

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 23 (1932)
Heft: 20

Artikel: Der fehlerlose Stromwandler
Autor: Schwager, A.C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059342>

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: 04.04.2026

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

Der fehlerlose Stromwandler.

Von dipl. Ing. A. C. Schwager, San Francisco, U. S. A.

621.314.224—187

Mit Rücksicht auf die bei Hochspannungsenergiemessungen auftretenden Fehler werden die Bedingungen eines idealen Wandlers aufgestellt. Die Fehlergrenzen der gewöhnlichen, sowie verschiedener verbesserter Wandler werden auf analytischem Weg bestimmt; es ergibt sich, dass sich keine Methode eignet, Einleiterwandler niedrigen Uebersetzungsverhältnisses und hoher sekundärer Bürde für Präzisionsmessungen verwendbar zu machen.

Es wird dann gezeigt, dass die Form der Magnetisierungskurven durch geeignete Gestaltung des magnetischen Kreises derart geändert werden kann, dass Kerne von praktisch konstanter Wechselstrompermeabilität und damit fehlerlose Wandler entstehen. Die Eigenschaften und Anwendungsgrenzen dieser Wandler werden theoretisch und anhand von Versuchsergebnissen bestimmt; ferner werden bevorzugte Prüfmethode erläutert.

Da auf diesem Weg Fehlerlosigkeit für Wandler höchster Spannung und für die am häufigsten vorkommenden Uebersetzungsverhältnisse und Bürden erzielt wird, kann das Problem des Ein- und Mehrleiterstromwandlers als weitgehend gelöst betrachtet werden.

I. Allgemeines.

A. Genauigkeitsgrenzen der heutigen Energiemessungen in Hochspannungsnetzen.

Beim Kauf und Verkauf elektrischer Energie ist die Genauigkeit der Energiemessung von grundlegender Bedeutung. Die Messgenauigkeit ist bei Hochspannungsmessungen gegeben durch die Kombination von Zähler, Spannungs- und Stromwandler; der totale Fehler ist eine Funktion der Fehler der einzelnen Apparate. Der Fehlwinkel Θ (gemessen in Winkelminuten¹⁾ der Stromwandler ist dabei von grossem Einfluss; unter Vernachlässigung seines Uebersetzungsfehlers und der Fehler im Spannungswandler ergibt sich für eine einphasige Leitung bei einer Phasenverschiebung φ folgender Fehler in der Energiemessung¹⁾:

$$100 \cdot \frac{\Delta P}{P} = 0,029 \cdot \Theta' \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{in } \%) \quad (1)$$

Fig. 1 zeigt diese Beziehung. Ein Wandler mit einem Fehlwinkel von 60' verursacht bei einer Netzphasenverschiebung von 85° einen Fehler von 20 %;

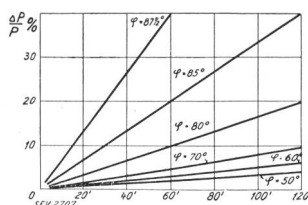


Fig. 1.
Fehler in der Energiemessung ($\frac{\Delta P}{P}$ in %) in Funktion des Stromwandlerfehls (Winkelminuten).

beträgt der Fehlwinkel 40' und ist der Netz-cos $\varphi = 0,2$, so beträgt der Fehler immer noch 5 %. Verhältnisse, welche solche Fehler verursachen, kom-

¹⁾ Die Messwandler, von Dr. I. Goldstein.

L'auteur établit les conditions que doit remplir un transformateur de mesure idéal, compte tenu des erreurs liées aux mesures d'énergie en haute tension. Par voie analytique, il détermine les limites d'erreur des transformateurs ordinaires ainsi que de différents types perfectionnés; il en ressort qu'aucune méthode ne se prête à rendre utilisables pour des mesures de précision des transformateurs à un conducteur à rapport faible et à charge secondaire élevée.

L'auteur montre ensuite que par une conformation appropriée du circuit magnétique, il est possible de modifier la courbe de magnétisation d'une manière telle qu'on obtient des noyaux de perméabilité constante et, partant, des transformateurs sans erreur. Il étudie ensuite théoriquement et à l'aide de résultats d'essais les propriétés et limites d'application de ce nouveau transformateur et explique quelques méthodes d'essai préférées.

Comme il est possible par ce moyen d'éliminer complètement les sources d'erreur pour les rapports et charges courantes, le problème des transformateurs d'intensité à un ou plusieurs conducteurs pour les très hautes tensions peut être considéré comme résolu dans de larges limites.

men praktisch oft vor bei leerlaufenden Transformatoren und Asynchronmotoren, oder bei Netzsammenschlüssen und Austausch von Energie unter oft sehr kleinem cos φ .

B. Grundforderungen für den idealen Stromwandler.

a) Genauigkeit.

Die heute relativ geringe Genauigkeit bei Energiemessungen kann nur durch Elimination der Stromwandlerfehler erhöht werden; diese müssen auf Werte reduziert werden, die denen bei Zählern entsprechen. Als Fehlergrenzen müssen also 0,1 % im Uebersetzungsverhältnis und einige Minuten im Fehlwinkel verlangt werden, und zwar über den normalen Bereich des Sekundärstromes, d. h. von 0,5 bis 5 A.

b) Bürde.

Die Leistung des Wandlers soll hoch sein, wenn möglich von der Grössenordnung 50 VA.

c) Isolation und Ueberstromsicherheit.

In Anbetracht der grossen Aufmerksamkeit, die diesem Problem in letzter Zeit geschenkt wurde, soll hier nicht näher darauf eingegangen werden^{2) 3)}. Es bedarf kaum weiterer Erörterung, dass der Einleiterdurchführungsstromwandler die ideale Lösung darstellt, sobald er auch mit a) und b) in Einklang gebracht werden kann.

Infolge seiner ausserordentlichen Wichtigkeit sind grosse Anstrengungen zur Lösung dieses Problems gemacht worden; heute sind folgende Verbesserungsmethoden bekannt:

²⁾ Die Entwicklung der Messeinrichtungen für Hochspannung, von G. Keinath. ETZ, Heft 53, 1931, S. 1596.

³⁾ Die neueste Entwicklung im Stromwandlerbau, von Dr. I. Goldstein. ETZ, Heft 16, 1932, S. 377.

1. Anwendung von Nickel-Eisen-Legierungen^{2) 4) 5)}.
2. Brooks Zweistufen-Wandler⁶⁾.
3. Iliovici-Wandler⁷⁾.

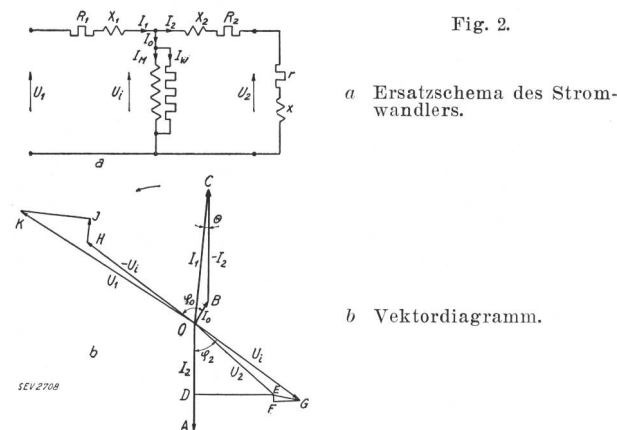
Vergleiche zwischen den verschiedenen Verbesserungsmethoden müssen unter gleichen Bedingungen vorgenommen werden, da nur dadurch ein absolutes Urteil über ihre Güte abgegeben werden kann. Eine solche Untersuchung wird zunächst im folgenden für Einleiterstromwandler gegeben, die einen gewöhnlichen hochlegierten Eisenkern besitzen und nach den erwähnten drei Methoden verbessert sind. Dann werden nach Entwicklung der Theorie eines fehlerlosen Wandlers dessen Eigenschaften mit denen der anderen verbesserten Wandler verglichen.

II. Stromwandler-Genauigkeitsgrenzen.

A. Der Wandler mit hochlegiertem Eisenkern.

1. Theorie.

Die Theorie kann am besten aus dem Ersatzschema Fig. 2 a und dem Vektordiagramm 2 b eines Wandlers mit gleichviel primären und sekundären Windungen abgeleitet werden¹⁾.



Es bedeuten:

- OC = I₁ Primärer Strom.
- OA = I₂ Sekundärer Strom.
- OB = I₀ Erregerstrom.
- OE = U₂ Sekundäre Klemmenspannung.
- OD = I₂r Ohmscher Spannungsabfall in der sekundären Bürde.
- DE = I₂x Induktiver Spannungsabfall in der sekundären Bürde.
- EF = I₂R Ohmscher Spannungsabfall in der sekundären Wicklung.

4) The Use of Nickel Iron Alloy Cores for Current Transformers, von T. Spooner. Journal AIEE, 1926, S. 540.
 5) Permeability of Hypernik reaches 167 000, von T. D. Yenson. Electrical World, Juni 1931.
 6) The Two-Stage Current Transformer, von H. B. Brooks and C. F. Holtz. Transactions AIEE, 1922, S. 382.
 7) Transformateurs d'intensité compoundés, von M. Iliovici. Bulletin de la Société Française des Electriciens, Heft 22, 1923, S. 55.

- FG = I₂X Induktiver Spannungsabfall in der sekundären Wicklung.
- OG = U_i Totale sekundär induzierte Spannung.
- φ₂ Phasenwinkel zwischen sekundärem Strom I₂ und induzierter Spannung U_i.
- φ₀ Phasenwinkel zwischen Magnetisierungsstrom I₀ und induzierter Spannung U_i.
- Θ Fehlwinkel des Wandlers.

Für die folgenden theoretischen Untersuchungen sollen alle Grössen als rein sinusförmig angenommen werden. Die maximale Kraftliniendichte hängt durch folgende Gleichung mit dem Effektivwert der Spannung U_i zusammen:

$$B_{max} = \frac{U_i \cdot 10^8}{4,44 f w F} \quad (2)$$

worin bedeuten:

- F = Querschnitt des Kernes in cm².
- w = Zahl der sekundären Windungen.
- f = Frequenz; in den folgenden Untersuchungen durchweg 60 Per./s.

B_{max} = Maximale Kraftliniendichte in Gauss.

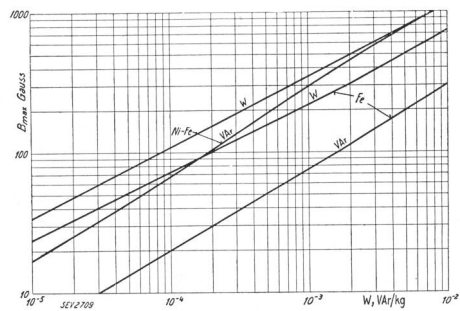


Fig. 3.

Induktion (B_{max}) in Funktion der Wirkleistung (W) und der Blindleistung (VAr) pro kg Silizium- resp. Nickel-Eisen (Fe bzw. Ni-Fe), bei 60 Per./s.

Der auf die sekundäre Windungszahl w bezogene Magnetisierungsstrom I₀ besteht aus zwei Komponenten, dem Magnetisierungsstrom I_M (in A, bzw. Magnetisierungsleistung in VAr) und dem Wirkstrom I_W (in A, bzw. Wirkleistung in W). I₀, I_M, I_W können aus Kurven, die Wirk- und Blindleistung als Funktion der Induktion B darstellen, oder aus daraus abgeleiteten Kurven, wie der VA-Kurve oder der cos φ₀ Kurve, welche durch cos φ₀ = $\frac{W}{VA}$ definiert ist, berechnet werden. Diese Kurven bilden die Grundlage der Berechnung für alle Kernmaterialien und sind in Fig. 3 für legiertes und Nickeisen wiedergegeben. Der Blindstrom wird durch Division des Produktes aus Blindleistung pro kg und Kerngewicht durch U_i erhalten; analog ergibt sich der Wirkstrom aus der W/kg-Kurve. Sind diese Grössen bekannt, so

ergeben sich Uebersetzungsverhältnis \ddot{u} und Fehlwinkel Θ für den 1/1-Wandler^{1) 8)} zu:

$$\ddot{u} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_2 + I_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_2)}{I_2 \cos \Theta} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{I_0 \sin(\varphi_0 - \varphi_2)}{I_2 + I_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_2)} \quad (4)$$

Für kleine Fehlwinkel und rein ohmsche sekundäre Bürde ergibt sich der Uebersetzungsfehler

$$\Delta \ddot{u} = 100 \frac{I_w}{I_2} \% \quad (5)$$

und der Winkelfehler

$$\Theta = \frac{I_M}{0,00029 I_2} \text{ Winkelminuten} \quad (6)$$

Während Gl. (6) auch für grosse Fehlwinkel mit grosser Genauigkeit gilt, sinkt die Genauigkeit der Gl. (5) mit grösserem Fehlwinkel rasch, und in allen Fällen, in denen $\Theta > 1^\circ$, muss sie durch folgenden Ausdruck ersetzt werden:

$$\Delta \ddot{u} = 100 \left(\frac{I_w}{I_2} + \frac{1}{1 - \frac{(0,00029 \Theta')^2}{2}} - 1 \right) \% \quad (7)$$

Trotzdem die Gleichungen für $\Delta \ddot{u} \%$ und Θ' für einen Wandler mit dem Uebersetzungsverhältnis 1/1 abgeleitet worden sind, sind sie gültig für einen Einleiterwandler, unter der Voraussetzung, dass die Zahl der sekundären Windungen und daher I_M und I_w unverändert bleiben.

Der grösste Teil der folgenden Untersuchungen handelt von Einleiterstromwandlern; Fig. 2 kann somit etwas vereinfacht werden. In einem solchen Wandler sind die sekundären Windungen gleichmässig und nahe an den Kern gewickelt, so dass die sekundäre Streureaktanz sehr klein ist; wird ferner der Widerstand der Wicklung vernachlässigt, so kann $U_2 = U_i$ gesetzt werden. Beim Vergleich von Stromwandlern ist die sekundäre Bürde von grosser Bedeutung. Bei einem Hochspannungseinleiterstromwandler besteht sie bei Energiemessungen aus einem oder mehreren Zählern und dem Widerstand der Leitungen vom Wandler zum Zähler; in Freiluftstationen bildet dieser Widerstand den Hauptteil der Bürde und bringt diese auf einen $\cos \varphi$ von ungefähr = 1.

$\Delta \ddot{u}$ und Θ sind nicht die einzigen Grössen, die die Qualität eines Wandlers bestimmen; ihre Aenderungen, verursacht durch kleine Aenderungen in der Bürde, sind ebenfalls von Bedeutung. Ein Wandler, der infolge Aenderung der Bürde grosse Aenderungen in $\Delta \ddot{u}$ und Θ zeigt, ist schlechter als einer, der nur kleine Abweichungen aufweist. Darin liegt z. B. einer der Hauptunterschiede in den Charakteristiken von Mehr- und Einleiterwandlern.

⁸⁾ A Study of the Current Transformer with Particular Reference to Core Losses, von P. G. Agnew. Bulletin Bureau of Standards, Washington, D. C., Heft 7, 1911, S. 423.

2. Der Bezugswandler.

Vergleiche zwischen den verschiedenen Verbesserungsmethoden müssen an Wandlern mit gleichen Kernabmessungen und gleicher sekundärer Windungszahl gemacht werden. Zu diesem Zwecke nehmen wir einen Bezugskern: der Innendurchmesser sei D , der Aussendurchmesser $1,25 D$ und die Höhe H ; alle Dimensionen sind in cm gewählt (Fig. 4). H ist im folgenden mit wenigen Ausnahmen zu 18 cm angenommen, unabhängig von D , was Wandler ergibt, die mit ihren Eigenschaften denen in der Praxis gebrauchten ähnlich sind.

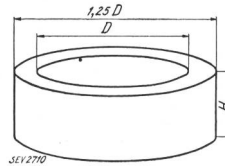


Fig. 4.
Abmessungen des
Bezugskernes.

Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel für eine rein Ohmsche Bürde vom Widerstand r sollen nun bestimmt werden. Blindstrom und Wirkstrom können aus Fig. 3 bestimmt werden. Die Kraftliniendichte in den gebräuchlichen Wandlern liegt zwischen 10 bis 1000 Gauss; in diesem Gebiet kann die Blindleistung (VAr), die Wirkleistung (W) mit grosser Annäherung durch folgende Beziehungen dargestellt werden:

$$VAr/kg = \gamma_M B^{1,6} \quad (8)$$

$$W/kg = \gamma_W B^2 \quad (9)$$

Hier stellen γ_M und γ_W Materialkonstanten dar. Für Werte von B , die nur wenig ausserhalb dieses Bereichs liegen, gelten die Gl. (8) und (9) noch annähernd. Wird das spezifische Gewicht des Kernmaterials mit s kg/cm³ bezeichnet, dann ergibt sich aus (2), (5), (6), (8), (9) und $U_2 = I_2 r$, $VAr = U_2 I_M$, $W = U_2 I_w$ durch Substitution:

$$\Delta \ddot{u} = 3,95 \cdot 10^{14} \frac{s \gamma_W r}{H w^2} \% \quad (10)$$

$$\Theta = 3,45 \cdot 10^{13} \frac{s \gamma_M D^{0,4} r^{0,6}}{H^{0,6} w^{1,6} I_2^{0,4}} \text{ Minuten} \quad (11)$$

und für den 18 cm hohen Kern aus hochlegiertem Eisen mit Werten

$$\gamma_M = 9,5 \cdot 10^{-7}, \gamma_W = 2,2 \cdot 10^{-8}, s = 0,0075 \text{ kg/cm}^3$$

$$\Delta \ddot{u} = 3,7 \cdot 10^3 \cdot \frac{r}{w^2} \% \quad (12)$$

$$\Theta = 4,4 \cdot 10^4 \cdot \frac{D^{0,4} r^{0,6}}{w^{1,6} I_2^{0,4}} \text{ Minuten} \quad (13)$$

Dies sind die Fehlerbeziehungen in allgemeiner Form; für grosse Fehlwinkel Θ muss Gl. (7) an Stelle von (5) benutzt werden, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll. Im vorigen ist die Wichtigkeit der Fehlervariationen durch Aende-

rung der Bürde erwähnt worden. Diese Variation $\Delta \Delta \ddot{u} \%$ im Uebersetzungsfehler, infolge einer kleinen Aenderung Δr im Widerstand, ist gegeben durch

$$\Delta \Delta \ddot{u} \% = \frac{d \Delta \ddot{u} \%}{d r} \Delta r$$

wird $\Delta r = 0,04$ Ohm gewählt, so erfolgt bei normalem Sekundärstrom von 5 A eine Aenderung in der Bürde um den Betrag von 1 VA, daher

$$\Delta \Delta \ddot{u} / \text{VA} = \frac{1,47 \cdot 10^2}{w^2} \% \quad (14)$$

und analog:

$$\Delta \Theta / \text{VA} = 1,06 \cdot 10^3 \cdot \frac{D^{1,4}}{w^{1,6} r^{0,4} I_2^{0,4}} \text{Minuten} \quad (15)$$

3. Diskussion der Formeln.

Anhand dieser Formeln sollen die Fehler einiger Wandler bestimmt werden. Ein Einleiterwandler mit einem Uebersetzungsverhältnis 200/5, einem Kerndurchmesser von 38 cm und 18 cm Kernhöhe, der ein guter Repräsentant der Hochspannungsreihe darstellt, soll untersucht werden.

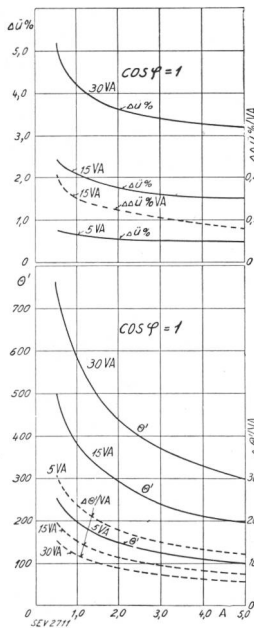


Fig. 5.

Fehlerkurven eines 200/5-A-Wandlers bei $\cos \varphi = 1$. Oben Uebersetzungsfehler in $\%$ ($\Delta \ddot{u} \%$, resp. $\Delta \Delta \ddot{u} \% / \text{VA}$), unten Winkelfehler in Minuten Voreilung (Θ' resp. $\Delta \Theta' / \text{VA}$), in Funktion des Sekundärstromes (A). Kernmaterial: Legiertes Eisen. $D = 38$ cm, $H = 18$ cm.

Fig. 5 gibt $\Delta \ddot{u} \%$, Θ' , $\Delta \Delta \ddot{u} \% / \text{VA}$, $\Delta \Theta' / \text{VA}$ für Bürden von 5, 15 und 30 VA, $\cos \varphi = 1$. Die Fehler sind unzulässig hoch; für 15 VA ergibt sich bei einem Sekundärstrom von 0,5 A ein Fehlwinkel von 500'. $\Delta \Theta' / \text{VA}$ ist eine Funktion der Bürde und nimmt mit zunehmender Bürde rasch ab.

Fig. 6 zeigt die Verbesserung der Fehler durch erhöhtes Eisengewicht des Kernes; es ist ersichtlich, dass ein Kern von 180 cm Höhe immer noch einen unzulässigen Fehlwinkel von 70' aufweisen würde, was eine Lösung in dieser Richtung unmöglich macht. In Fig. 7 sind die Fehlwinkel als Funktion des Innendurchmessers D und des Uebersetzungs-

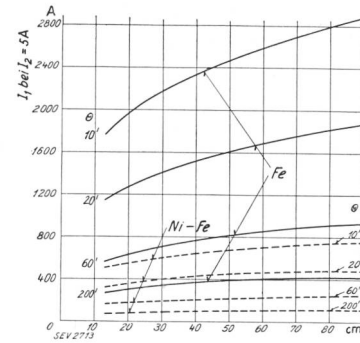


Fig. 7.

Fehlwinkel (θ) in Funktion des Uebersetzungsverhältnisses und des Kerndurchmessers (D), für Silizium-Eisen (Fe) und Nickel-Eisen (Ni-Fe). $H = 18$ cm, Bürde = 15 VA, $\cos \varphi = 1$, Sekundärstrom = 0,5 A.

verhältnisses \ddot{u} dargestellt; rasche Abnahme der Genauigkeit mit der Verkleinerung desselben kommt klar zum Ausdruck. Die Abhängigkeit von D ist von gewisser Bedeutung; Wandler, die über verschiedene Ausführungsarten einer Durchführung gegebener Spannung passen, weisen ähnliche Fehler auf.

Trotzdem den untersuchten Fehlern grosse Bedeutung zukommt, sind sie nicht ein absolutes Kriterium der Güte des Wandlers, da durch Verminderung der sekundären Windungszahl und durch Parallelschaltung eines Widerstandes oder einer Kapazität an irgend eine Wicklung die Fehler reduziert und für einen Stromwert ganz eliminiert werden können. Fig. 8 a und 8 b zeigen die Wirkung eines Widerstandes, bzw. einer Kapazität, an die Sekundärseite angeschlossen. Als Ausgangspunkt der theoretischen Untersuchung müssen daher die Differenzen der Fehler zwischen 0,5 und 5 A gelten; sie können aus (10) und (11) berechnet werden. Die folgenden 4 Ausdrücke sind deshalb charakteristisch für einen Wandler:

1. $\Delta \Delta \ddot{u} \%$ = Aenderung des Uebersetzungsfehlers von 0,5 bis 5 A.
2. $\Delta \Theta'$ = Aenderung des Fehlwinkels von 0,5 bis 5 A.
3. $\Delta \Delta \ddot{u} \% / \text{VA}$ = Maximale Aenderung des Uebersetzungsfehlers pro VA von 0,5 bis 5 A.
4. $\Delta \Theta' / \text{VA}$ = Maximale Variation des Fehlwinkels pro VA von 0,5 bis 5 A.

Die maximale Aenderung nach 3 und 4 befindet sich gewöhnlich bei 0,5 A.

Es ist üblich, $\Delta \ddot{u} \%$ und Θ' als Funktion von I_2 aufzutragen; ebenso können $\Delta \Delta \ddot{u} \% / \text{VA}$ und $\Delta \Theta' / \text{VA}$ veranschaulicht werden. Dennoch ist dies nicht die einzige Darstellungsmöglichkeit. Es bedeute:

T_1 = Allgemeine Wandlercharakteristik,
 i, j, ξ, ζ = Einheitsvektoren;
 dann sei nach Definition:

$$T_1 = i \Delta \dot{u} \% + j \Delta \theta' + \xi \Delta \dot{u} \% / VA + \zeta \Delta \theta' / VA \quad (16)$$

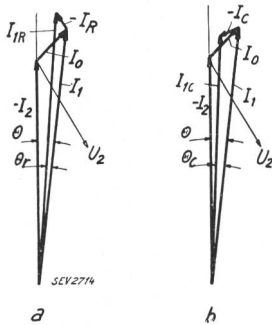


Fig. 8.
 a Fehlwinkelkorrektur mittels Widerstand.
 b Fehlwinkelkorrektur mittels Kapazität.

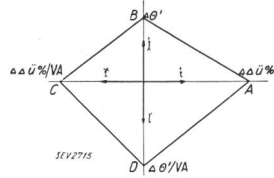


Fig. 9.
 Allgemeine Stromwandlercharakteristik.

Werden diese Einheitsvektoren nach Fig. 9 aufgetragen, so ist die allgemeine Charakteristik durch die 4 Punkte A B C D gegeben. Für praktische Zwecke ist es jedoch vorteilhafter, die maximal auftretenden Fehler zu betrachten, woraus sich folgende Charakteristik ergibt:

$$T = i \Delta \dot{u} \% + j \theta' + \xi \Delta \dot{u} \% / VA + \zeta \theta' / VA \quad (17)$$

- wo $\Delta \dot{u} \%$ = Maximaler Uebersetzungsfehler von 0,5 bis 5 A.
- θ' = Maximaler Fehlwinkel in Minuten von 0,5 bis 5 A.
- $\Delta \dot{u} \% / VA$ = Maximale Aenderung des Uebersetzungsfehlers pro VA von 0,5 bis 5 A.
- θ' / VA = Maximale Aenderung des Fehlwinkels pro VA von 0,5 bis 5 A.

Ein Beispiel dieser Darstellungsweise zeigt Fig. 11.

B. Verwendung von Nickel-Eisen-Legierungen.

Mit der Entdeckung der hohen Permeabilität gewisser Nickel-Eisen-Legierungen haben sich dem Stromwandlerbau neue Wege eröffnet. Die Entwicklung und Anwendung dieser Materialien ist in der Literatur an verschiedenen Orten behandelt worden und soll hier nicht weiter erwähnt werden^{2) 3)}. Ein Punkt, der oft Anlass zu Missverständnissen gibt, soll jedoch hervorgehoben werden. Da die ersten Legierungen, wie Permalloy und auch die meisten heute in Europa verwendeten, wie z. B. die Gumlich-Legierung und das Mümetall, sehr frühzeitige Sättigung aufweisen, wird dies irrtümlich oft als allgemeine Eigenschaft dieser Materialien angesehen. Das in Amerika gebräuchliche Hypernik übertrifft jedoch das legierte Eisen bis zu einer Liniendichte von 16000 Gauss in magnetischer Beziehung⁵⁾. Dieses Material soll im folgenden die Grundlage der theoretischen Betrachtungen sein; im Bereiche kleiner Liniendichte ist seine Wechsel-

strompermeabilität ungefähr 8 mal grösser als für legiertes Eisen, bei gleicher Liniendichte. Infolge des resultierenden kleinen Erregerstromes wird eine bedeutende Reduktion der Stromwandlerfehler bedingt.

In Fig. 3 sind Blindleistung (VA_r) und Wirkleistung (W) als Funktion von B aufgetragen; sie können angenähert folgendermassen dargestellt werden:

$$\left. \begin{aligned} VA_r / kg &= \gamma_M B^{1,6} \\ W / kg &= \gamma_W B^2 \end{aligned} \right\} 10 > B > 1000$$

wo $\gamma_M = 9,7 \cdot 10^{-8}$
 $\gamma_W = 8,4 \cdot 10^{-9}$

Da die obigen Funktionen in den Potenzen von B mit denen für legiertes Eisen, siehe Gl. (8) und (9), übereinstimmen, so gelten die allgemeinen Gleichungen (10) und (11) auch für dieses Kernmaterial mit verschiedenen numerischen Werten der Materialkonstanten. Eine Diskussion der Verbesserung anhand obiger Formeln hat jedoch nur theoretische Bedeutung, da in praktischen Ausführungen Faktoren dazukommen, die es nicht möglich machen, die Vorteile des Materials vollständig auszunützen. Im Gegensatz zu den Kernen aus legiertem Eisen, die aus gestanzten Ringen bestehen, wird bei den teuren Nickel-Eisen-Legierungen eine uhrfederartige Anordnung der Bleche vorgezogen, um Abfälle zu vermeiden. Die zur Magnetisierung der dadurch auftretenden Luftspalte nötigen Amperewindungen verschlechtern die Eigenschaften bedeutend; die folgenden Resultate sind nur für gestanzte Kerne gültig.

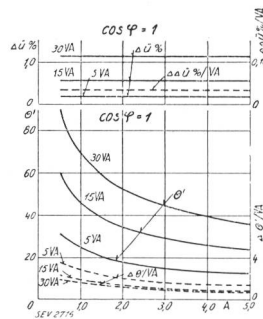


Fig. 10.
 Fehlerkurven eines 200/5-A-Wandlers.
 Kernmaterial: Nickel-Eisen.
 D = 38 cm, H = 18 cm

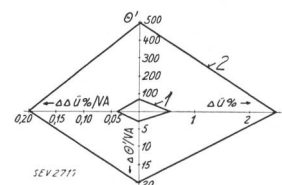


Fig. 11.
 Allgemeine Charakteristik eines 200/5-A-Wandlers.
 Bürde = 15 VA, cos phi = 1.
 1 Legiertes Eisen.
 2 Nickel-Eisen.
 D = 38 cm, H = 18 cm.

Fig. 10 gibt die Fehlerkurven des schon früher betrachteten Bezugswandlers für 5, 15 und 30 VA, cos phi = 1. Die Fehlwinkelkurven sind geometrisch ähnlich zu denen in Fig. 5 für legiertes Eisen und haben 8,4 mal kleinere Werte für gleiche Werte von Sekundärstrom und Bürde. Die Verbesserung in den Uebersetzungsfehlern ist viel geringer; entsprechende Werte sind ungefähr 3 mal kleiner. Dieser Nachteil hat seine Ursache darin, dass die Elimination der Verluste in sehr unvollkommener Weise geschieht, wie aus Fig. 3 ersichtlich ist, wo für

Liniendichten von 1000 Gauss und darüber die Verluste grösser sind als die Blindleistung. Die gestrichelten Kurven in Fig. 7 zeigen den Fehlwinkel in Funktion von Kerndurchmesser und Uebersetzungsverhältnis; die im Vergleich zum legierten Eisen erzielten Verbesserungen sind bedeutend. Die Fehleränderungen infolge Bürdenänderung sind in Fig. 10 eingezeichnet. Die totale Charakteristik ist in Fig. 11 neben derjenigen für legiertes Eisen aufgetragen.

C. Der Zweistufenstromwandler von Brooks.

Die Erfindung des Zweistufenwandlers von Brooks bildet eines der fundamentalsten und wirksamsten Mittel zur Fehlerverbesserung⁶⁾, indem die Fehler, die sowohl durch Aenderung des Sekundärstromes als auch der Bürde entstehen, automatisch korrigiert werden, allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen.

Wie aus Fig. 12a ersichtlich, werden zwei unabhängige Kerne benutzt. Der erste erzeugt einen sekundären Strom mit Fehlern des gewöhnlichen Wandlers, weiter werden primärer und sekundärer Strom in Phasenopposition über die Wicklungen des zweiten Kernes geschickt, der mit einer Hilfs- oder Tertiärwicklung versehen ist. Im Vektordiagramm 12b stellt der Erregerstrom I_{01} des ersten

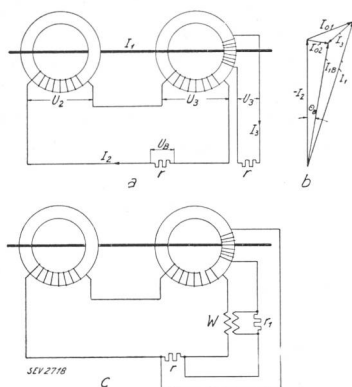


Fig. 12. Zweistufenwandler von Brooks. a) Für Zähler mit 2 Wicklungen. b) Vektordiagramm. c) Für normale Zähler. r Ausgleichsbürde. w Zusatzwandler.

Kernes auch den fiktiven primären Strom des zweiten Kernes dar; unter Vernachlässigung seines Erregerstromes I_{02} ist der tertiäre Strom I_3 gleich I_{01} . Ein Zähler, der mit einer Wicklung für den Sekundärstrom I_2 und mit einer zweiten Wicklung für den tertiären Strom I_3 versehen ist, misst daher die Summe dieser Ströme, die angenähert I_1 ist. Die Benutzung spezieller Zähler bildet einen gewissen Nachteil dieser Schaltung, dafür ist der Wandler imstande, die zweidimensionale Mannigfaltigkeit von Strom- und Bürdenänderungen zu korrigieren.

Werden sekundäre und tertiäre Wicklung nach Fig. 12c verbunden und die totale gegenseitige Induktion durch Anwendung eines weiteren Wandlers und einer Bürde auf Null gebracht, so kann ein gewöhnlicher Zähler verwendet werden⁹⁾. Leider

⁹⁾ Bushing Type Current Transformers for Metering, von A. Boyajian and W. F. Skeats. Journal AIEE, April 1929, S. 308.

gehen in dieser Schaltung manche Vorteile der ursprünglichen Anordnung verloren; der Wandler ist empfindlich gegen Aenderung der Bürde, die totale Bürde ist angenähert verdoppelt, und weitere Instrumente, z. B. Relais, müssen ausserhalb des Messkreises angeschlossen werden.

Es ist eine Hauptbedingung aller Zweistufenwandler, dass die Erregerströme I_{10} und I_{02} Grössen zweiter Ordnung sind im Vergleich zu I_2 bzw. I_3 , eine Bedingung die nur zutrifft für Wandler mit hohem Uebersetzungsverhältnis und kleiner Bürde. Mit Abnahme der primären Amperewindungszahl und Zunahme der Bürde kann I_{02} leicht Werte von der Grössenordnung von I_3 annehmen, und die Möglichkeit einer Fehlerreduktion geht rasch verloren. Dies geht am besten aus der Betrachtung des Bezugswandlers hervor, der in Schaltung 12c für gewöhnliche Zähler mit einer Nutzbürde von 15 VA, $\cos \varphi = 1$ untersucht werden soll; die Höhe des ersten Kernes sei 15 cm, die des zweiten 3 cm. In dem Vektordiagramm Fig. 13, in dem Ströme und Spannungen für einen sekundären Strom von 2,5 A dargestellt sind, ist I_{02} grösser als I_3 . Fig. 14 zeigt, dass die Fehler des Zweistufenwandlers kaum verschieden sind von denen des gewöhnlichen Wandlers. Die vorteilhaften Eigenschaften des Zweistufenprinzips gehen bei Wandlern mit hoher

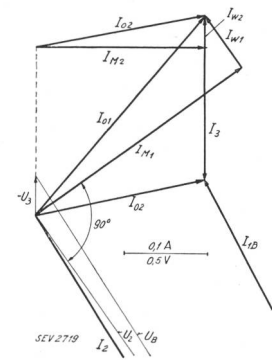


Fig. 13. Zweistufenwandler. Diagramm für $I_2 = 2,5$ A, $r = 1,2 \Omega$. Maßstab ist in Figur angegeben.

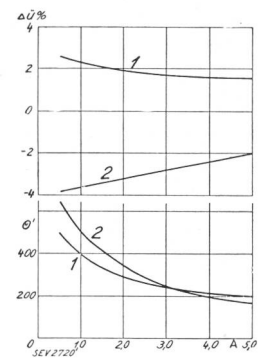


Fig. 14. Fehlerkurven von 200/5-A-Wandlern. $D = 38$ cm, $H = 18$ cm. Bürde = 15 VA, $\cos \varphi = 1$. 1 Legiertes Eisen. 2 Zweistufenwandler für normale Zähler (Fig. 12c).

Bürde und niedrigem Uebersetzungsverhältnis vollständig verloren und können daher nichts zur endgültigen Lösung des Hochspannungseinleiterwandlersystems beitragen.

D. Der Stromwandler nach Iliovici.

Durch Vormagnetisierung mit einer unabhängigen, fremd erregten, mit der Hauptwicklung nicht verknüpften Wicklung, bringt Iliovici⁷⁾ den Kern des Wandlers auf hohe Permeabilität (Fig. 15). Die resultierende Verbesserung im Fehlwinkel ist in Fig. 16 dargestellt. Trotzdem die so erhaltenen Resultate eine grosse Verbesserung darstellen, bedeutet die Notwendigkeit einer fremden Erregerquelle eine unangenehme Komplikation und ein Element der Betriebsunsicherheit. Eine fremde

Quelle kann unter Benutzung gewisser Kunstschaltungen vermieden werden ¹⁰⁾.

Da jedoch die Permeabilität des Eisens in diesen Anwendungen nicht höher ist als diejenige der Nickel-Eisen-Legierungen, so wird den letzteren infolge der erwähnten Nachteile, die die Vormagnetisierung mit sich bringt, der Vorzug gegeben.

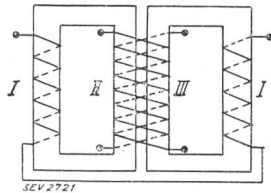


Fig. 15.
Stromwandler nach Ilivici.
Kern- und Wicklungsanordnung.
I Fremderregte Zusatzwicklung.
II Primärwicklung.
III Sekundärwicklung.

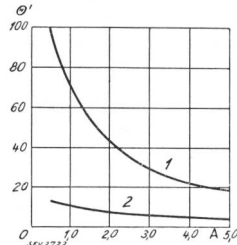


Fig. 16.
Fehlwinkel
1 Eines gewöhnlichen Wandlers,
2 Eines Ilivici-Wandlers.

E. Diskussion der Verbesserungsmethoden.

Aus diesen Untersuchungen ist ersichtlich, dass die Benützung von Nickel-Eisen-Kernen für die betrachteten hohen sekundären Bürden das wirksamste Mittel zur Fehlerverminderung darstellt. Dies bedeutet aber nicht, dass die Anwendung von Nickel-Eisen die endgültige Lösung des Wandlerproblems ermöglicht, seine Grenzen sollen am Bezugskern mit 38 cm Durchmesser untersucht werden. Wird zu diesem Zweck ein maximaler Fehlwinkel von 20' zugelassen, so ist aus Fig. 10 ersichtlich, dass die Fehler für 30, 15 und 5 VA zu gross sind. Eine Bürde von 2,5 VA erzeugt den zulässigen Fehlwinkel, so dass dieser Wandler allein für diese verschwindend kleine Bürde als Präzisionswandler gelten kann; ferner nimmt der Fehler über die erlaubte Grenze zu, sobald die Bürde um 1 VA erhöht wird, da die Aenderung 5'/VA beträgt.

Der Transformator ist daher gegen Aenderung der Bürde äusserst empfindlich, eine Eigenschaft, der speziell während der Installation Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Solche Wandler werden gewöhnlich im Laboratorium mit den zugehörigen Instrumenten und Verbindungen geeicht. Diese Verbindungen können nur kurz sein, um die zulässige Kapazität des Wandlers nicht zu übersteigen. Für grössere Distanzen zwischen Wandler und Zähler kommt derselbe nicht in Frage oder dann höchstens unter Anwendung von Instrumenten, die für reduzierten Normalstrom, z. B. 0,5 oder 1,0 A, gebaut sind.

Die Empfindlichkeit der Einleiterwandler in bezug auf Aenderung der Bürde scheint im Vergleich zum Mehrleiterwandler sehr gross; der Unterschied erklärt sich jedoch aus Gl. (14), wonach die Aenderung des Uebersetzungsfehlers um-

gekehrt proportional dem Quadrate der sekundären Windungszahl ist. Ein Wandler mit 200 Ampèrewindungen ist 50mal empfindlicher als ein solcher mit 1500 Ampèrewindungen. Neben den viel grösseren Fehlern ist dies ein weiterer Hauptunterschied zwischen Ein- und Mehrleiterwandlern. Er ist praktisch jedoch von untergeordneter Bedeutung, da das Konstanthalten der Bürde innerhalb gewisser Grenzen keine Schwierigkeiten bereitet.

Folgerung.

Aus den vorhergehenden Untersuchungen folgt, dass die Lösung eines wichtigen Problems des Elektrizitätswerksbetriebes, der Bau von Einleiterstromwandlern mit niedrigem Primärstrom und hoher Leistung, kaum annähernd gelöst ist. Der Wandler mit Silizium-Eisen ist zu ungenau, die Verbesserung durch Nickel-Eisen beträgt nur wenige Prozent von der gewünschten und der Zweistufenwandler verliert den grössten Teil seiner Wirksamkeit bei hoher Bürde und niedrigem Uebersetzungsverhältnis. Im folgenden soll eine wirksamere Lösungsmethode beschrieben werden.

III. Formänderung von Magnetisierungskurven.

A. Der Wandler mit konstanter Permeabilität.

Der Erregerstrom ist die Ursache aller Stromwandlerfehler; seine Reduktion, wie sie bei Nickel-Eisen-Legierungen erreicht wird, ist daher ein nützliches Mittel zu deren Verkleinerung. Es wäre jedoch falsch, anzunehmen, dass dies der einzige Weg zur Verbesserung darstellt, was z. B. daraus hervorgeht, dass der Zweistufenwandler unter gewissen Bedingungen wirksamer ist als der Nickel-Eisen-Wandler.

Im Gegensatz zur Grösse der Fehler sind deren Aenderungen mit dem Sekundärstrom nicht von der absoluten Grösse des Erregerstromes, sondern von dessen nicht proportionaler Aenderung mit der Liniendichte abhängig. Es ist eine von der Theorie des Lufttransformators her bekannte Tatsache, dass ein Wandler mit proportionaler Beziehung zwischen Liniendichte und Erregerstrom konstante Fehler aufweist. Analog folgt, dass ein Kern mit absolut konstanter Wechselstrompermeabilität die endgültige Lösung des Stromwandlers darstellt ⁸⁾. Mittel und Prozesse zur Herstellung eines solchen Materials für praktische Anwendung sind bis heute nicht bekannt; die folgende Untersuchung beschäftigt sich daher eingehend mit dem Problem und gibt Methoden, die zu dessen vollkommener Lösung führen.

Während die tatsächliche Wechselstrommagnetisierungskurve durch 1 in Fig. 17 gegeben ist, stellt die gerade Linie 2 die erwünschte Beziehung dar und ist mathematisch formuliert durch:

$$I_M = \text{konst.} \cdot B \quad (18)$$

In den meisten technischen Anwendungen ist Proportionalität zwischen B_0 und $10 B_0$ vollständig genügend, entsprechend dem normalen Betriebsgebiet der Wandler. Kerne verschiedener Wandler arbei-

¹⁰⁾ Instrument Transformers, von Wellings und Mayo. J. Inst. Elec. Engrs. London, Band 68, S. 704.

ten in Gebieten verschiedener Liniendichten, so dass der Ausgangspunkt B_0 variiert; unabhängig davon muss der Beziehung (18) über den ganzen Bereich bis $10 B_0$ genügt werden. Für den Verlauf der Kurve ausserhalb dieses Bereichs sollen keine Bedingungen aufgestellt werden, grösstmögliche Anlehnung an Proportionalität wird jedoch bevorzugt werden.

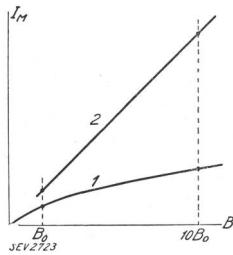


Fig. 17.

Beziehung zwischen Liniendichte (B) und Magnetisierungsstrom (I_M).
 1 Tatsächliche Kurve.
 2 Proportionale (erwünschte) Kurve.

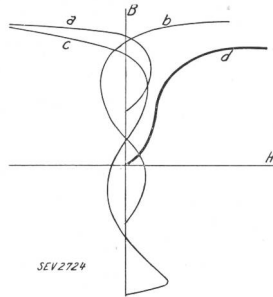


Fig. 18.

Molekulare Magnetisierungskurven nach Ewing.
 a, b, c = Magnetisierungskurven verschiedener Komplexe.
 d = Resultierende Magnetisierungskurve.

B. Molekulartheorie des Magnetismus.

Die Lösung des Problems verlangt die Erzeugung einer Magnetisierungskurve gegebener Form. Trotzdem die technische Forschung mit Hilfe von Legierungen und durch Wärmebehandlung in der Erzeugung von Kurven, die von denen des legierten Eisens verschieden sind, erfolgreich gewesen ist, ist die angestrebte konstante Permeabilität durch dieses Mittel nicht erreicht worden.

Die rein wissenschaftliche Seite des Ferromagnetismus ist in den letzten Jahren weitgehend geklärt worden; zur Lösung des Problems können indessen die erzielten Fortschritte nicht beitragen. Im folgenden soll ein Zwischenweg eingeschlagen werden, indem einige fundamentale Eigenschaften, die durch die Molekulartheorie postuliert werden, technisch verwendet werden sollen. Mit Hilfe der klassischen Mechanik berechnet Langevin die Magnetisierungskurven der paramagnetischen Substanzen und erhält Resultate, die mit den Versuchen übereinstimmen. Der Wert der Liniendichte für eine gegebene magnetische Feldstärke wird durch Addition der Beiträge der Elementarmagnete bestimmt. Ewing hat versucht, die Magnetisierungskurve von Eisen aus der Summe der Magnetisierungskurven elementarer Komplexe zu berechnen. In Fig. 18 sind einige dieser Kurven, a, b, c, neben der resultierenden Kurve d dargestellt¹¹⁾. Unabhängig von der Frage der Richtigkeit bringen beide Theorien ein Prinzip zu Tage, nach welchem Magnetisierungskurven erhalten werden können «durch Summation der Magnetisierungskurven einzelner Komplexe».

In den folgenden technischen Anwendungen soll diese Methode als «Künstliche Formänderung von

¹¹⁾ On a Molecular Theory of Ferromagnetic Substances, von K. Honda und J. Okubo. Phy. Rev. 1917, S. 705.

Magnetisierungskurven» bezeichnet werden. Der Elementarkomplex wird durch einen kleinen Teil magnetischen Materials ersetzt, die Magnetisierungskurve desselben soll der elementaren Magnetisierungskurve entsprechen. Eine grosse Anzahl solcher Teilchen mit individuell verschiedenen Kurven soll dann in bezug auf die resultierende Kurve untersucht werden. Im speziellen sollte es möglich sein, Grösse und Kurven der Teilchen so zu wählen, dass die resultierende Magnetisierungskurve eine gerade Linie darstellt. Die Wahl der einzelnen Kurven $I = f(B)$ ist von grosser Bedeutung; um von Nutzen zu sein, sollten sie unter sich genügend Verschiedenheit zeigen.

Nun hat gerade die Magnetisierungskurve des legierten Eisens diese Eigenschaft; für niedrige Linienzahl ist $I = f(B)$ konkav in bezug auf die B-Achse, für hohe Werte konvex; sie kann nicht über den ganzen Bereich durch eine einzige Funktion dargestellt werden. Den folgenden fundamentalen Anordnungen zur Formänderung von Magnetisierungskurven soll daher legiertes Eisen zugrunde gelegt werden; ferner werden alle Berechnungen für Wechselstrom von 60 Per./s ausgeführt.

Formulierung der Beziehung zwischen Liniendichte und Magnetisierungsstrom, Anwendung eines Einheitskernes.

Der Magnetisierungsstrom eines Kerns, der eine bestimmte Blindleistung (VAr) bezieht, hängt von Gewicht, Querschnitt und Windungszahl ab. Ein Kern von 1 kg Gewicht und einem Querschnitt von 1 cm², normal zu den Kraftlinien, und als Teil eines geschlossenen magnetischen Kreises gedacht, soll als

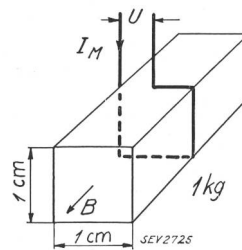


Fig. 19.
 Einheitskern.
 Gewicht 1 kg.

Einheitskern gewählt werden (Fig. 19). In einer einzigen Windung um diesen Kern besteht folgende Relation zwischen Spannung und Liniendichte:

$$B_{max} = 3,76 \cdot 10^5 \cdot U \tag{19}$$

Ferner ist:

$$I_M/kg = \frac{VAr/kg}{U}$$

Formel für niedrige Linienzahl ($10 < B < 1000$):

Durch Einsetzen von $VAr/kg = 9,5 \cdot 10^{-7} \cdot B^{1,6}$ folgt

$$I_M/kg = I_0 = 0,36 B^{0,6} \tag{20}$$

Formel für grosse Liniendichte ($3000 < B < 18000$):

Für Gleichstrommagnetisierung bei hoher Liniendichte gilt bekanntlich die Fröhlichsche Formel:

$$\frac{H}{B} = \alpha + \sigma H$$

Dieselbe Beziehung besteht für Wechselstrommagnetisierungskurven von legiertem Eisen und ergibt für den Einheitskern:

$$I_M/\text{kg} = I_1 = \frac{142}{\frac{19300}{B} - 1} \quad (21)$$

C. Kombination von zwei Kernen.

1. Methode.

Der Kern einer gewöhnlichen Drosselspule, die zwei Teile verschiedenen Querschnittes aufweist, ist der Repräsentant dieser Methode (Fig. 20a). Folgende vereinfachende Annahmen werden gemacht: Die Liniendichte soll in beiden Teilen gleichmässig über den Querschnitt verteilt sein, Streuflüsse werden vernachlässigt, so dass die Totalflüsse gleich sind. Das Problem reduziert sich daher auf die Betrachtung von zwei Kernen verschiedenen Querschnittes mit Liniendichten umgekehrt proportional zum Querschnitt. Der Magnetisierungsstrom ist gleich der Summe der Magnetisierungsströme der einzelnen Teile. Der Einheitskern von 1 kg Ge-

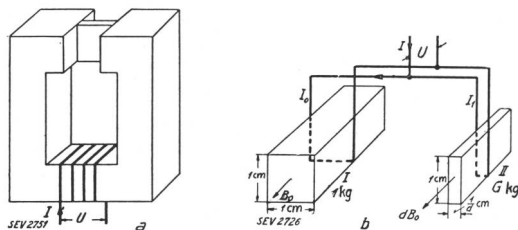


Fig. 20. a Kern mit zwei Elementen. b Ersatzschema des Kernes mit zwei Elementen. I Niedrige Liniendichte, Gewicht 1 kg. II Hohe Liniendichte, Gewicht G kg.

wicht (Fig. 20b) arbeite in dem durch Gl. (20) dargestellten Gebiete niedriger Liniendichte. Das Gewicht des auf hoher Dichte, B_1 , arbeitenden Kernes sei G kg, sein Strom I ist gegeben durch

$$I_1 = \frac{142 G}{\frac{19300}{B_1} - 1} = \frac{142 G}{\frac{19300}{dB_0} - 1} \quad (22)$$

wo $d = \frac{B_1}{B_0}$ und konstant.

Wie aus Fig. 20b ersichtlich, ist der Querschnitt des hochgesättigten Kernes gleich $\frac{1}{d}$, da die beiden Kerne an dieselbe Spannung U angeschlossen sind. Die Magnetisierungskurve des im Bereiche niedriger Liniendichte arbeitenden Kernes ist konkav in bezug auf die B-Achse, während die des hochgesättigten Teiles konvex verläuft. Wird das Gewicht G gross gewählt, dann wird der Verlauf der resultie-

renden I-B-Kurve durch I_1 bestimmt sein, während I_0 für kleines G ausschlaggebend ist. Zwischen diesen extremen Fällen besteht ein Zustand, für den sich die entgegengesetzten Krümmungen der beiden Kurven in solcher Weise addieren, dass die resultierende Kurve angenähert geradlinig verläuft. Fig. 21 zeigt das Resultat einer solchen Addition, der resultierende Strom $I = I_0 + I_1$ zeigt vollständige Linearität in der Umgebung des Punktes C, die Tangente an diesem Punkt geht durch den Nullpunkt.

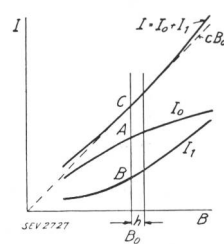


Fig. 21. Annäherung an die proportionale Beziehung.

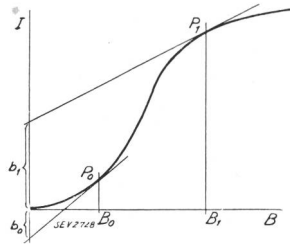


Fig. 22. Graphische Bestimmung der Kerngewichte.

Graphische Bestimmung des Gewichtes G. Diese Lösung ist speziell geeignet für den Fall, dass die Magnetisierungskurve nur graphisch gegeben ist (Fig. 22). Der Einheitskern ist durch P_0 , der gesättigte Kern mit dem zu bestimmenden Gewicht G, durch P_1 dargestellt. G ist dann gegeben durch

$$G = \frac{b_0}{b_1} \text{ kg} \quad (23)$$

wo b_0 = Achsenabschnitt der Tangente durch P_0 auf der I-Achse.

b_1 = Achsenabschnitt der Tangente durch P_1 auf der I-Achse.

Analytische Lösung. Wenn eine Funktion und ihre Ableitungen für einen Punkt bekannt sind, so kann dieselbe in der Umgebung des Punktes nach Taylor in eine Potenzreihe entwickelt werden:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{hf'(x_0)}{1!} + \frac{h^2f''(x_0)}{2!} + \dots$$

Im folgenden wird eine genügend genaue Annäherung erzielt durch Berücksichtigung der zwei ersten Glieder. Da der totale Magnetisierungsstrom gegeben ist durch

$$I_0 + I_1 = f(B) = 0,36 \cdot B^{0,6} + \frac{142 G}{\frac{19300}{dB_0} - 1} \quad (24)$$

so folgt durch Koeffizientenvergleich

$$0,36 B_0^{0,6} + 142 \frac{G B_0}{19300 - dB_0} = c B_0 \quad (25)$$

$$0,22 B_0^{0,4} + 142 \frac{19300 G}{\left(\frac{19300}{d} - B_0\right)^2} = c \quad (26)$$

Dies sind die grundlegenden Gleichungen, durch die B_0 , d , G und c zusammenhängen.

Beispiel 1. Die Nützlichkeit der Methode soll in einem Beispiel erläutert werden. In Fig. 23 stellt I_0 den Magnetisierungsstrom des 1 kg schweren Einheitskernes dar, der im Bereiche von 400 bis 1000

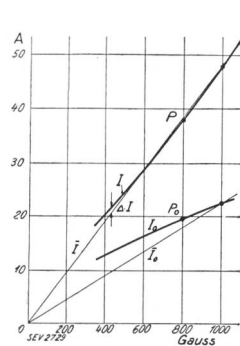


Fig. 23.
Magnetisierungsstrom (A) in Funktion der Induktion. I_0 für ein Element. I für zwei Elemente.

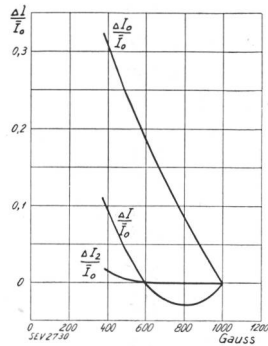


Fig. 24.
 $\frac{\Delta I}{I_0}$ für verschiedene Kernkombinationen.

Gauss arbeitet. Der hochgesättigte Kern ist so gewählt, dass Proportionalität für den Punkt P entsprechend $B_0 = 800$ Gauss erzeugt wird mit einer Liniendichte von 6000 Gauss. Daraus folgen $d = 7,5$, $G = 0,28$ kg und $c = 0,047$, I stellt den totalen Strom dar. Um ein klares Urteil über die erzielte Verbesserung zu erhalten, werde eine gerade Linie I_0 durch den 1000-Gauss-Punkt von I_0 und den Ursprung gezogen und die Differenz ΔI_0 zwischen I_0 und \bar{I}_0 bestimmt. In gleicher Weise sei ΔI auf eine Gerade durch den 1000-Gauss-Punkt der I -Kurve bezogen, berechnet. Fig. 24 zeigt die den Werten $\frac{\Delta I_0}{I_0}$ und $\frac{\Delta I}{I_0}$ entsprechenden Kurven; die Reduktion von $\frac{\Delta I_0}{I_0}$ auf $\frac{\Delta I}{I_0}$ ist ein direktes Mass für die Verbesserung des Fehlwinkels, die an einem rein Ohmisch belasteten Stromwandler durch Einschaltung eines hochgesättigten Kernteiles erhalten werden kann. Im vorigen Beispiel wurde die

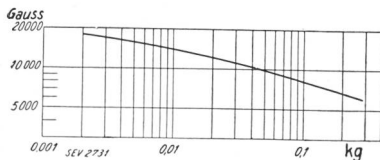


Fig. 25.
Beziehung zwischen Liniendichte und Kerngewicht.

Liniendichte des gesättigten Teiles zu 6000 Gauss angenommen, woraus sich ein Gewicht von 0,28 kg ergab. Wird eine grössere Liniendichte gewählt, so nimmt das Gewicht entsprechend ab, die Beziehung zwischen B und G ist in Fig. 25 dargestellt.

2. Methode.

Während in der 1. Methode das Verhältnis der Kraftliniendichten konstant gehalten wurde, sollen

nun zwei Kerne mit unveränderlichem Verhältnis der magnetisierenden Ampèrewindungen betrachtet werden. Eine solche Anordnung kann erzielt werden durch Serieschaltung der Wicklungen der Kerne nach Fig. 26a. Der Einheitskern niedriger Liniendichte ist mit einer einzigen, der Kern hoher Dichte, der der Einfachheit halber dieselbe Länge haben soll, mit w Windungen versehen. In dieser Anordnung ist die Beziehung zwischen der angelegten Spannung U und dem Strom I_2 von primärer Bedeutung, da U_2 proportional ist der Summe der Kraftflussverkettungen $\Sigma \Phi_K w_K$, so soll Proportionalität zwischen diesen und I_2 formuliert werden. Es ist

$$\Sigma \Phi_K w_K = B_0 + wFB_1$$

und mit (20) und (21)

$$\Sigma \Phi_K w_K = 56 I_2^{1,66} + 19300 Fw^2 \frac{I_2}{142 + wI_2} \quad (27)$$

Dies ergibt die folgenden Bedingungen für Linearität für den Wert I_2 :

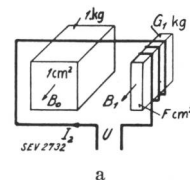
$$56 \cdot I_2^{1,66} + 19300 \frac{Fw^2 I_2}{142 + wI_2} = cI_2 \quad (28)$$

$$93 \cdot I_2^{0,66} + 2,74 \cdot 10^6 \cdot \frac{Fw^2}{(142 + wI_2)^2} = c \quad (29)$$

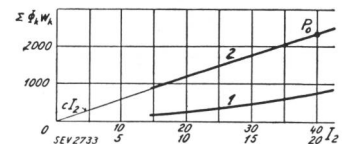
Beispiel 2. Zum Zwecke eines direkten Vergleiches mit Beispiel 1 seien I_2 und w so gewählt, dass Linearität auftritt für $B_0 = 800$ und $B_1 = 6000$ mit folgendem Resultat:

$$\begin{aligned} w &= 3,3 \\ F &= 0,076 \text{ cm}^2 \\ I_2 &= 19,6 \text{ A} \end{aligned}$$

Die Tatsache, dass w eine gebrochene Zahl ist, beschränkt die Allgemeinheit der Berechnungen nicht. Die resultierende Strom-Flussverkettungskurve ist in Fig. 26b dargestellt. Trotzdem Proportionalität nur für den Punkt P_0 formuliert wurde, erstreckt sich dieselbe mit grosser Genauigkeit über den ganzen Bereich. Fig. 24 zeigt die entsprechende $\frac{\Delta I_2}{I_0}$ -Kurve. Hier entspricht der Wert $\Sigma \Phi_K w_K = 2675$ der Liniendichte $B_0 = 1000$ des ersten Beispiels. Die radikale Verbesserung, die durch Methode 2 erhalten wird, ist ersichtlich und wird



a
Kernkombination mit proportionaler Beziehung zwischen Kraftflussverkettungen und Magnetisierungsstrom.



b
Beziehung zwischen Kraftflussverkettungen und Magnetisierungsstrom für Kerne mit ein (1) und zwei (2) Elementen.

durch die Hinzufügung eines gesättigten Kernes von relativ sehr kleinem Gewicht erzielt. Die scheinbare Permeabilität der Anordnung ist annähernd konstant und im Vergleich zu der des Einheitskernes hoch.

Diskussion der bekannten Kunstsaltungen.

Die vorigen Betrachtungen erklären einige unter dem Namen Kunstsaltungen bekannte Verbesserungsmethoden. *Pfiffner* unterbricht den Hauptkern durch einen Spalt und erzeugt daher in dem reduzierten Querschnitt *X* hohe Sättigung (Fig. 27a), ferner schaltet er eine Drosselspule mit einem Kern *Y* konstanten Querschnittes parallel zur sekundären Wicklung¹²⁾. Das Arbeitsprinzip ist ähnlich mit Methode 1. *Wilson* versieht den Kern mit einer Oeffnung, durch die die sekundäre Wick-

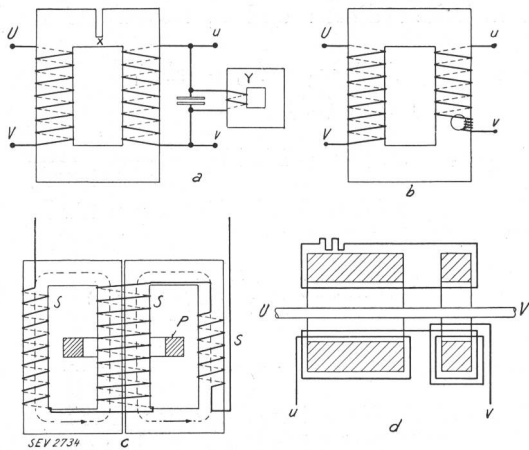


Fig. 27.

Kunstschaltungen.

- a Nach Pfiffner.
- b Nach Wilson.
- c Nach AEG.
- d Nach Wellings und Mayo.

lung gewunden wird, um lokal hohe Liniendichte zu erzeugen (Fig. 27b)¹³⁾. Fig. 27c bzw. d zeigen weitere Ausführungsformen der *AEG*¹⁴⁾ und von *Wellings* und *Mayo*¹⁰⁾; ihre Wirkungsweise ist trotz der verschieden konstruktiven Ausführung identisch und durch Methode 2 gegeben. In dieselbe Kategorie gehört ferner eine von *Vohl* angegebene Schaltung³⁾. Nach veröffentlichten Resultaten sind die erreichten Verbesserungen für angemessene Bürde beschränkt, wie aus Tabelle I ersichtlich.

Tabelle I.

Methode	Bürde	$\frac{\Delta \Delta \ddot{u}}{\ddot{u}} \%$ von 0,5 bis 5 A	$\Delta \theta'$ von 0,5 bis 5 A
Wilson unkorrigiert	45 VA $\cos \varphi = 0,455$	0,7 1,1	7 13
Küchler (AEG) unkorrigiert	60 VA $\cos \varphi = 0,5$	0,6 0,8	20 30

In keinem Falle werden die Fehler auf mehr als 50 % der ursprünglichen Werte reduziert, die Methoden sind wenig wirksam und ihre Anwendung kommt auf Einleiterwandler kaum in Frage, da dort eine Reduktion auf weniger als 1 % der ursprünglichen Werte erforderlich ist.

¹²⁾ Pfiffner U. S. A. Patent 1 731 865.
¹³⁾ A New High Accuracy Current Transformer, von M. S. Wilson. Journ. AIEE, März 1929, S. 179.
¹⁴⁾ Messwandler für Hochspannungen, von Rudolph Küchler. VDE-Fachberichte 1931, S. 40.

D. Kernzahl unendlich.

Analog zu Methode 1 und 2 können weitere Untersuchungen an zwei, drei und allgemein *n* Kernen in allen möglichen Schaltungen, parallel, in Serie, oder Kombinationen davon, angestellt und nach proportionalen Strom-Spannungs-Beziehungen erforscht werden. Hier soll nur noch der Fall unendlicher Anzahl Kerne behandelt und die Gleichungen für Proportionalität aufgestellt werden. Die einzelnen unendlich kleinen Kernteile arbeiten im Bereich verschiedener Kraftliniendichten; es sollen auch solche zugelassen werden, die nicht im Bereich der Gleichungen (20) und (21) liegen.

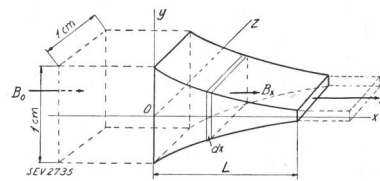


Fig. 28.
Kernform zur Erzeugung der verlangten Kraftfluss-Magnetisierungsstromkurve.

Es kann vermutet werden, dass ein Keil nach Fig. 28 den Bedingungen genügt. Es sei angenommen, dass der totale Kraftfluss B_0 ohne Streuung von $x = 0$ bis $x = L$ verläuft. Die Blindleistung wird durch $\text{VAr/kg} = f(B)$ ganz allgemein als Funktion von *B* dargestellt; wird das spezifische Gewicht mit *s* bezeichnet, so folgt:

$$dG = syz dx$$

$$\text{VAr} = 2s \int_0^L y f\left(\frac{B_0}{y}\right) dx$$

und da Proportionalität zwischen Magnetisierungsstrom und Kraftfluss mit Proportionalität zwischen VAr und B_0^2 identisch ist:

$$c B_0^2 = \int_0^L y f\left(\frac{B_0}{y}\right) dx \tag{30}$$

Die Lösungen dieser Gleichungen bestimmen die möglichen Formen des Keiles $f(xy) = 0$. Da $\text{VAr/kg} = f(B)$ nicht über den ganzen Bereich analytisch gegeben ist, ist eine allgemeine Lösung nicht möglich. Wenn $\text{VAr} = f(B)$ graphisch bekannt ist, so können eventuell bestehende Lösungen durch sukzessive Approximation erhalten werden. Am einfachsten geschieht jedoch die Bestimmung von $f(xy) = 0$ durch Versuche.

E. Versuche.

Zu diesem Zwecke wurde eine Drosselspule mit einem Kern veränderlichen Querschnittes gebaut (Fig. 29). Die Verwendung von verschiebbaren Lamellen, die z. B. durch einen Bolzen zusammengehalten werden können, bildet eine praktische Ausführungsart. An Stelle von *B* tritt die an die Wicklung angelegte Spannung als die eine Variable

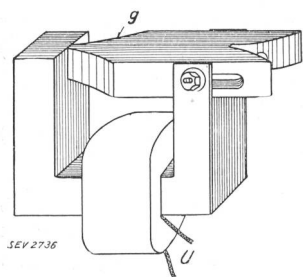


Fig. 29.
Einstellbarer Kern mit
Teilen verschiedener Li-
niendichte.
g Gesättigter Teil.

des Kreises. Fig. 30 zeigt ein Bild des Kernes, dessen Joch für eine proportionale $U-I_M$ -Beziehung eingestellt ist. Tabelle II gibt die entsprechenden Prüfergebnisse.

Tabelle II.

U V	I_M A	\bar{I}_M A	ΔI_M A	$\frac{\Delta I_M}{I_M} \%$
0,3	0,07688	0,07661	0,00027	0,35
0,6	0,15404	0,15322	0,00082	0,53
1,2	0,30770	0,30644	0,00126	0,41
1,8	0,46020	0,45966	0,00054	0,12
2,4	0,6129	0,6129	0,00000	0,00
3,0	0,7661	0,7661	0,00000	0,00

Aus Tabelle II ist ersichtlich, dass die maximale Variation von $\frac{\Delta I_M}{I_M}$ und daher auch der Permeabilität über den ganzen Bereich ca. $\frac{1}{2} \%$ beträgt. Der Umriss des eingengten Kernteiles ist aus Fig. 30 ersichtlich, eine einzige Lamelle, 25 mm hoch und

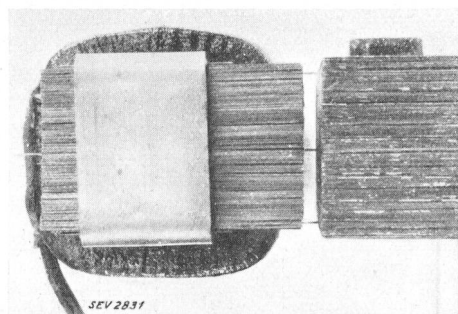


Fig. 30.
Drosselspule mit proportionaler Strom- und
Spannungseigenschaft.

0,38 mm dick, überbrückt den 6 mm breiten Luftspalt zwischen den beiden 50·50-mm-Flächen. Die Form ist nicht identisch mit $f(xy) = 0$, da die Linienverteilung ungleichmäßig ist.

Der Wirkstrom. In den vorigen Betrachtungen wurde die Wirkkomponente des Erregerstromes absichtlich vernachlässigt. Die endgültige Lösung des Problems verlangt eine proportionale Kraftfluss-Erregerstrombeziehung, bedingt durch Proportionalität des Blind- und Wirkstromes. Der Wirkstrom ist im Vergleich zum Blindstrom klein, und da er nach Berechnung aus Gl. (5) angenähert proportional verläuft, ist die Bedingung für proportionale I_M im allgemeinen hinreichend zur Erzeugung eines Proportionalen I_0 .

F. Der fehlerlose Stromwandler *).

Praktische Ausführung.

Durch zweckmäßige Verwendung von einstellbaren, gesättigten Kernteilen kann also konstante Permeabilität erzeugt werden. Es ist nun die einfachste und zweckmäßigste Anwendung auf den Stromwandler zu suchen. Die Unterbrechung von Kernen mit einem Gewicht von 100 kg und darüber durch einige Lamellen nach Fig. 27a ist mechanisch nicht zulässig. Kleine Kräfte genügen, um die ursprüngliche Einstellung zu verändern, wodurch die Fehler auf unzulässige Grenzen erhöht werden. Fig. 27b hat ähnliche Nachteile, indem die Einstellung schwierig und die Isolation der sekundären Wicklung gefährdet ist.

Wird jedoch der Kern Y in Fig. 27a mit Teilen verschiedener und zum Teil sehr hoher Sättigung versehen, dann wird es möglich sein, Proportionalität ohne Unterbrechung des Hauptkernes zu erzielen, da diese unabhängig ist von der Lage der auf hoher Liniendichte arbeitenden Kernteile. Die Vorteile einer solchen Konstruktion sind augenscheinlich, da eine kleine Drosselspule in Verbindung mit einer Kapazität imstande ist, irgendeinen gewöhnlichen Mehr- oder Einleiterstromwandler in einen fehlerlosen Wandler umzuwandeln. Eine Änderung der üblichen Kernkonstruktion der Wandler ist nicht notwendig. Die Einstellung der Lamellen kann mit Leichtigkeit geschehen; die Drosselspule kann mit dem Wandler konstruktiv vereinigt

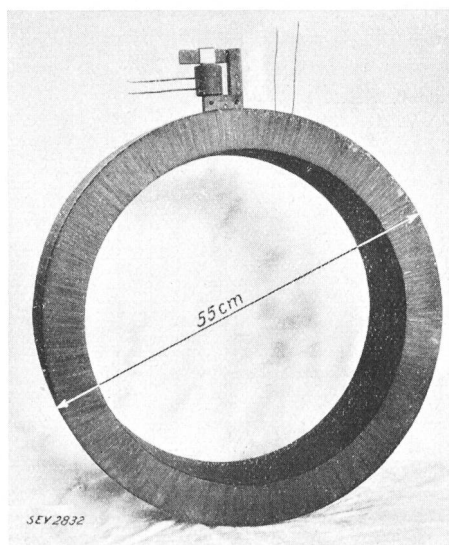


Fig. 31.
Wandler von 120 kg Gewicht mit zugehöriger
Drosselspule, die Proportionalität erzeugt.

werden oder an irgendeinem vorteilhaften Ort angebracht werden, eine Eigenschaft, die für Durchführungsstromwandler besonders wichtig ist.

Fig. 31 zeigt die Kombination eines Höchstspannungskernes (44 cm Innendurchmesser, 55 cm Aussendurchmesser, 18 cm Höhe, 120 kg) mit der

*) USA-Patent Nr. 1 863 936.

dazugehörigen kompensierenden Drosselspule, deren relativ kleine Abmessungen veranschaulicht werden. Tabelle III gibt die Blind- und Wirkströme und deren Abweichungen für Spannungen zwischen 0,4 bis 4 V, die Liniendichte im Hauptkern ändert sich entsprechend von 53 bis 530 Gauss.

Tabelle III.

U A	I _M A	I _M A	ΔI _M A	$\frac{\Delta I_{M0}}{I_M}$	I _w A	I _w A	ΔI _w A	$\frac{\Delta I_{w0}}{I_w}$
0,4	0,2432	0,2420	0,0012	0,5	0,0804	0,0800	0,0004	0,5
0,8	0,4850	0,4840	0,0010	0,2	0,1607	0,1600	0,0007	0,4
1,6	0,9690	0,9680	0,0010	0,1	0,3201	0,3200	0,0001	0
2,4	1,4522	1,4520	0,0002	0	0,4803	0,4800	0,0003	0
3,2	1,9404	1,9360	0,0044	0,2	0,6426	0,6400	0,0026	0,2
4,0	2,4200	2,4200	0	0	0,8000	0,8000	0	0

Die scheinbare Wechselstrompermeabilität des Hauptkernes zeigt innerhalb des ganzen Bereiches eine Abweichung von maximal 0,5 %, ähnlich verhält sich der Wirkstrom. Der totale Magnetisierungsstrom für 0,5 A ist 1,5 mal grösser als derjenige des Hauptkernes allein. Aus verschiedenen ausgeführten Versuchen folgt, dass dieses Verhältnis, im folgenden mit *t* bezeichnet, Werte bis zu 1,2 als Minimum annehmen kann. Für den entsprechenden Wert *μ* des Wirkstromes ergibt sich ein Minimum von 1,5.

Theoretische Fehlerberechnung. Mit der Kenntnis von $\frac{\Delta I_M}{I_M}$, $\frac{\Delta I_w}{I_w}$, *t* und *u* lassen sich die Fehler des neuen Wandlers vorausbestimmen.

Beispiel: Uebersetzungsverhältnis 200/5 A, Bezugskern aus legiertem Eisen, 38 cm Innendurchmesser, 18 cm hoch.

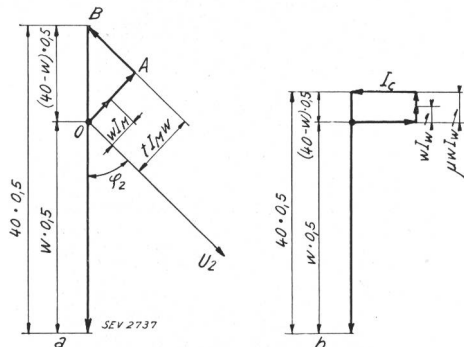


Fig. 32.

Diagramm des fehlerlosen Wandlers.

- a) mit Widerstand
- b) mit Kapazität

a) Fig. 32 zeigt das Vektordiagramm dieses Wandlers für 0,5 A Sekundärstrom, dessen Fehlwinkel mit Hilfe eines Widerstandes auf Null gebracht ist. Die Bürde sei *P* mit einer Phase φ_2 . Die Anzahl der sekundären Windungen ist kleiner als 40 und soll im folgenden berechnet werden. Aus dem Dreieck OAB folgt:

$$0,5 (40-w) = \frac{I_M t w}{\sin \varphi_2} \quad (31)$$

$$\text{und nach (1) und (8) } I_M = 20 \frac{t P^{0,4}}{w^{1,6}} \quad (32)$$

$$\text{daher } t = \frac{(40-w) w^{0,6} \sin \varphi_2}{40 \cdot P^{0,4}} \quad (33)$$

Um eine mögliche Lösung zu erhalten, genügt es, *w* so zu wählen, dass $t \geq 1,2$. Wird im speziellen $P = 1,2$ und $\cos \varphi_2 = 0,3$ gewählt, so ergibt sich

$$w = 25$$

$$t = 1,25$$

$$T = i \cdot 0,2\% + j \cdot 2' + f \cdot 1,5\% + l \cdot 0' \quad (34)$$

b) Aehnlich lässt sich die Gleichung eines rein Ohmisch belasteten Wandlers, mit einer Kapazität versehen, bestimmen (Fig. 32 b).

$$0,5 (40-w) = I_w u w \quad (35)$$

$$I_w = 19 \frac{r}{w^2} \quad (36)$$

$$u = \frac{w(w-40)}{38 r} \quad (37)$$

Für $r=0,6$ folgt: $w = 39$
 $u = 1,7$

$$T = i \cdot 0\% + j \cdot 3' + f \cdot 0,18\% + l \cdot 0' \quad (38)$$

Vergleich mit andern Wandlern.

Im II. Teil wurde die Anwendung von Nickel-Eisen als die wirksamste Korrekturmethode erkannt. Die Verbesserungen, die mit dem Kern konstanter Permeabilität erzeugt werden können, sollen anhand des 200/5-A-Wandlers mit 38 cm Innendurchmesser damit verglichen werden. Die Resultate sind in Tabelle IV wiedergegeben.

Vergleich der Fehler von 200/5-A-Einleiterstromwandlern.

Tabelle IV.

Identifikations-Buchstabe	Art des Wandlers	Bürde	Δ <i>i</i> %	θ'	$\frac{\Delta \Delta \ddot{u}}{VA}$ %	$\frac{\Delta \theta'}{VA}$
A	Fe Windungszahl abgeglichen	15 VA cos φ = 1,0	0,8	500	0,14	20
B	Ni-Fe Windungszahl abgeglichen	15 VA cos φ = 1,0	0	60	0,04	2
C	Ni-Fe Windungszahl abgeglichen	3 VA cos φ = 0,8	0,3	15	0,10	3
D	Konstante Permeabilität	30 VA cos φ = 0,3	0,2	2	1,5	0
E	Konstante Permeabilität	15 AV cos φ = 1,0	0	3	0,18	0

D und *E* sind den Gl. (34) und (38) entnommen. Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel sind von primärer Bedeutung. Für eine rein Ohmsche Bürde

sind die Uebersetzungsfehler naturgemäss klein, die Fehlwinkel dagegen gross; die Verbesserung von *D* und *E* im Vergleich zum Fe- und Ni-Fe-Wandler ist augenscheinlich. Der maximale Fehlwinkel beträgt für *A* 500', für *B* 60', aber nur 2' für *D* und 3' für *E*. Der Fehlwinkel des Wandlers konstanter Permeabilität ist demnach 250 mal kleiner als derjenige des Wandlers mit legiertem Eisenkern und 30 mal kleiner als der des Ni-Fe-Kernwandlers.

Während Wandler *A* und *B* ausserhalb des Messgenauigkeitsbereichs sind, so befinden sich *D* und *E* innerhalb der Präzisionsklasse (Fig. 33).

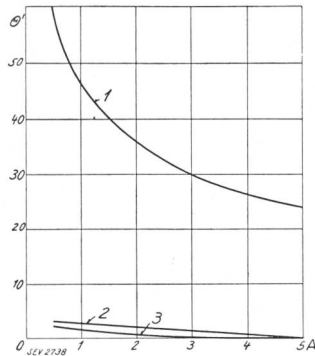


Fig. 33. Fehlervergleich zwischen dem Wandler konstanter Permeabilität und dem Nickel-Eisen-Wandler.
 1 Nickel-Eisen-Wandler
 2 Wandler mit konstanter Permeabilität; $P = 0,6$; $\cos \varphi = 1$
 3 Wandler mit konstanter Permeabilität; $P = 1,2$; $\cos \varphi = 0,3$

Um wenigstens einen teilweisen Vergleich mit einem Ni-Fe-Wandler machen zu können, soll dessen Bürde so klein gewählt werden, dass er in die Präzisionsklasse fällt, siehe *C*, Bürde 3 VA, $\cos \varphi = 0,8$, Fehlwinkel 15'. Ein Vergleich der Aenderung der Uebersetzungsfehler $\Delta \Delta \ddot{u} \% / VA$, der in die Messklasse fallenden Wandler, zeigt, dass dieselbe grösser ist für *D* und *E* als für *C*, der Unterschied zwischen den beiden letzteren ist unbedeutend und kann durch Anwendung einer Kapazität für den Fall einer Bürde mit $\cos \varphi < 1$ aufgehoben werden.

Die Variation $\Delta \theta' / VA$ ist von besonderem theoretischem Interesse, für *E* wird diese Grösse Null, was seine Ursache darin hat, dass der Magnetisierungsstrom in jedem Augenblicke durch den Strom in der Kapazität aufgehoben wird. Der Erregerstrom des Transformators ist ein reiner Wirkstrom; scheinbar wird kein Magnetisierungsstrom benötigt, um den Kern auf die nötige Liniendichte zu bringen; diese Kombination kann daher als Wandler mit scheinbar unendlicher Permeabilität bezeichnet werden, seine Fehler sind einzig durch die Grösse des Wirkstromes bestimmt und können nur durch Verminderung der Verluste verkleinert werden. Da es möglich ist, mit Hilfe des Kernes konstanter Permeabilität unendliche Permeabilität zu erzeugen, muss die Notwendigkeit der Herstellung von Legierungen mit immer höherer Permeabilität bezweifelt werden, die Richtlinien zukünftiger Verbesserungen im Kernmaterial der Stromwandler scheinen auf die radikale Elimination der Wattverluste zu deuten.

Der Vergleich verschiedener 200/5-A-Wandler nach Tabelle IV zeigt deutlich, dass der Wandler konstanter Permeabilität den Nickel-Eisen-Kern-Wandler in jeder Beziehung übertrifft, und wäh-

rend sich der letztere auf Bürden von wenigen VA beschränken muss, kann der erstere Bürden von 50 VA und höher bewältigen. Allgemein ist die Erzielung konstanter Permeabilität in der Weise, die Fehler aller Wandler auf weniger als 1% der ursprünglichen Werte zu reduzieren; sie bedeutet somit eines der wirksamsten Mittel zur Elimination der Fehler.

IV. Konstruktion der Einleiter-Durchführungsstromwandler.

Ausser dem Kern eines gewöhnlichen Durchführungsstromwandlers verlangt die entwickelte Methode die Anbringung einer geeigneten Drosselspule und einer Kapazität nach Fig. 34. Da das

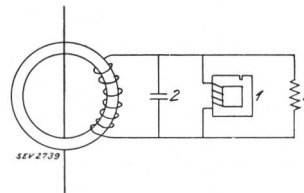


Fig. 34. Schaltungsschema des fehlerlosen Wandlers.
 1 Drosselspule
 2 Kapazität
 3 Bürde

Gewicht der Drosselspule und die Grösse des Kondensators klein ist, so bietet ihre Anordnung keine Schwierigkeiten.

Es ist schon früher gezeigt worden, dass alle Einleiterwandler mit niedrigem Uebersetzungsverhältnis gegen Aenderung in der sekundären Bürde empfindlich sind. Es scheint ferner kein einfaches Mittel zur Eliminierung dieser Empfindlichkeit über grosse Aenderungen der Bürde zu bestehen, da diese nach Gl. (14) umgekehrt proportional ist

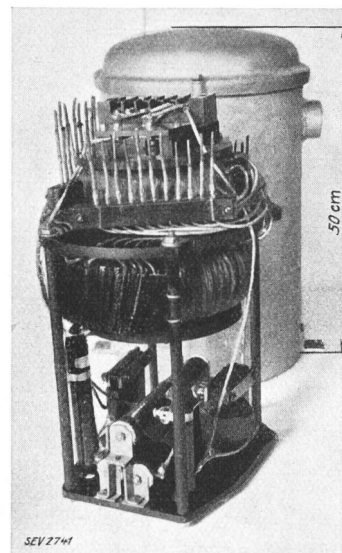


Fig. 35. Kompensator.

dem Quadrate der Windungszahl. Durch die Tatsache, dass für sehr hohe sekundäre Bürde, z. B. 50 VA und darüber Präzisionsgenauigkeit erzielt werden kann, bietet sich eine vollkommen neue Möglichkeit: Der Wandler wird für eine bestimmte

konstante Bürde, z. B. 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$ geeicht. Beträgt die äussere Bürde z. B. 20 VA, $\cos \varphi = 0,5$, so müssen ein zusätzlicher Widerstand und eine zusätzliche Reaktanz als Ergänzungsbürde die fehlenden 30 VA, $\cos \varphi = 0,5$ ersetzen. Damit wird der notwendige grosse Bereich der Nutzbürde erzielt. Fig. 35 zeigt die Konstruktion einer solchen Ergänzungsbürde, die für ein Maximum von 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$ gebaut ist. Die unterteilten Widerstände und die zur Verhütung von Streuung ringförmigen Reaktanzen sind im oberen Teile des Bildes ersichtlich. Der untere Teil der Kombination, die im folgenden «Kompensator» genannt wird, enthält zwei Drosselspulen; jede ist für je ein Uebersetzungsverhältnis eines Wandlers mit zwei verschiedenen Stromstärken bestimmt. Die Widerstände zwischen den Drosselspulen dienen zur Fehlwinkelkorrektur, an ihre Stelle treten in den meisten Fällen geeignete Kapazitäten. Der ganze Apparat wird dann in einen kleinen Kessel montiert und ist somit für Aufstellung an irgend einer Stelle, speziell aber zur Anbringung in nächster Nähe der Durchführungen von Oelschaltern und Transformatoren im Freien geeignet.

V. Versuchsergebnisse.

Zur Bestätigung der in Abschnitt III berechneten Eigenschaften des fehlerlosen Stromwandlers folgen Versuchsergebnisse an einem ausgeführten

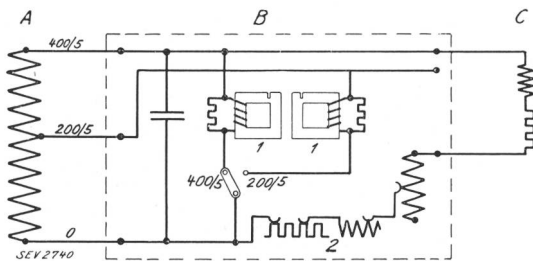


Fig. 36.
Schaltungsschema des 400/200/5-A-Wandlers.
A Sekundäre Wicklung des Wandlers.
B Kompensator
1 Drosselspulen
2 Zusatzbürde
C Bürde

Apparat. Um die Untersuchungen im Bereiche höchster Spannungen und der in solchen Systemen am häufigsten auftretenden Stromstärken zu halten, wurde ein Kern aus hochlegiertem Eisen mit 44 cm Innendurchmesser, 55 cm Aussendurchmesser, 18 cm Höhe und mit einem Gewicht von 120 kg gewählt (Fig. 31). Diese Dimensionen erlauben Aufbau auf einer 220-kV-Kondensatordurchführung. Als Uebersetzungsverhältnisse wurden 400/5 A und 200/5 A angenommen; das Schaltungsschema ist in Fig. 36 wiedergegeben. Tabelle V gibt Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel eines seriemässig hergestellten Wandlers. Die Bürde für 400 A Primärstrom beträgt 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$, diejenige für 200 A Primärstrom 15 VA, $\cos \varphi = 0,9$.

Tabelle V.

Sekundärstrom A	Wandlerfehler			
	400/5		200/5	
	Bürde 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$	θ'	Bürde 15 VA, $\cos \varphi = 0,9$	θ'
0,5	0,06	-11	0,45	+ 6
1	0,01	- 7	0,1	+ 2
2	0,07	0	0,2	+ 3
3	0,04	+ 1	0,1	+ 3
4	0,00	0	- 0,1	- 1
5	- 0,01	+ 1	+ 0,1	- 1

Dem Prüfschein des U.S.A. Bureau of Standards, Washington D. C., entnommen.

Die Resultate für 400 A sind in Fig. 37 graphisch dargestellt, ebenso die Kurven des gewöhnlichen Wandlers (ohne Drosselspule) bei gleicher Bürde. Fig. 38 zeigt die Fehlerkurven für 200 A

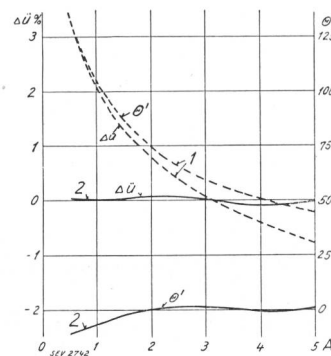


Fig. 37.
Fehlerkurven ($\Delta i\%$ und θ') des 400/5-A-Wandlers.
 $D = 44$ cm, $H = 18$ cm.
Gewicht = 120 kg. Bürde = 0 bis 50 VA für $\cos \varphi$ im Bereich von Fig. 39a.
I Gewöhnlicher Wandler.
II Präzisionswandler.

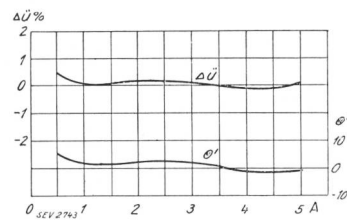


Fig. 38.
Fehlerkurven ($\Delta i\%$ und θ') des 200/5-A-Präzisionswandlers.
 $D = 44$ cm, $H = 18$ cm.
Gewicht = 120 kg. Bürde = 0 bis 15 VA für $\cos \varphi$ im Bereich von Fig. 39b

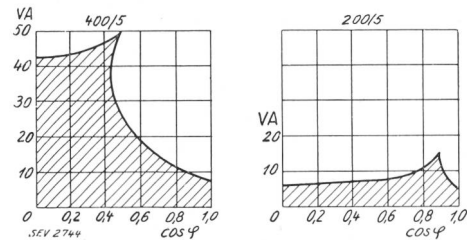


Fig. 39.
400/200/5-A-Wandler.
Grenzen für Bürde und $\cos \varphi$.

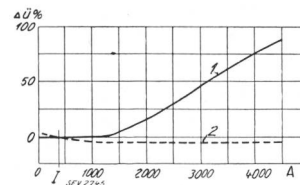


Fig. 40.
Ueberstromcharakteristik des 400/5-A-Wandlers.
 $D = 44$ cm, $H = 18$ cm, Gewicht = 120 kg, Bürde = 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$.
1 Präzisionswandler
2 Gewöhnlicher Wandler
I Normalstrom

Primärstrom. Dieselben Genauigkeiten gelten auch für den in Fig. 39 dargestellten Bürdenbereich, da Bürden, die innerhalb der schraffierten Flächen

liegen, durch die Zusatzbürde ergänzt werden können. Fig. 40 zeigt die Ueberstromcharakteristik des 400/5-A-Stromwandlers, die hohe Genauigkeit hält bis zum dreifachen Normalwerte und geht dann rasch verloren; die Kurve für den gewöhnlichen Wandler verläuft flach. Dieses Verhalten des Präzisionswandlers ist vorteilhaft, da dadurch die Möglichkeit einer Beschädigung der angeschlossenen Zähler bei Ueberstrom stark verringert ist.

Empfindlichkeit gegen Aenderungen in Bürde und Temperatur.

Die möglichen Genauigkeiten sind nur dann von praktischer Bedeutung, wenn dieselben innerhalb enger Grenzen konstant bleiben unter den zu erwartenden äusseren Einflüssen. Die Widerstände der Wicklung, des Kompensators und der äusseren Bürde sind abhängig von der Temperatur. Eine weitere Temperaturabhängigkeit kann auch in den magnetischen Eigenschaften des Kernes und der Drosselspule vorhanden sein. Zur Bestimmung derselben wurden mit Wandlerkern und Drosselspule bei verschiedenen Temperaturen Versuche ausgeführt. Die Resultate sind neben anderen Messungen in Tabelle VI dargestellt.

Empfindlichkeit gegen Bürde- und Temperaturänderungen bei einem Hochspannungseinleiterpräzisionswandler. Uebersetzungsverhältnis 400/5 A. Bürde 50 VA, cos φ = 0,5. Tabelle VI.

	Maximale Aenderung von Δ <i>u</i> % (+ bedeutet Zunahme)	Maximale Aenderung von θ in Min. (+ bedeutet voreilend)
10° C Temperaturzunahme des Kernes und der Drosselspule	+ 0,01	+ 1
1,0 VA Zunahme der Bürde (Ohmisch)	+ 0,07	+ 6
1,0 VA Zunahme der Bürde (Reaktiv)	+ 0,13	— 3

Die Werte der zweiten Zeile können dazu benutzt werden, Aenderungen der Fehler, die aus einer Temperaturänderung des Widerstandes der total angeschlossenen Bürde erwachsen, zu bestimmen.

Magnetisierung des Kernes. Oeffnung der sekundären Wicklung unter Strom beeinflusst wie bei einem gewöhnlichen Wandler die Genauigkeit; dieselbe kann durch Entmagnetisieren wieder hergestellt werden.

Frequenz. Wird ein für 50 Per./s gebauter Stromwandler für Messungen bei sehr stark verschiedener Frequenz, z. B. 16²/₃ Per./s benutzt, so wird dadurch seine Genauigkeit beeinflusst; für kleine Frequenzschwankungen innerhalb eines Netzes selbst ist er jedoch nicht empfindlich.

Oberwellen. Den in Tabelle V für die Grundwelle der Ströme bestimmten Fehlern kommt nur dann Bedeutung zu, wenn sie auch für die entsprechenden Effektivwerte gelten. Diese Bedingung ist im allgemeinen für den gewöhnlichen Transformator erfüllt, bei welchem auch starke Verzerrungen

der Stromform praktisch konstante Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel ergeben¹⁵⁾. Bei einem mit Drosselspule kompensierten Wandler könnte vermutet werden, dass diese infolge der höheren Sättigung eines Kernteiles eine über den Bereich einer Periode stark veränderliche Impedanz darstellt. Zur Abklärung dieser Frage wurden Ströme und Spannungen für das Uebersetzungsverhältnis 400/5 oszillographisch untersucht. Fig. 41 zeigt den Ver-

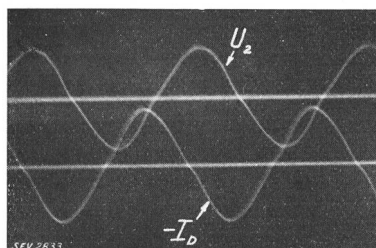


Fig. 41. Oszillogramme für Spannung und Strom der Drosselspule für 5 A. Sekundärstrom.

lauf der sekundären Spannung und des durch diese in der Drosselspule erzeugten Stromes für einen Sekundärstrom von 5 A. Es ist ersichtlich, dass beide Grössen angenähert sinusförmig verlaufen und auf eine über die ganze Periode praktisch konstante Impedanz schliessen lassen. Ein störender Einfluss von Oberwellen durch die Drosselspule tritt daher nicht auf.

Diese Tatsache wurde auch direkt bestätigt, indem die in Tabelle V angegebenen Werte mit Hilfe von Messungen mit Zählern auf Primär- und Sekundärseite des Wandlers verifiziert wurden.

Diskussion der Versuchsergebnisse.

Aus Tabelle V ist ersichtlich, dass der untersuchte Einleiterwandler sehr kleine Fehler hat. Für das Uebersetzungsverhältnis 400/5 ist Präzisionsgenauigkeit erreicht für Bürden bis zu 50 VA cos φ = 0,5. Die Genauigkeit dieses Wandlers übertrifft diejenige der gebräuchlichen Topfstromwandler. Tabelle VI zeigt weiter, dass diese Genauigkeit unter den verschiedensten äusseren Einflüssen erhalten bleibt.

Grenzen: Als untere Grenze des Uebersetzungsverhältnisses für Wandler höchster Spannungen kann wohl 200/5 A angegeben werden. Mit diesem und allen höheren Verhältnissen kann für alle praktischen Zwecke Fehlerlosigkeit und Unempfindlichkeit gegen äussere Einflüsse erzielt werden. Für Wandler niedrigerer Spannung und daher kleineren Kerndurchmessers und Gewichtes können diese vorteilhaften Eigenschaften für bedeutend geringere Uebersetzungsverhältnisse erzielt werden. Da jedoch der Höchstspannungswandler von primärer Bedeutung ist, sollen einige Methoden erwähnt werden, die ihn für kleinere Stromstärken verwendbar machen, oder die seine Eigenschaften für die oben angegebenen Primärströme bedeutend verbessern können.

¹⁵⁾ The Determination of the Ratio of Transformation and of the Phase Relation in Transformers, von E. B. Rosa und M. G. Lloyd. Bulletin of the Bureau of Standards, Heft 6, Nol.

Verminderung der Wattverluste. Da die Bürde für Wandler, die ausschliesslich für den Anschluss von Zählern benützt werden, einen hohen $\cos \varphi$ hat, so ist sie angenähert ein reiner Widerstand. Der Magnetisierungsstrom des Wandlers plus Drosselspule kann daher durch die Kapazität vollständig neutralisiert werden, die Fehler sind nur vom Wirkstrom abhängig. Die Anwendung von Eisen mit möglichst kleinen Verlusten, etwa von der Grössenordnung eines Zehntels der bisherigen, ist daher empfehlenswert; dessen Erzeugung scheint nicht mit unüberwindbaren Schwierigkeiten verknüpft zu sein.

Nickel-Eisen-Legierungen mit hoher Permeabilität können nichts zur weiteren Lösung beitragen, da ja die Kombination von Drosselspule, Kern und Kapazität in sich selbst schon eine scheinbar unendliche Wechselstrompermeabilität besitzt und daher die Nickel-Eisen-Legierungen in physikalischer Wirkung bei weitem übertrifft, mit dem weiteren Vorteil, dass die Kosten nur einen Bruchteil desjenigen von Nickel-Eisen-Kernen ausmachen.

Zweistufenwandler nach Brooks. Wird der betrachtete Hochspannungswandler für 50 A Primärstrom gebaut, dann ist seine Empfindlichkeit gegen äussere Einflüsse der begrenzende Faktor. Hier kann das Zweistufenprinzip von Brooks mit speziellem Zähler angewendet werden, da es in der Sache ist, die Empfindlichkeit über gewisse Grenzen zu eliminieren.

Der Mehrleiterstromwandler. Trotzdem der Mehrleiterstromwandler in seinen verschiedenen Ausführungsformen viel grössere Genauigkeiten ergibt als der Einleiterstromwandler, so sind seine Fehler, speziell im Gebiete höchster Spannungen vom Standpunkt moderner Messtechnik und speziell im Vergleich zu den angeschlossenen Zählern, unzulässig²⁾. Die Fehlwinkel sollten unter keinen Umständen 20' überschreiten. Von den Resultaten, die durch Anwendung einer Drosselspule an Einleiterstromwandlern erzielt wurden, kann erwartet werden, dass ähnliche Verbesserungen am Mehrleiterwandler möglich sind.

Versuche zeigen, dass Uebersetzungsfehler von weniger als 0,1 % und Fehlwinkel von weniger als 3' leicht erreicht werden. Eine Zusatzbürde ist nicht nötig, da der Wandler wegen seiner hohen sekundären Windungszahl ja praktisch unempfindlich ist gegen Aenderungen der sekundären Bürde. Fehlerlosigkeit wird erzielt ohne Aenderung der üblichen Kernkonstruktion und praktisch ohne zusätzliche Kosten.

VI. Prüfmethode.

Die Eichung der Wandler kann nach irgend einer der bekannten Methoden vorgenommen werden. Da jedoch einige in den Vereinigten Staaten entwickelte Apparate in bezug auf Installation des neuen Wandlers spezielle Vorteile bieten, sollen sie hier kurz erwähnt werden.

Die absoluten Eichmethoden.

Die Vergleichung von Spannungsabfällen an induktionsfreien Widerständen im Primär- und Sekundärkreis bildet der Ausgangspunkt der absoluten Methoden. Die Messungen sind gewöhnlich Nullmessungen in Brückenschaltung; diejenige von Schering und Alberti ist wohl die in Europa gebräuchlichste Methode. Die Schaltung ist in Fig. 42

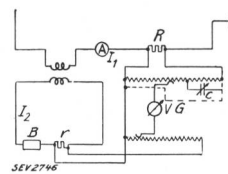


Fig. 42. Eichschaltung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. VG Vibrationsgalvanometer. B Bürde.

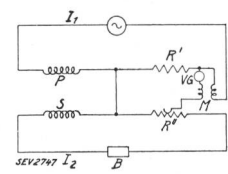
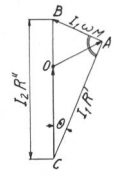


Fig. 43. a Eichschaltung nach Agnew. b Vektordiagramm.



wiedergegeben und bedarf keiner weiteren Erläuterung. Eine ähnliche Kompensationsmethode von Agnew ist in Fig. 43 dargestellt; sie hat den Vorteil, dass die Fehlergrössen in einfacherer Weise aus der Schaltung hervorgehen. Stromlosigkeit im Vibrationsgalvanometer (VG) wird durch passende Einstellung der Widerstände R' und R'' und der gegenseitigen Induktion M erzielt. Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel sind aus Fig. 43 b gegeben durch:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R''}{R'} \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2\pi f M}{R^1} \right]^2}}$$

$$\text{tg } \delta = \frac{2\pi f M}{R_1}$$

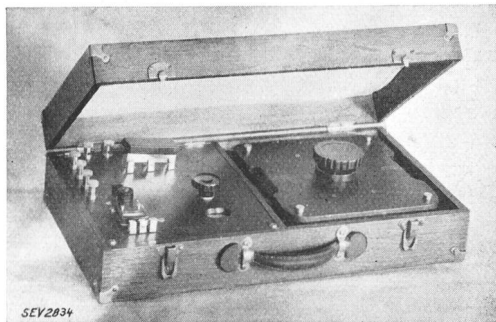
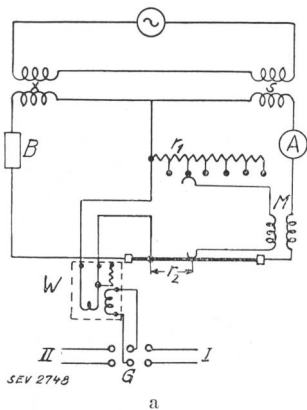
Für kleine Fehlwinkel ist derselbe direkt proportional zu M , während er in der Schaltung von Schering und Alberti proportional zur Kapazität ist. In einem variablen Kondensator ändert sich die Kapazität und damit auch der Fehlwinkel linear mit der Verdrehung desselben; dasselbe Resultat kann aber auch erzielt werden mit einer speziell konstruierten veränderlichen Induktivität¹⁶⁾, so dass für beide Methoden lineare Skalen resultieren. Durch sukzessive Approximation, die in einer fortgesetzten Aenderung von R'' und M oder C besteht, wird endgültige Stromlosigkeit erzielt; es ist nicht möglich, Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel unabhängig zu bestimmen. Trotzdem dieser Nachteil im Laboratorium von untergeordneter Bedeutung ist, ist seine Elimination in Prüffeldmessungen sehr erwünscht. Dies wird erreicht durch Ersatz des Vibrationsgalvanometers durch ein anderes Instrument¹⁷⁾, vorzüglich ein Wechselstromgalvanometer. Durch Anschluss der Feldspulen an eine

16) A Variable Mutual Inductor, von H. B. Brooks und F. C. Wagner. Bulletin Bureau of Standards, Heft 13, Nr. 4.
17) Recent Developments in Exact A. C. Measurements, von Sharp and Crawford. Transactions of AIEE 29, 1910, S. 1517.

Spannung, die in Phase ist mit dem sekundären Strom, kann der Uebersetzungsfehler durch Aenderung des Widerstandes R'' bestimmt werden. Der Fehlwinkel bestimmt sich analog aus der Induktivität M durch Anlegung einer gegen den sekundären Strom um 90° verschobenen Spannung.

Vergleichsmethoden.

Für die Vergleichsmethoden, die in Prüffeldmessungen und hauptsächlich in den Eichstätten der Elektrizitätswerke benützt werden, gelten von



b
Fig. 44.
Eichschaltung nach Silsbee.

den Laboratoriumsmethoden abweichende Forderungen. In erster Linie sollen die Anschaffungskosten gering sein; die Forderungen an Genauigkeit sind viel beschränkter, da sie durch rein praktische Gesichtspunkte gegeben werden. Eine Messgenauigkeit von 0,1 % im Uebersetzungsverhältnis und 3 Minuten im Fehlwinkel sind vollkommen genügend. An Stelle der teuren Normalwiderstände kann ein geeichter Normalwandler mit den nötigen Uebersetzungsverhältnissen treten. Die Schaltung der absoluten Methode kann sehr vorteilhaft durch eine von Silsbee¹⁸⁾ angegebene ersetzt werden (Fig. 44 a), deren Wirkungsweise leicht durch Analogie aus Fig. 43 b abgeleitet werden kann. Die Anordnung ist tragbar; gegen Transport ist das Galvanometer weniger empfindlich als ein gewöhnliches Voltmeter. Fig. 44 b zeigt den Apparat mit der veränderlichen Induktivität zur rechten Seite.

¹⁸⁾ A Method for Testing Current Transformers, von F. B. Silsbee. Scientific Paper of the Bureau of Standards, Nr. 309.

Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel können an linearen Skalen direkt abgelesen werden. Die tatsächlichen Fehler folgen dann durch Berücksichtigung derjenigen des Normalwandlers. Da es jedoch möglich ist, durch Anbringung einer Drosselspule absolut fehlerfreie Normalwandler zu bauen, so kann auch diese Korrektur noch fortfallen. Infolge der vielzähligen Vorteile ist diese Vergleichsmethode im Zusammenhang mit der Schaltung nach Silsbee in den Vereinigten Staaten die im Prüffeld am häufigsten angewendete. Die leichte Tragbarkeit erlaubt Versuche an installierten Wandlern.

Methode mit Eichwicklung.

Die Durchführungsstromwandler erlauben eine weitere Vereinfachung der Versuchsanordnung. In den Vergleichsmethoden ist ein Normalwandler und zur Erzeugung des gewöhnlichen hohen Primärstromes ist ferner ein Speisetransformator notwendig. Diese können nun vollkommen weggelassen werden, wenn der Kern mit einer Eichwicklung versehen wird. Theorie und Versuche zeigen, dass bei gleichmässig verteilter Sekundärwicklung identische Fehler erzeugt werden durch einen einzigen Leiter und eine Wicklung irgend einer Windungszahl, solange die primäre Amperewindungszahl dieselbe ist. Im Falle eines Uebersetzungsverhältnisses von 400/5 A wird demnach eine primäre Wicklung, aus 80 Windungen bestehend, einen Stromwandler im Verhältnis 1:1 erzeugen. Der primäre Strom wird durch die Eichwicklung geschickt und nach der Methode Silsbee können dann die Fehler ohne weitere Zusatzapparate abgelesen werden; der Stromkreis des Hauptprimärleiters muss zu diesem Zwecke unterbrochen werden. Dieser Prüfung kommt für Kontrolleichungen an Ort und Stelle Bedeutung zu.

Laboratoriumseichung des fehlerlosen Transformators.

Jeder fabrikmässig hergestellte Wandler, bestehend aus Kern, Drosselspule, Kapazität und

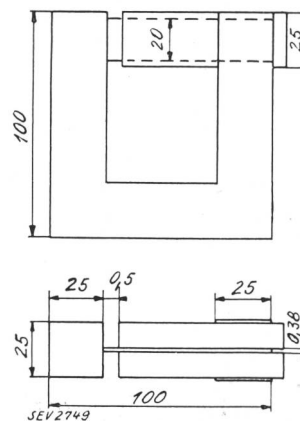


Fig. 45.
Abmessungen
des Drosselspulkernes
in mm.

Zusatzbürde, muss zur Erzeugung der Fehlerlosigkeit dem Prüfstand übergeben werden. Zum Zwecke der leichten Verständlichkeit soll angenommen

werden, dass der in Fig. 31 dargestellte Messwandler für eine Bürde von 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$ eingestellt werden soll. Die beweglichen Lamellen der Drosselspule (Fig. 45) werden so angeordnet, dass von der Kombination Kern-Drosselspule, wenn sekundärseitig an eine Spannung gelegt, angenähert ein proportionaler Erregerstrom bezogen wird, was für den Bereich von 1 bis 10 Volt mit

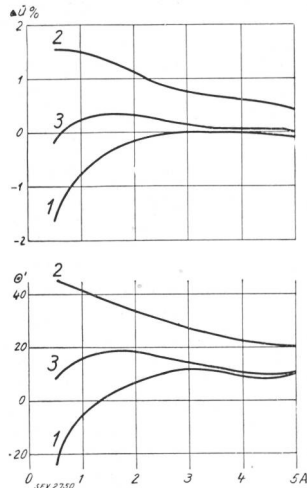


Fig. 46.

Beziehung zwischen Wandlerfehler und Lamelleneinstellung.

- 1 Lamellenhöhe 20 mm
- 2 Lamellenhöhe 10 mm
- 3 Lamellenhöhe 15 mm

Hilfe eines Voltmeters und eines Milliampereometers leicht geprüft werden kann. Darauf wird der Kondensator angeschlossen und Uebersetzungsfehler und Fehlwinkel in gewöhnlicher Weise mit der Vergleichsmethode bestimmt. Die auftretenden Fehler 1 (Fig. 46) sind zu gross. Reduktion der

Höhe der Lamelle auf die Hälfte gibt die Fehlerkurven 2. Durch Vergleich von 1 und 2 ist anzunehmen, dass ein Zwischenwert der Höhe bessere Resultate ergibt, was auch der Fall ist, wie Kurven 3 zeigen, die einer Lamelle von $\frac{3}{4}$ der ursprünglichen Höhe entsprechen. Eine weitere Reduktion der Fehler kann durch Aenderung des Luftspaltes, der Anzahl der überbrückenden Lamellen und, wenn notwendig, auch durch Aenderung der Dimensionen des ungesättigten Teiles des Kernes erzielt werden. Die fabrikmässige Einstellung auf verschwindende Werte kann durchschnittlich in einer halben Stunde gemacht werden, worauf der Wandler zur Ablieferung bereit ist.

Installationsversuche des Transformators.

Bevor der Wandler in Betrieb gesetzt wird, muss darauf geachtet werden, dass die angeschlossene Bürde und die Ersatzbürde sich zum geeichten Werte (z. B. 50 VA, $\cos \varphi = 0,5$) ergänzen. Die bevorzugte Methode besteht jedoch in der Benutzung der Silsbee-Schaltung im Zusammenhang mit der Eichwicklung. Wird ein Milliampèremeter A in den Differenzstromkreis der Fig. 44 eingeschaltet, unter Weglassung der übrigen Apparate, so zeigt dessen Stromlosigkeit richtige Bürdeneinstellung an. In derselben Weise kann auch der Silsbee-Apparat zur Einstellung benützt werden; dabei können die bei Anschluss der tatsächlich vorhandenen Instrumente auftretenden Fehler bestimmt werden, und zwar mit einer Genauigkeit von 0,1 % des Uebersetzungsverhältnisses und einigen Minuten im Fehlwinkel.

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Elektrische Asphaltkochwagen in Zürich.

621.364:625.7

In Nr. 18, S. 483, teilten wir mit, dass in verschiedenen deutschen Großstädten anstelle der holz- und kohlebeheizten Teerschmelzwagen solche mit elektrischer Beheizung in Betrieb genommen wurden, die ohne Rauch und Russ mit Hilfe der Elektrowärme in kurzer Zeit den Teer schmelzen und durch fein regulierbare Beheizung in jedem gewünschten Masse flüssig erhalten. Die elektrische Energie wird den städtischen Kabelnetzen oder den Fahrleitungen der Strassenbahnen entnommen.

In verdankenswerter Weise teilt uns die Direktion der

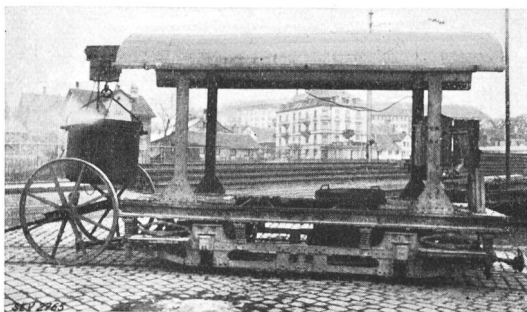


Fig. 1.

Elektrischer Asphaltkochwagen der Städtischen Strassenbahn Zürich.

Städtischen Strassenbahn Zürich mit, dass diese Strassenbahn schon seit Januar 1921 einen elektrischen Asphaltkochwagen besitzt. Es ist dies ein Anhängewagen auf Strassenbahngleise mit zwei Asphaltkesseln von je 250 l Inhalt. Geheizt werden dieselben durch Gleichstrom 550 V, in drei Stufen zu 5 kW, zusammen 15 kW pro Kessel. Die Heizung erfolgt durch Strahlung, so dass eine Beschädigung der Heizkörper beim Reinigen (Ausklopfen) des Kessels nicht mehr vorkommt. Vor und während der Fahrt auf den Arbeitsplatz und auf diesem selbst kann geheizt werden, indem über einen Steckkontakt vom Motorwagen Energie ab der Fahrleitung entnommen werden kann. Die Kessel sind so eingebaut, dass sie vermittle eines Laufkranes dem Wagen einzeln entnommen und vermittle Hängewagen auf die Arbeitsstelle geführt werden können. Die Einrichtung bewährt sich, namentlich nachdem an Stelle einer gewöhnlichen Widerstandsheizung eine Strahlungsheizung eingebaut wurde.

Es wäre noch beizufügen, dass derartige Schmelzwagen nicht unbedingt auf Strassenbahngleisen laufen müssen; es können auch von der Strassenbahn völlig unabhängige Strassenfahrzeuge benützt werden, wobei die Energie gleichwohl einer Strassenbahnfahrleitung entnommen werden kann oder aber dem Kabelnetz für die Allgemeinversorgung.

Ferner möchten wir darauf hinweisen, dass auch die Benzinmotoren von Pressluftanlagen, die bei Strassenarbeiten in Städten einen Teil des schrecklichen Lärms solcher Anlagen verursachen, durch Elektromotoren ersetzt werden könnten, nicht zuletzt im Interesse der Lärmverminderung auf Strassen.