

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 36 (1945)
Heft: 9

Artikel: Präzisionswandler für Hochspannungsnetze
Autor: Fischer, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060215>

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: 19.01.2026

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

Wenn die Abweichungen zwischen der Rechnung und den Messungen von Hölzler (I) grösser sind, so liegt dies zweifellos darin, dass für eine genauere analytische Angleichung seiner Phasenkurve auch noch ein Glied 5. Grades verwendet werden müsste.

Literatur-Verzeichnis

- Armstrong: Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Bd. 24 (1936), Mai.
 Carson und Fry: Bell System Techn. J., Bd. 16 (1937).
 Crosby: Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Bd. 25 (1937).
 Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Februar 1939.

- Fränz und Vellat: Elektr. Nachr. Technik, August 1943.
 (I) Hölzler: Elektr. Nachr. Technik, Mai 1941.
 (II) Kulp: Elektr. Nachr. Technik, Bd. 19 (1942), S. 72, H. 5.
 Elektr. Nachr. Technik, Bd. 19 (1942), S. 96, Heft 6.
 Elektr. Nachr. Technik, Bd. 19 (1942), S. 126, Heft 7.
 Murray und Crosby: Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Juni 1936.
 Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., April 1937.
 RCA-Review, Nr. 3, Januar 1940.
 RCA-Review, Nr. 3, Januar 1941.
 Plump: Hochfr. und Elektro-Akustik, Bd. 52 (1938).
 Roder: Proc. Inst. Radio Engrs., Mai 1932.
 Proc. Inst. Radio Engrs., Dezember 1937.
 Vellat: Elektr. Nachr. Technik, April 1941

Adresse des Autors:

Dr. P. Güttinger, A.-G. Brown Boveri & Cie., Baden.

Präzisionswandler für Hochspannungsnetze

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 7. Oktober 1944 in Luzern,
 von J. Fischer, Basel

621.314.22.08

Der Einfluss von Spannungs- und Stromwandlerfehlern auf die Genauigkeit der Messung der Energieabgabe wird untersucht; es geht daraus hervor, wie wichtig es ist, nicht nur die prozentualen Fehler, sondern auch die absoluten Messfehler, in kWh, zu betrachten. Dann werden Möglichkeiten besprochen, Spannungswandler und Stromwandler zu verbessern; es wird auch auf den Einfluss der Betriebsbedingungen hingewiesen.

Etude de l'influence des erreurs dues aux transformateurs de tension et d'intensité sur la précision de mesure de la fourniture d'énergie. L'auteur constate qu'il est très important de considérer non seulement les erreurs en pour cent, mais aussi les erreurs absolues, en kWh. Il examine ensuite les moyens aptes à améliorer à cet égard les transformateurs de tension et d'intensité et attire l'attention sur l'influence exercée par les conditions d'exploitation.

Die folgenden Ausführungen richten sich an den Betriebsingenieur, der wegen seiner vielseitigen Beanspruchung kaum Zeit findet, in die Feinheiten eines Spezialgebietes einzudringen. Ein Eingehen in Grundlagen blieb dabei unvermeidlich; absichtlich wird aber auf die allgemein bekannten Darstellungen über Leistungstransformatoren Bezug genommen. In der Messwandler-Theorie werden nämlich Diagramme benützt, welche infolge ihrer knappen Darstellung den Zusammenhang mit den Verhältnissen bei Leistungstransformatoren nicht so leicht erkennen lassen. Es schien mir deshalb angezeigt, jene knappen Darstellungen hier nicht zu benützen.

Allgemeines

Entwurf und Fabrikation von genauen Hochspannungswandlern haben mit einer Reihe von Schwierigkeiten zu kämpfen. Diese sind zum Teil durch die verhältnismässig grossen Isolationsabstände bedingt, welche zu grossen Magnetkörpern führen. Dazu kommen noch Forderungen wirtschaftlicher Natur; auch eine organische Eingliederung in eine Schaltanlage ist zu berücksichtigen.

Um die Bedeutung genauer Messwandler abschätzen zu können, seien zunächst einige allgemeine Begriffe in Erinnerung gerufen.

Durch Einschalten von Strom- und Spannungswandlern in einen Messkreis werden folgende Fehlergrössen in die Messung eingefügt (Fig. 1):

1. Durch Strom- und Spannungsfehler: Messfehler von gleicher Grösse und gleichem Vorzeichen.
2. Durch Winkelfehler: Veränderung des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung im Messkreis.

Fig. 2 zeigt, mit welchen Grössenordnungen von Messfehlern etwa gerechnet werden muss, wenn beispielsweise Wandler benützt würden, welche die

Bestimmungen der Eidg. Verkehrsprüfung erfüllen und in üblicher Weise abgestimmt sind. Die eingetragenen Werte stellen die Summe der Einzelfehler dar, die bei einer Einphasenmessung auftreten, jedoch ohne Berücksichtigung allfälliger

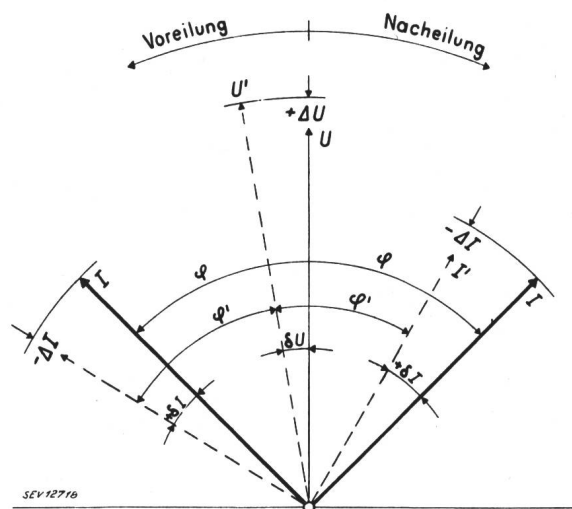


Fig. 1.

Wirkung der Messwandlerfehler

U, I, φ, P Sollwerte, wobei $P = U I \cos \varphi$
 U', I', φ', P' Istwerte $P' = U' I' \cos \varphi'$

Gesamte Messfehler in % bei einer Einphasenmessung:

bei Nacheilung $\approx \Delta U \% + \Delta I \% - 0,0291 (\delta U - \delta I) \tan \varphi$

bei Voreilung $\approx \Delta U \% + \Delta I \% + 0,0291 (\delta U - \delta I) \tan \varphi$

Sämtliche Einzelfehler sind einschliesslich ihres Vorzeichens einzusetzen, wobei $\delta_{vor} = +$, $\delta_{nach} = -$ gilt.

Fehler der angeschlossenen Messinstrumente. Sie sind auch gültig für Messungen im symmetrischen Dreiphasennetz, wenn zugleich genau gleichartige Messwandlerpaare benützt werden.

Bei Wahl von Wandlern nach Klasse 0,2 sinken die Fehler auf rund 40 %, bei Klasse 0,1 auf rund 20 % der Werte nach Fig. 2.

schriften umschriebenen Arbeitsbereich [von 80 % bis 120 % der Nennspannung sowie von $\frac{1}{4}$ (bzw. 15 VA) bis zu $\frac{1}{1}$ Bürde] annehmbar bleibt, aber nicht ausgenutzt werden kann wegen ungünstiger Diagrammlage. Durch einen Luftspalt passender Grösse, der in den Flusskreis eingefügt wird, lässt sich eine verbessernde Wirkung erzielen. Die Blindkomponente des Magnetisierungsstromes wird dadurch künstlich vergrössert. Wesentlich ist, dass der nötige Zuschuss an Leerlaufstrom sich praktisch proportional zur angelegten Spannung verhält. Die prozentualen ohmschen und induktiven Spannungsabfälle des zusätzlichen Magnetisierungsstromes bleiben dann für den gesamten Arbeitsbereich konstant; sie wirken als Parameter. Dass auf diese Weise recht genaue Wandler erzielt werden können, zeigt Fig. 4.

Die Daten stammen von einer Serie von 135-kV-Wandlern, die 125 VA nach Klasse 0,2 abzugeben hatten. (Uebersetzungsverhältnis $\frac{135\,000}{100} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$. Die

Sekundärspannung hätte hier etwas tiefer angesetzt werden dürfen. Bei etwas anderer Windungsabstimmung hätte diese Wandlerreihe auch Klasse 0,1 VDE genügt bei einer Belastung von 125 VA). Beachtlich ist auch, dass bei 135 kV angelegter Spannung, also der vollen verketteten Netzspannung, die Genauigkeit immer noch innerhalb Klasse 0,5 lag. Selbstverständlich kann mit einer sekundärseitig angeschlossenen Drosselspule passender Grösse die gleiche Wirkung erreicht werden, doch ist diese Lösung kostspieliger und dürfte gegenüber normal dimensionierten Wandlern kaum mehr einen wirtschaftlichen Vorteil bieten. Im Gegensatz hierzu stellt die Ausführung mit Luftspalt im Flusskreis eine ökonomische Lösung dar.

Diese Ausführung ist deshalb interessant, weil entgegen aller Erwartung auch ein grosser Magnetisierungsstrom eines Spannungswandlers günstig sein kann, sofern er auf alle übrigen Daten richtig abgestimmt wird.

Der Dreiphasen-Spannungswandler mit 5 Schenkeln, wovon 3 bewickelt sind, galt lange Zeit als den Anforderungen nicht genügend, wenn hohe Messgenauigkeit verlangt wird. Er wurde deshalb nicht allgemein angewandt. Im Gegensatz hierzu hatten wir diese Wandlerart mit jeder praktisch gewünschten Genauigkeit stets ausgeführt. Sie wurde u. a. schon für die Messeinrichtung der Kraftwerke Oberhasli A.-G. im Jahre 1928 für den 150-kV-Teil gewählt. Ihre Messergebnisse waren in Uebereinstimmung mit den gehegten Erwartungen; lediglich eine kleine Korrektur des Windungs-Uebersetzungsverhältnisses erwies sich als vorteilhaft. Der viel kritischere Teil, der Winkelfehler sowie die annähernde Gleichartigkeit der 3 Phasen unter sich, war durchaus in Ordnung. Diese Fünfschenkelwandler sind mit je 3 Stromwandlern in einem gemeinsamen Oelkasten montiert, eine Anordnung, welche auch für die uns im Jahre 1940 bestellten 2 neuen 150-kV-Gruppen beibehalten

wurde. Ueber die Stromwandler folgen weiter unten noch einige Angaben.

Vertragsgemäss waren die Spannungswandler für 200 VA Belastbarkeit pro Phase, Klasse 0,1

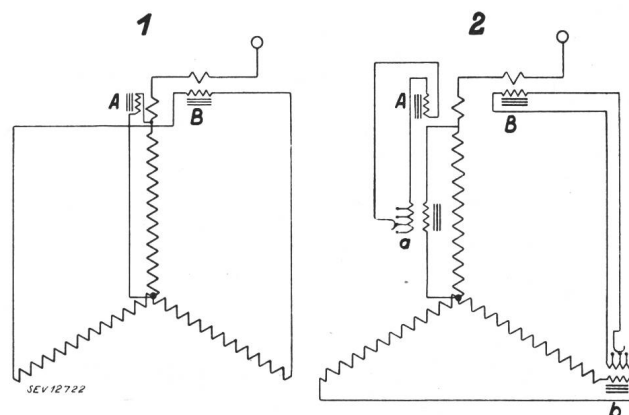


Fig. 5.

Uebersetzungs- und Winkelfehler-Korrektur eines Dreiphasenwandlers, Sekundärseite

A Uebersetzungskorrektur-Wandler

B Winkelfehlerkorrektur-Wandler

a Speisewandler für A

b Speisewandler für B

1 Anordnung mit fester Korrektur.

2 Anordnung mit Reguliermöglichkeiten der Korrekturglieder.

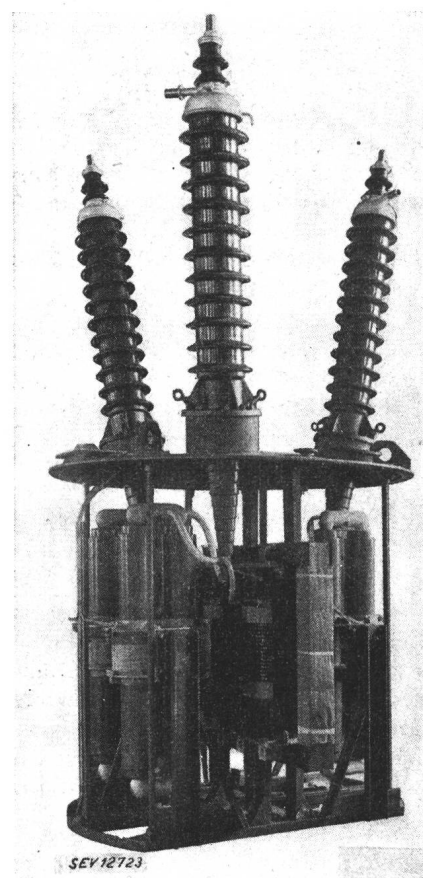


Fig. 6.

VDE, zu bemessen. Die genaue Abgleichung des Uebersetzungsverhältnisses sowie der Winkelfehler erfolgt durch Hilfswandler. In Fig. 5 ist das für eine Phase dargestellt.

Entsprechend den geringen Energiebeträgen, welche die Hilfswandler übertragen müssen, haben sie nur kleine Abmessungen. Die getroffene Anordnung gestattete bequeme Feineinstellung bei fertig montierten Messgruppen.

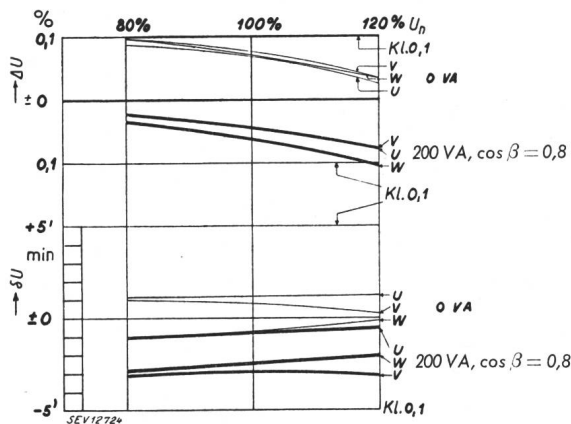


Fig. 7.

Dreiphasen-Spannungswandler 150 kV, Klasse 0.1

Messwerte der Spannungsfehler und Fehlwinkel. Die Unterschiede von ΔU 0 VA für die 3 Phasen liegen innerhalb der absoluten Messfehler.

Fig. 6 zeigt eine Messgruppe während der Montage (die Hilfswandler sind noch nicht montiert), Fig. 7 die Messdaten eines Spannungswandlers dieser Gruppe.

Stromwandler

Bekanntlich lassen sich Stromwandler in den mannigfachsten Ausführungsarten mit grosser Messgenauigkeit herstellen. Auch bei Stromwandlern

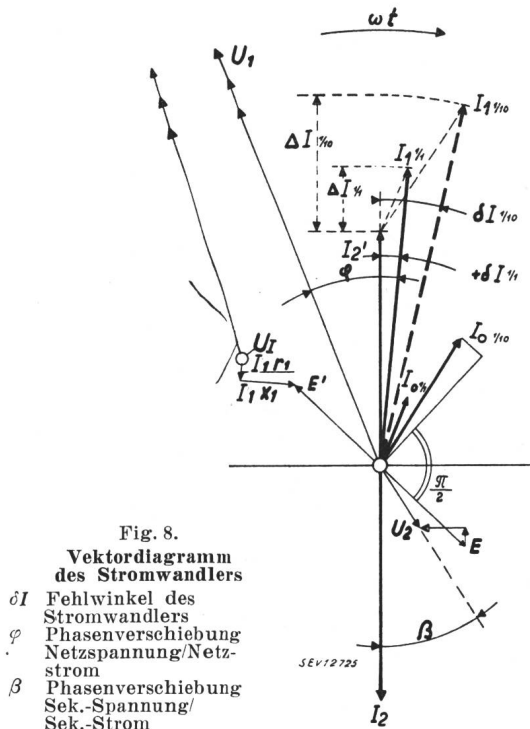


Fig. 8.

Vektordiagramm des Stromwandlers

- δI Fehlwinkel des Stromwandlers
- φ Phasenverschiebung Netzspannung/Netzstrom
- β Phasenverschiebung Sek.-Spannung/Sek.-Strom

Die Ströme sind in % des Sekundärstromes aufgetragen. Der Magnetisierungsstrom bei $\frac{1}{10}$ Nennstrom wird zufolge der Eigenart der Magnetisierungskurve in dem in Betracht kommenden Induktionsbereich grösser als bei $\frac{1}{10}$ Nennstrom. Die Stromfehler und Winkelfehler sind abhängig sowohl von $\cos \beta$, als auch von der Grösse des Primärstromes. Die gewählte Darstellung gilt für eine Sekundärbürde. Für andere Bürden ändern sich die Magnetisierungsströme nach Grösse und Richtung und damit auch die Stromfehler sowie die Fehlwinkel.

wirkt der unvermeidliche Magnetisierungsstrom als Störglied einer nach Grösse und Richtung genauen Uebersetzung. Die Impedanz der Sekundärwicklung kann dabei einen namhaften Teil der total induzierten Spannung aufzehren, so dass der Magnetisierungsstrom und damit auch die Wandlerfehler verhältnismässig gross werden. Das geht aus Fig. 8 hervor.

Ab 1933 und in den folgenden Jahren stellten wir für grosse Genauigkeitsansprüche für Hochspannungsnetze vorzugsweise Wandler mit nickellegierten Kernen her. Sie gaben beispielsweise bei 150 kV Betriebsspannung, 330 kV Prüfspannung, leicht bis zu 200 VA in Klasse 0.2. Konstruktiv waren es Schleifenwandler mit innen liegender Hochspannungswicklung, die vom ringförmigen Magnetkern umfasst wurden. Auf dem Magnetkern ist die Sekundärwicklung aufgewunden. Diese weist eine relativ sehr kleine Impedanz auf. Die Primärschleife wurde in ein mechanisch sehr festes Metallrohr verlegt und dort verkeilt. Der Rohrkörper ist quer zur Achse der Primärwindungen an einer Stelle aufgeschnitten und isoliert verschraubt, so dass darin keine Kurzschlussströme zirkulieren können, die sonst das Zustandekommen eines Stromes in der Sekundärwicklung verhindern würden. Diese Konstruktion hat sich als allen Anforderungen gewachsen erwiesen. Fig. 9 zeigt den aktiven Teil.

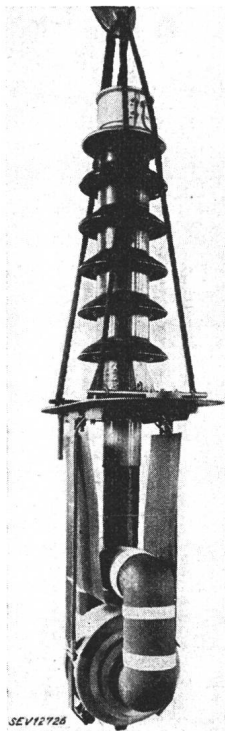


Fig. 9.

Aktiver Teil eines Schleifenstromwandlers

Kerne aus Mu-Metall, Permalloy und ähnlichen Stoffen mit ihren guten magnetischen Eigenschaften erfordern verhältnismässig wenig Amperewindungen. Da die Kraftwirkung zwischen 2 stromdurchflossenen Leitern oder Leiterbündeln vom Quadrat der AW -Zahlen abhängt, werden bei Verwendung von Nickellegierungen, zufolge der geringen AW -Zahlen, auf einfache Weise sehr kurzschlußsichere Wandler erreicht. Die Anwendung dieser Legierungen wird jedoch durch deren hohen Preis erschwert. Eine weitere Erschwerung liegt in der etwas umständlichen Fabrikation; die Kerne müssen nämlich nach der Herstellung einer sorgfältigen thermischen Behandlung unterworfen werden, denn nur dann werden die hohen Qualitäten dieser Legierungen erreicht. Es war deshalb gegeben, dass die Bemühungen weitergingen, auch

aus ausgewählten silizierten Blechen hochpräzise Stromwandler anzufertigen.

Fabrikatorisch einfach ist der Kernwandler mit runden Spulen. Er lässt sich gut abstützen und mit Isoliermaterialien aufbauen, welche einfach herzustellen sind. Hinderlich ist u. a. die relativ grosse Impedanz der Sekundärwicklung, die, wie bereits ausgeführt wurde, die zu induzierende Spannung vergrössert, wodurch die Fehler wachsen. Bei hohen Spannungen wird die Länge des Flussweges ohnehin etwas gross, dem mit Steigerung der Primär- AW -Zahl nur bis zu einem gewissen Masse begegnet werden kann, wenn der Wandler nicht allzu sehr kurzschlussgefährdet werden soll. Es ist deshalb gar nicht leicht, auf dieser Basis einen Stromwandler für 150 kV etwa in Klasse 0,2 zu erreichen. Einen interessanten Beitrag zum Problem des genauen Stromwandlers für hohe Spannungen ohne Zuhilfenahme von Kunstsaltungen liefert der Haefely-Stromwandler mit Doppelwicklung, d. h. mit 2 bewickelten Säulen. Die verbessernde Wirkung ist überraschend gross. Die Fensterbreite des Eisenkörpers wird hier nur unwesentlich grösser als bei der bisherigen bekannten Ausführung mit einer bewickelten Säule. Der Raumbedarf im Oelgefäss wird allerdings etwas grösser. Dafür steht jetzt die doppelte Leistung zur Verfügung und, was noch viel wesentlicher ist, die Fehler sinken zugleich auf die Hälfte; denn jetzt muss ja nur noch die halbe Länge des ursprünglichen Flussweges von den Amperewindungen einer Säule bestritten werden. Fig. 10 zeigt die erzielten Messresultate an derartigen 150-kV-Wandlern, die für 150 VA in Klasse 0,2 ausgeführt wurden.

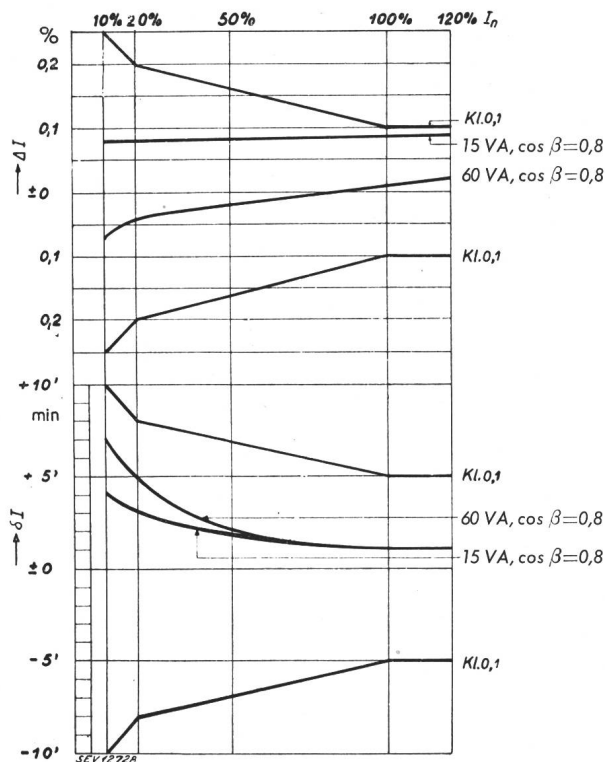


Fig. 10.

Messdaten eines 150-kV-Stromwandlers mit Doppelwicklung

Kehren wir nun zu den Messgruppen von 150 kV der Kraftwerke Oberhasli zurück. Dort sind aus baulichen Gründen je 3 Schleifen-Stromwandler eingebaut, die mit Mess- und Relaiskern ausgerüstet sind. Ihre Hochspannungswicklung ist in je 2 nebeneinander gelagerte Kondensatordurchfüh-

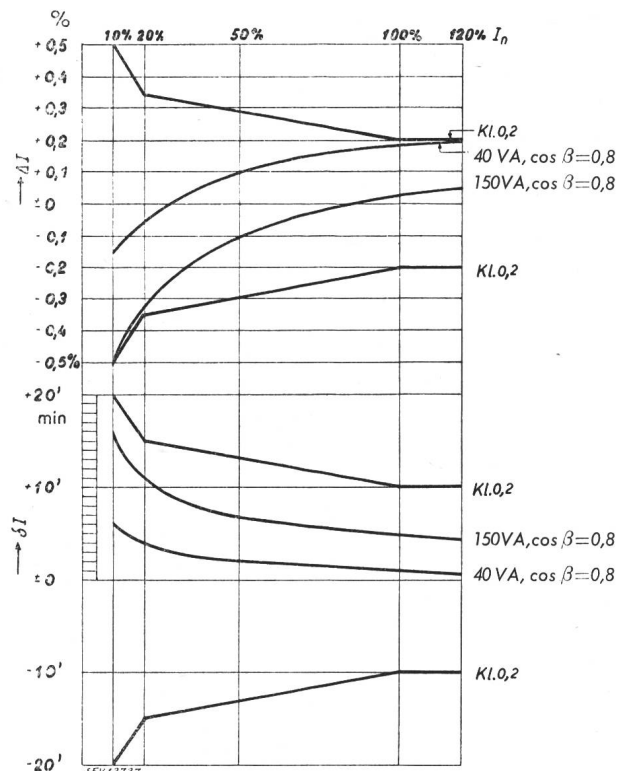


Fig. 11.

Messdaten eines 150-kV-Stromwandlers Klasse 0,1

rungen eingezogen und satt verkeilt. Die Kondensator-Durchführungen aus Hartpapier werden in ihrem Mittelteil durch kräftige Metallbriden zusammengehalten. Für den Messkern, der 60 VA in Klasse 0,1 abgibt, wurde Mu-Metall zum Aufbau benutzt, das trotz der kriegsbedingten Schwierigkeiten noch rechtzeitig aus dem Ausland beschafft werden konnte.

Zwecks Feinabgleich der Uebersetzung ist im Primärkreis, parallel zu den Stromwandlerpolen, eine passend dimensionierte Impedanz angeschlossen. Durch diese fliesst ein Partialstrom von weniger als 0,5 %. Sie weist annähernd lineare Charakteristik auf und besitzt ausserdem mindestens die gleiche thermische Sicherheit, wie die Stromwandler-Primärwicklung. Mit den übrigen Hilfseinrichtungen, nämlich Schutzwiderstand und Parallel-Funkenstrecke, ist sie zu einem mechanischen Ganzen vereinigt, das oben auf dem Klemmenkopf der Hochspannungs-Durchführungen zugänglich angebracht ist.

Die an einem derartigen Messkern erzielten Daten zeigt Fig. 11.

Neuerdings hat sich auch die Einphasen-Messgruppe eingeführt, welche aus einer Kombination von Strom- und Spannungswandler des Stützertyps entstand.

Fig. 12 zeigt einen normalen 50-kV-Einphasen-Spannungswandler des Stützertyps mit einpoliger Erdung der Hochspannungswicklung, daneben eine Messgruppe 50 kV. Beide sind ölgefüllt. Der Spannungswandler ist als Manteltyp ausgebildet; er ist im untern Teil des Kastens montiert. Darüber ist der Stromwandler angeordnet, ebenfalls ein Mantel-

sprechenden Messdaten wurden mir von Oberingenieur Aemmer von den Kraftwerken Oberhasli in freundlicher Weise zur Verfügung gestellt.

Die Bemühungen zur Herstellung äusserst genauer Messwandler finden also, auch unter diesem Gesichtswinkel betrachtet, ihre Berechtigung.

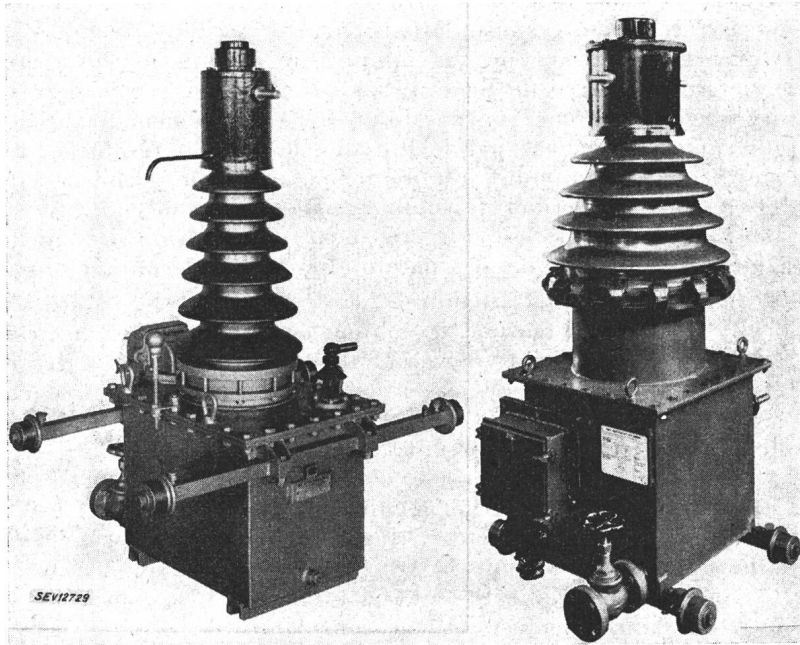


Fig. 12.

Links: 50-kV-Einphasen-Spannungswandler

Rechts: 50-kV-Messgruppe

typ mit sehr gut verkeilten Wicklungen. Er besitzt einen Mess- und einen Relaiskern.

Spannungswandler	$\frac{50\,000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$	70 VA 0,2
Stromwandler, Messkern	200/5	30 VA 0,2
Stromwandler, Relaiskern	250/5	40 VA 1,0

therm. Grenzstrom 16 kA; dyn. Grenzstrom 32 kA.

Der Stromwandler kann für jede praktisch gewünschte Leistung und Genauigkeit bis Klasse 0,2 sowie beliebige Kernzahl ausgeführt werden. Einzig die Bauhöhe des Unterteils wird dadurch beeinflusst.

Der Bau hochpräziser Messwandler für Energiemessungen in Hochleistungsnetzen wäre wenig gerechtfertigt, solange nicht die Zähler-Industrie Apparate mit etwa ähnlichen Genauigkeitsgraden herzustellen vermöchte. Auch hierzu mag eine konkrete Angabe aufschlussreich sein. Die Kraftwerke Oberhasli haben zum Anschluss an die 150-kV-Messgruppen Präzisionszähler eingebaut, welche bei der Prüfung durch den SEV bemerkenswert gute Daten zeigten. Aus 40 verschiedenen Messungen bei den unterschiedlichsten Belastungsverhältnissen, die an zwei derartigen Zählern ausgeführt wurden, ergibt sich ein mittlerer Fehler von nur 0,15 %, wobei alle Abweichungen vom Nullwert dem absoluten Betrage nach gezählt sind. Die ent-

Vergrösserte Messfehler können auch auftreten, wenn 2 an und für sich genaue Stromwandler sekundär parallel geschaltet werden, während ihre Primärseiten von verschiedenen grossen frequenzgleichen Strömen durchflossen werden. Dabei ist es gleichgültig, ob diese Parallelschaltung direkt erfolgt, d. h. galvanisch, oder aber durch induktive Kopplung über einen sogenannten Summenstromwandler. In jedem Fall muss sowohl der schwach, als auch der stark belastete Stromwandler eine Spannung aufbringen, welche derjenigen an der gemeinsamen Bürde entspricht, wodurch vergrösserte Fehler auftreten können.

Für einen derartigen Anwendungsfall müssen deshalb meistens speziell bemessene Wandler verwendet werden, wenn sie genauer formulierten Präzisionsansprüchen genügen müssen.

Bei *Spannungswandlern* bewirken primärseitig vorgeschaltete Schutzwiderstände sehr erhebliche Fehlervergrösserungen, welche in der Regel nur durch besondere Massnahmen auf ein erträgliches Mass zurückgeführt werden können.

Auf diese Verhältnisse sei hier wenigstens andeutungsweise noch hingewiesen.

Adresse des Autors:

J. Fischer, Vizedirektor der Emil Haefeli & Cie. A.-G., Basel.