

Ölisolierte magnetische Spannungs- und Stromwandler

Dipl. Ing. Johannes Rickmann, Emil Haefely & Cie AG Basel, Kunden Service

Grundlage

Ausgehend von der Anwendung der magnetischen Wandler wird über das allgemeine Transformatorersatzschaltbild die Theorie der Wandler erläutert. Nach einem kurzen Überblick über die Ausführungsformen werden die elektrischen und magnetischen Auslegungskriterien näher dargelegt.

Anschliessend an eine Übersicht der Prüfmethode (elektrisch und magnetisch) werden die zukünftigen Entwicklungen für ölisolierte magnetische Wandler aufgezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- 1. Stromwandler**
 - 1.1 Das Transformatorersatzschaltbild des Stromwandlers**
 - 1.2 Auslegungskriterien von Stromwandlern**
 - 1.2.1 Magnetische Auslegungskriterien**
 - 1.2.2 Elektrische Auslegungskriterien**
 - 1.3 Ausführungsformen von Stromwandlern**
- 2. Induktive Spannungswandler**
 - 2.1 Das Transformatorersatzschaltbild des Spannungswandlers**
 - 2.2 Auslegungskriterien von Spannungswandlern**
 - 2.2.1 Magnetische Auslegungskriterien**
 - 2.2.2 Elektrische Auslegungskriterien**
 - 2.3 Ausführungsformen von Spannungswandlern**
- 3. Prüfmethoden**
- 4. Zukünftige Entwicklungen für ölisierte magnetische Wandler**
- 5. Zusammenfassung**

Einleitung

Elektrische Energie ist ein sehr wichtiger Faktor unserer Gesellschaft. Da eine unterbrechungsfreie Energieversorgung in vielen Fällen von grosser Bedeutung ist, ist es notwendig, Strom und Spannung kontinuierlich zu messen, um die nötigen Informationen über den Betriebszustand der elektrischen Anlagen und Netze zu erhalten.

Diese Informationen sind zum einen während des Normalbetriebes zur Messung und Verrechnung nötig, zum anderen, im Ueberlast- oder Kurzschlusszustand, für den Schutz der Anlagen.

Induktive Wandler transformieren das Primärsignal (Strom oder Spannung) in ein Sekundärsignal, das technisch weiterverarbeitet werden kann. Sie sorgen weiterhin für eine galvanische Trennung und elektrische Isolierung zwischen beiden Signalen.

Neben diesen Aufgaben gibt es noch weitere mess- und systemtechnische Anforderungen:

- hohe Abbildungstreue
- verzögerungsfreie Uebertragung
- hohe Zuverlässigkeit
- gute EMV-Festigkeit

Im weiteren wird die Umsetzung dieser Anforderungen durch induktive Strom- und Spannungswandler näher erläutert. Es werden über das Transformator-Ersatzschaltbild die magnetischen und des weiteren die elektrischen Auslegungskriterien dargelegt und Ausführungsformen aufgezeigt.

Aus den Prüfmethode für Routine- und Typenprüfungen, wird als Beispiel die Genauigkeitsprüfung kurz erläutert, da sie neben der Teilentladungsmessung die grösste Genauigkeit erfordert.

Mögliche weitere Entwicklungen für ölisierte magnetische Wandler gehen, da sich das transformatorische Prinzip seit ca. 100 Jahren bewährt, immer stärker in höhere Zuverlässigkeit und Anpassung an die veränderten Umweltbedingungen.

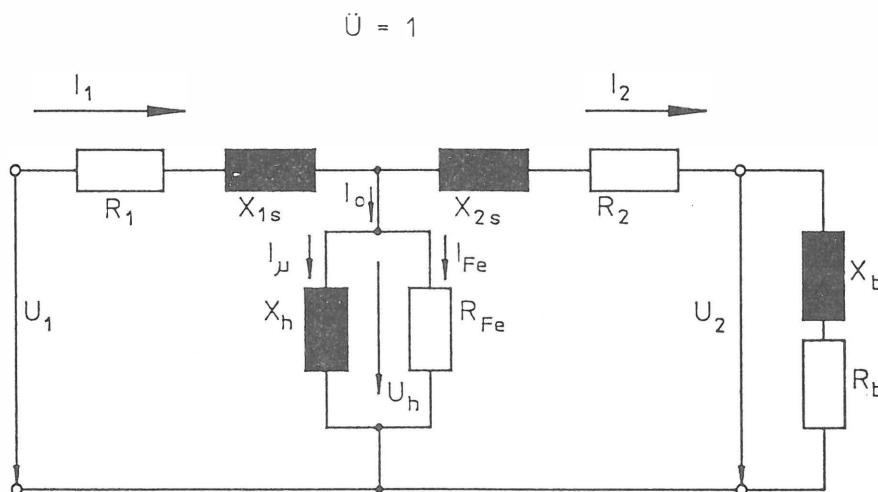
1. Stromwandler

Die heute gebräuchlichen Stromwandler arbeiten nach dem transformatorischen Prinzip. So betrachtet ist der induktive Stromwandler ein im Kurzschluss betriebener Transformator.

Durch das transformatorische Prinzip lassen sich die Bedingungen der galvanischen Trennung und der Untersetzung des Primärsignales auf ein messtechnisch verarbeitbares Niveau mit einer hohen Abbildungstreue, verzögerungsfreier Uebertragung, hoher Zuverlässigkeit und guter EMV-Festigkeit lösen.

1.1 Das Transformatorersatzschaltbild des Stromwandlers

Das Ersatzschaltbild des induktiven Stromwandlers kann unter der Annahme einer Uebersetzung 1:1 wie folgt dargestellt werden (Figur 1).

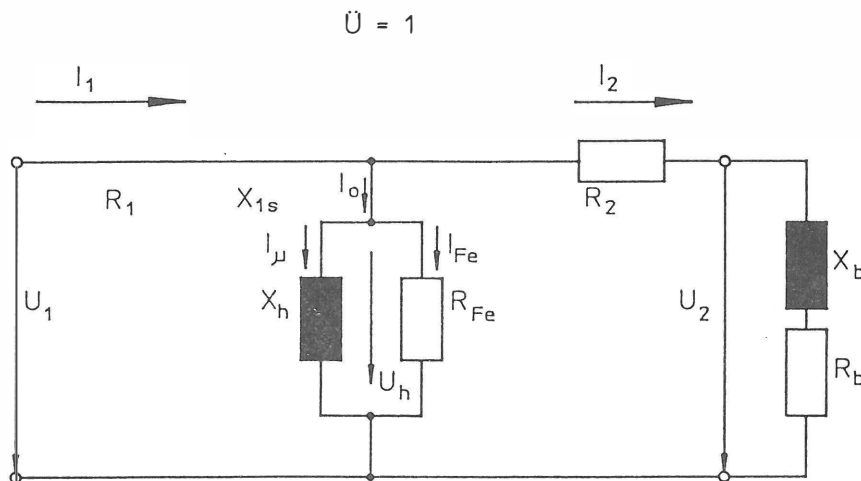


Figur 1
Ersatzschaltbild des
Stromwandlers

Ersatzschaltbild des Messwandlers

- I_1, U_1 Primaerstrom bzw. Primaerspannung (zu messende Groesse)
- R_1 Wirkwiderstand der Primaerwicklung
- X_{1s} Streublindwiderstand der Primaerwicklung
- X_h Magnetisierungs-Widerstand
- R_{Fe} Eisen-Verlustwiderstand
- R_2 Wirkwiderstand der Sekundaerwicklung
- X_{2s} Streublindwiderstand der Sekundaerwicklung
- R_b Buerdenwiderstand, Wirkanteil
- X_b Buerdenwiderstand, Blindanteil
- I_2, U_2 Sekundaerstrom bzw. Sekundaerspannung
- I_0 Leerlaufstrom
- I_μ Magnetisierungsstrom
- I_{Fe} Eisenverluststrom
- U_h Transformator-Hauptspannung

Da der Primärstrom als ein vom Netz eingepprägter Strom betrachtet werden kann, werden die primären Impedanzen für die Ermittlung des Uebertragungsverhaltens vernachlässigt. Beim Stromwandler mit gleichmässig bewickeltem Ringkern und konzentrischem primären Innenleiter kann die sekundäre Streureaktanz ebenfalls vernachlässigt werden, wodurch sich das Ersatzschaltbild wie folgt vereinfacht (Figur 2)



Figur 2
Vereinfachtes Ersatzschaltbild

Dieses Ersatzschaltbild bietet eine einfache aber ausreichende Grundlage zur Berechnung von Stromwandlern im eingeschwungenem Zustand.

Aus dem Induktionsgesetz folgt:

$$U(t) = n \cdot \frac{d \Phi(t)}{dt} = n \cdot A \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (1)$$

mit

n	=	Windungszahl
Φ	=	Fluss
A	=	Eisenquerschnitt
B	=	Induktion

Weiterhin gilt

$$U(t) = i_s(t) \sqrt{(R_b + R_2)^2 + (X_b)^2} \quad (2)$$

mit

$i_s(t)$	=	Sekundärstrom
R_2	=	Wicklungswiderstand
R_b	=	Bürdenwiderstand
X_b	=	Bürdenreaktanz

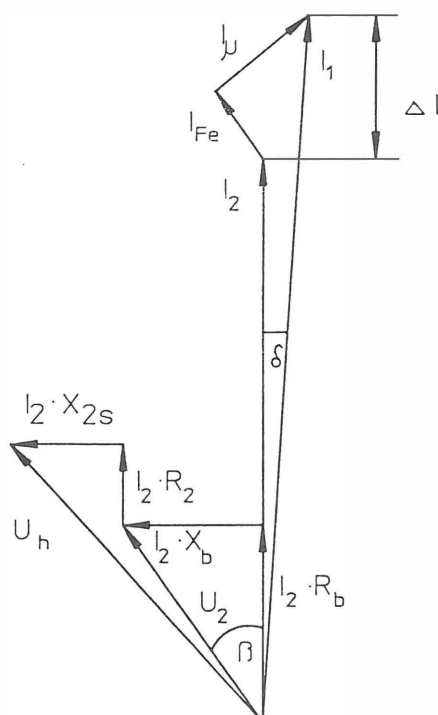
Für den Sekundärstrom gilt:

$$i_s(t) = \frac{i_p(t)}{k_n} \quad (3)$$

mit

$i_p(t)$	=	Primärstrom
k_n	=	Uebersetzungsverhältnis

Figur 3 zeigt das Vektordiagramm des Stromwandlers, mit dessen Hilfe Betrags- und Winkelfehler leicht berechnet werden können.



Figur 3
Vektordiagramm des
Stromwandlers

1.2 Auslegungskriterien für Stromwandler

Aus dem Ersatzschaltbild (Fig. 2), dem Vektordiagramm (Fig. 3) und der Fehlerdefinition lassen sich jetzt die magnetischen Auslegungskriterien herleiten, wobei das transiente Verhalten des Stromwandlers unberücksichtigt bleiben soll.

1.2.1 Magnetische Auslegungskriterien

Mit einer Erweiterung der Gleichung (2) wie folgt

$$U = f_i \cdot I \cdot Z \quad (4)$$

mit:

$$\begin{aligned} f_i &= \text{Ueberstromfaktor} \\ Z &= \text{Gesamtbürde} \\ I &= \text{Nennstrom} \end{aligned}$$

und mit Gleichung (1) umgeschrieben zu

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi \cdot f \cdot n \cdot A} \quad (5)$$

bzw.

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi \cdot f \cdot n \cdot B} \quad (6)$$

mit

$$\begin{aligned} A &= \text{Querschnitt} \\ f &= \text{Frequenz} \\ n &= \text{Windungszahl} \end{aligned}$$

können die Stromwandlerkerne dimensioniert werden.

Die maximale Induktion B_{\max} ergibt sich mit den Anwendungen und den geforderten Ueberstromfaktoren.

Die beiden generellen Anwendungen sind Mess- und Schutzzwecke mit unterschiedlichen Anforderungen. Während für Messkerne eine hohe Genauigkeit und zum Schutz der angeschlossenen Messeinrichtungen Sättigung des Kernes bei Überströmen gefordert wird, sind die Anforderungen an die Genauigkeit für Kerne zu Schutzzwecken geringer, jedoch darf bis zum Nennüberstromfaktor keine Sättigung auftreten, um ein möglichst verzerrungsfreies Signal zu liefern.

Der Fehler im Nennbereich wird ,wie aus Figur 2 ersichtlich, definiert durch:

$$\varepsilon = \frac{I_1 - k_n I_1}{I_1} = \frac{I_0}{I_1} \quad (7)$$

Der Fehler wird also hauptsächlich durch den Leerlaufstrom beeinflusst. Er soll im Nennbereich möglichst klein sein, jedoch beim Nennüberstromfaktor für Messkerne mindestens 15 % (VDE) bzw. 10 % (IEC) betragen.

Der Winkelfehler definiert sich dabei wie folgt:

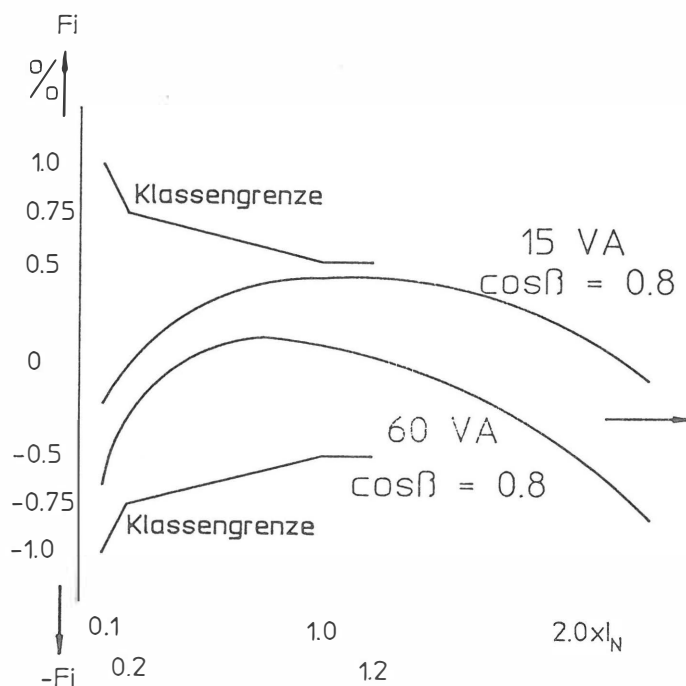
$$\delta_i = \arctan \frac{-I_{Fe} \sin \beta + I_{\mu} \cos \beta}{I_2 + I_{Fe} \cos \beta + I_{\mu} \sin \beta} \quad (8)$$

Der Fehler für Schutzkerne ist Ueberstrombereich durch den Gesamtfehler auch "Composite"-Fehler definiert.

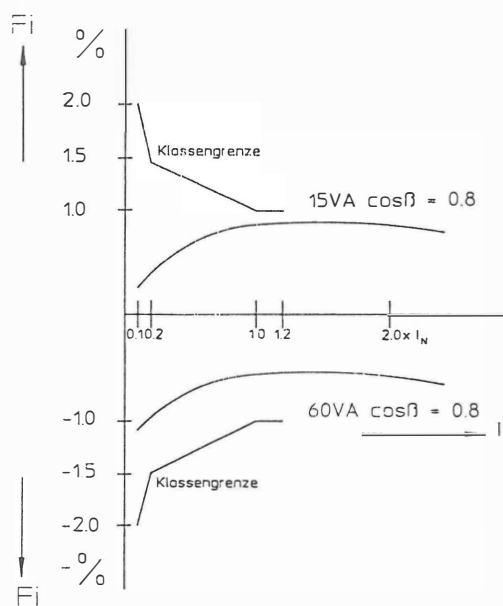
$$\varepsilon_C = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int [(k_n I_2(t) - I_1(t))^2 dt]}}{I_1} \quad (9)$$

Er darf für 5P-Kerne nicht mehr als 5 % und für 10 P-Kerne nicht mehr als 10 % betragen.

Die Figuren 4 und 5 zeigen Fehlergrenzen und typische Fehler-Kurven für Messkerne nach Klasse 0,5 (Fig. 4) und Schutzkernklasse 5P (Fig. 5).



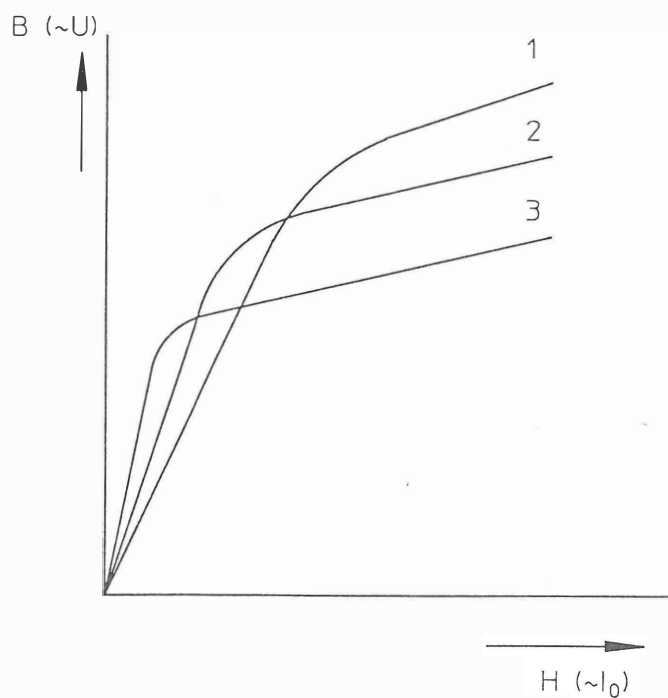
Figur 4
Fehlerverlauf für einen
Messkern Klasse 0,5



Figur 5
Fehlerverlauf für einen
Schutzkern Klasse 5P

Aus den beschriebenen Anforderungen für Mess- bzw. Schutzkerne können die Kriterien für die Auswahl des Kernmaterials hergeleitet werden.

Messkerne benötigen ein Material mit hoher Permeabilität und damit kleinerem Magnetisierungsstrom und geringerer Sättigungsinduktion, Schutzkerne benötigen eine hohe Sättigungsinduktion, jedoch geringere Permeabilität.



Figur 6
 U/I_0 Kennlinien verschiedener
Kernmaterialien

- 1 : Silizium-legiertes Eisen
- 2 : Nickel-legiertes Eisen
- 3 : Nickel-legiertes Eisen (gesteigerter Nickelanteil)

Figur 6 zeigt die B/H- bzw. U/Io-Kernlinien dreier Materialien. Mit steigender Permeabilität von 1 nach 3 sinkt die Sättigungsinduktion; jedoch die Kosten für das Kernmaterial steigen überproportional.

Mit den Gleichungen 1-9 und den Magnetisierungskernlinien der Materialien hat man nun Instrumente an der Hand, die Stromwandler magnetisch auszulegen.

1.2.2 Elektrische Auslegungskriterien

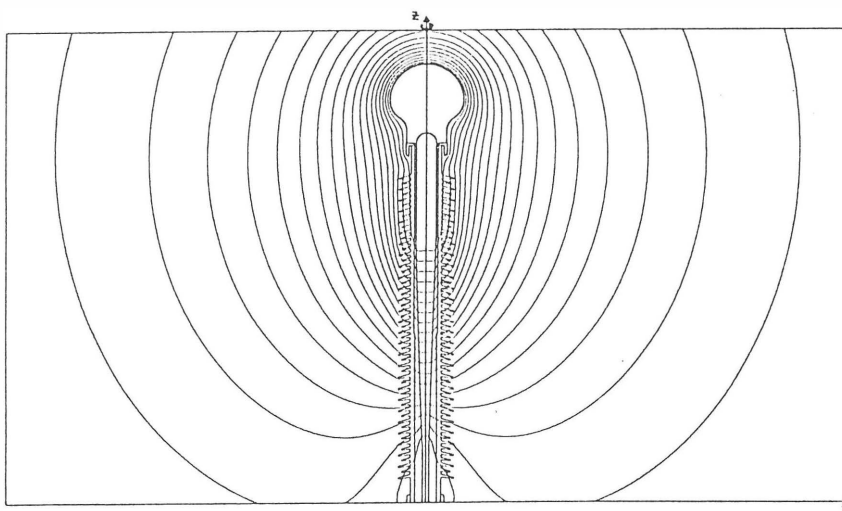
Die elektrischen Auslegungskriterien für Wandler werden durch die Nenn- und Prüfbedingungen bestimmt. Man unterscheidet dabei die innere (Oel-Papier) Isolation und die äussere (Luft) Isolation.

Die Festigkeit der äusseren Isolation wird neben den atmosphärischen Bedingungen, die nicht beeinflussbar sind, durch die Schlagweite bestimmt.

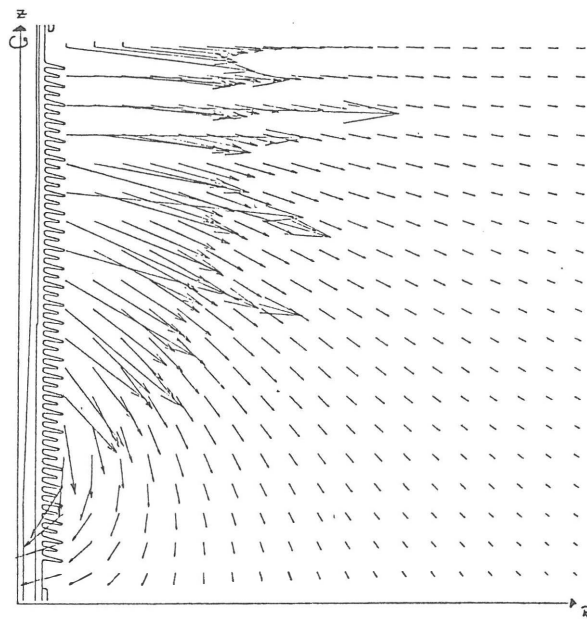
Neben dem Einsatz der feingesteuerten Durchführung, die eine Schlagweitenreduzierung erlaubt, ist auch die Ausformung der Kittflansche von Bedeutung.

Der Einsatz von Feldberechnungsprogrammen für rotationssymmetrische Felder mit beliebigen Isolierstoffübergängen, führte zu einer Optimierung der Durchführung, der Schlagweite und des Durchmessers des Porzellan.

Die folgenden Figuren zeigen als Beispiel die Äquipotential-Linien (Fig. 7) sowie Richtung und Grösse der Feldstärkenvektoren (Figur 8) im äusseren Feld eines 245 kV Stromwandlers.



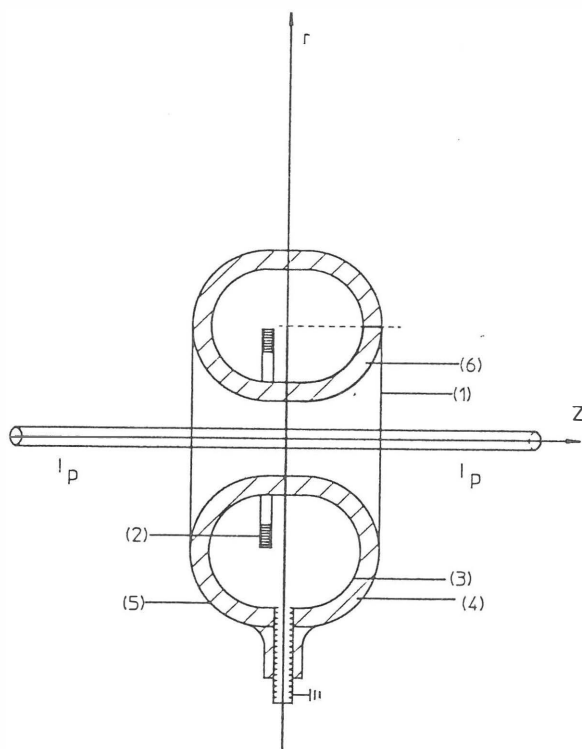
Figur 7
Äquipotentiallinien im äusseren
Feld eines 245 kV
Stromwandlers



Figur 8
Feldstärkevektoren im äusseren
Feld eines 245 kV
Stromwandlers

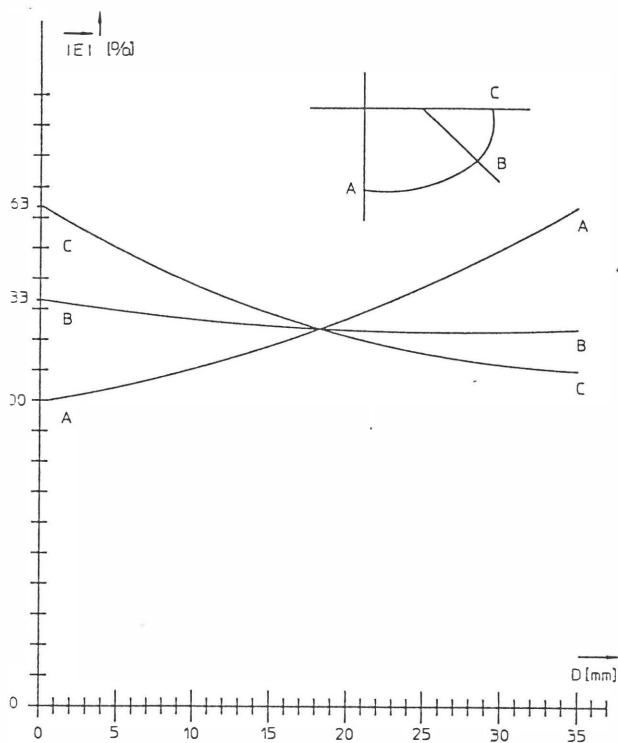
Für die optimale Auslegung der Öl-Papier-Isolation wird ebenfalls das Feldberechnungsprogramm herangezogen. Aufgrund der komplizierten Form des Kopfteiles eines Kopfstromwandlers, und der Einschränkung auf rotationssymmetrische Felder, sind hier jedoch mehrere Rechengänge mit verschiedenen Ausschnitten nötig.

Figur 9 zeigt die schematische Darstellung des Torusaktivteiles eines Kopfstromwandlers.



Figur 9
Schnitt durch den Kopfteil eines
Stromwandlers
1) Aktivteil
2) Ringkern
3) Einbauschale
4) Isolation
5) Hochspannungsbelag

Der Feldstärkerverlauf für den Ausschnitt 6 zeigt Figur 10 an den Stellen A, B, C.



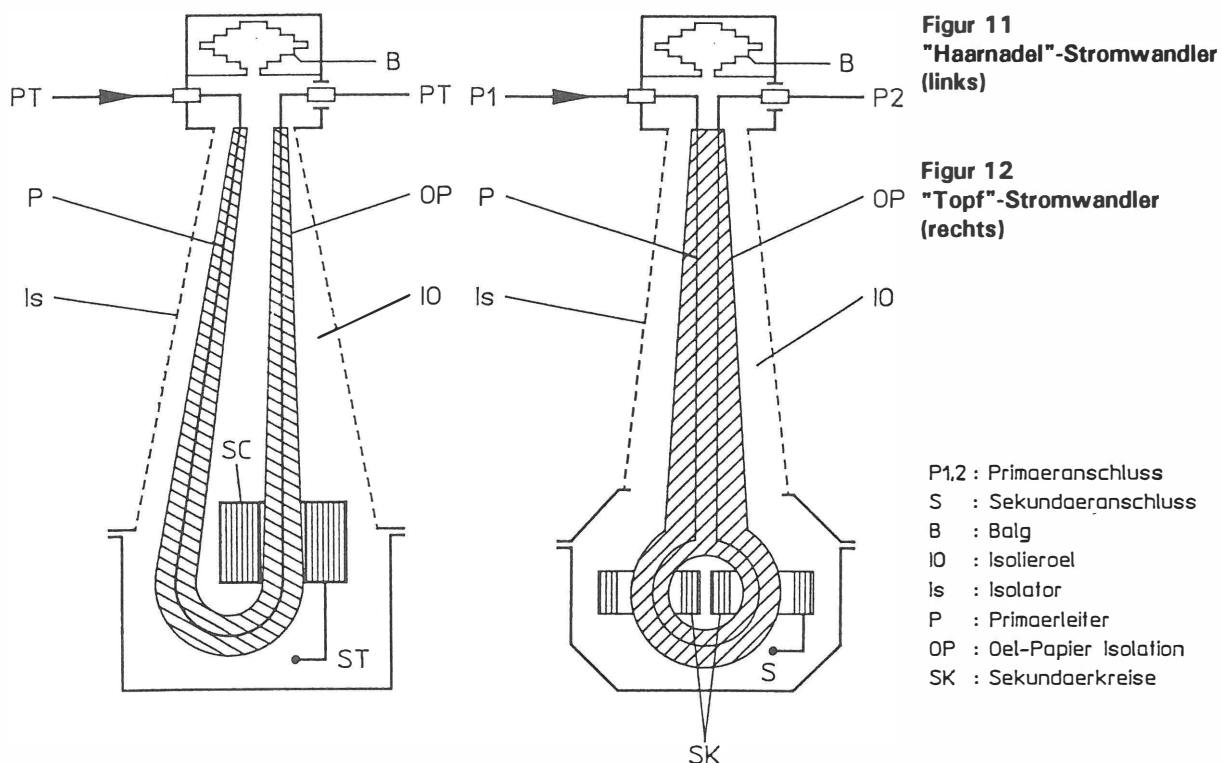
Figur 10
Feldstärkerverlauf im Ausschnitt
6 (Figur 9)

Die dielektrische Auslegung und Optimierung von induktiven Wandlern für eine möglichst Ausführung, ist heute oft der aufwendigste Teil der Dimensionierung. Trotz des Einsatzes von rechnergestützten Feldberechnungsprogrammen ist der Prüfaufwand sehr hoch.

1.3 Ausführungsformen von Stromwandlern

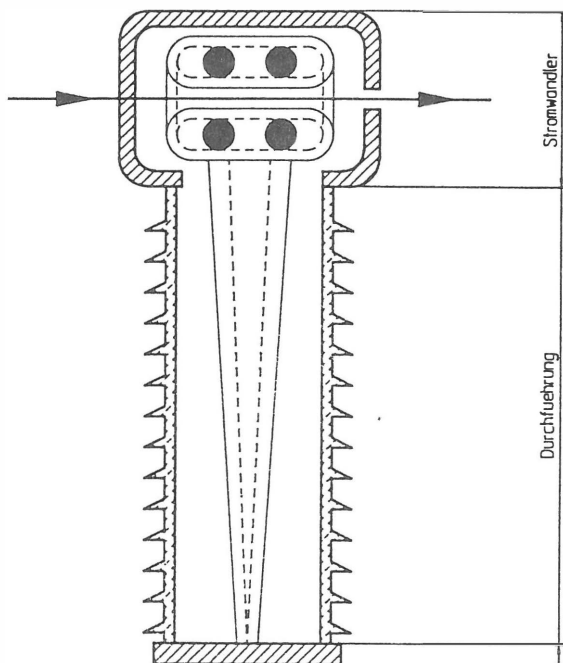
Die ausgeführten technischen Lösungen von induktiven Stromwandlern lassen sich in 2 Gruppen aufteilen, die "High-reactance"- und die "Low-reactance"-Typen.

In die Gruppe der High-reactance" Stromwandler fallen die "Haarnadel"- (Fig. 11) und die "Topf"-Ausführung (Fig. 12).



Infolge der hohen Primärinduktivität dieser beiden Ausführungsformen treten durch Kurzschlussströme hohe Kräfte zwischen den Leitern auf, die die Isolation beschädigen können. Steile Spannungsänderungen der Primärspannung können ebenfalls die Isolation beschädigen oder zu einem Ueberschlag von einem Primäranschluss über den Kopf zum anderen Anschluss führen.

Diese Nachteile vermeidet der "Low-reactance"-Typ (Fig. 13).

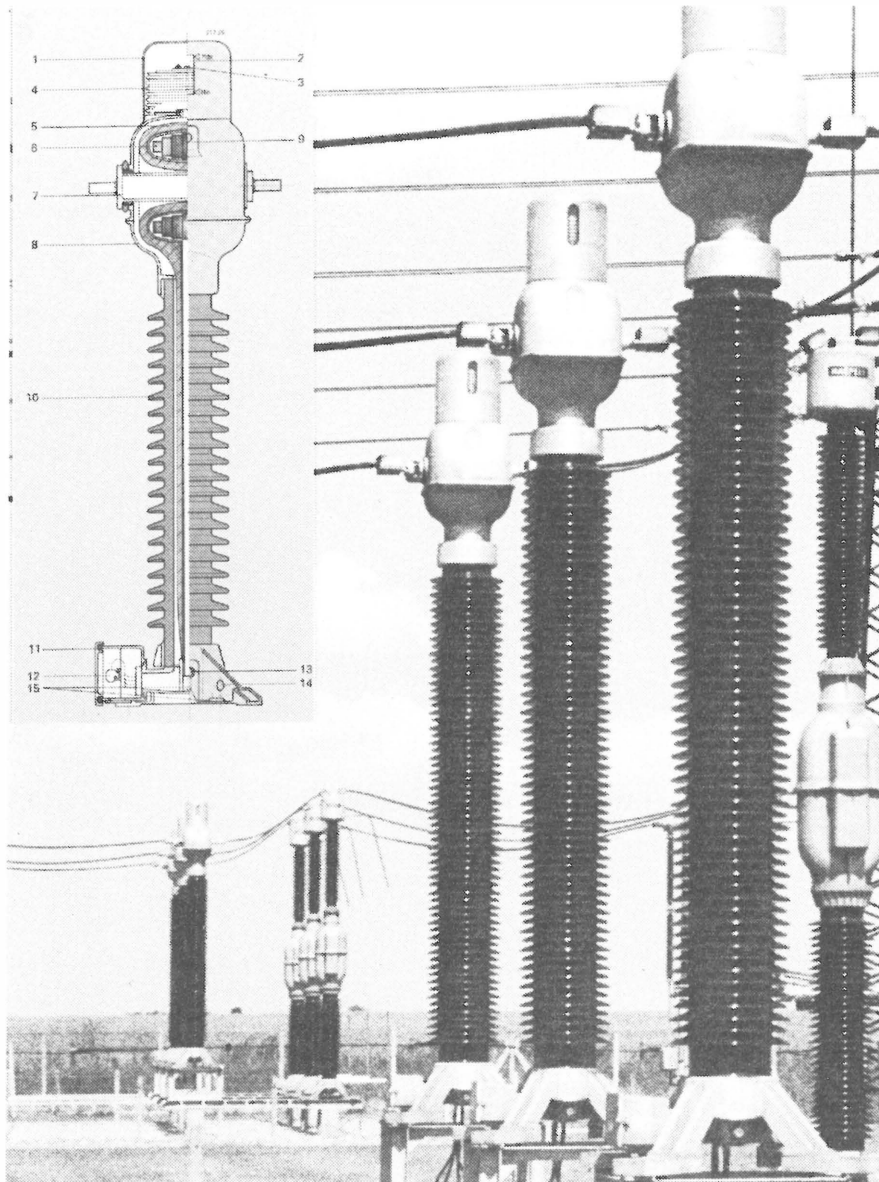


Figur 13
Kopfstromwandler

Der Kopfstromwandler hat durch seinen kompakten Aufbau eine sehr kleine Primärinduktivität wodurch er als sehr kurzschlussfest betrachtet werden kann.

Im weiteren wird nur noch der Kopfstromwandler betrachtet, da dies die heute übliche Bauweise ist.

Das folgende Bild (Fig. 14) zeigt den inneren Aufbau eines Haefely-Kopfstromwandlers mit seiner technischen Ausführung als 420 kV-Stromwandler.



Figur 14
Schnittbild und Ausführung
eines Kopfstromwandlers

Die Haube (1) dient zum Schutz des nichtrostenden Metallfaltenbalges (4) gegen äussere Einflüsse und enthält ebenso das Sichtfenster für die Balgstandanzeige (2).

Der Metallfaltenbalg kompensiert die Aenderungen des Oelvolumens bei Temperaturschwankungen und gewährleistet gleichzeitig den hermetischen Luftabschluss des Apparates.

Der der Hochspannungsisolation (5) angepasste Kopf (8) ist aus Aluminiumguss und trägt die Primärwicklung (7), die Schale mit der Isolation und den Porzellanisolator (10.)

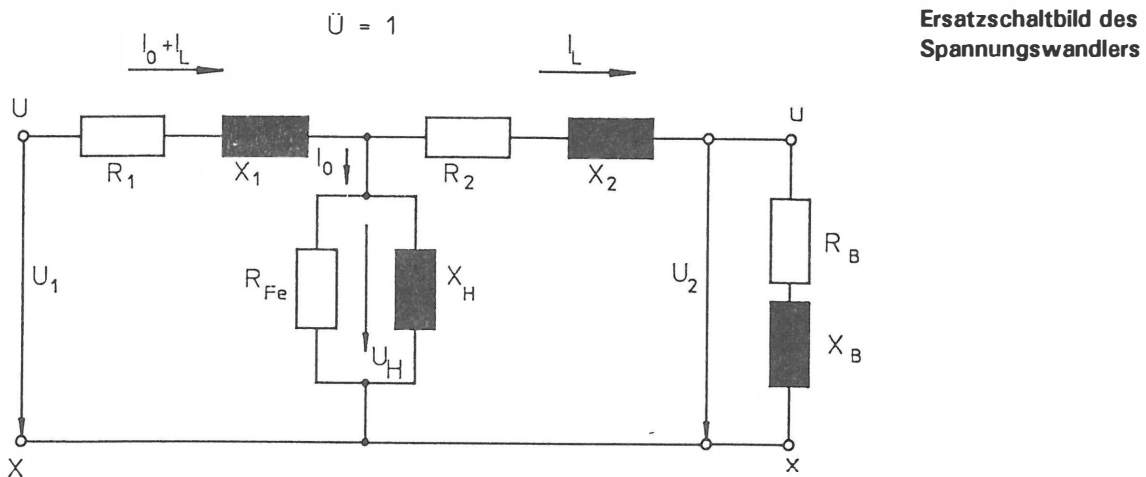
Die Sekundärwicklungen und Kerne (6) sind zum Schutz gegen Fehler der Isolation und zur besseren EMV-Festigkeit in die Schale eingebaut; ihre Ausleitungen gehen durch das Durchführungsrohr zum Sockel und werden durch eine Mehrfachdurchführung in den Klemmenkasten (11) geleitet.

2. Induktive Spannungswandler

Der induktive Spannungswandler kann als schwach belasteter Transformator betrachtet werden. Der Spannungswandler hat im Gegensatz zum Stromwandler nur einen Eisenkern, auf dem die Primärwicklung und je nach Anforderung mehrere Sekundärwicklungen aufgebracht sind.

2.1 Das Transformatorersatzschaltbild des Spannungswandlers

Das Ersatzschaltbild des Spannungswandlers zeigt sich dabei wie folgt (Fig. 15)



Im Gegensatz zum Stromwandler können hier die Primärreaktanzen und die sekundäre Streureaktanz nicht vernachlässigt werden.

Für die Sekundärspannung gilt:

$$U_2(t) = \frac{f_v U_1(t)}{k_n} \quad (10)$$

mit:

$U_1(t)$ = Primärspannung
 $U_2(t)$ = Sekundärspannung
 k_n = Uebersetzungsverhältnis
 f_v = Spannungsfaktor

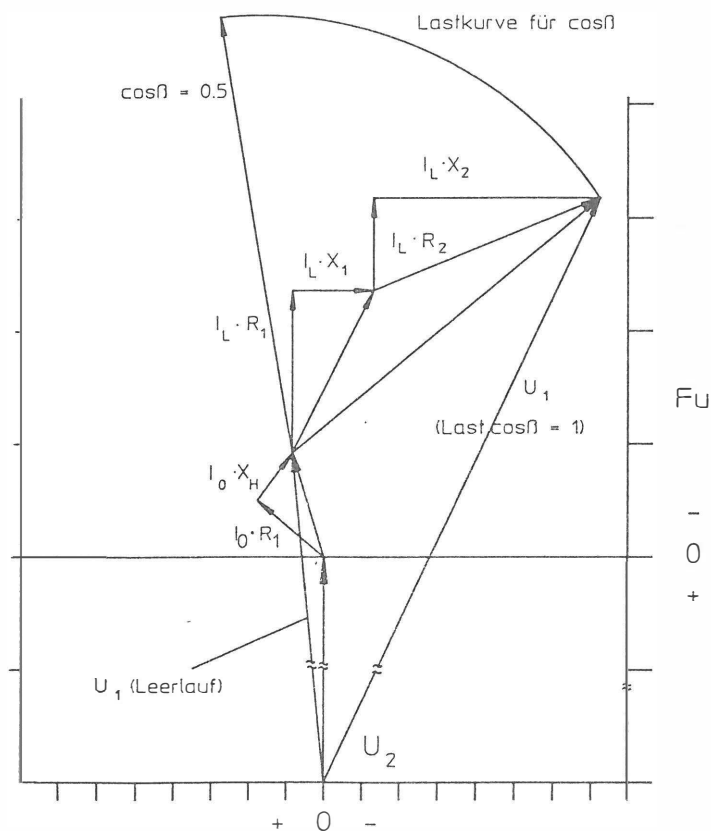
und

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

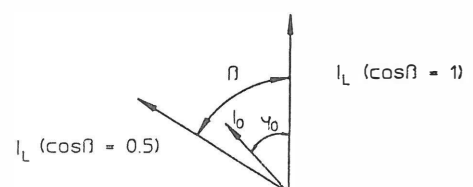
mit:

n_1 = Windungszahl der Primärwicklung
 n_2 = Windungszahl der Sekundärwicklung

Figur 16 zeigt das Vektordiagramm des Spannungswandlers als Grundlage für die Fehlerberechnung.



Figur 16
Vektordiagramm des
Spannungswandlers



2.2 Auslegungskriterien für Spannungswandler

2.2.1 Magnetische Auslegungskriterien

Mit den Gleichungen 5,10 und 11 und den vorgegebenen geometrischen Abmessungen lassen sich jetzt leicht die Primär- und Sekundärwicklungen dimensionieren. Die Nenn- und die Maximalinduktion variieren mit dem Nennspannungsfaktor, nicht mit der Anwendung. Aus diesem Grunde sind der Spannungsfaktor und die Dauer der Ueberspannung wichtige Dimensionierungsgrößen.

Der Uebersetzungsfehler des Spannungswandlers teilt sich in den Lerlauf und den Lastfehler auf.

Beim unbelasteten Spannungswandler führt der Leerlaufstrom zu einem Spannungsabfall an den primären Reaktanzen.

$$F_o = \frac{I_o * |(R_1 + x_1)|}{U_1} 100\% \quad (12)$$

Der Leerlauffehler kann durch Windungszahlabgleich kompensiert werden.

Wird der Spannungswandler durch eine Bürde belastet, so kommt zum Leerlauffehler noch der Fehler durch die Spannungsabfälle an den primären und sekundären Reaktanzen, hervorgerufen durch den Laststrom, hinzu.

$$F_I = F_o + \frac{I_L * |(R_1 + X_1 + R_2 + X_2)|}{U_1} 100\% \quad (13)$$

mit:

$$\begin{aligned} I_o &= \text{Leerlaufstrom} \\ I_L &= \text{Laststrom} \end{aligned}$$

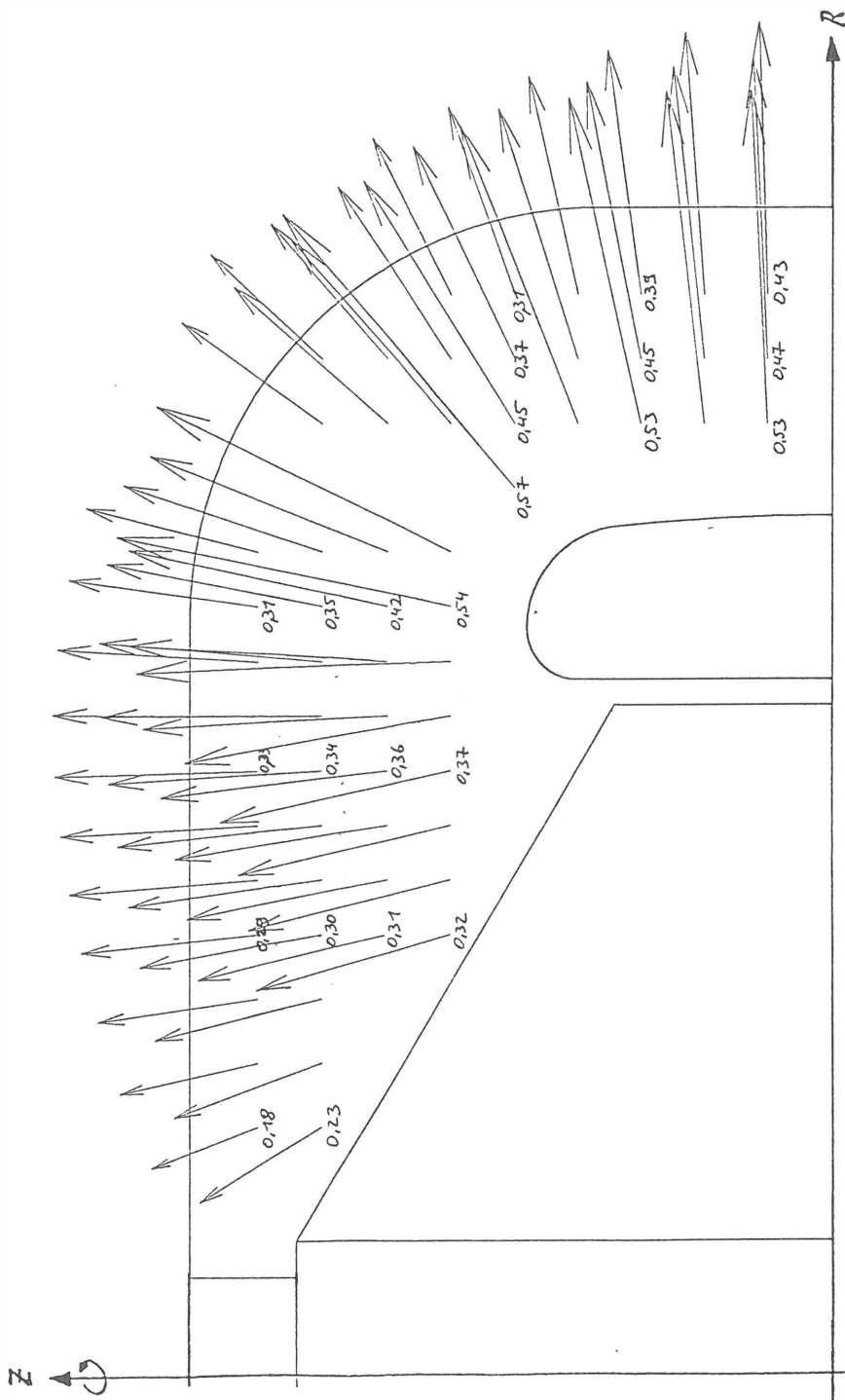
Der Fehler des Spannungswandlers kann somit für einen Lastfall, normalerweise Nennbürde, $\cos = 1$, berechnet und gezeichnet werden, und ist dann für jeden anderen Lastfall graphisch extrapolierbar.

2.2.2 Elektrische Auslegungskriterien

Für die dielektrische Auslegung von Spannungswandlern gelten grundsätzlich die gleichen Bedingungen, wie für Stromwandler.

Beim Spannungswandler jedoch muss das Aktivteil zweimal gegen die Hochspannung isoliert werden. Zum einen die Isolation zwischen den einzelnen Wicklungslagen, zum anderen die Isolation der Wicklung gegen das Gehäuse.

Die Isolation der Wicklung gegen das Gehäuse wird dabei mit einer Kombination aus dichter Isolation und konstruierten Oelspalten aufgebaut. Der Einsatz der Feldberechnung führte zu



Figur 18
Feldstärkevektoren im Raum
zwischen den Elektroden

2.3 Ausführungsformen von induktiven Spannungswandlern

Figur 19 zeigt das Schnittbild und die Ausführung eines 145 kV-Spannungswandlers.

Die Haube (1) trägt den Primäranschluss und die Balgstandanzeige und schützt den Metallfaltenbalg (2) gegen äussere Einflüsse.

Das Hochspannungspotential wird mit Hilfe der Durchführung (3.4) durch das Porzellan (5) zur, in Trapezform ausgeführten, Primärwicklung (8) geleitet.

Zwischen Durchführungsrohr (3) und Primärwicklung liegt ein Schutzring (7) zur mechanischen Fixierung der Durchführung und Abschirmung der oberen Kanten der Primärwicklung.

Unter der Primärwicklung liegen die Sekundärwicklungen (9), die durch einen elektrostatischen Schirm zwischen beiden geschützt werden.

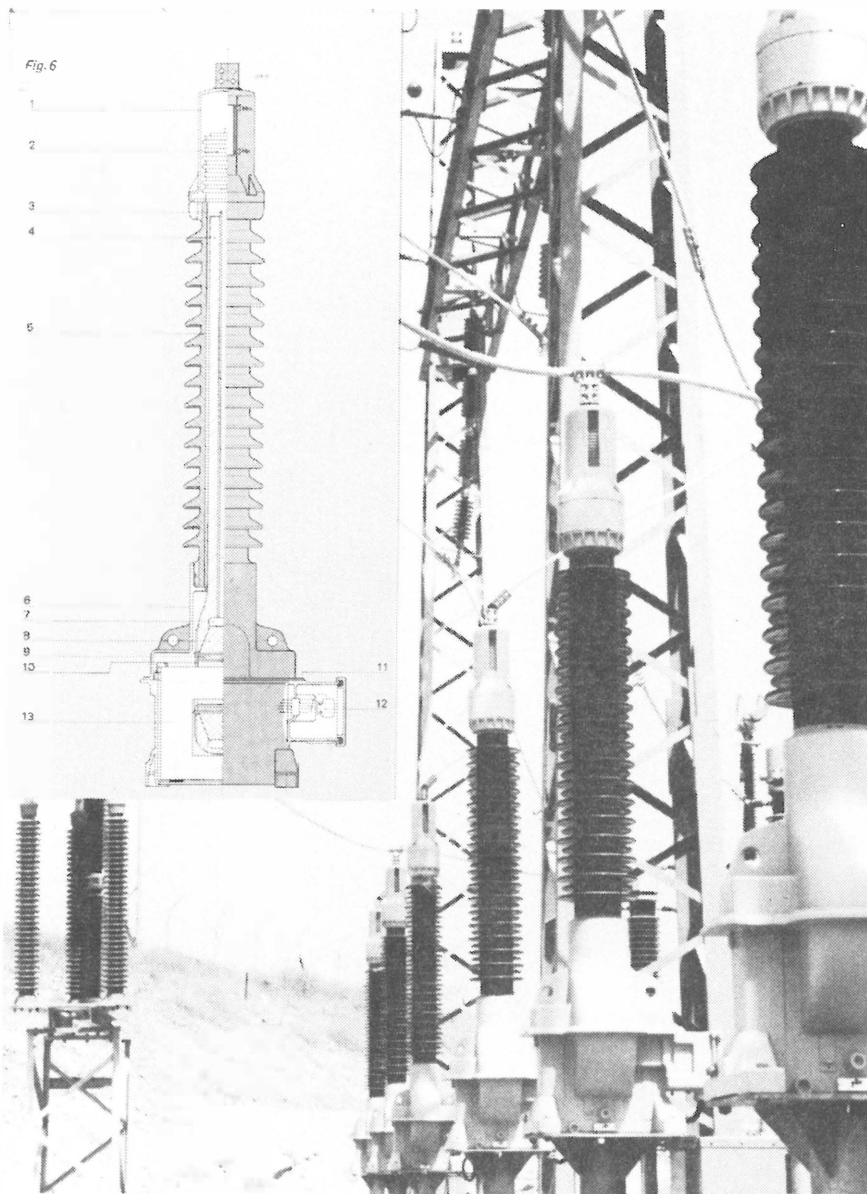
Die Primär- und Sekundärwicklungen sind auf dem geschachtelten Rahmenkern (13) aufgebracht.

Das erdseitige Ende der Hochspannungswicklung sowie die Ausleitungen der Sekundärwicklungen werden in den Klemmenkasten (11) eingeleitet und mit den Sekundärklemmen (12) verbunden.

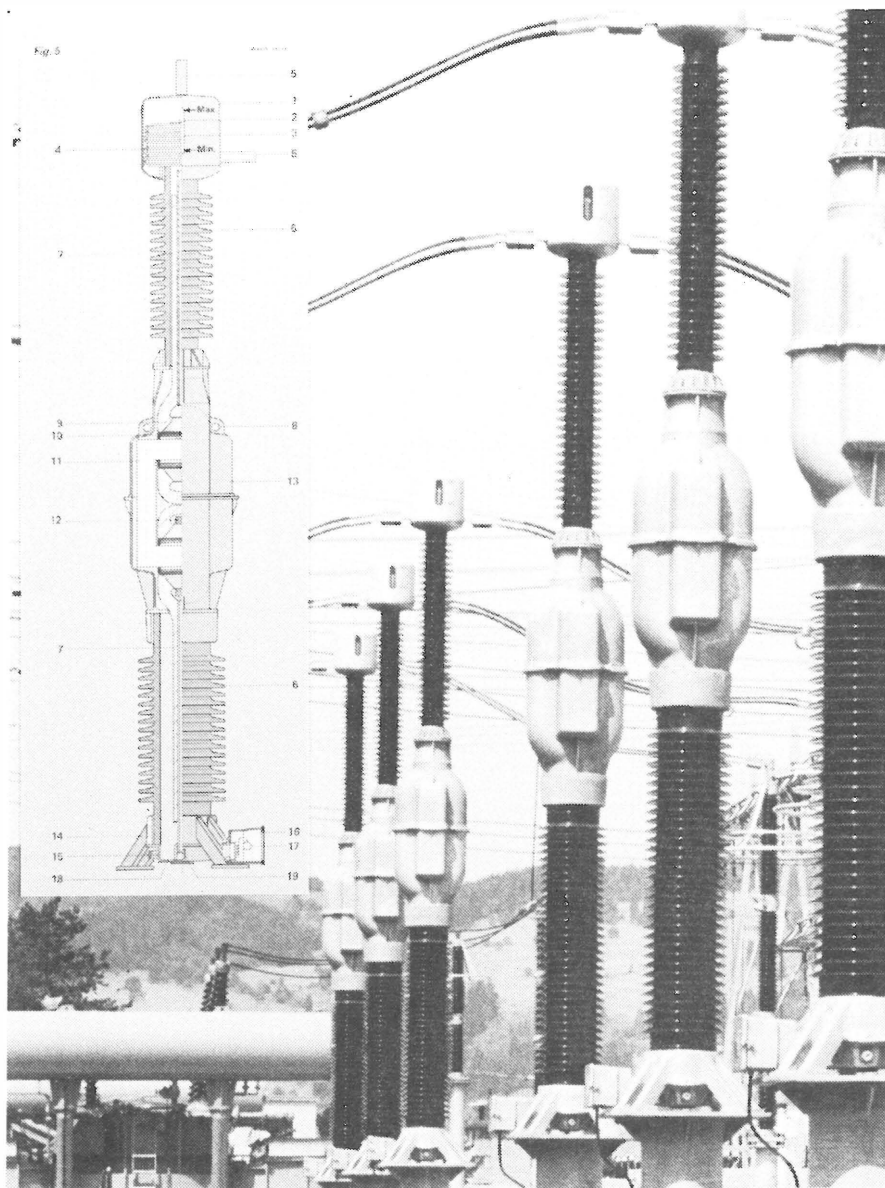
Diese Ausführung wird von 72,5 kV - 300 kV verwendet; für die darüberliegenden Spannungen von 362 kV - 525 kV wird eine kaskadierte Ausführung, wie in Figur 20 verwendet.

Figur 20 zeigt das Schnittbild und die Ausführung von 420 kV Spannungswandlern.

Sie besteht aus 2 in Reihe geschalteten Hochspannungswicklungen auf einem Eisenkern, der sich, wie das Gehäuse, auf Mittelpotential befindet. Auf dem Eisenkern befinden sich ausserdem die Schub- und Kopplungswicklungen, zur besseren Spannungsaufteilung der beiden Spulen bei Belastung, während die Sekundärwicklungen im Schutzring der unteren Hochspannungswicklung untergebracht sind.



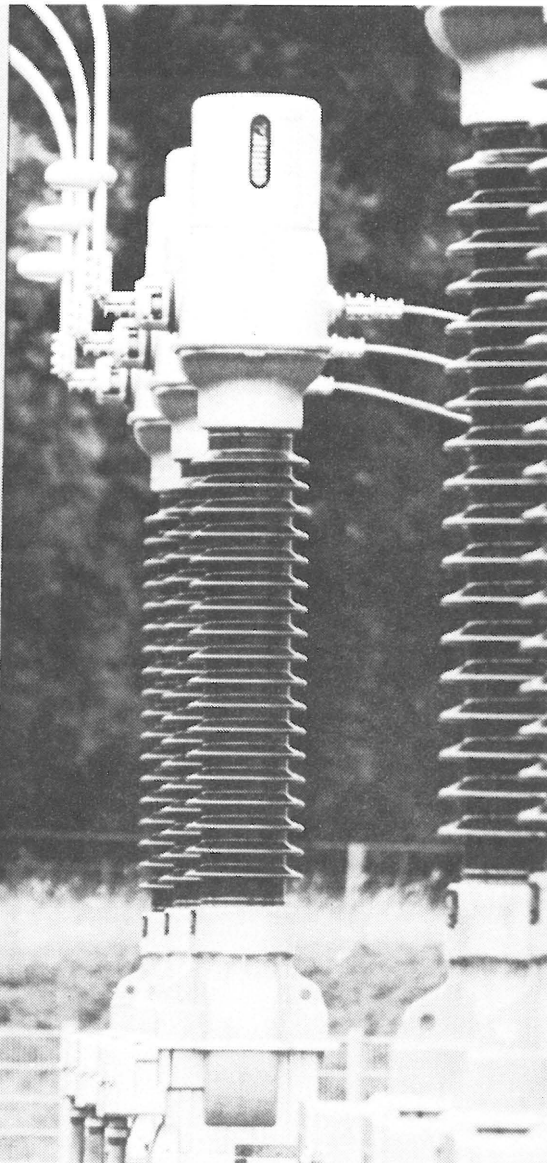
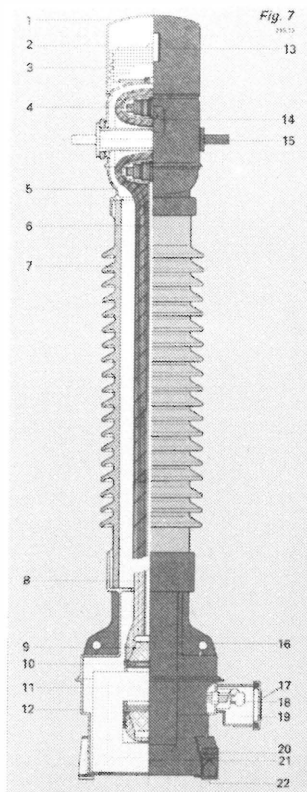
Figur 19
Schnittbild und Ausführung
eines 145 kV
Spannungswandlers



Figur 20
Schnittbild und Ausführung
eines 420 kV
Spannungswandlers

Figur 21 zeigt das Schnittbild und die Ausführung von kombinierten Strom- und Spannungswandlern. Diese Möglichkeit der Kombination ist bei Haefely von 72,5 kV - 300 kV durchführbar. Der prinzipielle Aufbau der Aktivteile ist der gleiche, wie bei den Einzelwandlern.

Durch die Kombination von Strom und Spannungswandlern ist der Platzbedarf in der Anlage deutlich kleiner, was bei möglichen Erweiterungen von Anlagen von Vorteil ist.



Figur 21
Schnittbild und Ausführung
eines 145 kV Kombiwandlers

3. Prüfmethoden

Bei den Prüfmethoden unterscheidet man zwischen Typprüfungen, die an einem Apparat durchgeführt werden und Routineprüfungen, die für alle Apparate einer Serie gelten.

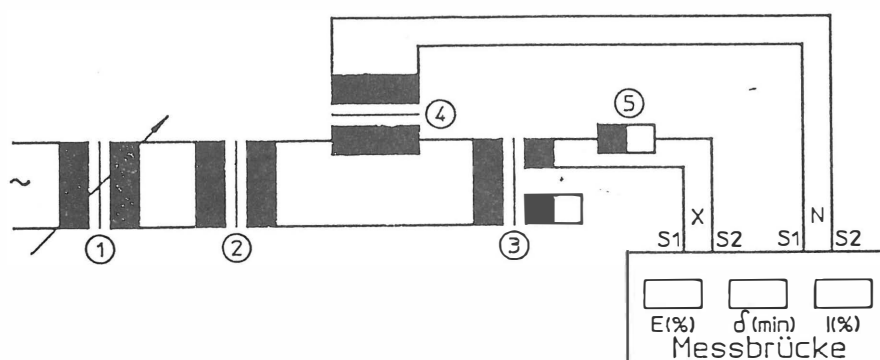
Zu den Typprüfungen gehören:

1. Kurzschlussstromprüfung (nur Stromwandler)
2. Erwärmungsprüfung
3. Blitzstossprüfung
4. Schaltstossprüfung
5. Regenprüfung für Freiluftwandler
- 5.1 Wechselspannungsprüfung für $U_m < 300 \text{ kV}$
- 5.2 Schaltstossprüfung für $U_m > 300 \text{ kV}$
6. Genauigkeitsprüfung

Zu den Stückprüfungen gehören:

1. Prüfung der Anschlussbezeichnungen
2. Wicklungsprüfung der Sekundärwicklungen
3. Wicklungsprüfung der Teilwirkungen
4. Windungsprüfung (nur Stromwandler)
5. Wicklungsprüfung der Primärwicklung
6. Teilentladungsmessung
7. Genauigkeitsmessung

Auf eine nähere Erläuterung der dielektrischen Prüfungen wird hier verzichtet, nur die für Wandler wichtige Genauigkeitsmessung am Beispiel des Stromwandlers kurz erläutert.



Figur 22
Diagramm für die
Genauigkeitsmessung an
Stromwandlern

Figur 22 zeigt das Schema für die Genauigkeitsmessung für Stromwandler. Ueber einen Regeltransformator (1) wird ein Hochstromtransformator (2) gespeist, der durch das Testobjekt (3) mit angeschlossener Bürde (5) und den Normalwandler (4) belastet wird. Die Sekundärströme beider Zweige werden in der Messbrücke verglichen und analysiert. Zur Anzeige wird dann der aktuelle Primärstrom (in %), der Uebersetzungsfehler (in %), sowie der Winkelfehler (in min) gebracht.

Zur Genauigkeitsmessung von Spannungswandlern wird das gleiche Prinzip angewendet.

4. Zukünftige Entwicklungen

Die Entwicklung auf dem Gebiet der ölisolierten Wandler verläuft zwar nicht so rasant, wie in der Elektronik, jedoch auch hier werden weiterhin Anstrengungen unternommen, die Wandler weiter zu optimieren, um den veränderten Umweltbedingungen gerecht zu werden.

Neben konstruktiven Massnahmen, die zu einer erhöhten Sicherheit führen, wie Einbau von Berstscheiben, Verbundisolatoren und massiverer Befestigung des Durchführungsrohres, die zum Teil schon ausgeführt wurden, nehmen die technologischen Massnahmen einen breiteren Raum ein. Die technologischen Massnahmen, wie der Einsatz dichterere ölisolierter Folien oder spannungsfesterer Isolieröle (synthetische PCB-freie Isolieröle) führen zu einer höheren Ausnutzung der Isolation und damit zu geringeren Ölvolumina.

Der Aufwand an Entwicklung und Prüfung ist hier jedoch sehr viel höher, wodurch es wohl noch einiger Zeit bedarf, bis diese Technologien einsatzfähig sind.

5. Zusammenfassung

Betriebsmittel zum Einsatz bei Messung und Schutz in Hochspannungsanlagen.

Induktive Strom- und Spannungswandler sind beim heutigen Stand der Technik zuverlässige. Die Grundlage der magnetischen Auslegung dieser Wandler wurde erläutert und die heutigen Methoden der elektrischen Auslegung aufgezeigt.

Die Prüfmethode, die einen nicht unerheblichen Teil des Aufwandes bei der Fertigung von Hochspannungsapparaten ausmachen wurden am Beispiel der Genauigkeitsmessung kurz dargestellt.

Trotz Ihrer schon heute hohen Zuverlässigkeit sind noch weitere Entwicklungsschritte bei ölisierten Wandlern möglich, die neben dem besseren Schutz des Anlagepersonals, vor allem in eine Verringerung des Ölvolumens gehen werden. Dies wird, angesichts der sich verschärfenden Umweltbedingungen, in Zukunft die Hauptaufgabe bei der Weiterentwicklung von ölisierten magnetischen Wandlern sein.