

Hochgenaue rechnergestützte Verlustleistungsmessung an Transformatoren

Joachim Pimper
Haefely Basel

Die Verlustleistungsmessung an Transformatoren ist ein unentbehrliches Meßverfahren zum Nachweis der Qualität von Transformatoren. Kurzschluß- und Leerlaufverluste werden dem Nutzer vom Hersteller garantiert.

Während die Kenntnis der Leerlauf- und Kurzschlußverluste für die Erstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung erforderlich ist, dient der exakte Wert der Kurzschlußverluste bei großen Transformatoren auch dem Vergleich der berechneten Verluste zu denen durch die Streufelder in den Konstruktionsteilen verursachten Zusatzverlusten.

Nachfolgend wird ein Transformatorenmeßsystem vorgestellt, mit welchem eine hochpräzise computerunterstützte Messung der Verluste an Dreiphasen-Transformatoren in den Bereichen von 1 A ... 2000 A und 100 V ... 100 kV bis zu einer Frequenz von 200 Hz ermöglicht wird.

1. Die wirtschaftliche Bedeutung der Transformatorenverlustmessung

Bei der Elektroenergieübertragung vom Erzeuger zum Verbraucher treten naturgemäß Verluste auf. Die gesamten Verluste vom Generator bis zum Hausanschluß liegen heute bei etwa 7 %.

Bild 1 zeigt die Aufteilung der Verluste in der elektrischen Energieversorgung.

Die Verluste der Netzkuppeltransformatoren von 400 kV auf 220 kV sind etwa 0,3 %, die der Mittelspannungstransformatoren ca. 0,4 % und die der Verteiltransformatoren etwa 0,4 %.

Gesamthaft sind die Transformatorenverluste mehr als 1 % der übertragenen

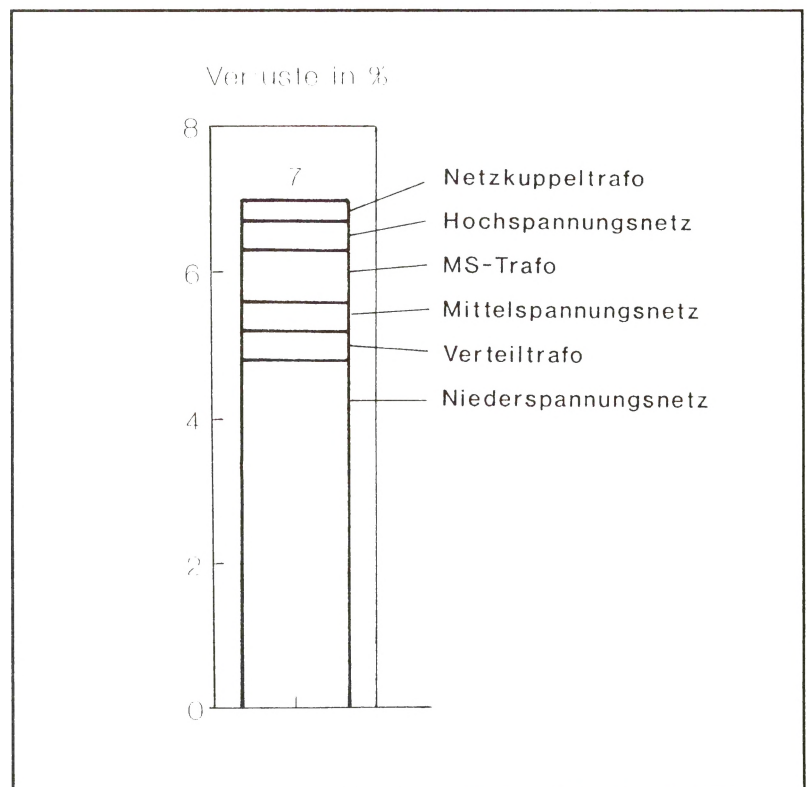
Energie. Bei einem deutschen Jahresverbrauch von 440.000 GWh erkennt man leicht die wirtschaftliche Bedeutung der Transformatorenverluste.

2. Die Definition der Transformatorenverluste

Normgemäß sind die Gesamtverluste eines Transformators die Summe der Leerlauf- und der Kurzschlußverluste.

Die Leerlaufverluste sind die aufgenommene Wirkleistung, wenn Nennspannung bei Nennfrequenz an die Anschlüsse einer Wicklung angelegt wird, während die andere bzw. die anderen Wicklungen unbelastet bleiben.

Bild 1 Aufteilung der Verluste



Das Ersatzschaltbild des Transformators (Bild 2) reduziert sich somit (Bild 3) und die verlustbehafteten Elemente sind der Ohmsche Widerstand der Erregerwicklung (R_2) und der Eisenverlustwiderstand (R_{Fe}). In der Verlustformel von Steinmetz erkennt man den Einfluß der Betriebsbedingungen, der Dimensionierung, der Konstruktion und der Materialwahl.

$$P_{Fe} = P_h + P_w = k_h \cdot f \cdot \hat{B}^x + k_w \cdot \delta^2 \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2$$

Wobei P_h Hystereseverluste
 P_w Wirbelstromverluste
 k_h Hysteresekoeffizient
 k_w Wirbelstromkoeffizient
 δ Blechdicke
 x Exponent bei Induktion:
 bei $\hat{B} < 1 \text{ T}$, $x \leq 2$
 bei $\hat{B} > 1 \text{ T}$, $x > 2$

Als Kurzschlußverluste sind die bei Nennfrequenz aufgenommene Wirkleistung definiert, wenn über die Leiteranschlüsse einer Wicklung der Nennstrom fließt, während die Anschlüsse der anderen Wicklungen kurzgeschlossen sind.

Das Ersatzschaltbild (Bild 4) reduziert sich auch hier zu einer allgemein gültigen vereinfachten Form mit der Annahme, daß die Ohmschen Wicklungswiderstände und die Streureaktanzen der Wicklungen deutlich kleiner als die Hauptreaktanz des symbolisch dargestellten spannungsabhängigen Eisenwiderstandes sind.

Die Kurzschlußverluste stellen die gesamte Stromwärmeleistung bei Nennstrom und Nennfrequenz dar, die in allen Wicklungen und Konstruktionsteilen im betriebswarmen Zustand verbraucht wird. Sie setzen sich aus den Ohmschen Verlusten der Wicklungen, Ableitungen und Verbindungen sowie aus den durch die Streufelder hervorgerufenen Wirbelstromverlusten in den Wicklungen und in den Konstruktionsteilen zusammen.

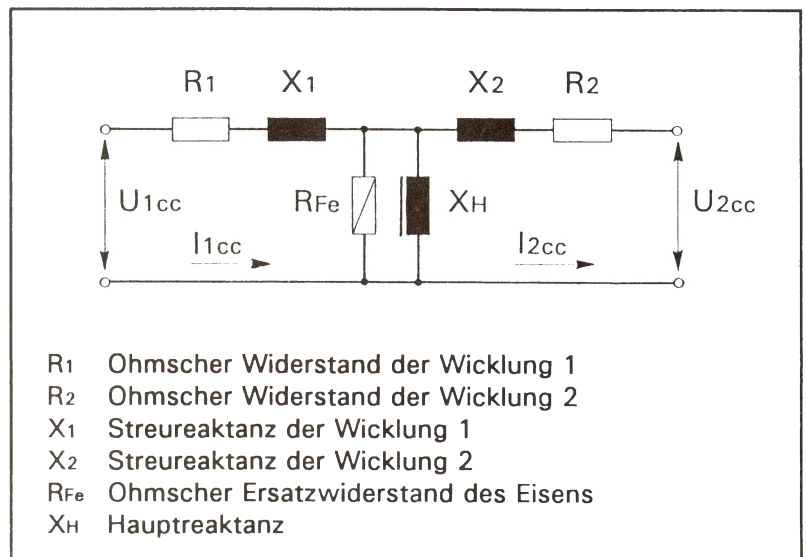
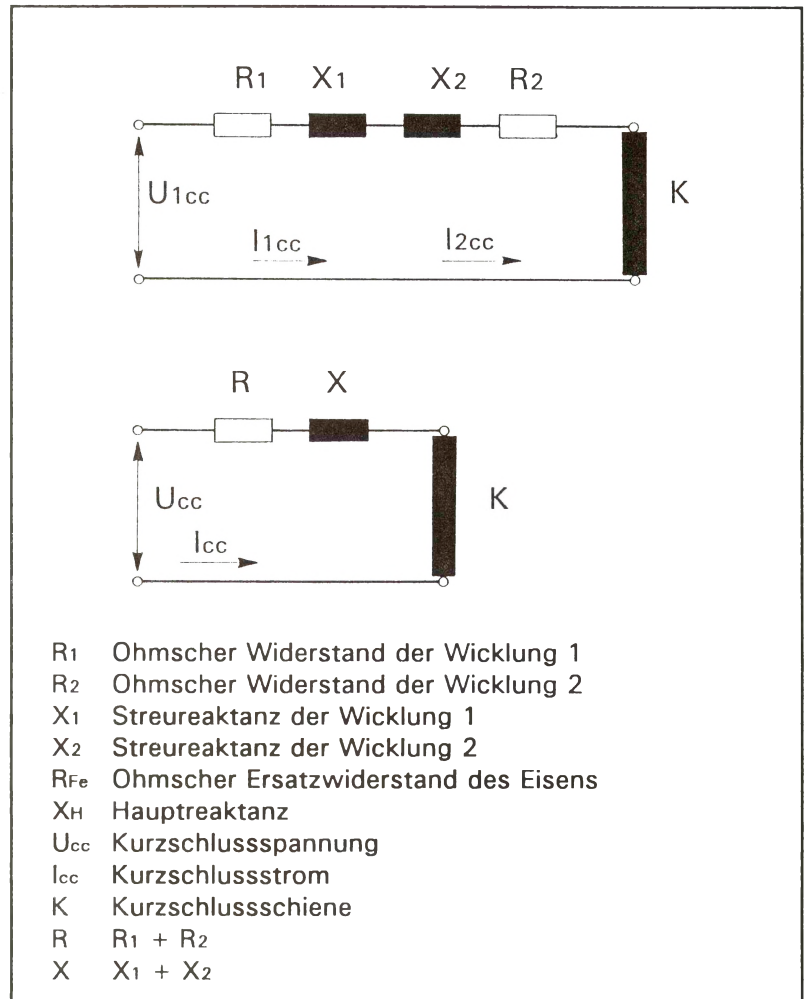


Bild 2 Ersatzschaltbild

Bild 3 Kurzschlusersatzschaltbild



3. Die Messung der Verluste

Das hier vorgestellte Transformatoren-messsystem bietet eine komfortable Möglichkeit zur Messung der Transformatorverluste.

Den Grundaufbau zeigt Bild 5 für einphasige und Bild 6 für dreiphasige Prüfobjekte.

Ein digitales Präzisions-Wattmeter mißt nach manuell ausgelöster Triggerung des Systems gleichzeitig die Ströme, die Spannungen und die Phasenwinkel der drei Phasen und errechnet die Leistungen innerhalb von weniger als 0,6 s.

Die drei Phasenspannungen werden mittels kapazitiven Teilern und elektronisch gesteuerten Meßbereichsumschaltern in einem Bereich von 100 V bis 100 kV der Eingangsspannung des Wattmeters angepaßt.

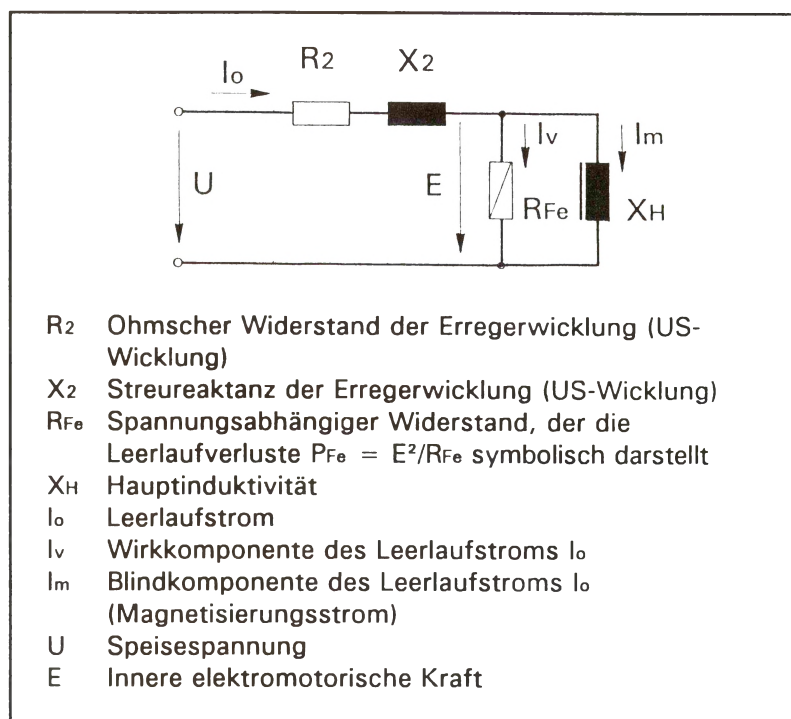


Bild 4 Ersatzschema

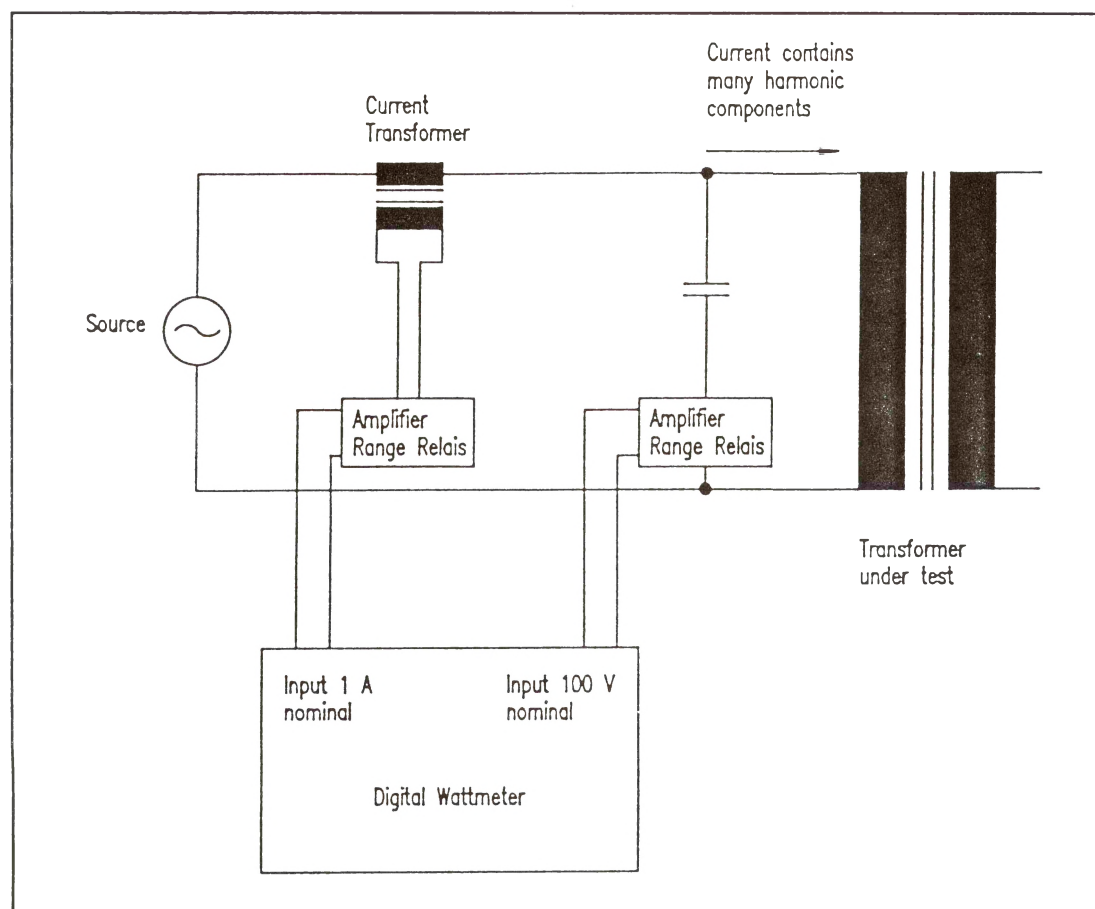


Bild 5 Einphasige Meßschaltung

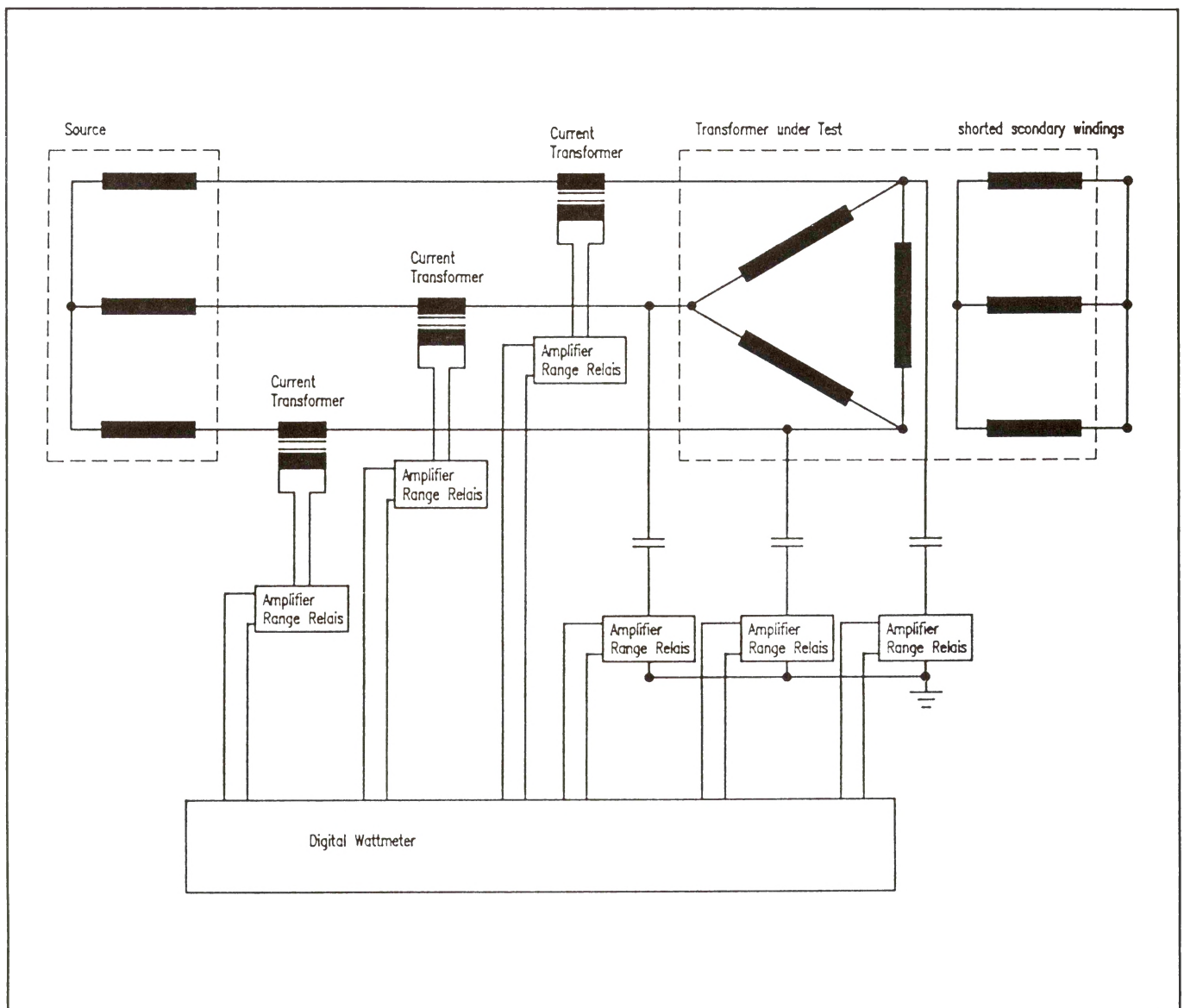
Die Hochspannungskondensatoren der kapazitiven Teiler sind gasisolierte Normalkondensatoren der Nennkapazität von 100 pF und einer Nennspannung von 100 kV, deren Temperaturkoeffizient $< 3 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ und deren Stabilität besser als 0,01 % pro Jahr sind.

Die Phasenströme werden mittels elektronisch kompensierten Stromwandlern

im Bereich von 1 A bis 2000 A gemessen. Elektronisch gesteuerte Meßbereichsumschalter passen die Mesströme auf den Eingangsstrom des Wattmeters an.

Ein Computer steuert das Wattmeter und die Meßbereichsumschalter derart, daß die optimalen Meßbereiche angewählt werden.

Bild 6 Dreiphasige Meßschaltung



EMIL HAEFELY & CIE AG, 4028 BASEL, SWITZERLAND				
POWER MEASUREMENT				
	Phase A	Phase B	Phase C	Total
App. Power	99.726 kVA	100.07 kVA	92.395 kVA	292.19 kVA
Powerfactor	1.000	1.000	1.000	1.000
Real Power	99.637 kW	100.05 kW	92.096 kW	291.79 kW
Current	LOAD L. 10.649 A	10.418 A	10.253 A	* Sum/3 * 10.440 A
Range	12 A	12 A	12 A	
Voltage	RMS 9.372 kV	9.612 kV	9.012 kV	9.332 kV
Range	AUR 9.343 kV	9.583 kV	8.985 kV	9.303 kV
	10.00 kV	10.00 kV	10.00 kV	
F1-Manual F2-Trigger F3-Single F4-AV = 4 F5-Reset F6-Current F7-Voltage F8-Cal F9-Print				
MESSAGE : Single Measurement.				

Bild 7 Bildschirm des Computers

Auf dem Bildschirm des Computers (Bild 7) werden die für die Ermittlung der Leerlauf- und Kurzschlußverluste erforderlichen Werte pro Phase und als Summe angezeigt und pro Messung als Datensatz in eine Datei des Massenspeichers geschrieben.

Diese Daten stehen dann für eine Protokollauswertung unabhängig von der Messung zur Verfügung.

4. Fehlerbetrachtung

Für sinusförmige Vorgänge ist die Wirkleistung das Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung und deren

Phasenwinkel. Sind in die Messschaltung Meßwandler eingebracht, sind deren Übertragungsfaktoren zu berücksichtigen.

$$P = \ddot{U}_u \cdot U_{\text{eff}} \cdot \ddot{I}_i \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \delta$$

Nach partieller Ableitung und Umwandlung folgt:

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\ddot{U}_u}{\ddot{U}_u} + \frac{dU_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}} + \frac{d\ddot{I}_i}{\ddot{I}_i} + \frac{dI_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} - \tan \varphi d\varphi$$

Bei der Kurzschlußverlustmessung verhält sich ein Transformator induktiv, d. h. die Spannung eilt dem Strom um fast 90° voraus.

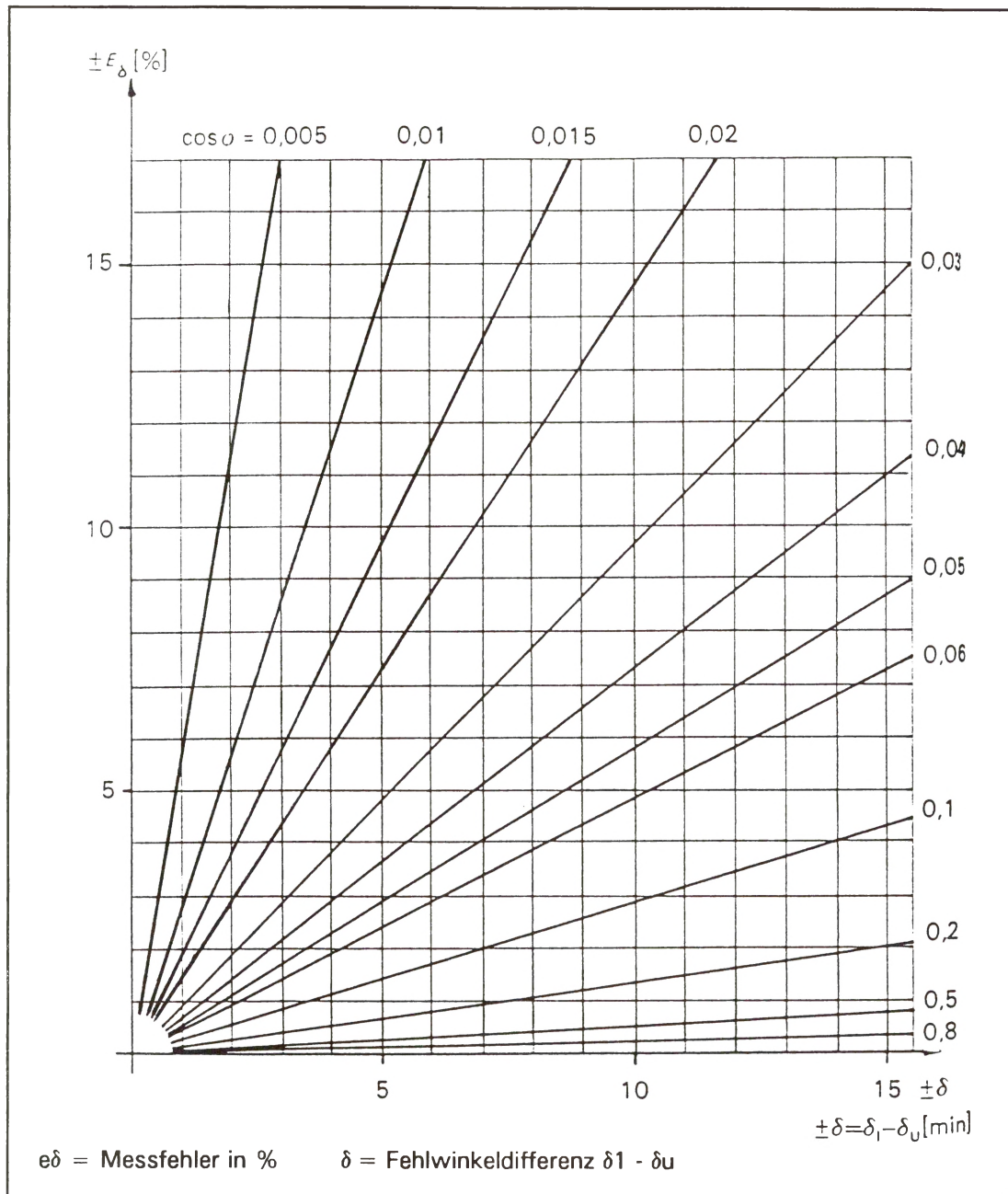


Bild 8 Einfluss der Fehlwinkel von Messwandlern auf den Messfehler bei der einphasigen induktiven Leistungsmessung

Für diesen Winkelbereich gilt

$$\tan P \approx \pm \frac{1}{\cos \varphi}$$

und somit ergibt die Fehlerformel folgende Darstellung:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta \ddot{U}_u}{\ddot{U}_u} + \frac{\Delta U_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}} + \frac{\Delta \ddot{U}_i}{\ddot{U}_i} + \frac{\Delta I_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} + \frac{\Delta \varphi}{\cos \varphi}$$

Der auftretende maximale Fehler ist somit die Summe der Beträgsfehler der Messkomponenten und einem Winkelanteilfehler. Während erstere allein durch die Eigenschaften der Messkomponenten gegeben sind, ist der Winkelfehleranteil von Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung, d.h. vom Prüfobjekt abhängig.

Dieser Einfluß ist in Bild 8 dargestellt.

Es ist anschaulich erkennbar, daß bei induktiver Leistungsmessung der Einfluß des Winkelfehlers der Meßwandler auf das Meßresultat zu Fehlmessungen führen kann.

Die für das Transformatorenmesssystem eingesetzten Komponenten sind speziell auf kleinsten Fehlwinkel ausgelegt. Die Systemprüfung beinhaltet die Kalibrierung und Protokollierung der Meßgenauigkeit:

- die Genauigkeitsmessung der Spannungswandler für alle 10 Spannungsbereiche bei jeweils 100 % der jeweiligen Nennspannung,
- die Genauigkeitsmessung der Stromwandler für alle 11 Strombereiche bei jeweils 60 %, 80 %, 100 % und 120 % des Nennstromes,
- die Genauigkeitsmessung des Spannungskanals über das gesamte System und alle Nennspannungen,
- die Genauigkeitsmessung des Stromkanals über das gesamte System und allen Nennströmen
- die Genauigkeitsmessung des Wattmeters in Abhängigkeit des Leistungsfaktors

Alle Messungen werden mit geeichten Vergleichskomponenten durchgeführt.

Die garantierte Genauigkeit des Messystems ist:

- für den Spannungskanal kleiner 0,4 % bei Spannungen zwischen 1 kV - 100 kV und 1 % bei Spannungen zwischen 100 - 500 V des Meßbereiches und für 1 Jahr,
- für den Stromkanal kleiner 0,4 % bei Strömen zwischen 1 A - 2000 A des Meßbereiches und für 1 Jahr,
- für die Leistungsmessung ist die Genauigkeit vom Leistungsfaktor abhängig

Leistungsfaktor 0,01	:	< 3 % des Meßbereiches
Leistungsfaktor 0,01	:	< 1,5 % des Meßbereiches
Leistungsfaktor 0,1	:	< 0,75 % des Meßbereiches
Leistungsfaktor 1,0	:	< 0,5 % des Meßbereiches

Das Transformatorenmesssystem enthält eine hochgenaue Spannungsquelle, welche es gestattet, zu beliebigen Zeiten einen Systemtest durchzuführen. Dieser Test gibt Auskunft über die Einhaltung der Meßgenauigkeit.