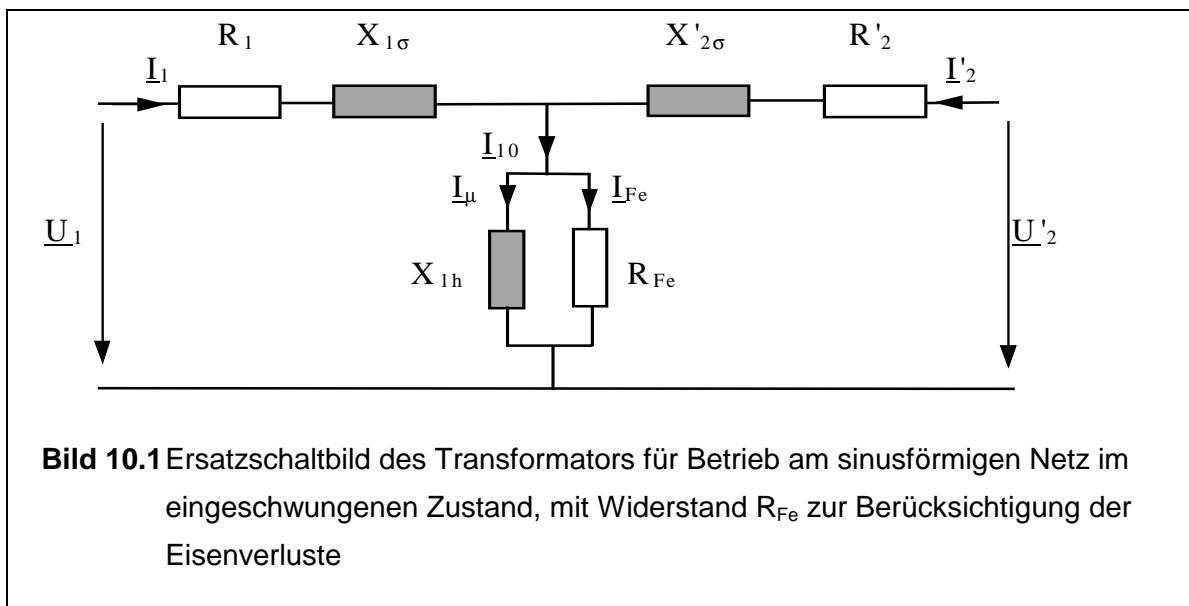


## Theoretische Grundlagen

Transformatoren sind elektromagnetische Energiewandler, die elektrische Energie bei gleicher Frequenz und im allgemeinen unterschiedlichen Spannungen und Ströme wandeln. Je nach Einsatzbereich werden Maschinentransformatoren (Primärspannung bis etwa 27 kV, Sekundärspannung 230 kV oder 400 kV), Netzkupplungstransformatoren (zwischen den Spannungsebenen 400, 230, 110 kV), Verteilertransformatoren (Primärspannungen < 24 kV, Sekundärspannung überwiegend 400 V) und Kleintransformatoren unterschieden.

Mit Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit der Versorgung mit elektrischer Energie müssen Transformatoren hohe Wirkungsgrade besitzen.

Aus den Spannungsgleichungen zweier magnetisch gekoppelter Stromkreise ergibt sich mit dem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  (bei technischen Transformatoren ist in der Regel  $\ddot{u} = U_{1N}/U_{2N}$ ) das einphasige Ersatzschaltbild für Sternschaltung ( **$U_1$ : Strangspannung**).



Bei Leerlauf können im allgemeinen die Wicklungswiderstände und die Streureaktanzen vernachlässigt werden. Der Eisenwiderstand  $R_{Fe}$  berücksichtigt die als Folge von Ummagnetisierung (Hysterese) und Wirbelströmen in den Kern- und Jochblechen sowie in den ferromagnetischen Konstruktionsteilen auftretenden Eisenverluste  $P_{Fe}$ . Bei konstanter Frequenz sind die Eisenverluste näherungsweise proportional zum Quadrat der Klemmenspannung.

### Leerlaufversuch

Aus dem Leerlaufversuch können folgende Größen bestimmt werden:

Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$ :

$$(10.1) \quad \ddot{u} = U_1/U_{20} \quad \text{mit} \quad U_1: \text{ primäre Strangspannung,} \\ U_{20}: \text{ sekundäre Leerlaufspannung (Strang)}$$

Widerstand  $R_{Fe}$  zur Berücksichtigung der Eisenverluste

$$(10.2) \quad R_{Fe} = U_1^2/P_{Fe}$$

Leerlaufimpedanz  $Z_0$ ,

$$(10.3) \quad Z_0 = U_1/I_{10}$$

und die Hauptreaktanz  $X_{1h}$

$$(10.4) \quad 1/X_{1h}^2 = 1/Z_0^2 - 1/R_{Fe}^2$$

### Kurzschlussversuch

Als zweiter Versuch zur Überprüfung der Eigenschaften eines Transformators dient der Kurzschlussversuch. Eine Prüfung unter den Bedingungen des Bemessungsbetriebs ist bei größeren Transformatoren weder im Prüffeld noch am Aufstellungsort möglich.

Im Prüffeld können im allgemeinen die erforderlichen großen Leistungen weder eingespeist noch als Belastung realisiert werden; am Aufstellungsort im Einsatz scheitert ein länger andauernder Bemessungsbetrieb an den sich ändernden Netzverhältnissen und Belastungen. Daher wird der Transformator im Prüffeld im Kurzschluss betrieben, wobei die Spannung so eingestellt wird, dass Nennstrom fließt. Da die Stromwärmeverluste in den Wicklungen vom Quadrat des Stroms abhängig sind, treten beim Kurzschlussversuch dieselben Stromwärmeverluste auf, wie im Bemessungsbetrieb. Die hierzu erforderliche Spannung, bezogen auf die Bemessungsspannung, wird als relative Kurzschlussspannung  $u_k$  bezeichnet.

$$(10.5) \quad u_k = \sqrt{3} U_{1k} / \sqrt{3} U_{1N} = \sqrt{3} U_{2k} / \sqrt{3} U_{2N}$$

Die relative Kurzschlussspannung liegt in der Größenordnung von etwa 4% ( $S_N = 50 \dots 630$  kVA, DIN 42500) bis 14% ( $S_N = 80$  MVA, DIN 42508) und steigt mit zunehmender Bemessungsleistung.

Bei Kurzschluss des Transformators kann im allgemeinen der Magnetisierungsstrom gegenüber Primär- und Sekundärstrom vernachlässigt werden ( $I_1 \approx I_2$ ).

Bild 10.2 zeigt das vereinfachte einphasige Ersatzschaltbild, das nicht nur für Kurzschluss, sondern auch für die meisten Lastzustände mit Ausnahme des Leerlaufs gilt.

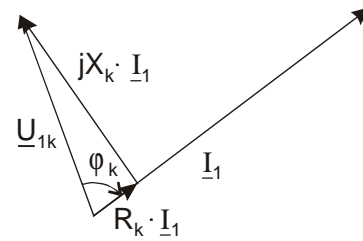
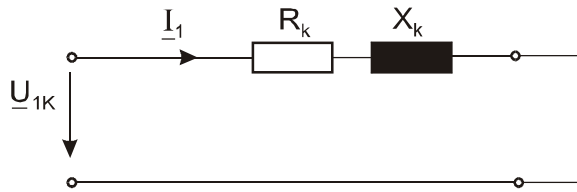
In der rechten Bildhälfte sind die zugehörigen Zeigerdiagramme dargestellt (Kurzschluss, Belastung mit  $I_1 = 0,6 \cdot I_{1N}$ ,  $\cos\varphi = 0,8$  induktiv).

Die Kurzschlussimpedanz  $Z_k$  beträgt

$$(10.6) \quad Z_k = |R_k + jX_k| = U_{1k} / I_{1N} = u_k \cdot U_{1N} / I_{1N} = u_k \cdot Z_N \\ \text{mit } Z_N: \text{ Nennimpedanz, } Z_N = U_{1N}/I_{1N}$$

Die Kurzschlussimpedanz  $Z_k$  ist um einige Zehnerpotenzen kleiner als die Leerlaufimpedanz  $Z_0$  nach Gl. (10.3).

## Kurzschluss



## Belastung

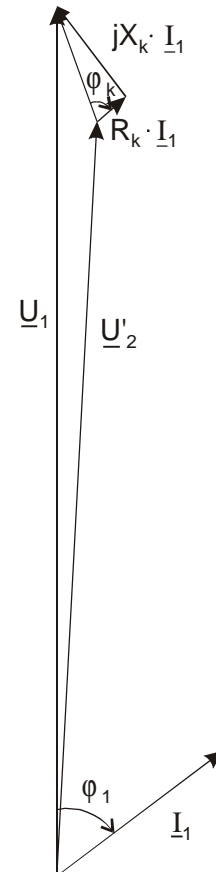
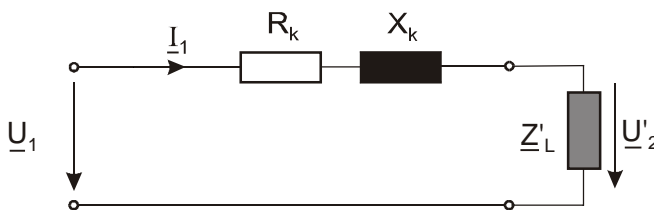


Bild 10.2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild

Zeigerdiagramm

Da die angelegte Spannung beim Kurzschlussversuch klein ist gegenüber der Bemessungsspannung, sind die Eisenverluste praktisch vernachlässigbar; die aufgenommene Wirkleistung  $P_k$  entspricht mit hoher Genauigkeit den Stromwärmeverlusten des Transformators.

$$(10.7) \quad R_k = R_1 + R'_2 = P_{1k} / (3 \cdot I_{1N}^2)$$

Der Kurzschlussleistungsfaktor  $\cos\varphi_k$

$$(10.8) \quad \cos\varphi_k = R_k / Z_k$$

ist in der Regel klein, da die Kurzschlussimpedanz und damit auch die relative Kurzschlussspannung insbesondere bei größeren Transformatoren dominant durch die Streu-

reaktanz bestimmt wird. Das Verhältnis zwischen Kurzschluss- und Leerlaufimpedanz beträgt im Normalfall weniger als 1%.

Die Kurzschlussreaktanz  $X_k$  ist die Summe aus primärer und sekundärer Streureaktanz:

$$(10.9) \quad X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = Z_k \cdot \sin\varphi_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

### Belastungsversuch

Primär- und Sekundärspannung unterscheiden sich bei Last durch ein rechtwinkliges Spannungsdreieck, dessen Katheten durch  $R_k \cdot I_1$  und  $X_k \cdot I_1$  gebildet werden (siehe Bild 10.2 unten). Der zwischen der Hypotenuse  $Z_k \cdot I_1$  und der Kathete  $R_k \cdot I_1$  eingeschlossene Winkel ist die Phasenverschiebung des Kurzschlussstroms  $\varphi_k$ . Dieses Spannungsdreieck wird als Kappsches Dreieck bezeichnet.

Bei konstantem Primärstrom ist die Größe des Kappschen Dreiecks ebenfalls konstant, lediglich seine Lage ändert sich in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung des Stroms  $I_1$  gegenüber der Strangspannung  $\underline{U}_1$ ; das Dreieck "dreht" sich um die Spitze des Zeigers  $\underline{U}_1$ .

Durch Zeichnung des Kappschen Dreiecks für kapazitive Last wird anschaulich klar, dass es bei kapazitiven Lasten zu einer Überhöhung der Sekundärspannung gegenüber der Leerlaufspannung  $U_{20}$  kommt.

Die Ermittlung der Ersatzschaltbilddaten aus dem Kurzschlussversuch gestattet die Vor-ausberechnung des Spannungsabfalls bei Belastung.

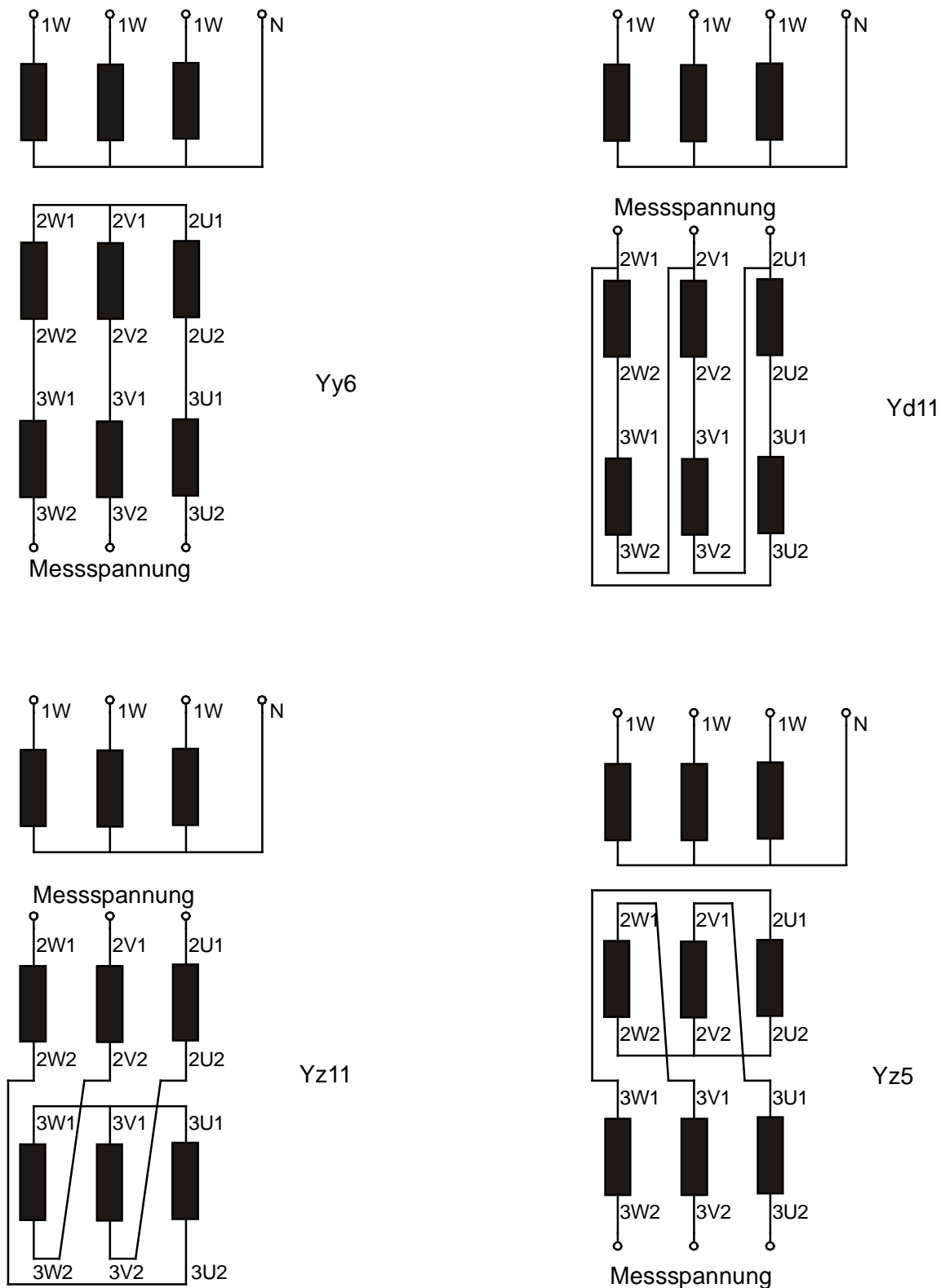
### Schaltgruppen

Drehstromtransformatoren können mit unterschiedlichen Schaltungen von OS- und US-Wicklungen ausgeführt werden (Bild 10.3). Bei den Maschinentransformatoren wählt man üblicherweise für die Unterspannungsseite Dreieckschaltung, für die Oberspannungsseite Sternschaltung mit herausgeführtem Neutralleiter.

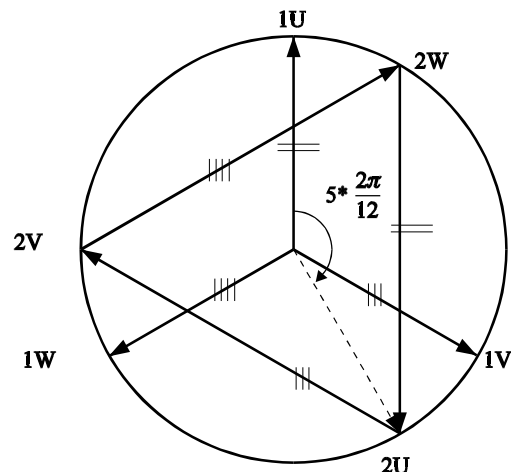
Bild 10.3 (VDE 0532 Teil 4, nächste Seite) zeigt die Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren, wobei die wichtigsten eingerahmt sind.

Die Spannungszeiger  $\underline{U}_{1u}$  und  $\underline{U}_{2u}$  sind gegeneinander phasenverschoben, wenn die Schaltung von OS- und US- Wicklung nicht identisch sind, wie es in Bild 10.4 am Beispiel eines Transformators mit  $\Delta$ - Schaltung der US- Wicklung und Sternschaltung der OS- Wicklung gezeigt ist.

Der Winkel zwischen den Zeigern  $\underline{U}_{1u}$  und  $\underline{U}_{2u}$  beträgt  $150^\circ$ . Die Schaltgruppe besteht neben den Abkürzungen für die Schaltungen von US- und OS- Wicklung aus der Kennzahl, die die Phasenverschiebung zwischen  $\underline{U}_{1u}$  und  $\underline{U}_{2u}$  in Vielfachen von  $30^\circ$  angibt.



**Bild 10.3** Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren (VDE 0532 Teil 4)



**Bild 10.4** Phasenverschiebung zwischen Ober- und Unterspannung  
(Beispiel OS- Wicklung: Y, US- Wicklung: D: Schaltgruppe Yd5)

### Parallelschaltung von Transformatoren

Wenn Transformatoren parallel geschaltet werden sollen -dies ist in vermaschten Netzen häufig der Fall- so

- müssen Schaltungen und Übersetzungsverhältnis übereinstimmen
- sollen die relativen Kurzschlussspannungen möglichst gleich sein, da sonst der härtere Transformator (mit der kleineren relativen Kurzschlussspannung) bei Belastung der Parallelschaltung mit der Summe der Bemessungsscheinleistungen überlastet wird.

### Versuchsdurchführung

Allgemeiner Hinweis: Die Messwernerfassung erfolgt rechnergestützt mit Hilfe eine drei-phasigen Leistungsmessgeräts. Die Bildung von Mittelwerten aus den drei Stranggrößen erfolgt zum Teil durch die Software.

#### 1. Messung der Wicklungswiderstände

Bestimmen Sie die Wicklungswiderstände aller Wicklungen. Dabei sind die Widerstände, die Anschlüsse, zwischen denen gemessen wird, und die Wicklungstemperatur (zu Versuchsbeginn gleich Raumtemperatur) anzugeben.

#### 2. Leerlaufender Transformator

Am leerlaufenden Transformator werden folgende Messungen durchgeführt (Schaltung siehe Bild 10.5, Seite 10):

## 2.1 Übersetzungsverhältnis

Durch direkte Messungen der Spannungen an Primär- und Sekundärwicklung kann das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u} = U_1 / U_2$  bestimmt werden.

## 2.2 Schaltgruppenkontrolle

Die Leerlaufmessung 2.3 soll in Schaltgruppe Yy0 durchgeführt werden. Überprüfen Sie die Schaltgruppe, ggf. Schaltung ändern.

## 2.3 Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms (Primärseite gespeist)

Messen Sie als Funktion der verketteten Spannung ( $200 \text{ V} < U_L < 420 \text{ V}$ ):

Primärspannungen	$U_{L1-L2}, U_{L1-L3}, U_{L2-L3}$
Leerlaufströme (Primärseite)	$I_{10U}, I_{10V}, I_{10W}$
Wirkleistungen	$P_{0U}, P_{0V}, P_{0W}$

## 3. Kurzschlussversuch

Der Transformator wird sekundärseitig kurzgeschlossen und die Primärspannung von Null in Stufen hochgestellt, bis in der Primärwicklung der Nennstrom fließt.

Messen Sie

Spannungen	$U_{L1-L2}, U_{L1-L3}, U_{L2-L3}$
Ströme	$I_{1U}, I_{1V}, I_{1W}$
Leistungen	$P_{1U}, P_{1V}, P_{1W}$

## 4. Belastungsversuch

Messen Sie bei drei vom Versuchsleiter vorgegeben Belastungen

4.1 ohmsch

4.2 induktiv

4.3 kapazitiv

bei  $U_1 = U_{1N}$  die Primärströme, die Primärspannungen, die Sekundärspannungen und die aufgenommene Wirkleistung P

## 5. Schaltgruppenbestimmung

Zugrundegelegt werden vom Versuchsleiter ausgewählte Schaltungen gemäß Bild 10.6 (Seite 11). Anhand von Zeigerbildern ist der Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  zwischen verketteter Ober- und Unterspannung festzulegen.

Das zur messtechnischen Kontrolle der Schaltgruppe verwendete Instrument (Power Analyser) besitzt 3 Kanäle. Mit 3 ohmschen Widerständen ( $R_1, R_2, R_3$ ) werden primäre Leiterspannung und Instrumentenstrom in Phase gebracht. Damit liegt zwischen dem Wirkstrom und einer sekundären Messspannung der Phasenverschiebungswinkel.

## Versuchsauswertung

### 1. Berechnen Sie

- den mittleren Primärwicklungswiderstand  $R_1 = 1/3 (R_{1U} + R_{1V} + R_{1W})$
- den mittleren Sekundärwicklungswiderstand  $R_2 = 1/3 (R_{2U} + R_{2V} + R_{2W})$
- den bezogenen Sekundärwicklungswiderstand  $R'_2 = \dot{u}^2 \cdot R_2$

### 2. Ermitteln Sie folgende Größen:

- mittlere Primärspannung  $U_{1L} = 1/3 (U_{L1-L2} + U_{L1-L3} + U_{L2-L3})$
- mittlerer Leerlaufstrom  $I_{10} = 1/3 (I_{10U} + I_{10V} + I_{10W})$
- Scheinleistung  $S_0 = \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_{10}$
- Wirkleistung  $P_0 = P_{0U} + P_{0V} + P_{0W}$
- Kupferverluste  $P_{Cu0} = 3 \cdot I_{10}^2 \cdot R_1$
- Leerlaufleistungsfaktor  $\cos\varphi_0 = P_0 / S_0$
- Eisenverluste  $P_{Fe} = P_0 - P_{Cu0}$

### Berechnen Sie für Bemessungsspannung folgende Größen

- relativer Leerlaufstrom  $i_0 = I_{10} / I_{1N}$
- relativer Magnetisierungsstrom  $i_\mu = i_0 \cdot \sin\varphi_0$
- relativer Eisenverluststrom  $i_{Fe} = i_0 \cdot \cos\varphi_0$
- Hauptreaktanz  $X_{1h}$
- Eisenwiderstand  $R_{Fe}$

### Stellen Sie grafisch dar:

$$U_{1L} = f(I_{10}), \cos\varphi_0 = f(U_{1L}); V_{Fe} = f(U_{1L}^2)$$

### Diskutieren Sie die Kurvenverläufe!

### Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm für Nennspannung

Welche Verluste deckt die im Leerlauf aufgenommene Wirkleistung?

### 3. Bestimmen Sie die Mittelwerte von Strömen ( $I_{1k}$ ), Spannungen ( $U_{1Lk}$ ) und Leistungen

Stellen Sie die Kurzschlussspannung  $U_{1Lk} = f(I_{1k})$  und die Wirkleistung  $P_k = f(I_{1k}^2)$  grafisch dar.

Ermitteln Sie aus dem Diagramm  $U_{1Lk} = f(I_{1k})$  für  $I_{1k} = I_{1N}$  die Nennkurzschlussspannung  $U_{1LkN}$  (für den kalten Transformator)

### Berechnen Sie

- die relative Nennkurzschlussspannung  $u_k = U_{1LkN} / U_{1LN}$
- deren Wirkkomponente  $u_{kr} = u_k \cdot \cos\varphi_k$
- deren Blindkomponente  $u_{kx} = u_k \cdot \sin\varphi_k$

sowie die Impedanzen des einsträngigen Ersatzschaltbilds

- den Kurzschlusswiderstand  $R_k$



- die Kurzschlussreaktanz  $X_k$

Vergleichen Sie den Kurzschlusswiderstand mit der Summe  $R_1 + R'_2$

Berechnen Sie die Streureaktanzen unter der Annahme

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = X_k/2$$

Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm für  $U_{1k} = u_k \cdot U_{1N}$

Rechnen Sie die Wicklungswiderstände auf  $75^\circ\text{C}$  um und berechnen Sie die Kurzschlussimpedanz  $Z_{kw}$  für  $75^\circ\text{C}$ .

Ermitteln Sie mit dieser Impedanz die relative Kurzschlussspannung

$$u_{kw} = Z_{kw} \cdot I_{1N} / U_{1N} \text{ (für den warmen Transformator)}$$

4. Zeichnen Sie für alle drei Lastfälle das vereinfachte Zeigerdiagramm (Hinweis: verwenden Sie den Wicklungswiderstand  $R_k$  für den kalten Transformator)

Ermitteln Sie den Spannungsabfall  $\Delta U_2 = U_{20} - U_2$

a) aus der Messung

b) mit Hilfe des Zeigerdiagramms

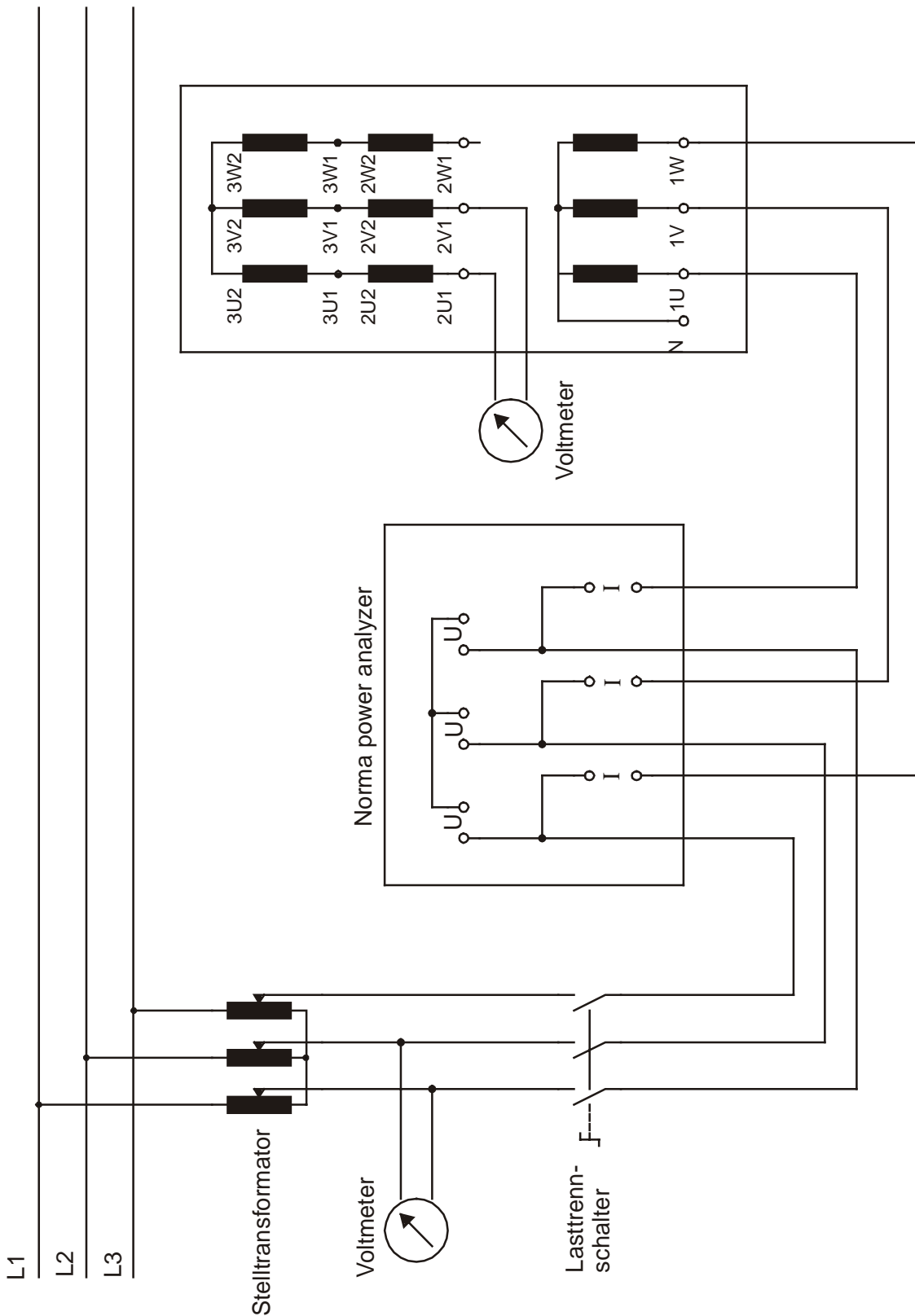
Bestimmen Sie für die ohmsche Belastung den Wirkungsgrad des Transformators.

Ermitteln Sie den Laststrom, bei dem bei ohmscher Belastung der Wirkungsgrad maximal wird und bestimmen Sie den maximalen Wirkungsgrad  $\eta_{\max}$ .

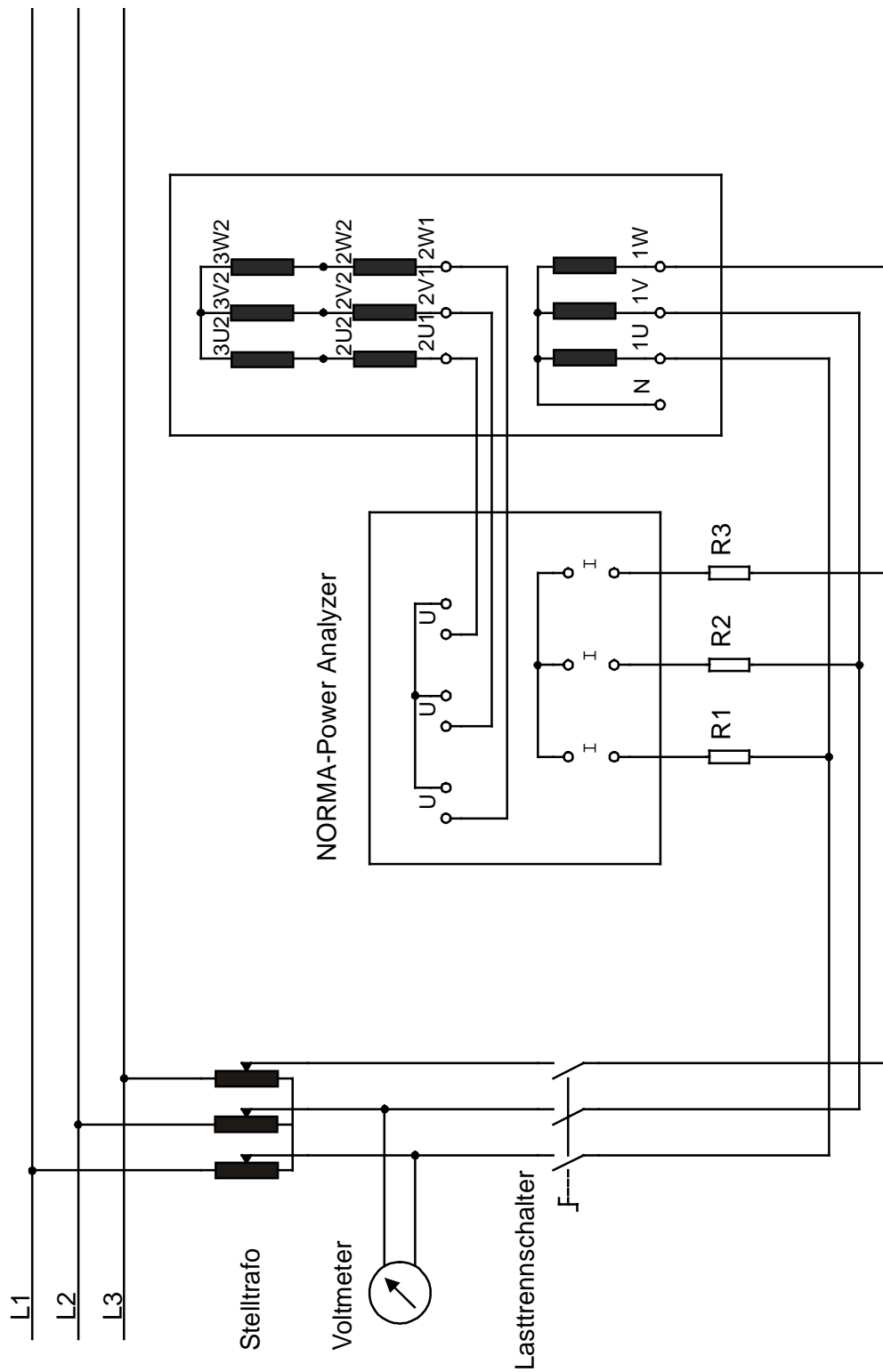
Hinweis: Der Wirkungsgrad ist maximal, wenn die stromabhängigen Verluste gleich den lastunabhängigen Verlusten sind:

$$\eta_{\max} \text{ für } P_{CuN} \cdot (I/I_N)^2 = P_{FeN}.$$

Das Wirkungsgradmaximum tritt im allgemeinen bei Teillast auf.



**Bild 10.5** Drehstromtransformator: Schaltung für die Leerlauf- und Belastungsmessung



**Bild 10.6** Drehstromtransformator: Schaltung für die Schaltgruppenbestimmung