

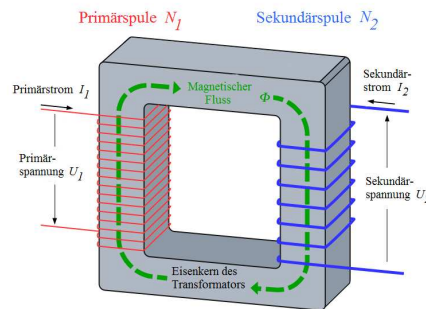
**Ausbildungsberuf: ElektronikerIn für Betriebstechnik, MechatronikerIn
 Prüfungsvorbereitung**

<http://www.reimerhass.pmbrandt.de/ksspg.html>

**9 Elektrische Maschinen¹
 9.1 Transformatoren**

1. Wie ist ein Einphasentransformator aufgebaut?

Idealtypisch besteht ein Transformator aus einem [magnetischen Kreis](#), welcher als Transformator Kern bezeichnet wird, und aus mindestens zwei Wicklungen. Die der elektrischen Energiequelle zugewandte Wicklung wird als Primärseite (von lateinisch *primarius*, *an erster Stelle*) bezeichnet. Diejenige, an welcher sich die elektrische Last befindet, wird als Sekundärseite bezeichnet (von lateinisch *secundarius*, *an zweiter Stelle*).



2. Wie funktioniert grundsätzlich ein Transformator?

Die Wirkungsweise lässt sich durch die folgenden Mechanismen beschreiben:

1. Eine Wechselspannung auf der Primärseite des Transformators erzeugt aufgrund der [elektromagnetischen Induktion](#) einen wechselnden magnetischen Fluss im Kern. Der wechselnde magnetische Fluss wiederum induziert auf der Sekundärseite des Transformators eine Spannung (Spannungstransformation).
2. Ein Wechselstrom in der Sekundärwicklung bewirkt dem [Ampèreschen Gesetz](#) entsprechend einen Wechselstrom in der Primärwicklung (Stromtransformation).

3. Wie verhalten sich bei einem unbelasteten Transformator die Spannungen zu den zugehörigen Windungszahlen?

Bei einem unbelasteten Transformator verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

4. Wie verhalten sich bei einem belasteten Transformator die Ströme zu den zugehörigen Windungszahlen?

Bei einem belasteten Transformator verhalten sich die Ströme umgekehrt wie die Windungszahlen:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

5. Wie verhält sich ein Transformator im Leerlauf?

Wenn an die Sekundärwicklung kein Verbraucher angeschlossen ist, liegt [Leerlauf](#) vor. Der Transformator ist unbelastet. Ein verlustloser Transformator im Leerlauf verhält sich wie eine [ideale Spule](#). Der unbelastete Transformator verhält sich wie eine Spule mit großer Induktivität.

¹ Prüfungsvorbereitung Aktuell ... Mechatronik / Josef Dillinger u. a.; Haan-Gruiten: EUROPA-Lehrmittel; 2011, 2. Aufl.; S. 92 ff und S. 298 ff; ISBN 978-3-8085-1140-4

6. Warum sind Luftspalte im Eisenkern des Transformators unerwünscht?

Luftspalte vergrößern lokal in der Nähe des Spaltes den Streufluss, der möglicherweise dort (z. B. im Trafokessel) zu Verlusten und Störungen führt. Auch in der weiteren Umgebung besitzen solche Transformatoren oft einen erhöhten Streufluss, da ein größerer Anteil des Gesamtfeldes außerhalb des Kernes auftritt.

Luftspalte im Eisenkern erhöhen die Strom- und Leistungsaufnahme im Leerlauf (Leerlaufverluste).

Aber:

An manche Transformatoren werden besonders hohe Anforderungen an die Linearität der Strom-Spannungs-Kennlinie gestellt oder sie dienen gleichzeitig der Zwischenspeicherung magnetischer Energie beim ([Sperrwandler](#)). Dies kann durch einen Luftspalt im magnetischen Kreis erreicht werden, in dem ein wesentlicher Teil der magnetischen Feldenergie gespeichert wird. Der Feldstärkebedarf und damit der Magnetisierungsstrom steigen, die Kennlinie wird geschert beziehungsweise linearisiert. Die im Luftspalt gespeicherte magnetische Energie vergrößert die Blindleistung, wird jedoch fast verlustfrei wieder abgegeben. Die Remanenz im Kern liegt wegen der Scherung der Magnetisierungskennlinie nahe bei der Induktion Null.

Arbeitsauftrag

1. Von welchen Größen hängt die Leerlaufspannung eines Transformators ab?

<http://www.elektroniktutor.de/bauteile/trafo.html>

Der Scheitelwert \hat{u} der Leerlaufspannung hängt vom Scheitelwert \hat{B} der magnetischen Flussdichte, vom Eisenquerschnitt A des Kernes, von der Frequenz f und der Windungszahl N ab (vgl. Transformatorhauptgleichung).

2. Welche Größen im Transformator ändern sich, wenn man die Spannung an der Eingangswicklung ändert?

Beim idealen Trafo gilt die Trafohauptgleichung uneingeschränkt für beide Spulenwicklungen. Die Leerlaufspannung ist direkt proportional zur Windungszahl. Der magnetische Fluss ist in beiden Wicklungen gleich groß:

$$U_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad \frac{d\Phi}{dt} \cdot N_2 = U_2$$

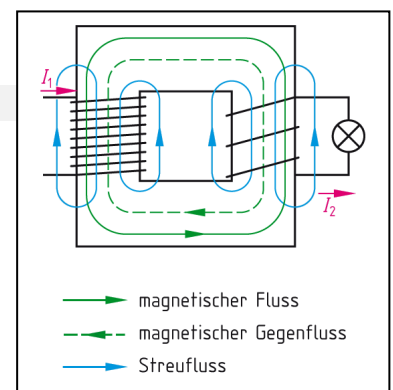
$$U'_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi'}{dt} \quad \frac{d\Phi'}{dt} \cdot N_2 = U'_2$$

Die Änderung von U_1 auf U'_1 in der Primärspule ändert Φ nach Φ' . Diese Änderung bewirkt in der Sekundärspule die Änderung von U_2 auf U'_2 .

Der magnetische Fluss Φ und die Ausgangsspannung U_2 .

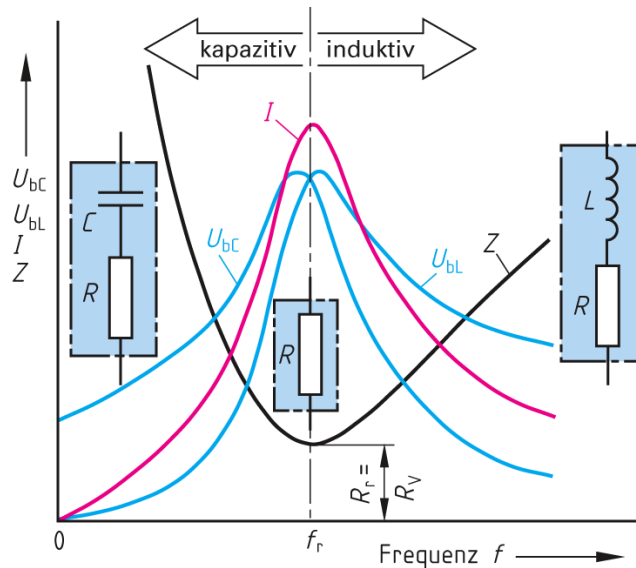
3. Was versteht man unter Streufeldlinien?

Der Streufluss ist der Teil des magnetischen Flusses, der nur die Eingangs- bzw. Ausgangswicklung durchdringt.



4. Wie ändert sich die Ausgangsspannung eines Transformators bei Belastung durch Kondensatoren?

Mit Belastung durch Kapazitäten bildet sich zusammen mit der Induktivität des Transformators ein Reihenschwingkreis: Es kommt zu einem Anstieg der Spannung.
 Die Ausgangsspule des Transformators und der Kondensator bilden eine Reihenschaltung aus R , L und C . Diese Reihenschaltung bildet auch einen Reihenschwingkreis. Bei Resonanz kommt es zu Spannungsüberhöhungen an Spule und Kondensator.



Resonanzkurve eines Reihenschwingkreises

5. Wie misst man die Kurzschlussspannung?

Die Kurzschlussspannung ist die Spannung, die bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung an der Primärwicklung liegen muss, damit in der Sekundärwicklung Nennstrom fließt. Die Messung der Kurzschlussspannung erfolgt im [Kurzschlussversuch](#).
 Die Kurzschlussspannung gibt das Verhalten der Ausgangsspannung bei Belastung des Transformators an:

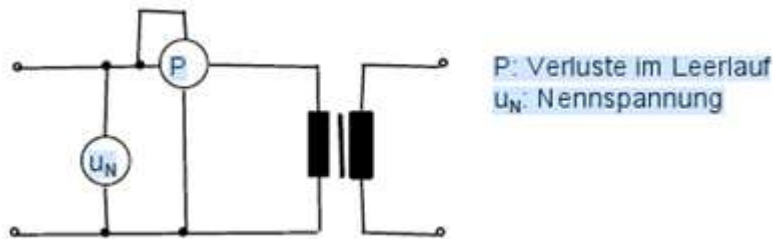
6. Welchen Einfluss hat eine kleine Kurzschlussspannung auf die Ausgangsspannung bei Belastung?

Eine kleine Kurzschlussspannung bedeutet, dass der Innenwiderstand des Transformators gering ist. Bei einer kleinen Kurzschlussspannung ist der Transformator „spannungssteif“, d.h. bei Belastung sinkt die Sekundärspannung nur geringfügig ab.

Zur Vertiefung

1. Wie werden beim Transformator die Eisenverluste ermittelt?

Die Eisenverluste eines Transformators ermittelt man im Leerlaufbetrieb bei Nennspannung. Das ist möglich, weil auf Sekundärseite keine Wicklungsverluste entstehen und auf der Primärseite nur der sehr geringe Leerlaufstrom fließt, dessen Wicklungsverluste vernachlässigt werden dürfen. Allerdings wird im Leerlauf bei Nennspannung der Kern des Transformators voll aufmagnetisiert, so dass alle Eisenverluste in vollem Umfang auftreten.
 Die Eisen- oder Kern- oder Leerlaufverluste können mit folgender Schaltung ermittelt werden:



2. Welchen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Transformators haben die angeschlossenen Verbraucher?

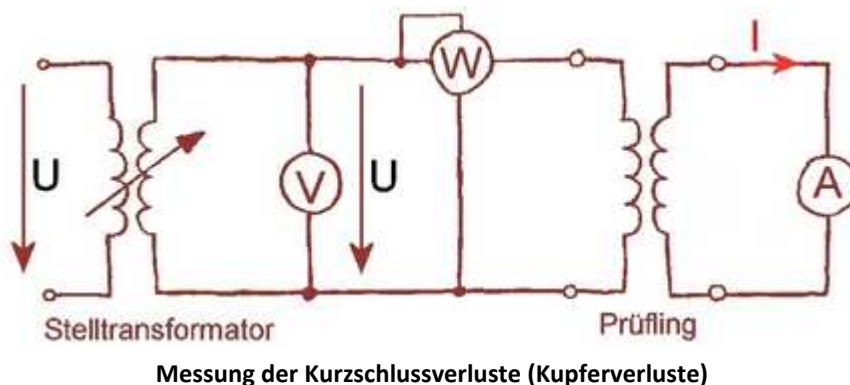
Als **Kupferverluste** oder **Wicklungsverluste** bezeichnet man die bei allen Spulen in Transformatoren, Elektromotoren, Generatoren und Elektromagneten auftretenden Stromwärmeverluste. Die Verluste entstehen überwiegend durch den Ohmschen Widerstand der Kupferwicklung.

Die Wicklungsverluste des Transformators hängen von der Stromaufnahme und damit von der Scheinleistung des angeschlossenen Verbrauchers ab. Je größer der Wirkleistungsfaktor des Verbrauchers ist, desto besser ist der Transformatorwirkungsgrad.

Bei der Konstruktion von heutigen Leistungstransformatoren wird ein Verlustverhältnis von Eisenverlustleistung zu Kupferverlustleistung von 0,17 bis 0,25 festgelegt. Der maximale Wirkungsgrad des Transformators liegt in dem Betriebspunkt, in welchem die Kupferverluste genauso groß wie die Eisenverluste sind. Bei Transformatoren in Schaltnetzteilen beeinflusst der Skineneffekt ebenfalls die Kupferverluste.

3. Wie werden die Wicklungsverluste ermittelt?

Wicklungsverluste werden im Kurzschlussversuch ermittelt. Beim Kurzschlussversuch wird bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung die **Eingangsspannung** mit Hilfe eines Stelltransformators so weit erhöht, bis der **Nennstrom** fließt. Da bei dieser Messung nur die relativ kleine Kurzschlussspannung am Prüfling anliegt, entstehen nur wenige Feldlinien - die Eisenverluste vernachlässigbar klein. Mit dem Leistungsmesser werden bei Kurzschluss somit die Kupferverluste $P_{V_{Cu}}$ gemessen.



4. Was ist unter einem Kleintransformator zu verstehen?

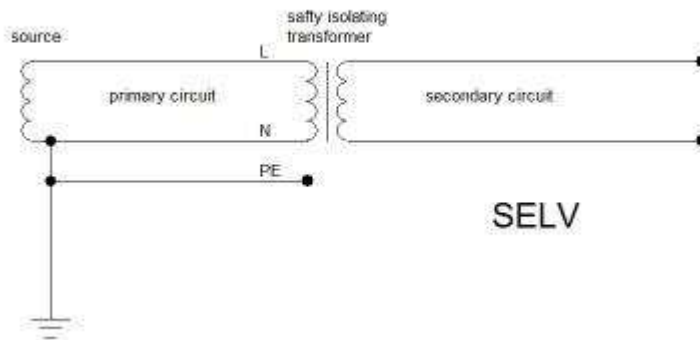
Kleintransformatoren haben Bemessungsleistungen bis 16 kVA, Eingangsspannungen bis 1000 V und Frequenzen bis 500 Hz.

5. Was ist unter einem Sicherheitstransformator zu verstehen?

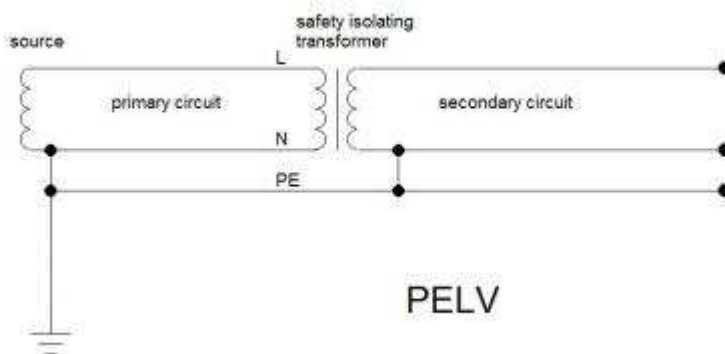
Ein **Sicherheitstransformator** (auch **Schutztransformator**) ist ein [Transformator](#) der sekundärseitig [Kleinspannungen](#) für [SELV](#)- und [PELV](#)-Stromkreise liefert. Die Bemessungsleistung beträgt höchstens 10 [kVA](#) und die Bemessungsfrequenz im Maximum 500 Hz. Die Spannung darf maximal 50 [V](#) betragen. Es gibt verschiedene Arten von Sicherheitstransformatoren. Sicherheitstransformatoren müssen [kurzschlussfest](#) oder bedingt kurzschlussfest sein. Die Oberspannungswicklung ist mit einer zusätzlichen Isolierstoff-Zwischenwand von der Unterspannungswicklung abgetrennt, damit auch bei einem Fehlerfall keine Verbindung zwischen Primär- und der Sekundärseite auftreten kann.

6. Was ist unter den Begriffen SELV und PELV zu verstehen?

SELV: Die Sicherheitskleinspannung (engl. *Safety Extra Low Voltage*, SELV) ist eine kleine elektrische Spannung, die aufgrund ihrer geringen Höhe und der Isolierung im Vergleich zu Stromkreisen höherer Spannung besonderen Schutz gegen einen [elektrischen Schlag](#) bietet. Bei SELV-Stromkreisen dürfen weder Körper von Betriebsmitteln noch Stromkreise sekundärseitig geerdet werden.



PELV: Die Schutzkleinspannung (engl. *Protective Extra Low Voltage*, PELV, früher „Funktionskleinspannung mit sicherer Trennung“) bietet ebenfalls Schutz gegen elektrischen Schlag. Sie wird in EN 50178 behandelt. PELV wird eingesetzt, wenn aus betrieblichen Gründen aktive Leiter der Kleinspannung oder die Körper der [Betriebsmittel](#) geerdet werden müssen. Das ist beispielsweise der Fall, wenn man einen [Potentialausgleich](#) zur Vermeidung von Funkenbildung in Behältern und explosionsgefährdeten Räumen realisieren muss. Bei PELV-Stromkreisen ist ein sekundärseitiger Anschluss der Kleinspannung geerdet.



7. Welche Sicherheitstransformatoren müssen unbedingt kurzschlussfest sein?

Klingeltransformatoren

8. Wie hoch darf die Bemessungsausgangsspannung bei Spielzeugtransformatoren sein?

24 V

9. Wie wird die Wicklungsprüfung durchgeführt?

Die Wicklungsprüfung erfolgt mit Hochspannungsprüfgeräten.

Prüfspannung ¹ für Kleintransformatoren bis 16 kVA, 1000 V, 500 Hz (nach DIN VDE 0550)				
Größte Bemessungsspannung des Transformators	50 V	250 V	500 V	1000 V
Prüfspannung in V bei Transformatoren der Schutzklasse I (Schutzleiter) und III (Kleinspannung)				
Eingangskreisgegen Körper	1000 V	1500 V	2500 V	3500 V
Ausgangskreisgegen Körper				
Eingangskreisgegen Ausgangskreis				
Prüfspannung in V bei Transformatoren der Schutzklasse II (Schutzisolierung)				
Eingangskreisgegen Metallteile	-	1500 V	2000 V	2500 V
Metallteilegegen Körper	-	2500 V	2500 V	2500 V
Eingangskreisgegen Ausgangskreis	-	3000 V	3500 V	4500 V
Eingangskreisgegen Körper	1000 V	1500 V	2500 V	3000 V
Ausgangskreisgegen Körper	1000 V	1500 V	2500 V	3000 V
1) Dauer der Prüfspannung 1 min. Bei Wiederholungsprüfungen genügen 80 % der Werte.				

10. Wie misst man den Isolationswiderstand von Kleintransformatoren?

Unter **Isolationswiderstand** versteht man den ohmschen Widerstandsanteil zwischen elektrischen Leitern untereinander beziehungsweise gegenüber dem Erdpotential. Da es keinen idealen [Isolator](#) gibt, bildet jede Isolierung auch einen ohmschen Widerstand, dessen Wert zwar sehr hoch sein kann, aber trotzdem immer endlich ist.

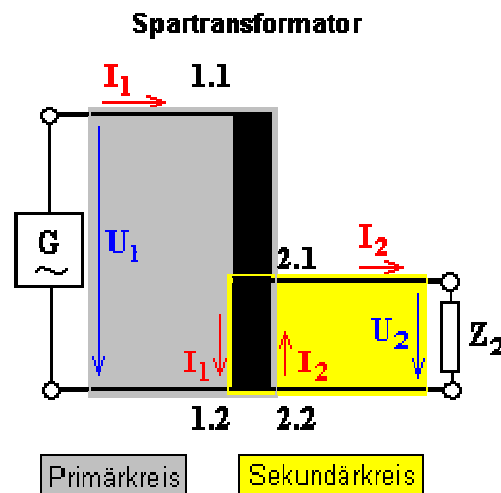
Die Isolationsmessung ist mit $U = 500 \text{ V DC}$ durchzuführen. 1 Minute nach Anlegen der Prüfspannung ist der Isolationswiderstand zu messen.

1. Messen zwischen Eingangs- und Ausgangskreis $R_{\text{iso}} > 5 \text{ M}\Omega$
2. Messen zwischen den Wicklungen und berührbaren metallischen Teilen $R_{\text{iso}} > 2 \text{ M}\Omega$

11. Wie ist ein Spartransformator aufgebaut?

Ein **Spartransformator** (kurz Spartrafo, auch **Autotransformator**) besteht im Gegensatz zu anderen [Transformatoren](#) aus nur *einer Spule*, die zur Entnahme der Ausgangsspannung(en) eine oder mehrere Anzapfungen hat. Primär- und Sekundärseite sind damit in einer einzigen Spule vereint.

- Der Spartrafo hat keine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärkreis.
- Nach der VDE 0100 Bestimmung ist der Einsatz eines Spartrafos als Schutztrafo verboten.



12. Welchen Vorteil hat ein Spartransformator gegenüber einem Transformator mit getrennten Wicklungen?

Einsparen von Leiterwerkstoff und Kerneisen. Hoher Wirkungsgrad (bis 99,8 %). Spannungsfest.

13. Wofür werden Spartransformatoren verwendet?

Spartransformatoren können überall dort angewendet werden, wo ohne galvanische Trennung abweichende Spannungen bereitgestellt werden müssen, z. B.:

- Vorschaltgerät für Natriumdampflampen
- Anlasstransformator für Drehstrommotoren
- Stelltransformator in Hochspannungsnetzen
- Höchstspannungstransformatoren (220 kV auf 380 kV).

14. Wozu dienen Streufeldtransformatoren?

Ein **Streufeldtransformator** ist ein [Transformator](#), der gezielt eine vergleichsweise lose magnetische Kopplung zwischen Primär- und Sekundärwicklung aufweist.

- [Vorschaltgerät](#) für [Leuchtreklame-Röhren](#) (Aufgabe: Transformation der Netzspannung auf einige Kilovolt und Strombegrenzung), Bauformen mit festem oder einstellbarem magnetischem Nebenschluss
- sog. Klingeltransformator (Aufgabe: Kurzschlussfestigkeit und geringe [Leerlaufverluste](#)), vergrößerter [Eisenkern](#), zwischen den Wicklungen eingeschobenes [Dynamoblech](#) als Nebenschluss
- Schweißtransformator (Aufgabe: einstellbare Strombegrenzung für den [Schweißlichtbogen](#)), Strom über Anzapfungen oder veränderliche Kopplung oder verstellbaren magnetischen Nebenschluss wählbar
- besonders sichere Stromversorgungen (Aufgabe: Kurzschlussfestigkeit und besonders hohe Zuverlässigkeit), Zwischenkelausführung mit vergrößertem Eisenkern-Volumen

15. Wie erfolgt die Einstellung des Schweißstromes?

Einstellung erfolgt durch das Ändern der Ausgangsspannung. Dies kann über einen Stufenschalter erfolgen, der Windungen zu- bzw. wegschaltet.

16. Ein idealer Transformator hat am Netz 230 V 50 Hz eine Stromaufnahme von 0,5 A. Seine Ausgangsspannung beträgt 50 V. Ermitteln Sie die ausgangsseitige Stromstärke und das Übersetzungsverhältnis.

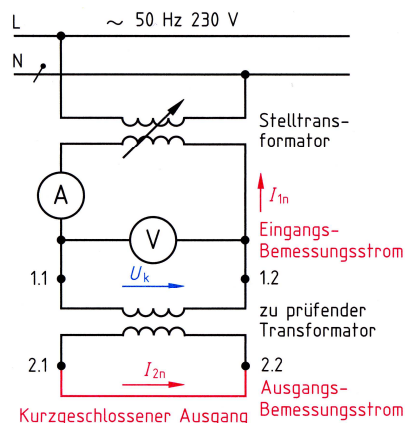
$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_2 \\
 U_1 \cdot I_1 &= U_2 \cdot I_2 \\
 I_2 &= \frac{U_1 \cdot I_1}{U_2} \\
 &= \frac{230 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A}}{50 \text{ V}} \\
 &= 2,3 \text{ A} \\
 \ddot{u} &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{230 \text{ V}}{50 \text{ V}} \\
 &= 4,6
 \end{aligned}$$

17. Wie ändert sich die Stromaufnahme und Leistungsaufnahme eines Transformators, wenn ein Luftspalt in seinem Eisenkern vergrößert wird?

Die Stromauf- und Leistungsaufnahme vergrößern sich. Damit die magnetische Flussdichte konstant bleibt, ist in einem magnetischen Kreis mit Luftspalt eine größere Durchflutung notwendig. Deshalb steigt auch der Magnetisierungsstrom.

18. Einphasentransformator

- a) Zeichnen Sie die Messschaltung zur Ermittlung der Kurzschlussspannung eines Einphasentransformators.



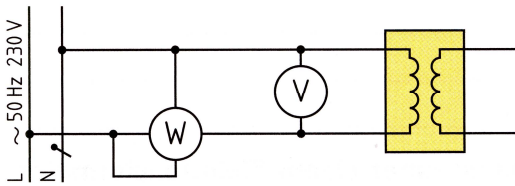
- b) Berechnen Sie die Kurzschlussspannung in % eines Transformators 400 V/230 V, wenn bei $U = 24 \text{ V}$ durch die Eingangswicklung der Bemessungsstrom fließt.

$$u_K = \frac{U_K}{U_n} = \frac{24 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 0,06 = 6\%$$

- c) Welche Aussage ist anhand der ermittelten Kurzschlussspannung über das Spannungsverhalten bei Belastung möglich?

Eine niedrige Kurzschlussspannung bedeutet, dass der Innenwiderstand des Transformators gering ist. Die Ausgangsspannung sinkt bei Belastung nur gering ab. Im Kurzschlussfall fließen hohe Ströme. Der Transformator ist spannungssteif. Tritt eine hohe Kurzschlussspannung auf (spannungsweich), sinkt die Ausgangsspannung bei Belastung stark ab.

19. Beim unten abgebildeten Versuch hat ein Trenntransformator bei anliegender Bemessungsspannung eine Leistungsaufnahme von 200 W.



Messschaltung

- a) Welche Verluste werden gemessen und wie entstehen sie?

Die Messschaltung dient zur Bestimmung der Eisenverluste (vgl. Zur Vertiefung Frage 1). Der Eisenkern wird durch die anliegende Wechselspannung ständig ummagnetisiert. Es entstehen Ummagnetisierungsverluste. Durch das Wechselfeld entstehen Wirbelströme im Metall, die weitere Verluste bewirken. Zusammen ergeben sie die Eisenverluste.

- b) Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Transformators bei Betrieb mit einer Bemessungsleistung 3000 VA, $\cos \varphi = 1$ und einer im Kurzschlussversuch ermittelten Leistungsaufnahme von 250 W.

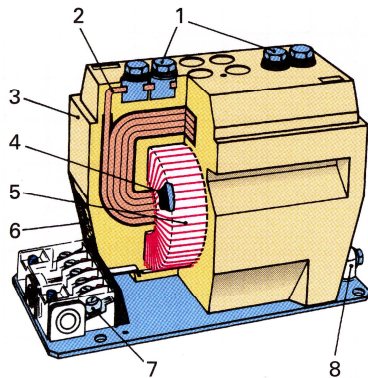
$$\begin{aligned}
 P_{ab} &= S_2 \cdot \cos \varphi \\
 &= 3000 \text{ VA} \cdot 1 \\
 &= 3000 \text{ W} \\
 \eta &= \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{VFe} + P_{W_i} + P_{ab}} \\
 &= \frac{3000 \text{ W}}{200 \text{ W} + 250 \text{ W} + 3000 \text{ W}} = 0,8695\dots \\
 &\approx 0,87
 \end{aligned}$$

20. Messwandler (vgl. Abbildung auf der folgenden Seite)

a) Wozu werden Messwandler verwendet?

Messwandler sind Transformatoren zum Anschluss von Messgeräten. Sie transformieren hohe Spannungen oder in messbare Größen.

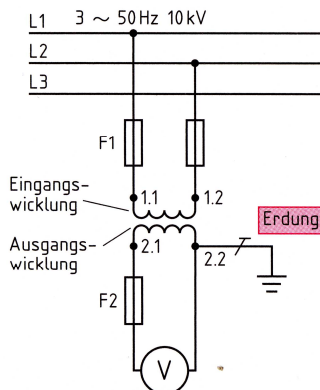
b) Worauf ist beim Betrieb von Spannungswandlern zu achten?



- 1 Anschluss der Eingangswicklung
- 2 Eingangswicklung
- 3 Gießharzkörper
- 4 Eisenkern in Schnittbandform
- 5 Ausgangswicklung
- 6 Leistungsschild
- 7 Klemmen der Ausgangswicklung
- 8 Erdungsschraube

Gießharz-Stromwandler im Schnitt

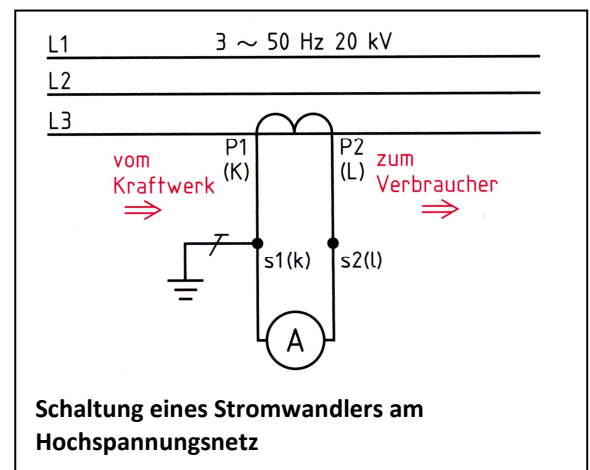
Spannungswandler dürfen nur mit geringer Belastung oder im Leerlauf betrieben werden. Der Spannungswandler wird sonst zerstört.



Schaltung eines Spannungswandlers am Hochspannungsnetz

c) Worauf ist beim Betrieb von Stromwandlern zu achten?

Stromwandler dürfen nur mit belasteter oder kurzgeschlossener Ausgangswicklung betrieben werden. Im Leerlauf entsteht in der Ausgangswicklung kein Gegenfeld. Dadurch würde in der Eingangswicklung durch den Stromfluss ein zu großer magnetischer Fluss entstehen, der gefährlich hohe Spannungen auf der unbelasteten Ausgangsseite zur Folge hätte. Die Isolierung würde beschädigt. Stromwandler dürfen deshalb nicht abgesichert werden.



Schaltung eines Stromwandlers am Hochspannungsnetz

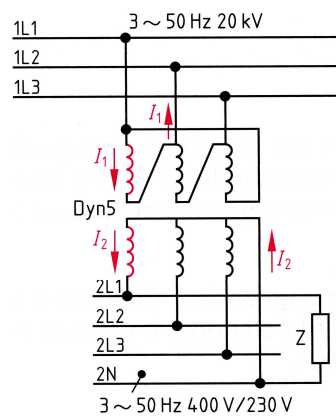
21. Ein Drehstromtransformator 10 kV/0,4 kV, $u_k = 5\%$, Schaltgruppe Dyn5, soll zur Versorgung des Niederspannungsnetzes verwendet werden.

a. Erklären Sie die Schaltgruppenbezeichnung.

- D: Oberspannungsseite in Dreieckschaltung
- y: Unterspannungsseite in Sternschaltung
- n: Sternpunkt (Neutralleiter) herausgeführt
- 5: Phasenverschiebung $5 \times 30^\circ = 150^\circ$

b. Beurteilen Sie die Eignung des Transformators.

Die Schaltung Dyn5 wird zur Versorgung von Niederspannungsnetzen verwendet. Der Neutralleiter ist voll belastbar.



Drehstromtransformator in Dyn5-Schaltung