Transformator

MESSUNGEN AM UNBELASTETEN UND BELASTETEN TRANSFORMATOR

- **Messung der Leerlaufspannung in Abhängigkeit von der Primärspannung bei festen Windungszahlen.**
- **Messung des Kurzschlussstroms in Abhängigkeit vom Primärstrom bei festen Windungszahlen.**

UE3040500

01/17 UD

Fig. 1: Anordnung zur Messung der Leerlaufspannung in Abhängigkeit von der Primärspannung.

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Transformatoren sind Spannungsumformer, die auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz beruhen. Sie werden insbesondere bei der Übertragung elektrischer Leistung über große Entfernungen eingesetzt, um durch eine Transformation auf möglichst hohe Spannungen und entsprechend niedrige Ströme Leitungsverluste zu minimieren.

Ein Transformator besteht im einfachsten Fall aus zwei gekoppelten Spulen, der Primärspule mit der Windungszahl N_1 und der Sekundärspule mit der Windungszahl N_2, die einen gemeinsamen Eisenkern umschließen. Im Folgenden wird der ideale, d.h. verlustfreie Transformator betrachtet.

Ist der Transformator unbelastet, kann im Sekundärkreis kein Strom fließen, d.h. $I_2 = 0$. Wird eine Wechselspannung U_1 an die Primärspule angelegt, verhält sie sich wie ein induktiver Widerstand, da ihr Ohm'scher Widerstand im Idealfall vernachlässigt werden kann. Im Primärkreis fließt dann ein Strom I, der einen magnetischen Fluss Φ erzeugt (Fig. 2) und so eine Spannung U_{ind} induziert. Diese Induktionsspannung ist wegen der Kirchhoff'schen Maschenregel $U_1 + U_{ind} = 0$ entgegengesetzt gleich zu U_1:

$$(1) \quad U_{ind} = -L_1 \cdot \frac{dI}{dt} = -N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -U_1 .$$

L_1: Induktivität der Primärspule
Φ: durch I erzeugter magnetischer Fluss

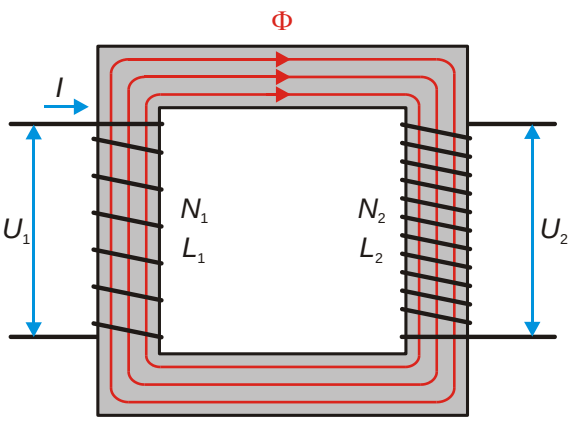

Fig. 2: Schematische Darstellung zum idealen, unbelasteten-Transformator mit Primär- und Sekundärspule im gleichen Wicklungssinn.

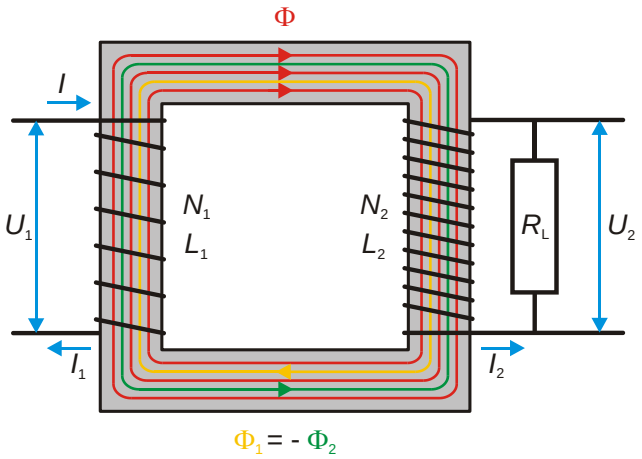

Fig. 3: Schematische Darstellung zum idealen, belasteten Transformator mit Primär- und Sekundärspule im gleichen Wicklungssinn.

Der Strom I entspricht einem reinen Blindstrom, da Spannung und Strom an einem induktiven Widerstand um $\varphi = 90°$ phasenverschoben sind („Die Spannung eilt dem Strom um 90° voraus“).

Da der magnetische Fluss Φ die Sekundärspule im Idealfall vollständig durchsetzt, wird dort eine Spannung

$$(2) \quad U_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

induziert. Aus (1) und (2) folgt schließlich das Spannungs- bzw. Übersetzungsverhältnis:

$$(3) \quad \frac{U_2}{U_1} = -\frac{N_2}{N_1}.$$

Das Minuszeichen zeigt an, dass U_1 und U_2 bei gleichem Wicklungssinn (Fig. 2) um 180° phasenverschoben sind. Bei entgegengesetztem Wicklungssinn sind U_1 und U_2 in Phase.

Beim belasteten Transformator fließt in der Sekundärspule ein Strom $I_2 = U_2 / R_L$, wobei R_L der Ohm'sche Lastwiderstand z.B. eines Verbrauchers ist (Fig. 3). Dieser Sekundärstrom entspricht einem reinen Wirkstrom, da Spannung und Strom an einem Ohm'schen Widerstand phasengleich sind ($\varphi_2 = 0°$). Er erzeugt den magnetischen Fluss

$$(4) \quad \Phi_2 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_2 \cdot I_2 \cdot \frac{A}{l},$$

μ_0: magnetische Feldkonstante
μ_r: Permeabilitätszahl
A: Spulenquerschnitt
ÿ: Spulenlänge

der die Primärspule im Idealfall vollständig durchsetzt und dem durch den Strom I erzeugten magnetischen Fluss Φ auf Grund der Lenz'schen Regel entgegengerichtet ist.

Dadurch überlagert sich dem primären Blindstrom I ein Wirkstrom I_1, der phasengleich mit der Primärspannung U_1 ist ($\varphi_1 = 0°$) und den zusätzlichen magnetischen Fluss

$$(5) \quad \Phi_1 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_1 \cdot I_1 \cdot \frac{A}{l}$$

erzeugt. Da der magnetische Fluss Φ unverändert bleibt, müssen sich die magnetischen Flüsse Φ_1 und Φ_2 gerade aufheben, d.h. $\Phi_1 + \Phi_2 = 0$. Damit folgt aus den Gleichungen (4) und (5)

$$(6) \quad \frac{I_2}{I_1} = -\frac{N_1}{N_2},$$

da μ_r, A und ÿ für beide Spulen gleich sind. Aus den Gleichungen (3) und (6) folgt, dass die primäre und die sekundäre Wirkleistung gleich sind:

$$(7) \quad P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = P_2.$$

Dabei gilt Gleichung (3) auch für den idealen, belasteten Transformator. Durch eine Betrachtung der Impedanzen lässt sich zeigen, dass das Spannungsverhältnis im Idealfall vom Ohm'schen Lastwiderstand unabhängig ist.

Für den belasteten Transformator ergeben sich zwei Grenzfälle. Im Grenzfall $R_L \to \infty$ ($I_2 = 0$) ist der Transformator sekundärseitig offen. Gleichung (3) gilt dann für die Leerlaufspannung U_{20}. Im Grenzfall $R_L = 0$ ($U_2 = 0$) ist der Transformator sekundärseitig kurzgeschlossen. Gleichung (6) gilt dann für den Kurzschlussstrom I_{2C}.

Im Experiment werden die Leerlaufspannung U_{20} in Abhängigkeit von der Primärspannung U_1 und der Kurzschlussstrom I_{2C} in Abhängigkeit vom Primärstrom I_1 für ein festes Windungszahlverhältnis $N_2 / N_1 = 2$ gemessen.

GERÄTELISTE

1 Spule D mit 600 Windungen 1000988 (U8497430)
1 Spule D mit 1200 Windungen 1000989 (U8497440)
1 Transformatorkern D 1000976 (U8497180)
1 Transformator mit Gleichrichter
1/ 2/ 4/ … 14 V, 5 A @230V 1003558 (U8521112-230)

oder

1 Transformator mit Gleichrichter
1/ 2/ 4/ … 14 V, 5 A @115V 1003557 (U8521112-115)
2 Digital-Multimeter P3340 1002785 (U118091)
1 Satz 15 Sicherheits-
experimentierkabel 75 cm 1002843 (U138021)

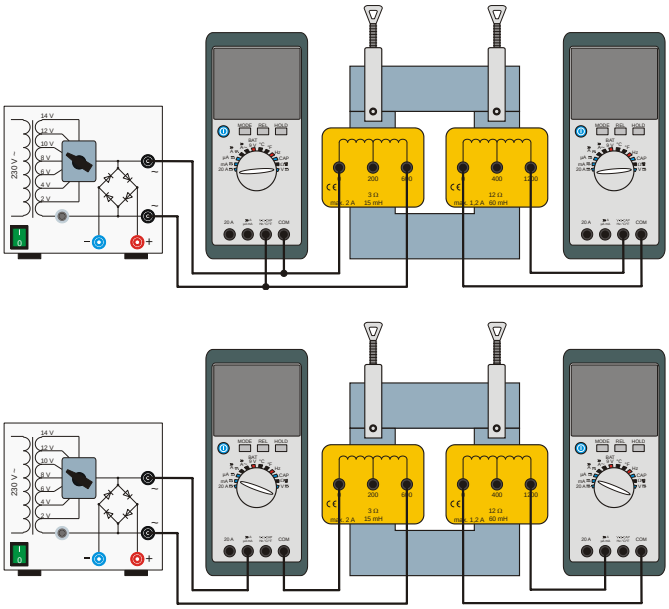

Fig. 4: Experimenteller Aufbau für den unbelasteten Transformator im Leerlauf (oben) und den belasteten Transformator bei Kurzschluss (unten).

AUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

- Experiment gemäß Fig. 4 oben aufbauen. Das primärseitige Multimeter parallel zur Primärspule als Spannungsmessgerät anschließen, den Spannungsmessbereich „V“ einstellen und „Mode AC“ wählen.
- Die Eingänge „COM“ und „V“ des sekundärseitigen Multimeters mit den Abgriffen „0“ und „1200“ der Sekundärspule verbinden, den Spannungsmessbereich „V“ einstellen und „Mode AC“ wählen.

Hinweis
Die Sekundärseite befindet sich dadurch im Leerlauf ($I_2 = 0$), es werden die Leerlaufspannungen U_{20} gemessen.

- Den Transformator mit Gleichrichter einschalten und nacheinander die Versorgungsspannungen U = 2 V, 4 V, 6 V, 8 V, 10 V, 12 V und 14 V einstellen.
- Für jede Versorungsspannung die Primär- und Leerlaufspannung an den Multimetern ablesen und in die Tab. 1 eintragen.
- Das primärseitige Multimeter jetzt in Reihe zur Primärspule als Strommessgerät anschließen (Fig. 4 unten), den Strommessbereich „mA“ einstellen und „Mode AC“ wählen.
- Die Eingänge „COM“ und „mA“ des sekundärseitigen Multimeters mit den Abgriffen „0“ und „1200“ der Sekundärspule verbinden, Strommessbereich „mA“ einstellen und „Mode AC“ wählen.

Hinweis
Die Sekundärseite ist dadurch über das Multimeter kurzgeschlossen ($U_2 = 0$), es werden die Kurzschlussströme I_{2C} gemessen. Das Multimeter fungiert als Ohm‘sche Last.

- Für jede Versorungsspannung den Primär- und Kurzschlussstrom an den Multimetern ablesen und in die Tab. 2 eintragen.

MESSBEISPIEL

Tab. 1: Unbelasteter Transformator im Leerlauf ($I_2 = 0$). Über die Versorgungsspannungen U eingestellte Primärspannungen sowie gemessene Leerlaufspannungen U_{20}, N_1 = 600, N_2 = 1200.

U_1 / V	U_{20} / V
2,42	4,43
4,74	8,84
6,90	12,92
9,32	17,59
11,37	21,52
13,50	25,63
15,92	30,32

Tab. 2: Belasteter Transformator bei Kurzschluss ($U_2 = 0$). Über die Versorgungsspannungen U eingestellte Primärströme I_1 sowie gemessene Kurzschlussströme I_{2C}, N_1 = 600, N_2 = 1200.

I_1 / mA	I_{2C} / mA
43,6	19,5
86,8	39,6
123,3	56,9
166,0	77,0
200,0	92,0
237,0	109,0
278,0	129,0

AUSWERTUNG

- Die Leerlaufspannungen U_{20} in Abhängigkeit von den Primärspannungen U_1 (Tab. 1) und die Kurzschlussströmestrome I_{2C} in Abhängigkeit vom Primärstrom I_1 (Tab. 2) graphisch darstellen und jeweils eine Ursprungsgerade anpassen (Fig. 5, 6).

Aus Gleichung (3) folgt für die Beträge der Spannungen

$$U_{20} = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$$

und aus Gleichung (6) entsprechend für die Ströme

$$I_{2C} = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 .$$

Daher sind die Steigungen der Geraden in Fig. 5 und Fig. 6 durch das Verhältnis der Windungszahlen $N_2 / N_1 = 2$ bzw. $N_1 / N_2 = 0{,}5$ bestimmt. Aus der Anpassung der Ursprungsgeraden ergibt sich $N_2 / N_1 = 1{,}90$ im Leerlauf und $N_1 / N_2 = 0{,}46$ bei Kurzschluss.

Die Werte weichen vom idealen Wert 2 bzw. 0,5 ab, weil reale Spulen immer verlustbehaftet sind. Die Verluste setzen sich aus den so genannten Eisen- und Kupferverlusten sowie Streuverlusten des magnetischen Flusses zusammen. Die Eisenverluste resultieren aus der Hysterese bei Ummagnetisierung des Eisenkerns und Wirbelströmen im Eisenkern, die Kupferverluste aus den Ohm'schen Widerständen der Kupferwicklungen der Spulen. Die Streuverluste werden dadurch verursacht, dass der magnetische Fluss Φ der vom Strom I durchflossenen Primärspule nicht vollständig die Sekundärspule durchsetzt.

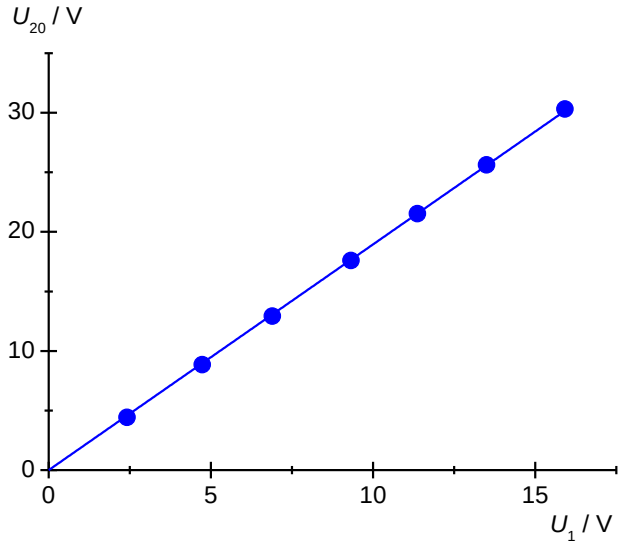

Fig. 5: Unbelasteter Transformator im Leerlauf ($I_2 = 0$). Leerlaufspannung U_{20} in Abhängigkeit von der Primärspannung U_1, $N_1 = 600$, $N_2 = 1200$.

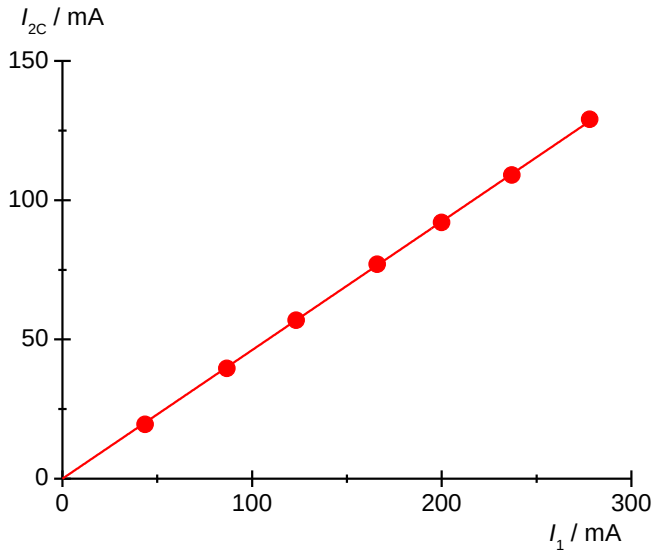

Fig. 6: Belasteter Transformator bei Kurzschluss ($U_2 = 0$). Kurzschlussstrom I_{2C} in Abhängigkeit vom Primärstrom I_1, $N_1 = 600$, $N_2 = 1200$.

© Copyright 2017 3B Scientific GmbH