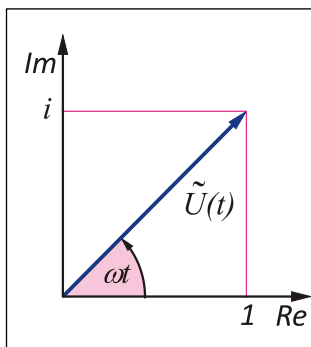


Dieser Versuch befasst sich mit verschiedenen Aspekten des Transformators. Zunächst soll das Verhalten der Spannungen und Stromstärken am realen Transformator gemessen und mit dem idealen Transformator verglichen werden. Im zweiten Teil des Versuches wird die Hysteresekurve des Eisenkernes dargestellt.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Vorbemerkungen

1.1.1 Komplexe Darstellung periodischer Größen



Eine zeitlich periodische Wechselspannung

$$U(t) = U_0 \cdot \cos \omega t \quad (1)$$

lässt sich mit der Eulerschen Beziehung

$$e^{ix} = \cos x + i \cdot \sin x \quad (2)$$

darstellen als Realteil einer komplexen Größe:

$$U(t) = \operatorname{Re}(U_0 \cdot e^{i\omega t}). \quad (3)$$

Bild 1: Komplexes Zeigerdiagramm einer harmonisch oszillierenden Spannung $U(t)$

Diese komplexe Größe kann in der Gaußschen Zahlenebene (**Bild 1**) veranschaulicht werden als ein mit der Kreisfrequenz ω in mathematisch positiver Richtung rotierender Zeiger der Länge U_0 .

Es ist nun üblich, statt der Gleichung (3) die Spannung durch die komplexe Größe selbst zu beschreiben:

$$\tilde{U}(t) = U_0 \cdot e^{i\omega \cdot t} \quad (11)$$

und die physikalische Spannung nur als Realteil von Gleichung (4) zu interpretieren. Um dies zu kennzeichnen, werden solche komplexen Größen mit einer Tilde („Schlange“) versehen.

Der Vorteil dieser komplexen Darstellung gegenüber der trigonometrischen Schreibweise periodischer Größen liegt in erheblich vereinfachten Rechnungen, in denen man beispielsweise auf Additionstheoreme für trigonometrische Funktionen ganz verzichten kann.

1.1.2 Widerstände im Wechselstromkreis

Spulen und Kondensatoren gehören zur Gruppe der Wechselstromwiderstände. Sie stellen magnetische oder kapazitive Speicher dar, die eine **Phasenverschiebung** zwischen Spannung und Strom bedingen. Im Gegensatz dazu kann in einem **Wirkwiderstand** R keine magnetische oder elektrische Energie gespeichert werden.

Ein Wechselstrom

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

ruft in einem Wirkwiderstand lediglich einen Spannungsabfall

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

hervor, für den das Ohmsche Gesetz sowohl für die **Augenblickswerte** ($U(t)$, $I(t)$)

$$U(t) = I(t) \cdot R \quad (5)$$

als auch für die **Effektivwerte** (U_{eff}, I_{eff})

$$U_{eff} = I_{eff} \cdot R \quad (6)$$

gilt. Der **Scheitelwert** I_0 bzw. U_0 ist der höchste Augenblickswert eines Wechselstromes bzw. einer Wechselspannung, während der **Effektivwert** I_{eff} eines Stromes der äquivalenten Gleichstromstärke entspricht, die in einem Widerstand R die gleiche Stromwärmeleistung hervorruft:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 \cdot dt} < I_0 \quad (7)$$

Eine analoge Gleichung gilt für den Effektivwert der Spannung. Als Scheitelfaktor wird das Verhältnis des Scheitelwertes zum Effektivwert definiert, das bei Sinusströmen bzw. Sinusspannungen den Wert $\sqrt{2}$ hat:

$$I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_0 \quad \text{bzw.} \quad U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_0 \quad (8a) \quad (8b)$$

Für Gleichstrom stellt eine Spule einen Ohmschen Widerstand dar, der durch das Material und die Abmessungen der Drahtwicklungen bestimmt ist. Ein verlustfreier Kondensator bildet einen unendlich hohen Gleichstromwiderstand. Im Wechselstromkreis bedeuten Spulen (**Induktivität L**) und Kondensatoren (**Kapazität C**) von der **Kreisfrequenz ω** der Wechselspannung abhängige **induktive ($\tilde{Z}_L$)** bzw. **kapazitive ($\tilde{Z}_C$) Widerstände**. In komplexer Darstellung lauten diese:

$$\tilde{Z}_L = i\omega \cdot L \quad \tilde{Z}_C = \frac{1}{i\omega \cdot C} \quad (9) \quad (10)$$

Die Beträge

$$|\tilde{Z}_L| = X_L = \omega \cdot L \quad |\tilde{Z}_C| = X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (11) \quad (12)$$

bezeichnet man als **Blindwiderstand** der Induktivität bzw. der Kapazität, da in ihnen keine Wirkleistung umgesetzt wird.

In der komplexen Darstellung wird der Gesamtwiderstand einer Spule, deren Ersatzschaltung eine Reihenschaltung aus Wirkwiderstand R und induktiven Widerstand $\tilde{Z}_L$ ist, durch

$$\tilde{Z} = R + i\omega \cdot L \quad (13)$$

beschrieben. Den Betrag von $\tilde{Z}$ nennt man **Scheinwiderstand (Impedanz)**. Der Darstellung komplexer Zahlen in der Gaußschen Zahlenebene entsprechend, wird R auf der reellen und $\omega \cdot L$ auf der positiven imaginären Achse aufgetragen (**Bild 2**). Die vektorielle Addition liefert den resultierenden Widerstand vom Betrag

$$|\tilde{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (14)$$

und einen Phasenwinkel φ entsprechend

$$\tan \varphi = \frac{\omega \cdot L}{R} \quad (15)$$

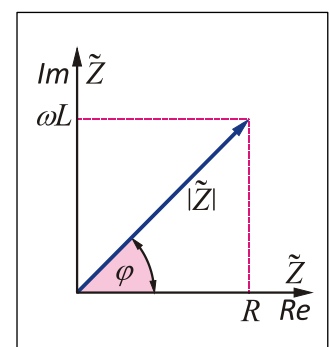


Bild 2: Zeigerdiagramm für den Widerstand einer Spule

1.2 Quantitative Behandlung des Transformators

1.2.1 Schaltung und Grundgleichung

In **Bild 3** ist die Transformatorschaltung gezeichnet: An die Primärseite wird eine Spannung $\tilde{U}_1$ angeschlossen; sie erzeugt den Strom $\tilde{I}_1$ durch die Primärwicklung. Alle die Primärseite betreffenden Größen erhalten den *Index1*, alle sekundärseitigen den *Index2*. Auf der Sekundärseite ist ein Verbraucher angeschlossen, der i. a. durch einen komplexen Widerstand zu charakterisieren ist.

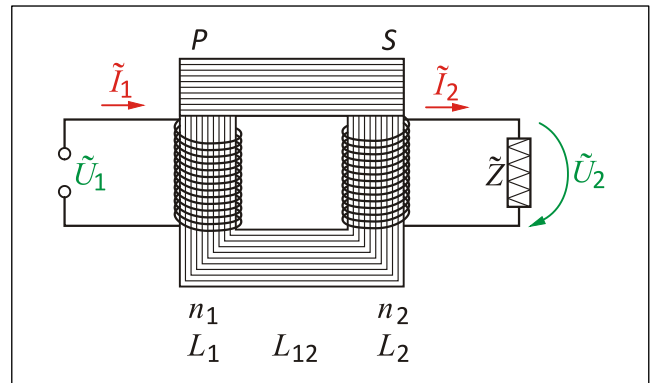


Bild 3: Transformatorschaltung

Wird für die beiden Teilkreise die Maschenregel aufgeschrieben, ergeben sich unmittelbar die sogenannten **Transformatorgleichungen**:

$$\text{Primär:} \quad \tilde{U}_1 = i\omega \cdot L_1 \cdot \tilde{I}_1 + i\omega \cdot L_{12} \cdot \tilde{I}_2 \quad (16)$$

$$\text{Sekundär:} \quad 0 = \tilde{Z} \cdot \tilde{I}_2 + i\omega \cdot L_2 \cdot \tilde{I}_2 + i\omega \cdot L_{12} \cdot \tilde{I}_1. \quad (17)$$

In diesen Gleichungen stehen links die jeweiligen Quellenspannungen, rechts die Spannungsabfälle:

- am rein induktiven Widerstand $\tilde{Z}_1 = i\omega \cdot L_1$ der Primärspule,
- von der Sekundär- in die Primärspule über die Gegeninduktivität L_{12} induzierten Spannung $\tilde{Z}_{12} \cdot \tilde{I}_2 = i\omega \cdot L_{12} \cdot \tilde{I}_2$,
- der Spannungsabfall am Verbraucher $\tilde{Z} \cdot \tilde{I}_2$,
- der durch die Selbstinduktion bewirkte Spannungsabfall $i\omega \cdot L_2 \cdot \tilde{I}_2$,
- der durch die Gegeninduktivität aus der Primärseite übertragene Spannungsabfall $i\omega \cdot L_{12} \cdot \tilde{I}_1$.

1.2.2 Auflösung der Transformatorgleichung und Diskussion von Spezialfällen

Alle interessierenden Größen, hier der Sekundärstrom $\tilde{I}_2$ und die Sekundärspannung $\tilde{U}_2$, lassen sich entweder durch den Primärstrom $\tilde{I}_1$ oder die Primärspannung $\tilde{U}_1$ ausdrücken.

Aus der Gleichung (17) erhält man sofort das Stromverhältnis

$$\frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} = - \frac{i\omega \cdot L_{12}}{\tilde{Z} + i\omega \cdot L_2}. \quad (18)$$

Die Kombination von Gleichung (16) und (18) liefert mit $\tilde{U}_2 = \tilde{Z} \cdot \tilde{I}_2$ das Spannungsverhältnis

$$\frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1} = \frac{L_{12} \cdot \tilde{Z}}{-L_1 \cdot \tilde{Z} + i\omega \cdot (L_{12}^2 - L_1 \cdot L_2)}. \quad (19)$$

Die Selbst- bzw. Gegeninduktionskoeffizienten sind definiert (*Siehe Literatur zur Induktion*):

$$\boxed{L_1 = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot n_1^2 \cdot \frac{A}{l}} \quad \boxed{L_2 = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot n_2^2 \cdot \frac{A}{l}} \quad \boxed{L_{12} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \frac{A}{l}} \quad (20)$$

Vereinfachend wird angenommen, dass Primär- und Sekundärspule sich nur durch ihre Windungszahlen (n_1, n_2) unterscheiden, also gleiche Länge l und gleichen Querschnitt A besitzen. μ_0 ist die magnetische Feldkonstante, μ_r die Permeabilitätszahl (siehe **Abschnitt 1.2.4**).

Die Gleichungen (20) gelten nur, wenn die magnetischen Flüsse die Spulen ganz durchsetzen; insbesondere muss der von einer Spule erzeugte Fluss ganz durch die andere Spule geführt werden. Dann hat man einen **idealen Transformator** vor sich. In Wirklichkeit ist stets mit **Streuverlusten** zu rechnen, insbesondere der Gegeninduktivitätskoeffizient ist dann kleiner als $\mu_r \cdot \mu_0 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot l/A$.

Es gilt also:

$$\text{Idealer Transformator: } L_{12}^2 = L_1 \cdot L_2$$

$$\text{Realer Transformator: } L_{12}^2 < L_1 \cdot L_2$$

Ganz allgemein kann man aus den Gl. (18) und (19) für das Strom- und Spannungsverhältnis ablesen:

- Beide Verhältnisse werden durch die Gegeninduktivität L_{12} bestimmt.
- Bei einem idealen Transformator ist das Spannungsverhältnis von der Größe und Art des Verbraucherwiderstandes $\tilde{Z}$ unabhängig und direkt durch das Übertragungsverhältnis n_2/n_1 gegeben:

$$\left| \frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1} \right| = \frac{L_{12}}{L_1} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (21)$$

Für weitergehende Aussagen zum Strom- und Spannungsverhältnis muss man den Verbraucher $\tilde{Z}$ genauer spezifizieren. Dazu lassen sich einige Spezialfälle diskutieren:

a) Kurzschluss: $\tilde{Z} = 0$

Bei Kurzschluss ist die Sekundärspannung ebenfalls gleich null; im Einzelnen verbleibt

$$\left| \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} \right| = \frac{I_{2eff}}{I_{1eff}} = \frac{L_{12}}{L_2} = \frac{n_1}{n_2} ; \quad \left| \frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1} \right| = \frac{U_{2eff}}{U_{1eff}} = 0 \quad (22)$$

Dies gilt für den idealen Transformator; wenn Streuverluste vorhanden sind, wird dieses Verhältnis der Windungszahlen nicht erreicht.

b) Leerlauf: $\tilde{Z} \rightarrow \infty$

$$\left| \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} \right| = 0 ; \quad \left| \frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1} \right| = \frac{U_{2eff}}{U_{1eff}} = \frac{L_{12}}{L_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (23)$$

Der Sekundärkreis ist jetzt geöffnet, der Sekundärstrom verschwindet. Bei Streuverlusten wird dieses Verhältnis nicht erreicht.

c) Rein Ohmscher Verbraucher: $\tilde{Z} = R$

(R enthält auch den rein Ohmschen Anteil R_2 der Sekundärspule)

$$\left| \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} \right| = \frac{\omega \cdot L_{12}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L_2^2}} \leq \frac{n_1}{n_2} ; \quad \left| \frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1} \right| = \frac{L_{12} \cdot R}{\sqrt{L_1^2 \cdot R^2 + \omega^2 \cdot (L_{12}^2 - L_1 \cdot L_2)^2}} \leq \frac{n_2}{n_1} . \quad (24)$$

Bei Anschluss eines Ohmschen Verbrauchers ist der Strom stets kleiner als der Kurzschlussstrom und die Spannung geringer als die Leerlaufspannung. Nur beim idealen Transformator hat man eine von der Größe des Verbrauchers unabhängige konstante Ausgangsspannung.

Dann gilt nämlich $L_{12}^2 = L_1 \cdot L_2$ und der Verbraucherwiderstand R fällt aus der Gleichung (24) heraus.

1.2.3 Leistungsanpassung

Im Sekundärkreis fällt eine **elektrische Leistung** P an, die im Primärkreis aufgebracht und durch das magnetische Feld übertragen wird. Zur Berechnung der Primärleistung wird zunächst die Momentanleistung am Lastwiderstand $\tilde{Z}$ an der Sekundärseite bestimmt.

Dieser verursacht eine Phasenverschiebung φ zwischen Strom und Spannung. Es gilt

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) = U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \omega \cdot t \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi). \quad (25)$$

Die im zeitlichen Mittel über eine Periode aufgebrachte Leistung wird als **Wirkleistung** $\bar{P}$ bezeichnet. Für sie ergibt sich aus Gleichung (25)

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi \quad (26)$$

Bei rein imaginärem Lastwiderstand $\tilde{Z}$ ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung $\varphi = 90^\circ$, die Wirkleistung also $P=0$. Nur ein Ohmscher Anteil des Verbraucherwiderstandes führt zu einer nicht verschwindenden Wirkleistung und damit zu einem Energieverbrauch.

Den Wechselstromwiderstand der Primärspule beim idealen Transformator leitet man aus den Gleichungen (16) und (18) her:

$$\tilde{Z}_1 = \frac{\tilde{U}_1}{\tilde{I}_1} = i\omega \cdot L_1 + \frac{\omega^2 \cdot L_{12}}{\tilde{Z} + i\omega \cdot L_2} \quad (27)$$

–Im unbelasteten Fall ($\tilde{Z} = \infty$) verschwindet der zweite Term in Gl. (27) und der Wechselstromwiderstand des Primärkreises ist rein imaginär. Die Wirkleistung beim unbelasteten Transformator ist also Null.

–Für den Grenzfall eines Kurzschlusses im Sekundärkreis ($\tilde{Z} = 0$) erhält man aus Gl. (27) auch $\tilde{Z}_1 = 0$. Die Primärspule des idealen Transformators wirkt dann ebenfalls wie ein Kurzschluss, und auch in diesem Fall verschwindet die Wirkleistung.

–Für den Fall ($0 < \tilde{Z} < \infty$) besitzt der zweite Summand in Gl. (27) einen nicht verschwindenden Realteil

$$\operatorname{Re}(\tilde{Z}_1) = \frac{R \cdot \omega^2 \cdot L_{12}}{R^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad (28)$$

so dass im Primärkreis eine endliche Wirkleistung aufgebracht werden muss.

1.2.4 Der Transformator zur Widerstandsanpassung

Beim Anschluss eines Ohmschen Lastwiderstandes (*Verbraucher*) R an eine Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand R_i ist die Leistung maximal, wenn

$$R = R_i. \quad (29)$$

Zur Leistungsanpassung von Verbrauchern, die die Bedingung (29) nicht erfüllen, kann ein Transformator zwischen Quelle und Verbraucher verwendet werden (*Bsp.: Sendeleistung einer Antenne, Leistung eines Lautsprechers*).

Aus Gl (28) folgt

$$R_1 = \operatorname{Re}(\tilde{Z}_1) = \frac{R \cdot \omega^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{R^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad \text{mit } L_1 = L_2 \cdot \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad \text{ergibt sich} \quad \frac{R_1}{R} = \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot n_1^2}{(R^2 + \omega^2 \cdot L_2^2) \cdot n_2^2}.$$

Unter der Voraussetzung (**Überprüfung in diesem Versuch!**)

$$R \ll \omega \cdot L_2 \quad (30)$$

ergibt sich $\frac{R_1}{R} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$, bezogen auf diesen Versuch

$$\boxed{\frac{R_i}{R_L} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (R_L \text{ bei } P_{L(max)})} \quad (31)$$

1.2.5 Hysterese

Neben den Streuverlusten treten bei einem realen Transformator auch Energieverluste beim Ummagnetisieren des Spulenkernes auf. Bei paramagnetischen und diamagnetischen Stoffen zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte gilt die Beziehung

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \quad (32)$$

mit μ_0 als magnetische Feldkonstante und $\mu_r(H)$ als Permeabilitätszahl.

Bei ferromagnetischen Stoffen, die als Transformatorkerne eingesetzt werden, wird die magnetische Flussdichte B wesentlich durch die Ausrichtung von Elementarmagneten bestimmt. Diese ist außer von

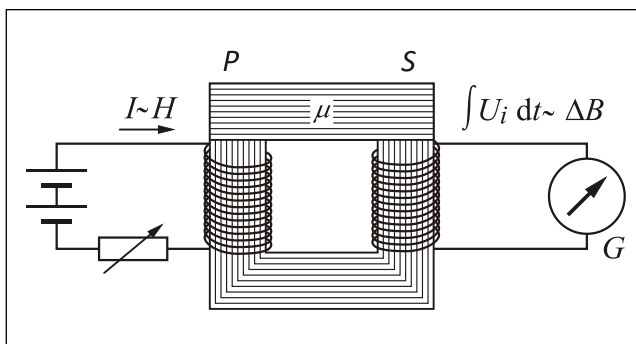


Bild 4a: Schaltung eines geschlossenen Transformators mit einem Eisenjoch für die Ermittlung der Hysterese

der Feldstärke H auch von der „Vorgeschichte“ des Materials abhängig, die Permeabilitätszahl μ_r ist also nicht konstant.

In **Bild 4b** ist der prinzipielle Zusammenhang zwischen B und H für den ferromagnetischen Fall (*Hysteresekurve*) dargestellt.

Bei einer Periode des Wechselstromes wird die Hysteresekurve einmal durchlaufen. Die Arbeit, die für die Ummagnetisierung während dieser Periode notwendig ist, wird durch den von der Hysteresekurve eingeschlossenen Flächeninhalt bestimmt.

Die mittlere Leistung, die bei der periodischen Ummagnetisierung im Eisen als Wärme verloren geht, ist

$$P_{\text{magn.}} = f \cdot V \cdot \oint B(H) dH \quad (33)$$

V : Volumen des Eisenkerns

f : Frequenz des Wechselstromes

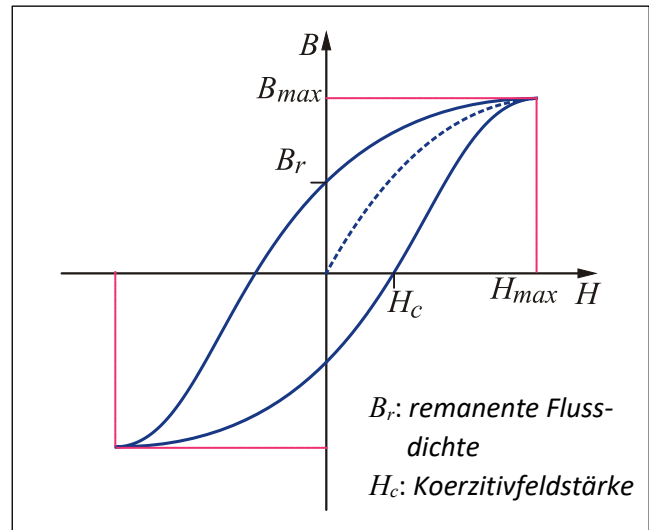
Das **Bild 4b** zeigt die Darstellungsmöglichkeit der Hysteresekurve z.B. auf einem Oszilloskop.

Dazu werden die Proportionalitäten

$$I_1 \sim H \text{ und } \int U_i dt \sim \Delta B$$

genutzt (siehe Versuchsdurchführung).

Bild 4b: Hysteresekurve mit Neukurve
(Eine Neukurve entsteht beim erstmaligen Hochfahren des H-Feldes.)



2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: Warum besteht der Eisenkern von Transformatoren meistens aus vielen zusammengeieteten Blechen?

Aufgabe 2: Warum brummen Trafos und mit welcher Frequenz?

Aufgabe 3: Wie ist das theoretische Übertragungsverhältnis eines Transformators, wenn dieser mit einer Primärspule von $n_1=2000$ Wdg. und einer Sekundärspule von $n_2=400$ Wdg. aufgebaut ist?

Aufgabe 4: Warum wird vor dem Transport von elektrischer Energie über weite Strecken mit Hilfe von Transformatoren die Spannung erhöht?

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Eisenkern und verschiedene Spulen, Stelltrafo, 2 Vielfachmessgeräte, Oszilloskop, Schiebewiderstand 100Ω (Lastwiderstand), Stellwiderstand $1 \dots 10\Omega$, Widerstand $3,3\Omega$ bzw. $1\text{M}\Omega$, Kondensator $1\mu\text{F}$

2.2.2 Versuchshinweise

Alle Spannungs- und Stromangaben beziehen sich auf **zu messende Effektivwerte!**

Hinweis:

Bei allen Aufgaben dient ein Stelltrafo als Primärspannungsquelle. Stellen Sie vor jeder Änderung des Schaltungsaufbaus die Primärspannung **auf Null** zurück!

Aufgabe 1: Messung von Spannung und Strom für **zwei unterschiedliche Windungsverhältnisse** n_1/n_2

Aufgabe 1a: $u_2 = f(u_1)$ unbelasteter Transformator

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 5a** auf. (mit $n_1=1000$ Wdg. sowie $n_2=(500; 250)$ Wdg.).
- Variieren Sie für die Messungen die **Primärspannung** u_1 von (0...20)V (Wechselspannung) in **2V-Schritten**. Beginnen Sie **bei** $u_1=0$.

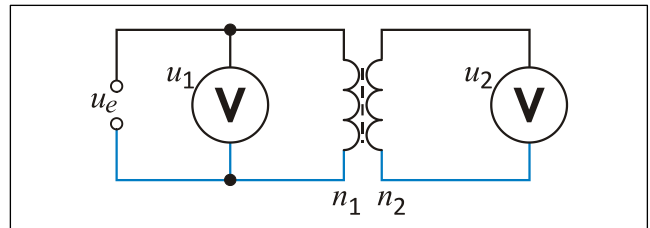


Bild 5a: Versuchsaufbau

Aufgabe 1b: $i_1 = f(i_2)$ belasteter Transformator

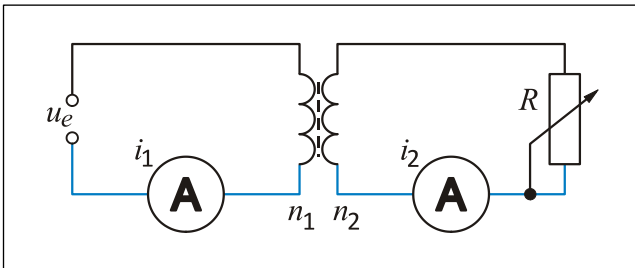


Bild 5b: Versuchsaufbau

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 5b** auf. (mit $n_1=1000$ Wdg. sowie $n_2=(500; 250)$ Wdg.).
- Stellen Sie als Primärspannung ca. $u_1 = u_e = 20$ V ein.
- Messen Sie den **Primärstrom** i_1 und den **Sekundärstrom** i_2 .
- Variieren Sie dabei den Sekundärstrom i_2 mittels des Lastwiderstandes $R_L = 100 \Omega$.

- Schieben Sie diesen Widerstand zunächst auf die Mittelstellung und stellen Sie danach den Lastwiderstand auf **4 weitere Werte vor** und **4 weitere Werte nach** dieser Mittelstellung ein (max. Dauerstrom beachten).
- Für $i_2=0$ unterbrechen Sie den Sekundärkreis (Lastwiderstand für diesen Fall nicht anschließen).

Aufgabe 2: Untersuchung der Wirkleistung im Primärkreis eines unbelasteten Transformators

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 6** so auf ($n_1 = n_2 = 250$ Wdg.), dass die Stromstärke i_1 proportional zum Spannungsabfall u_1 ist. Die Primärspule ist dabei mit dem Vorwiderstand R_V in Reihe geschaltet.
- Führen Sie eine Messung von i_1 , u_1 und $\cos \varphi$ für zwei unterschiedliche Primärspannungen (ca. $u_1 = (10; 20)$ V) durch.
- Ermitteln Sie die Phasenverschiebung φ zwischen Strom und Spannung mit dem Oszilloskop. Verwenden Sie dabei die Lissajous-Elipse (siehe **Bild 7**).

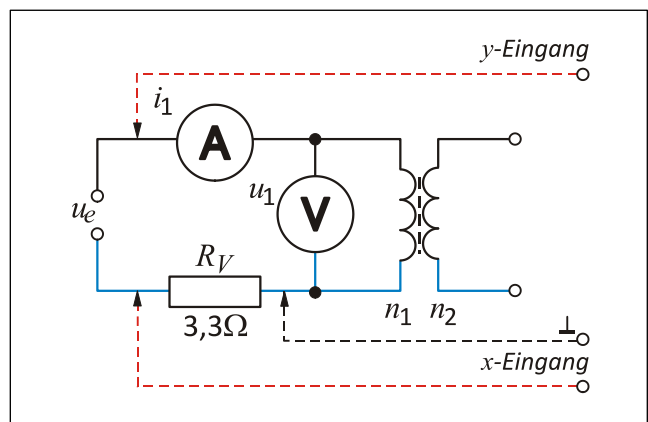


Bild 6: Versuchsaufbau

Achtung:

Vor Inbetriebnahme Laborpersonal unbedingt verständigen!

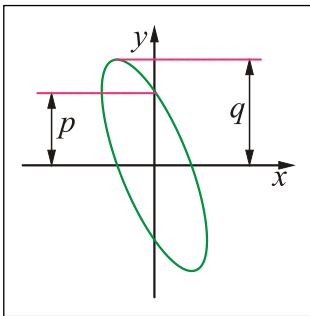


Bild 7: Lissajous-Figur zur Bestimmung der Phasenverschiebung

- Schließen Sie den x -Eingang zwischen Widerstand R_V und Spannungsquelle u_e sowie den y -Eingang zwischen Amperemeter und anderem Pol der Spannungsquelle u_e an. Die Massen (schwarzes Ader am BNC-Kabel) werden auf der anderen Seite des Widerstandes R_V angeschlossen.
- Drücken Sie auf den **x - y -Taster** am Oszilloskop und positionieren Sie die Lissajous-Ellipse mittig auf dem Bildschirm.
- Bestimmen Sie aus der Lage dieser entstehenden Ellipse die Phasenverschiebung.

Es folgt aus der Parameterdarstellung diese Ellipse mit nicht achsenparallelen Halbachsen

$$\sin \varphi = \frac{p}{q} . \quad (34)$$

Aufgabe 3: Bestimmung der abgegebenen Leistung P an einem ohmschen Lastwiderstand R_L im Sekundärkreis in Abhängigkeit von der Größe dieses Lastwiderstandes

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 8** auf (mit $n_1=250$ Wdg., $n_2=500$ Wdg., $L_2=9$ mH).
- Stellen Sie die Primärspannung auf einen Wert von $u_e=u_1=20$ V ein.
- Messen Sie durch Veränderung des Lastwiderstandes R_L (Lastwiderstand 100Ω) die Sekundärspannung u_2 und den Sekundärstrom i_2 durch **10 Einstellungen** von R_L (wie bei **Aufgabe 1b**).

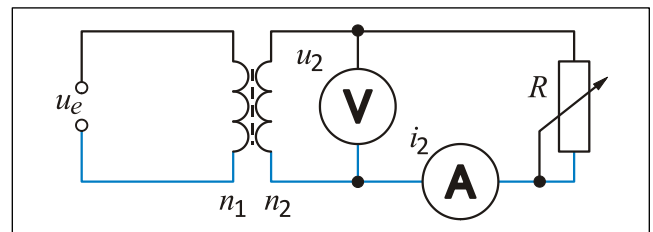


Bild 8: Versuchsaufbau

Aufgabe 4: Hysteresekurve des Transformators mittels Oszilloskops

- Die Darstellung der Hysteresekurve erfolgt mit dem Oszilloskop im xy -Betrieb.
- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 9** auf ($n_1=n_2=250$ Wdg., $u_e=20$ V).
- Schließen Sie den x -Eingang an den veränderlichen Kontakt des Stellwiderstandes im Primärkreis an. So können Sie den Strom und damit auch zur Koerzitivfeldstärke H proportionalen Spannungsabfall graphisch darstellen.
- Der y -Eingang wird zwischen dem Widerstand $R=1 \text{ M}\Omega$ und dem Kondensator $C=1 \mu\text{F}$ im Sekundärkreis angeschlossen. Die Sekundärspannung u_2 ist somit proportional zur zeitlichen Ableitung von der Magnetflussdichte B .

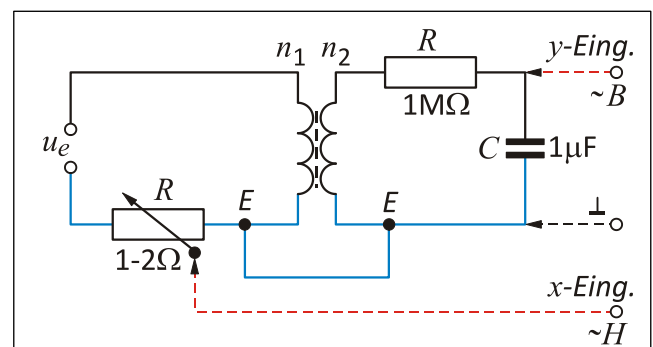


Bild 9: Versuchsaufbau

Hinweis:

Man erhält ein zur Magnetflussdichte B proportionales Spannungssignal, indem man u_2 durch ein RC-Glied über die Zeit integriert.

- Die Massen (schwarzes Ader am BNC-Kabel) werden auf einer Seite des Kondensators zusammen geschaltet.
- Skizzieren Sie das erhaltene Oszilloskopbild auf **Millimeterpapier**.

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Sie haben für **zwei** unterschiedliche Windungsverhältnisse n_1/n_2 folgendes gemessen

- a) $u_2 = f(u_1)$ beim unbelasteten und
- b) $i_1 = f(i_2)$ beim belasteten Transformator.

- Stellen Sie diese Funktionen in je einem Diagramm graphisch dar und ermitteln Sie deren Anstiege. Zeichnen Sie zu den Funktionsgeraden entsprechend die theoretischen Geraden mit ein.
- Vergleichen Sie die Verhältnisbeziehungen n_1/n_2 , u_1/u_2 und i_2/i_1 aus den theoretischen Überlegungen und den gemessenen Funktionsanstiegen.
- Vergleichen Sie den belasteten und den unbelasteten Transformator hinsichtlich der Messabweichungen miteinander. Welche Aussagen können Sie treffen? Diskutieren Sie das Ergebnis.

Aufgabe 2: Untersuchung der Wirkleistung im Primärkreis eines unbelasteten Transformators

- Bestimmen Sie die Wirkleistung im Primärkreis eines unbelasteten Transformators.
- Ermitteln Sie die Messunsicherheiten (*absolut und relativ*) durch eine Fehlerrechnung von u_1 , i_1 , φ und P .

Aufgabe 3: Bestimmung der abgegebenen Leistung P an einem ohmschen Lastwiderstand R_L im Sekundärkreis in Abhängigkeit von der Größe dieses Lastwiderstandes

- Stellen Sie die aus den Messwerten bestimmten Größen der Leistung P_L und des Lastwiderstandes R_L als Funktion $P_L = f(R_L)$ graphisch dar.
- Liegt die Leistungsanpassung am Maximum von P_L vor, kann daraus auf den Innenwiderstand R_i des Stelltrafos geschlossen werden. Berechnen Sie R_i bei $P_{L(max)}$ nach Gleichung (31).
- Überprüfen Sie die Gleichung (30) zur Widerstandsanpassung auf ihre Richtigkeit.

Aufgabe 4: Hysteresekurve des Transformators mittels Oszilloskops

- Diskutieren Sie das erhaltene Oszilloskopbild.

3. Ergänzung

In der Technik finden auch Transformatoren mit $n_1 = n_2$ Anwendung. Mit diesen sogenannten Trenntransformatoren ist es möglich, zwei Stromkreise galvanisch voneinander zu trennen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn in dem einen Stromkreis ein Pol geerdet ist, während im anderen Stromkreis beide Pole erdfrei sein sollen.

Bei Stelltransformatoren wird die Sekundärspannung über einen Schleifkontakt von der Sekundärspule abgegriffen. Die wirkliche Windungszahl n_2 und damit auch u_2 sind von der Stellung des Schleifkontaktes abhängig.