

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,  
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

---

**Versuch 16:**  
**Der Transformator**

---

Praktikant: Felix Kurtz  
Michael Lohmann  
E-Mail: felix.kurtz@stud.uni-goettingen.de  
m.lohmann@stud.uni-goettingen.de  
Betreuer: Björn Klaas  
Versuchsdatum: 10.09.2014

Testat:
---------

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Unbelasteter Transformator . . . . .	3
2.2	Belasteter Transformator . . . . .	4
2.3	Methoden, um die Phasenverschiebung zu berechnen . . . . .	4
2.3.1	Lissajous-Figuren . . . . .	4
2.3.2	Zeigerdiagramm . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Spannungsquelle . . . . .	7
4.2	Übersetzungsverhältnis . . . . .	7
4.3	Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom . . . . .	8
4.4	Leistung . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
	<b>Literatur</b>	<b>10</b>

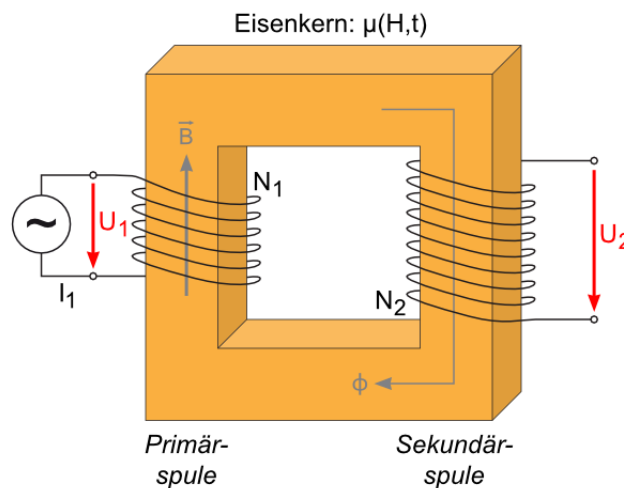
# 1 Einleitung

Im Alltag werden immer wieder *Transformatoren* benötigt, um Spannungen oder elektrische Ströme zu vergrößern/verkleinern. So wird elektrische Energie über große Distanzen mittels *Hochspannungsleitungen* übertragen, um Verluste zu minimieren. Dabei werden Spannungen jenseits der 10kV verwendet. Bei einer Steckdose im Haushalt beträgt die Spannung jedoch nur 230V.

In diesem Versuch soll die Funktionsweise eines Transformators betrachtet werden. Dabei wird auch der *belastete* Transformator untersucht.

## 2 Theorie

In der folgenden Abbildung 1 sind die grundlegenden Bestandteile eines Transformators zu sehen. Dabei ist  $U_1$  die Spannung,  $I_1$  die Stromstärke sowie die  $N_1$  Windungszahl der *Primärspule*. Analog dazu ist auf der Ausgangsseite die *Sekundärspule*.



**Abbildung 1:** Schema eines Transformators [LP1, Datum: 01.09.2014].

### 2.1 Unbelasteter Transformator

Ist der Sekundärkreis nicht geschlossen, spricht man von einem unbelasteten Transformator. Außerdem liege an der Primärspule eine Wechselspannung  $U_1$  an. Durch den Eisenkern ist der von der Primärspule erzeugte magnetische Fluss durch diese genauso groß wie durch die Sekundärspule. Mit dem Induktionsgesetz folgt (vgl. [Mes10, S.432])

$$U_1 = N_1 \dot{\Phi},$$

$$U_2 = -N_2 \dot{\Phi} = -\frac{N_2}{N_1} U_1.$$

Man erkennt, dass aufgrund der Lenzschen Regel die Spannungen um  $180^\circ$  phasenverschoben sind. Da Primärstrom und -spannung  $90^\circ$  phasenverschoben sind, wird in diesem Fall auch keine Energie umgesetzt.

Bei einem *idealen* Transformator mit dem Übersetzungsverhältnis  $u$  gilt also:

$$u = \frac{N_1}{N_2} = -\frac{U_1}{U_2}. \quad (1)$$

## 2.2 Belasteter Transformator

Schließt man den Sekundärkreis mit einem Widerstand  $R$ , spricht man von einem belasteten Transformator. Nun fließt im Sekundärkreis der Strom  $I_2 = \frac{U_2}{R}$ , welcher ein zusätzlichen magnetischen Fluss im Eisenkern und somit einen Strom  $I'_1$  im Primärkreis induziert:  $U_1 I'_1 = U_2 I_2$ . Also ist  $I'_1 = \frac{U_2}{U_1} I_2 = -\frac{I_2}{u}$ . Für den Gesamtstrom im Primärkreis folgt nun

$$I_1 = I_0 + I'_1 = I_0 - \frac{I_2}{u}, \quad (2)$$

wobei  $I_0$  der Primärstrom im unbelasteten Fall ist (vgl. [Mes10, S.433]).

Da  $I_0$  um  $\phi_0$  zur Primärspannung verschoben ist und  $I'_1$  in Phase zu dieser Spannung ist, kann man die Phasenverschiebung  $\phi$  im belasteten Fall aus (2) mit

$$\tan \phi = \frac{I_0 \sin \phi_0}{I_1 + I_0 \cos \phi_0} \quad (3)$$

bestimmen.

Für eine Phasenverschiebung  $\phi$ , den Primärstrom  $I$  und die Primärspannung  $U$  definiert man die im Sekundärkreis umgesetzte Leistung als *Wirkleistung*

$$P_{\text{wirk}} = UI \cdot \cos \phi, \quad (4)$$

sowie *Verlustleistung*

$$P_{\text{verlust}} = UI \cdot \sin \phi. \quad (5)$$

## 2.3 Methoden, um die Phasenverschiebung zu berechnen

### 2.3.1 Lissajous-Figuren

Um die Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen zwei Schwingungen gleicher Frequenz  $\omega$  zu bestimmen, trägt man die sich so ergebende Kurve auf:

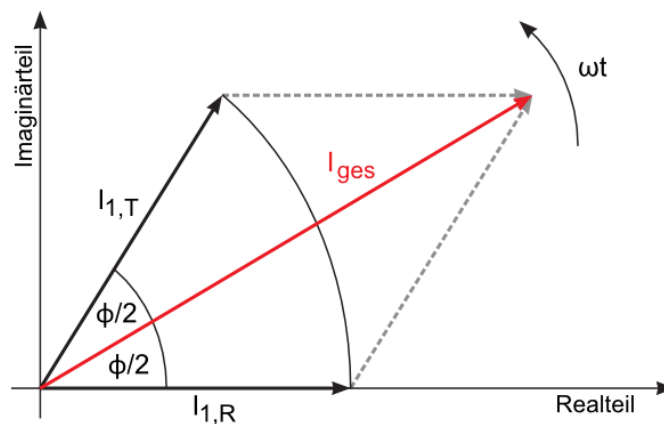
$$\begin{aligned} x(t) &= a \sin(\omega t), \\ y(t) &= b \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Der Schnittpunkt mit der x-Achse bezeichnen wir mit  $x_0$ , den mit der y-Achse mit  $y_0$ . Betrachtet man nun  $x = 0$ , so folgt  $\omega t = 0$  oder  $\omega t = \pi$ , also  $y_0 = b \sin(\varphi)$ . Analog gilt für  $y = 0$ :  $x_0 = a \sin(\varphi)$ . Also kann die Phasenverschiebung mit der Formel

$$\varphi = \arcsin \frac{x_0}{a} = \arcsin \frac{y_0}{b} \quad (6)$$

berechnet werden.

### 2.3.2 Zeigerdiagramm



**Abbildung 2:** zugehöriges Zeigerdiagramm [LP1, Datum: 01.09.2014].

Aus Abb.2 geht hervor, dass die Phasenverschiebung  $\phi$  bei  $|I_{1,T}| = |I_{1,R}|$  mit

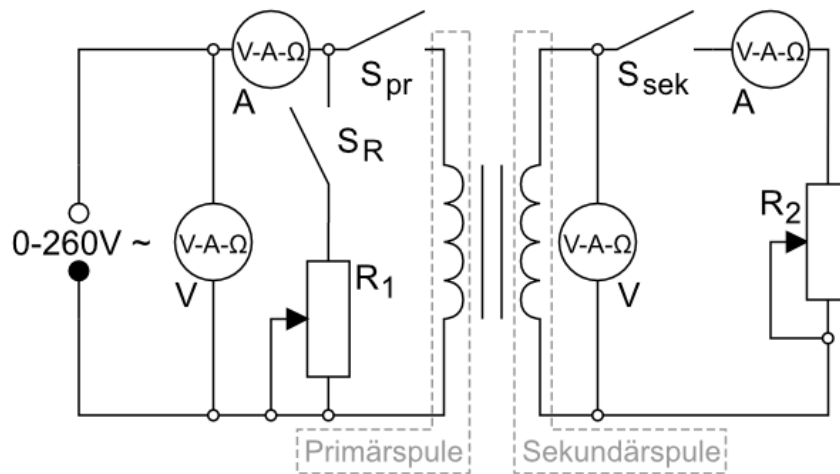
$$\cos(\phi/2) = \frac{I_{\text{ges}}}{2I_1} \quad (7)$$

berechnet werden kann.

## 3 Durchführung

Zuerst wird im **unbelasteten Fall** (Sekundärkreis nicht geschlossen)  $U_1$  in Abhängigkeit von  $I_1$ . Da hier keine Widerstände in Betrieb sind, erfolgt die Regelung des Stroms über die Wechselspannungsquelle. Man nimmt mindestens 20 Werte auf, auch welche bei hohen Spannungen. Jetzt wird  $U_2(U_1)$  gemessen. Nach Tauschen der Anschlüsse ist die andere Spule Primärspule und man misst wieder die Spannung der Sekundärspule (jetzt  $U_1$ ) in Abhängigkeit der Primärspannung. Dabei sollte  $U_2 \leq 20\text{V}$  sein.

Nachdem die Anschlüsse wieder zurück getauscht wurden, wird nun der **belastete Transformator** gemessen. Dazu wird der Sekundärkreis geschlossen. Man achte darauf,



**Abbildung 3:** Schaltplan des Versuchsaufbaus [LP1, Datum: 01.09.2014].

dass die Spannung immer vor Öffnen und Schließen eines Schalters auf Null heruntergefahren wird, da sonst hohe Induktionsströme auftreten und diese die Sicherungen der Messgeräte zerstören. Noch ist  $R_1$  nicht geschaltet und an Spule 1 liegt eine Spannung von 200 V an. Mit dem Schiebewiderstand  $R_2$  wird der Sekundärstrom  $I_2$  auf 1 A geregelt und der zugehörige Primärstrom  $I_1$  notiert. Nun wird der Widerstand  $R_1$  anstelle des Transformator in den Primärkreis geschaltet und so verstellt, dass der nun fließende Strom  $I_R$  gleich dem zuvor notierten Wert  $I_1$  ist. Danach wird die Primärspule parallel zum Schiebewiderstand geschaltet, und der Gesamtstrom  $I_{\text{ges}}$  bei gleichem Sekundärstrom  $I_2$  wie zuvor gemessen. Die ganze Messung wird für die Spulenströme 2, 3, 4, und 5 A durchgeführt sowie für 0 A. Bei letzterer Messung wird der Sekundärkreis geöffnet.

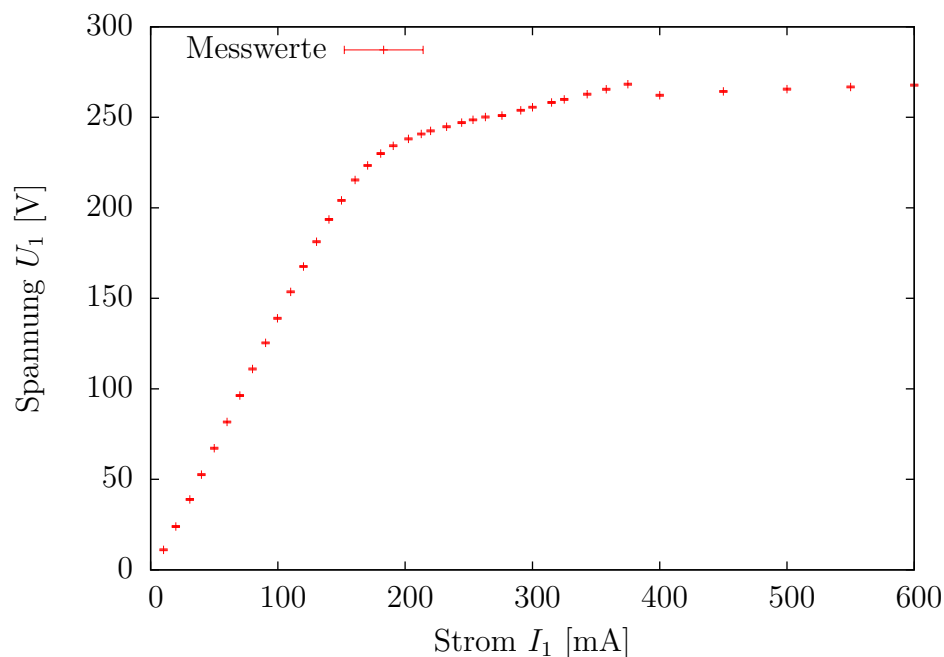
Die Phasenverschiebung zwischen Primärspannung und -strom wird mit dem Oszilloskop beobachtet und mit dem zugehörigen Drucker zur weiteren Auswertung ausgedruckt. Dabei wird die Primärspannung über den Tastkopf (10x) an Channel 1 des Oszilloskops gelegt, während der Strom an Channel 2 anliegt. Dabei wird die *Stromzange* verwendet. Außerdem ist  $R_1$  nicht im Primärkreis geschaltet.

Nun schaltet man das Oszilloskop in den *x-y-Mode* und beobachtet die Änderungen der Kurve bei Veränderung der Last, also den gleichen Strömen  $I_2$  wie zuvor. Die entsprechenden Ergebnisse werden wieder ausgedruckt.

## 4 Auswertung

### 4.1 Spannungsquelle

In Abbildung 4 ist die Primärspannung gegen den Primärstrom beim unbelasteten Transformator aufgetragen. Bei einem idealen Transformator würde man eine Ursprungsgerade erwarten. Dies ist hier jedoch nur bis etwa 150 mA richtig. Danach steigt die Spannung langsam bis zu einer gewissen *Sättigungsspannung*. Der Widerstand muss also immer größer werden. Dies lässt sich damit erklären, dass der Eisenkern gänzlich magnetisiert ist.

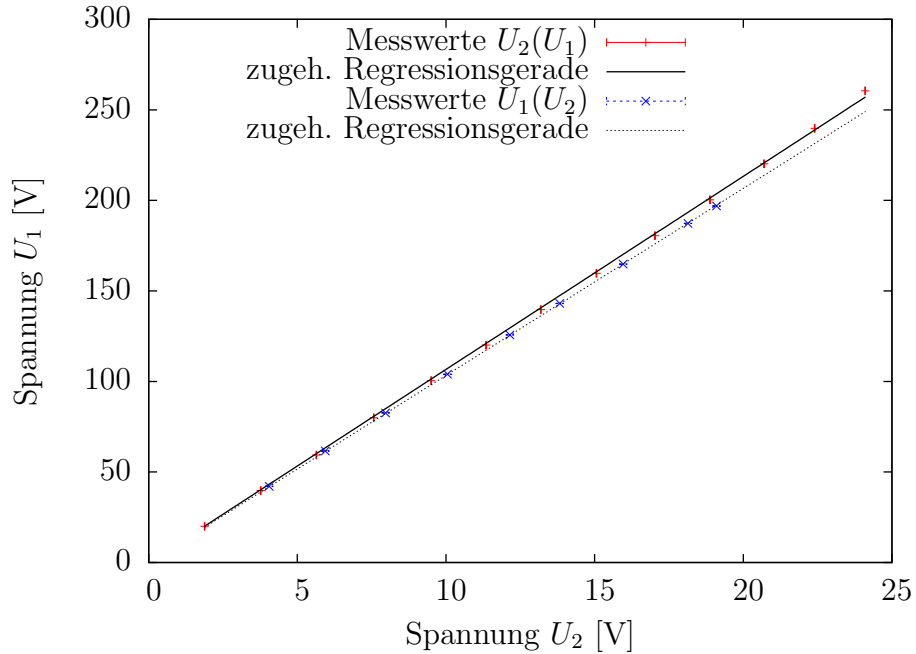


**Abbildung 4:** Spannung in Abhängigkeit des Stroms.

### 4.2 Übersetzungsverhältnis

Trägt man die Primärspannung gegen die Sekundärspannung auf (Abb.5), ist die sich ergebende Geradensteigung das Übersetzungsverhältnis  $u$ . Dies folgt aus (1). Da wir einmal  $U_2$  in Abh. von  $U_1$  gemessen haben und das andere Mal  $U_1(U_2)$ , ergeben sich auch zwei Geraden mit den Steigungen  $u = 10.663 \pm 0.025$  und  $u = 10.331 \pm 0.007$ . Der gewichtete Mittelwert beträgt

$$\underline{u = 10.353 \pm 0.007.} \quad (8)$$



**Abbildung 5:** Abhängigkeiten zwischen Primär- und Sekundärspannung.

### 4.3 Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

Um die Phasenverschiebung zu bestimmen, wurden 3 Methoden verwendet: Zum einen hat das Oszilloskop die Verschiebung im y-t-Mode angezeigt, zum anderen haben wir aus den Ausdrucken der Lissajous-Figuren mithilfe (6)  $\varphi$  bestimmt. Außerdem haben wir die wichtigen Werte für die Zeigerdiagramm-Methode gemessen. Mit (7) wurde daraus die Phasenverschiebung berechnet. All dies ist in der Abbildung 6 zu sehen. Darin wurde auch die Theoriekurve aus (3) eingezeichnet. Hierbei verwenden wir  $I_0 = 0.15 \text{ A}$  und  $\varphi_0 = \pi/2$  sowie die zuvor berechnete Übersetzung (8).

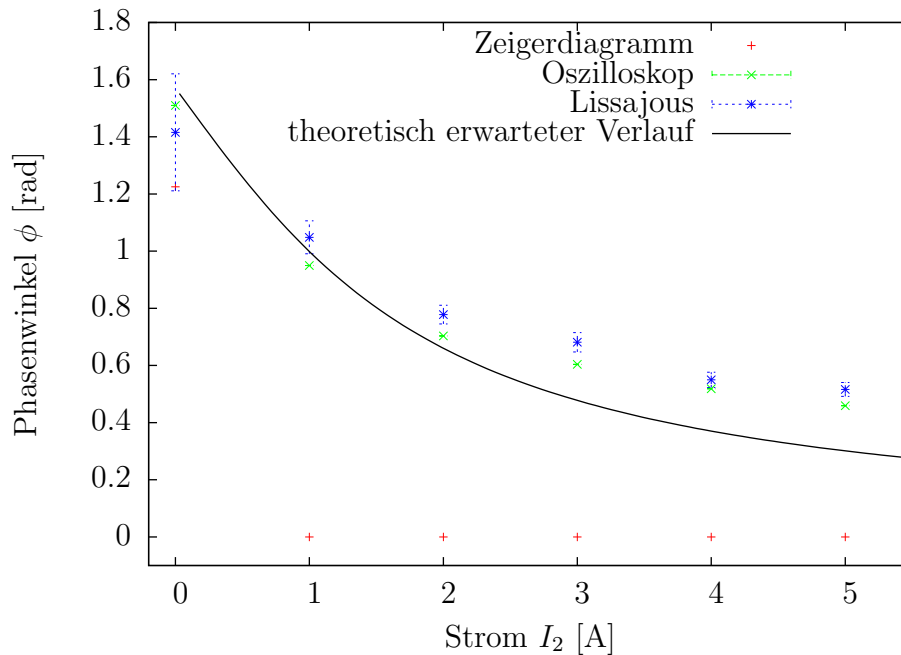
### 4.4 Leistung

Bei einer Spannung  $U = 200 \text{ V}$  und einem Strom  $I_2 = 5 \text{ A}$ , also  $I_1 = 0.48 \text{ A}$  ergibt sich mit der oben berechneten Phasenverschiebung  $\delta = (0.498 \pm 0.020) \text{ rad}$  (gewichteter Mittelwert aus Oszi- und Lissajous-Messung) ergeben sich nach (4) und (5) folgende Wirk- und Verlustleistungen:

$$P_{\text{wirk}} = (84.4 \pm 0.9) \text{ W} \quad P_{\text{verlust}} = (45.8 \pm 1.7) \text{ W}$$

Aus unseren Transformator-Werten  $U = 200 \text{ V}$  und  $I_1(I_2 = 0 \text{ A}) = 0.11 \text{ A}$  sowie der Phasenverschiebung  $\delta = (1.51 \pm 0.04) \text{ rad}$  ergibt sich eine Leerlauf-Leistung von  $(6.1 \pm 3.3) \text{ W}$ . Setzt man für ein Handyladegerät die gleichen Werte an und bezahlt einen





**Abbildung 6:** Phasenverschiebung.

Strompreis von 0.25 €/kWh, bezahlt man folgendes pro Jahr, wenn das Ladegerät in der Steckdose verbleibt:

$$365.2425 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 0.25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot (6.1 \pm 3.3) \text{ W} = (13.37 \pm 7.24) \frac{\text{€}}{\text{a}}.$$

Von diesem Geld könnte man sich stattdessen mindestens ein bis zwei Pizzen bestellen.

## 5 Diskussion

Die Bestimmung der Phasenverschiebung mittels **Zeigerdiagramm** lieferte keine brauchbaren Ergebnisse. So sind zwar in Abb. 6 Werte für 1A - 5A zu sehen. Jedoch wurde hier der arccos aus einer Zahl größer 1 berechnet. Das Programm *Gnuplot* setzt einen solchen Wert auf 0. Also wäre die Phasenverschiebung konstant bei 0. Es ist jedoch immer noch schleierhaft, warum bei dieser Messung solche Werte gemessen wurden. Auch die anderen beiden Gruppen hatten das gleiche Phänomen. Für zukünftige Praktikanten sollte dies untersucht und evtl. behoben werden. Falls der Aufbau fehlerhaft war, muss darauf in Zukunft in der Praktikumsanleitung hingewiesen werden.

Da das **Übersetzungsverhältnis** meist ganzzahlig ist, kann man bei dem Ergebnis (8) davon ausgehen, dass das tatsächliche Verhältnis  $u = 10$  ist. Somit ist der berechnete Wert etwa 3.5% größer.

## Literatur

- [LP1] *Lehrportal der Universität Göttingen.* <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4245>.
- [Mes10] Meschede, Dieter: *Gerthsen Physik.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 24. Auflage, 2010, ISBN 978-3-642-12893-6.