

Versuch 16

Der Transformator

Praktikant: Joscha Knolle
 Ole Schumann
E-Mail: joscha@zimmer209.eu
Durchgeführt am: 17.09.2012
Abgabe: 01.10.2012

Testiert:

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Theorie	2
2.1. Idealer Transformator	2
2.2. Realer Transformator	3
2.3. Phasenverschiebung im belasteten Transformator	4
3. Durchführung	6
3.1. Versuchsaufbau	6
3.2. Quantitative Messreihen	7
3.3. Untersuchungen am Oszilloskop	8
4. Auswertung	8
4.1. Unbelasteter Transformator	8
4.2. Zeigerdiagramm und Lissajous-Figuren	10
4.3. Wirk- und Verlustleistung des Transformators	12
5. Diskussion	13
A. Literaturverzeichnis	I

1. Einleitung

In der Elektrotechnik spielt der Transformator eine wichtige Rolle. Als Bauteil von beispielsweise Ladegeräten für Laptops und Handys, von Überlandleitungen und Induktionsöfen hat der Transformator eine große Bedeutung im Alltag. In diesem Versuch sollen daher die Eigenschaften und das Verhalten eines Transformators untersucht werden.

2. Theorie

2.1. Idealer Transformator

Wir betrachten zwei auf einen Eisenkern gewickelte Spulen wie in Abbildung 1. Durch jede Schleife einer Spule fließt also der gleiche magnetische Fluss Φ . Die eine Spule, die wir als *Primärspule* bezeichnen, habe n_1 Windungen; die zweite Spule bezeichnen wir als *Sekundärspule* und habe n_2 Windungen. Beide Spulen sind gleichsinnig gewickelt. Wir nehmen diesen Transformator dabei als ideal an, d. h., die relative Permeabilität des Eisens sei unendlich.

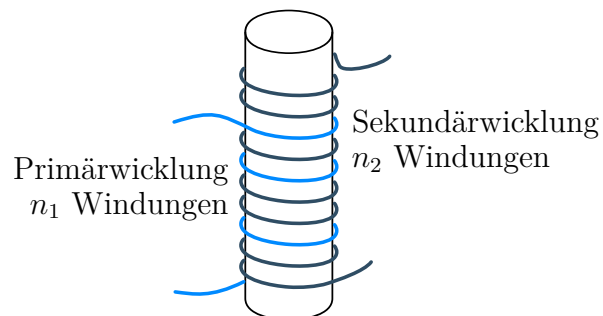


Abbildung 1: Skizze eines idealen Transformators [GRI, S. 338]

An der Primärspule legen wir eine Wechselstromspannung $U_1(t)$ an. Nach dem Induktionsgesetz erzeugt diese eine magnetische Flussänderung

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_1(t)}{n_1}, \quad (1)$$

welche wiederum in der Sekundärspule eine Spannung

$$U_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt} = n_2 \frac{U_1(t)}{n_1} \quad (2)$$

induziert. Man erhält also das *Übersetzungsverhältnis*

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = u. \quad (3)$$

Dabei arbeitet der ideale Transformator verlustfrei; es wird also genau die Leistung sekundär abgenommen, die primär aufgenommen wird. Daher gilt $P_1 = P_2$, und mit $P = UI$ folgt das Verhältnis der Ströme

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = u. \quad (4)$$

Insbesondere sind also die Primär- und die Sekundärspannung bei gleichem Wickelsinn gleichphasig. Außerdem nimmt der ideale Transformator im unbelasteten Zustand ($I_2 = 0$) keinen Primärstrom auf. [SCH, S. 1 f.]

2.2. Realer Transformator

Wir betrachten nun einen realen Transformator ohne ideale Flusskopplung, das heißt mit Verlust bei der Übertragung des magnetischen Flusses von der einen auf die andere Spule. Realisiert werden Transformatoren, indem zwei Spulen um ein Eisenjoch gewickelt werden. Wegen der großen relativen magnetische Permeabilität μ von Eisen laufen nahezu alle Feldlinien des magnetischen Feldes, welches durch die stromdurchflossene Primärspule erzeugt wird, durch das Eisenjoch und damit durch die Sekundärspule. Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 2(a) dargestellt. Verluste entstehen beim realen Transformator durch die Erwärmung des Eisenjoches. [DEM, S. 157]

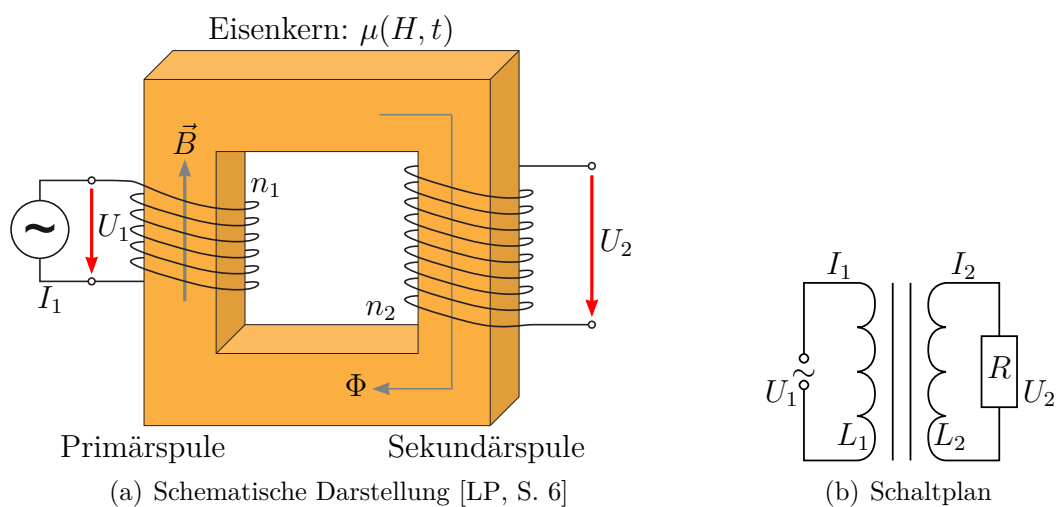


Abbildung 2: Realer Transformator

Als Maß für den Verlust führt man den Streukoeffizienten $s \in [0; 1]$ ein, mit dem sich das Verhältnis zwischen der Gegeninduktivität M und den Selbstinduktivitäten L_1, L_2 beschreiben lässt als

$$M = \sqrt{L_1 L_2 (1 - s)}. \quad (5)$$

Für $s = 0$ erhält man daraus $M = \sqrt{L_1 L_2}$, was der mathematischen Beschreibung der idealen Flusskopplung beim idealen Transformator entspricht. Ferner betrachten wir den Widerstand R zunächst als allgemeinen komplexen Widerstand Z und erhalten nach der Maschenregel für den Primär- und den Sekundärkreis

$$U_1 = i\omega L_1 I_1 + i\omega \sqrt{L_1 L_2 (1 - s)}, \quad (6)$$

$$0 = i\omega L_2 I_2 + i\omega \sqrt{L_1 L_2 (1 - s)}. \quad (7)$$

Durch Umformen von Gleichung (7) erhält man den Zusammenhang zwischen den Stromstärken

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{-i\omega U_1 \sqrt{L_1 L_2 (1 - s)}}{Z + i\omega L_2}. \quad (8)$$

Verwendet man den Zusammenhang $U_2 = Z I_2$ und setzt Gleichung (8) in Gleichung (7) ein, so erhält man den Zusammenhang zwischen den Spannungen

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{\sqrt{L_1 L_2 (1 - s)} Z}{L_1 Z + i\omega s L_1 L_2}. \quad (9)$$

Geht man wieder vom Ohmschen Widerstand $Z = R$ aus, so lassen sich aus Gleichungen (8) und (9) leicht die Beträge bilden und man erhält die Verhältnisse

$$\left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \sqrt{\frac{L_1 L_2 (1 - s)}{R^2 / \omega^2 + L_2^2}}, \quad (10)$$

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \sqrt{\frac{L_2 (1 - s)}{L_1 + \omega^2 s^2 L_1 L_2^2 / R^2}}. \quad (11)$$

2.3. Phasenverschiebung im belasteten Transformator

Betrachten wir nun einen belasteten Transformator, d. h. an der Sekundärspule gibt es einen Verbraucher bzw. einen ohmschen Widerstand R . Es gibt also einen Strom I_2 , welcher durch den Sekundärkreis, also insbesondere auch durch die Sekundärspule fließt. Dieser Strom erzeugt einen Fluss Φ_2 , welcher nach der Lenzschen Regel stets entgegen der Änderung des ursprünglichen Flusses $\dot{\Phi}_1$ gerichtet ist. Der Gesamtfluss durch den Eisenkern ist nun $\Phi_1 + \Phi_2$. Da aber die Spannung $U_1(t)$ durch die Spannungsquelle fest vorgegeben ist, muss es einen

Strom \tilde{I}_1 im Primärkreis geben, welcher den Fluss Φ_2 kompensiert, so dass der Gesamtfluss konstant bleibt.

Geht man vom einem idealen Transformator aus, so wird die Leistung aus dem Primärkreis komplett auf den Sekundärkreis übertragen. Es gilt also

$$\int_0^T U_1 (I_1 + \tilde{I}_1) dt = \int_0^T U_2 I_2 dt. \quad (12)$$

Da aber U_1 und I_1 um $\pi/2$ phasenverschoben sind, gilt

$$\int_0^T U_1 I_1 dt = 0,$$

so dass durch Differenzieren folgt

$$U_1 \tilde{I}_1 = U_2 I_2. \quad (13)$$

Daraus folgert man, dass U_1 und \tilde{I}_1 in Phase sind und es daher für eine Bestimmung der Phasenverschiebung ϕ zwischen U_1 und $I_1 + \tilde{I}_1 = I_{ges}$ ausreichend ist, I_1 an Stelle von U_1 zu betrachten.

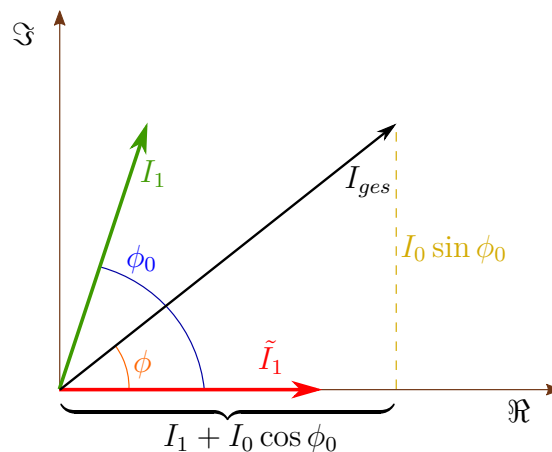


Abbildung 3: Herleitung von Gleichung (14)

Ist nun die Phasenverschiebung zwischen den Strömen I_1 und \tilde{I}_1 durch ϕ_0 gegeben, so findet man mit Abbildung 3 den Zusammenhang

$$\tan \phi = \frac{I_0 \sin \phi_0}{I_1 + I_0 \cos \phi_0}, \quad (14)$$

wobei I_0 die Amplitude des Stroms $I_1(t)$ beschreibt.

Gilt weiter für die Ströme die Gleichheit der Amplituden von I_1 und \tilde{I}_1 , so kann man ebenso folgern, dass gilt

$$\cos \left(\frac{\phi}{2} \right) = \frac{I_{ges}}{2\tilde{I}_1}. \quad (15)$$

3. Durchführung

3.1. Versuchsaufbau

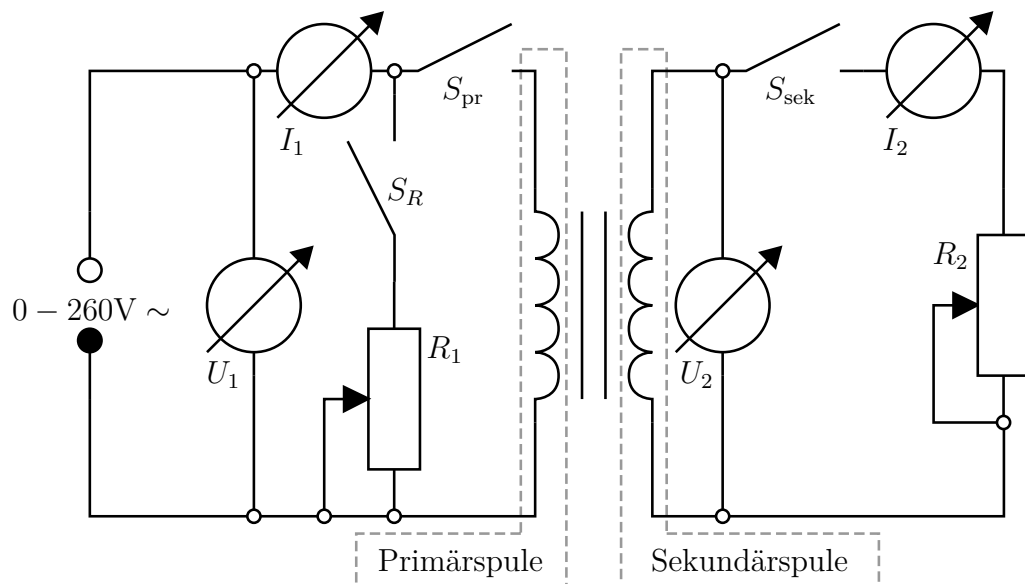


Abbildung 4: Schaltplan zum Versuchsaufbau [LP, S. 7]

In dem Versuch wird ein Transformator verwendet, der aus zwei auf einen Eisenring gewickelten Spulen besteht. Der Schaltplan zum Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. An der Primärspule liegt eine regelbare Wechselspannungsquelle an, die Spannungen im Bereich 0 V bis 260 V erzeugen kann. Insgesamt sind in dem Aufbau vier Multimeter und drei Schalter enthalten.

An der Primärspule kann mit einem Multimeter die anliegende Spannung als U_1 gemessen werden. Über den regelbaren Widerstand R_1 und den Schalter S_R kann der Stromkreis durch die Primärspule geschlossen werden. Der Strom, der durch die Spannungsquelle und die Primärspule fließt, kann an einem weiteren Multimeter als I_1 abgelesen werden. Über den Schalter S_{pr} kann der Stromkreis durch die Primärspule unterbrochen werden, die Primärspule ist dann unbelastet.

An der Sekundärspule kann die Spannung zwischen den beiden Spulenden mit einem Multimeter als U_2 gemessen werden. Über den Schalter S_{sek} und den regelbaren Widerstand R_2 kann der Stromkreis an der Sekundärspule geschlossen werden, die Sekundärspule ist dann belastet. Die Stärke des durch den belasteten Stromkreis fließenden Stroms kann an einem Multimeter als I_2 abgelesen werden.

3.2. Quantitative Messreihen

3.2.1. Erste Messreihe

Für die erste Messreihe wurde der Schalter S_{pr} geschlossen und die beiden Schalter S_{sek} , S_R geöffnet. Der Transformator war also unbelastet. Nun wurden am Wechselstromgenerator die eingegebene Spannung verändert und dann die Paare aus Stromstärke I_1 und Spannung U_1 im Primärspulenkreis notiert. Auf diese Weise wurden von uns 24 Messwert-Paare aufgenommen.

3.2.2. Zweite Messreihe

Für die zweite Messreihe blieb der Schalter S_{pr} geschlossen und die beiden Schalter S_{sek} , S_R geöffnet; der Transformator war also weiterhin unbelastet. Wir haben wieder die eingegebene Spannung am Wechselstromgenerator variiert und die Paare aus Spannung an der Primärspule U_1 und Spannung an der Sekundärspule U_2 notiert.

Anschließend wurden die Anschlüsse an beiden Spulen vertauscht, sodass die Primärspule die Aufgabe der Sekundärspule übernahm und umgekehrt. Wir wiederholten die obige Messung, haben also die eingegebene Spannung variiert und die Paare aus der Spannung an der Primärspule U_2 und Spannung an der Sekundärspule U_1 notiert.

3.2.3. Dritte Messreihe

Nun wurde wieder die ursprüngliche Verkabelung hergestellt und für die dritte Messreihe die Schalter S_{pr} , S_{sek} geschlossen sowie der Schalter S_R geöffnet; der Transformator war also belastet. Die Spannung an der Primärspule wurde auf $U_1 = 200 \text{ V}$ eingestellt. Durch Verändern des Widerstands R_2 haben wir den Strom in der Sekundärspule I_2 im Bereich 0 A bis 5 A variiert. Den Strom $I_2 = 0 \text{ A}$ haben wir dadurch erreicht, dass wir den Schalter S_{sek} geöffnet haben.

Dann haben wir I_2 auf einen Wert aus dem Messbereich eingestellt, den Wert für I_1 notiert und die Spannung auf 0 V geregelt, so dass keine Spannungsspitzen beim Schließen der Schalter auftreten. Nun wurde der Schiebewiderstand R_1 durch Schalten von S_R in den Primärkreis eingefügt, der Transformator durch Öffnen von S_{pr} überbrückt und der Widerstand bei wieder aufgedrehter Spannung so lange geändert, bis das Amperemeter denselben Wert wie den notierten Wert für I_1 anzeigte.

Anschließend wurde die Spannung erneut auf 0 V geregelt und der Transformator wieder in den Stromkreis durch Schließen von S_{pr} eingebaut (wobei vorher

wieder die Spannung heruntergeregelt wurde). Das Amperemeter zeigte nun den Gesamtstrom I_{ges} an, welcher ebenfalls von uns notiert wurde.

Diese drei Messwerte haben wir jeweils für Stromstärken im Sekundärspulenstromkreis I_2 aus 0 A, 1 A, 2 A, 3 A, 4 A und 5 A aufgenommen.

3.3. Untersuchungen am Oszilloskop

Außer den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Messreihen haben wir die Funktionsweise des Transformators noch am Oszilloskop untersucht. Dazu hat das Oszilloskop als Eingänge die Primärspannung U_1 sowie den Primärstrom I_1 erhalten. Die so erhaltenen Bilder des Oszilloskops konnten wir direkt ausdrucken.

Zunächst haben wir die Phasenverschiebung zwischen der Primärspannung und dem Primärstrom im $x-t$ -Modus qualitativ untersucht. Anschließend haben wir das Oszilloskop in den $x-y$ -Modus geschaltet und das Verhältnis von Primärspannung zu Primärstrom untersucht. Durch Veränderung des regelbaren Widerstands R_2 haben wir wie in Abschnitt 3.2.3 den Sekundärstrom auf 0 A, 1 A, 2 A, 3 A, 4 A und 5 A eingestellt. Zu jeder dieser Einstellungen haben wir das Bild am Oszilloskop ausgedruckt.

4. Auswertung

4.1. Unbelasteter Transformator

In der ersten Messreihe haben wir Primärspannung und Primärstrom des unbelasteten Transformators gemessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5 aufgetragen. Man erkennt für eine Stromstärke $I < 0,2\text{ A}$ ein lineares und für $I > 0,2\text{ A}$ ein beschränktes Wachstum der Spannung mit der Stromstärke. Ab dieser Stromstärke nimmt der Widerstand des Transformators ab. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Sättigungsmagnetisierung des Eisenkerns erreicht ist.

Betrachten wir die zweite Messreihe, so haben wir die Primär- und die Sekundärspannung des unbelasteten Transformators gemessen. In Abbildung 6 sind die Messergebnisse für diese Messreihe aufgetragen. Für beide Konfigurationen, also bei ursprünglicher und bei vertauschter Spulenanordnung, wurde zudem ein linearer Zusammenhang mittels `gnuplot` gefittet. Die Fitparameter der χ^2 -Fits sind in Tabelle 1 eingetragen. Als Fehler für die Spannungsmessung haben wir $\sigma_U = 0,01\text{ V}$ bzw. $\sigma_U = 0,1\text{ V}$ angenommen, je nach Messbereich des Messgerätes. Der Messbereich musste während des Versuchs umgestellt werden, um alle Messwerte aufnehmen zu können, weshalb sich unterschiedliche Fehler ergeben.

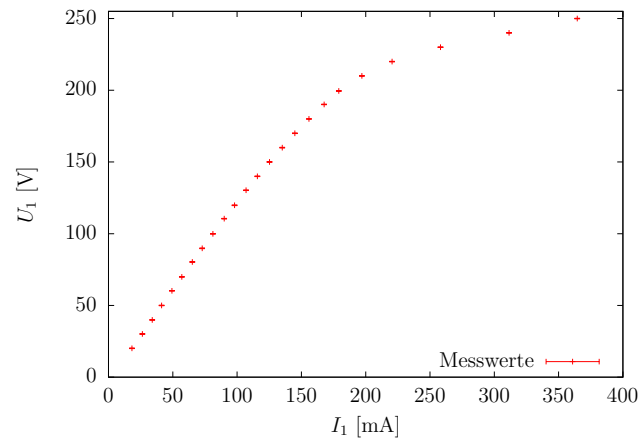
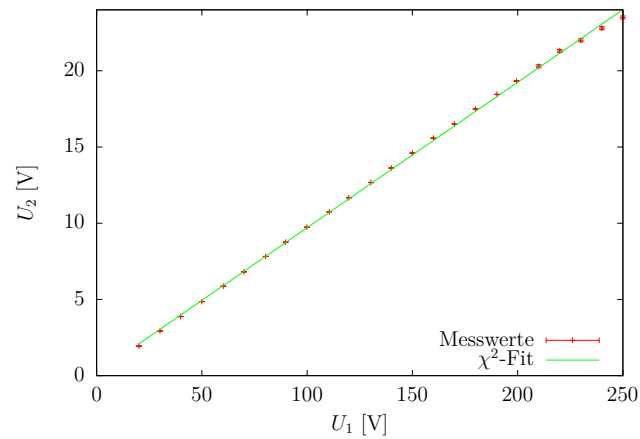
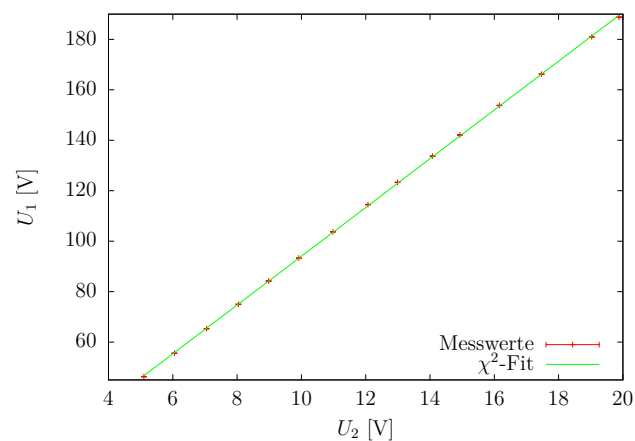


Abbildung 5: Spannung U_1 als Funktion der Stromstärke I_1



(a) Sekundärspannung U_2 als Funktion der Primärspannung U_1



(b) Primärspannung U_1 als Funktion der Sekundärspannung U_2

Abbildung 6: Korrelation von Primär- und Sekundärspannung

Zusammenhang	Steigung	Achsenabschnitt
$U_2 = a \cdot U_1 + b$	$0,0954 \pm 0,0005$	$0,17 \pm 0,08$
$U_1 = c \cdot U_2 + d$	$9,67 \pm 0,02$	$-2,6 \pm 0,3$

Tabelle 1: Ergebnis des linearen Fits zur Korrelation von Primär- und Sekundärspannung

Nach Gleichung (3) identifiziert man für die ursprüngliche Anordnung $a = \frac{1}{u}$, wobei sich bei der Berechnung von u der Fehler zu $\sigma_u = \sigma_a/a^2$ ergibt. Bei der vertauschten Anordnung ergibt sich somit $c = u$. Bildet man den gewichteten Mittelwert, so erhält man das Übersetzungsverhältnis u durch

$$u = \frac{\sigma_a^2 c + \sigma_c^2 a^3}{\sigma_a^2 + \sigma_c^2 a^4}, \quad (16)$$

wobei sich der Fehler ergibt zu

$$\sigma_u = \frac{\sigma_a \sigma_c}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_c^2 a^4}}. \quad (17)$$

So erhält man als Ergebnis

$$u = 9,768 \pm 0,019. \quad (18)$$

4.2. Zeigerdiagramm und Lissajous-Figuren

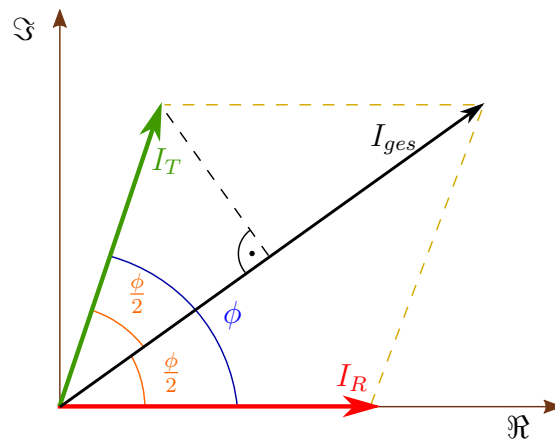


Abbildung 7: Zeigerdiagramm zur Beschreibung des cos-Zusammenhangs

In Abbildung 7 ist ein Zeigerdiagramm gezeichnet, aus dem man den in Gleichung (15) beschriebenen Zusammenhang zwischen dem Winkel ϕ und den Stromstärken erkennen kann. Aus dieser Gleichung erkennt man auch, dass gelten

muss

$$\frac{I_{ges}}{2I_R} \leq 1, \quad (19)$$

da $\cos \phi \leq 1$ stets erfüllt ist. Allerdings erkennt man bei unseren Messwerten, dass nur die ersten drei Paare diese Ungleichung erfüllen und die anderen einen Wert über 1 aufweisen. Für die Auswertung konnten wir also nur diese drei Werte verwenden.

Die für diese drei Werte bestimmten Phasenverschiebungen sind in Tabelle 2 in der rechten Spalte eingetragen.

Zusätzlich wollen wir aus den Lissajous-Figuren die Phasenverschiebung berechnen. Die Oszilloskopausdrucke sind im Anhang beigefügt. Aus diesen Drucken haben wir den y -Achsenmittelpunkt $a/2$ und den Maximalausschlag $b/2$ abgelesen. Für den Schnittpunkt mit der y -Achse gilt nämlich $U(t) = 0 = U_0 \sin(\omega t)$ und daher $\omega t = n\pi$. Für den Strom $I(t) = I_0 \sin(\omega t + \phi)$ folgt dann wegen $\sin(n\pi + x) = \pm \sin(x)$, dass $a = |I_0 \sin \phi|$ gilt. Den Maximalwert des Stroms haben wir als b abgelesen und können so folgern, dass

$$\phi = \arcsin\left(\frac{a}{b}\right) \quad (20)$$

gilt. Die so berechneten Werte für ϕ sind ebenfalls in Tabelle 2 eingetragen.

I_2 [A]	a [V]	b [V]	ϕ [rad]	ϕ [rad]
0	$5,8 \pm 0,1$	$5,8 \pm 0,1$	1,57	1,29
1	$5,3 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,1$	$1,11 \pm 0,06$	0,8
2	$5,4 \pm 0,2$	$8,2 \pm 0,2$	$0,72 \pm 0,04$	0
3	$5,4 \pm 0,2$	$10,5 \pm 0,2$	$0,54 \pm 0,03$	–
4	$5,6 \pm 0,2$	$13,1 \pm 0,2$	$0,442 \pm 0,019$	–
4,7	$5,8 \pm 0,2$	$14,8 \pm 0,2$	$0,403 \pm 0,016$	–

Tabelle 2: Berechnung der Phasenverschiebung ϕ

Da die Diagramme sehr verpixelt waren und die Linien auf Grund der Skalierung sehr dick waren, haben wir den Fehler beim Ablesen je nach Skala auf 0,1 V bzw. 0,2 V für a und b geschätzt. Den Fehler für die Berechnung des Winkels haben wir nach der Fehlerfortpflanzung zu

$$\sigma_\phi = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{a^2 \sigma_b^2 + b^2 \sigma_a^2}{b^2 - a^2}} \quad (21)$$

berechnet. Man erkennt an dieser Formel, dass sich für $a = b$ kein Fehler bestimmen lässt, da man hier durch null teilen würde. Daher haben wir hier keinen Fehler

angegeben, vermuten ihn aber in der gleichen Größenordnung wie die anderen Fehler auch.

In Abbildung 8 sind sowohl unsere Messergebnisse für die Phasenverschiebung, als auch der theoretische Verlauf nach Gleichung (14) sowie die drei Messwerte, die aus Gleichung (15) gewonnen werden konnten, eingezeichnet. Dabei wurde $I_0 = 0,15 \text{ A}$ als Strom bei unbelasteten Transformator gesetzt und $\phi_0 = 1,5708 \text{ rad}$ als Phasenverschiebung bei ebendiesem Wert.

Zusätzlich wurde für den Wert von I_1 aus Gleichung (14) das Verhältnis $I_1 = n_2/n_1 I_2$ verwendet. Dabei wurde unser Ergebnis aus Gleichung (18) benutzt, um das Windungszahlverhältnis auszudrücken.

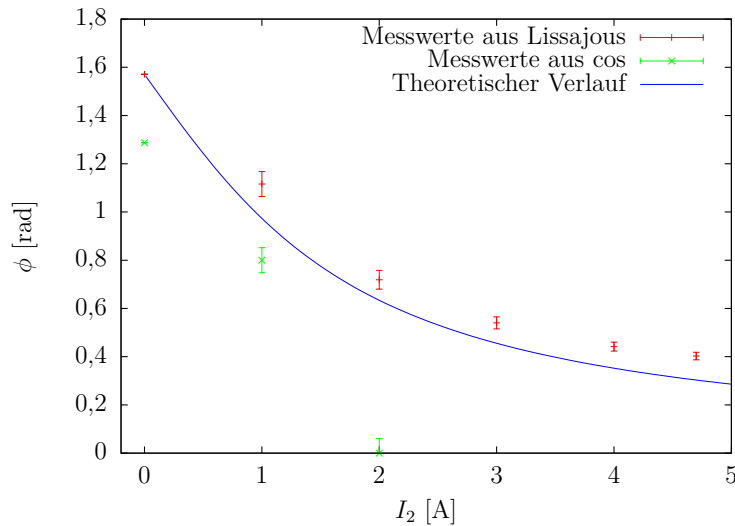


Abbildung 8: Phasenverschiebung ϕ in Abhängigkeit von Laststrom I_2

4.3. Wirk- und Verlustleistung des Transformators

Je nach Phasenverschiebung zwischen Spannung U_1 und Strom I_1 ändert sich die Wirk- bzw. Verlustleistung des Transformators. Bei unserer maximalen Last mit $I_2 = 4,7 \text{ A}$ ergab sich eine Phasenverschiebung von $\phi = 0,403 \text{ rad}$ (bestimmt aus den Lissajous-Figuren). Als Fehler für den Strom I_1 nehmen wir $\sigma_{I_1} = 0,01 \text{ A}$ an und für σ_ϕ den in Tabelle 2 angegebenen Wert. Aus der Fehlerfortpflanzung folgt

$$\sigma_{P_W} = U \sqrt{(\sigma_{I_1} \cos \phi)^2 + (\sigma_\phi I_1 \sin \phi)^2}, \quad (22)$$

$$\sigma_{P_V} = U \sqrt{(\sigma_{I_1} \sin \phi)^2 + (\sigma_\phi I_1 \cos \phi)^2}. \quad (23)$$

Daraus folgt für die Wirk- und Verlustleistung

$$P_W = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi = 200 \text{ V} \cdot 0,49 \text{ A} \cdot \cos(0,403) = (90 \pm 2) \text{ W}, \quad (24)$$

$$P_V = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \phi = 200 \text{ V} \cdot 0,49 \text{ A} \cdot \sin(0,403) = (38,4 \pm 1,7) \text{ W}. \quad (25)$$

5. Diskussion

In den ersten Messreihen konnten wir das Windungszahlverhältnis der Spulen auf etwa $u = 9,768 \pm 0,019$ einschätzen. Da ein so krummzahliges Verhältnis eher unwahrscheinlich ist, gehen wir davon aus, dass das wahre Verhältnis bei etwa 10 : 1 liegt, was eine Abweichung von etwa 3% bedeuten würde. Mögliche Fehlerquellen sind hier die nicht genau einzustellende Spannungsquelle, welche schon auf kleinste Drehungen an der Regelung sehr sensibel reagierte und zudem die Skala überhaupt nicht mit den vom Multimeter angezeigten Werten übereinstimmte.

Aus der ersten Messreihe kann man weiter erkennen, dass Strom und Spannung beim realen Transformator keinesfalls linear ansteigen, sondern eine gewisse Sättigungsspannung erreicht wird, welche vom verwendeten Eisenkern abhängt. Bei uns setzte diese Sättigung bei etwa 0,2 A ein. Leider haben wir keinen Referenzwert, um die Güte unseres Ergebnisses zu vergleichen.

Die Bestimmung der Phasenverschiebung ϕ über den \cos -Zusammenhang aus Gleichung (15) ist weitestgehend fehlgeschlagen. Der genaue Fehler ist uns leider nicht bekannt, so dass wir keine Ursache angeben können.

Über die Lissajous-Figuren konnten wir jedoch Werte finden, die sich dem theoretischen Verlauf entsprechend verhalten. Auffällig ist jedoch, dass alle Messwerte über der theoretischen Kurve liegen. Da die theoretische Kurve aber auch mit I_0 und ϕ_0 Konstanten enthält, die aus einer Messung stammen, kann es auch sein, dass diese beiden Werte falsch gemessen wurden und so ein Offset zu Stande gekommen ist.

A. Literaturverzeichnis

- [DEM] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. Vierte Auflage. Berlin, 2006.
- [GRI] David Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. Dritte Auflage. Neu-Delhi, 2011.
- [LP] Lehrportal Physik. *Der Transformator*. Online im Internet: <http://lp.uni-goettingen.de/get/pdf/4245>, abgerufen am 03.09.12, 16:29 Uhr.
- [SCH] Heinz Schmidt-Walter. *Transformatoren*. Online im Internet: http://schmidt-walter.eit.h-da.de/m_et/skript_pdf/em_2.pdf, abgerufen am 04.09.12, 10:51 Uhr.