

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: 15

Übungstitel: Transformator / Hysterese (TU)

Betreuer: Kilian Klusemann

Gruppennummer: 42

Name: Nico Eisner

Name: Philip Waldl

Mat. Nr.: 12214121

Mat. Nr.: 12214120

Datum der Übung: 10.11.2023

WS 2023/2024

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen & Grundlagen	4
3 Versuchsanordnung	5
4 Geräteliste	8
5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse	8
5.1 Leerlauf	8
5.2 Ohm'sche Last sekundärseitig	9
5.3 Ohm'sche-induktive Last	10
6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse	11
6.1 Leerlauf	11
6.2 Ohm'sche Last sekundärseitig	11
6.3 Ohm'sche-induktive Last	11
7 Diskussion	13
8 Zusammenfassung	14
8.1 Leerlauf	14
8.2 Ohm'sche Last sekundärseitig	14
8.3 Ohm'sche-induktive Last	14
9 Anhang	16
Literatur	18

1 Aufgabenstellung

Der Versuch Transformator / Hysterese behandelt, wie aus dem Namen bereits hervorgeht, den Funktionsbereich des Transformatoren, der in erster Linie die Umwandlung von elektrischen Spannungen beinhaltet. Anhand einer elektrischen Schaltung, welche im weiteren Verlauf des Experimentes immer wieder erweitert wird, soll die Rolle des Transformatoren veranschaulicht werden. Zu erledigen war dabei folgender Versuchsauftrag:

- Schaltung im Leerlauf
 - Primärstrom I_1
 - Primärspannung U_1
 - Wirkleistung P_1
 - Sekundärspannung U_2
 - Sekundärstrom I_2
 - Oszillographische Darstellung von Primärstrom und Sekundärspannung
- Schaltung mit Ohm'scher Last sekundärseitig
 - Primärstrom I_1
 - Primärspannung U_1
 - Wirkleistung P_1
 - Sekundärspannung U_2
 - Sekundärstrom I_2
 - Oszillographische Darstellung von Primärstrom und Sekundärspannung
- Schaltung mit Ohm'sch-induktiver Last (für ca. 20 Widerstandswerte)
 - Primärstrom I_1
 - Primärspannung U_1
 - Wirkleistung P_1
 - Sekundärspannung U_2
 - Sekundärstrom I_2
 - Oszillographische Darstellung der Sekundärspannung an der Stelle mit der größten Wirkleistung
- Schaltung mit Ohm'sch-kapazitiver Last
- Unsicherheitsberechnung für alle Punkte

Alle Informationen und Methodiken wurden uns von der Technischen Universität bereitgestellt [2].

2 Voraussetzungen & Grundlagen

Wie im vorherigen Kapitel bereits eingeleitet dient ein Transformator dazu, von einer elektrischen Spannung auf eine andere zu transformieren. Im Aufbau sieht er dabei vereinfacht so aus:

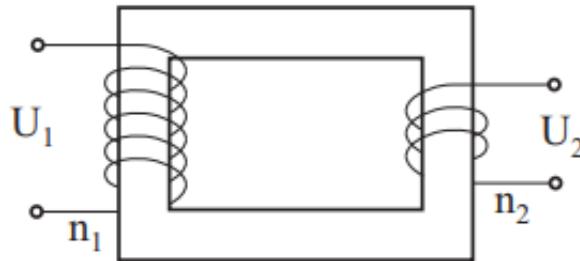


Abb. 1: Grundlegender Aufbau eines Transformators [2]

Wie sich in Abbildung 1 erkennen lässt, besteht der Transformator aus zwei Spulen, welche über einen Eisenjoch miteinander verbunden sind. Die Umwandlung der Spannungen basiert auf dem Faraday'schen Gesetz

$$U_{ind} = -N_{ind} \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Wenn an der Primärspule eine Wechselspannung angelegt wird, wird ein sich änderndes (aufgrund der Richtungsänderung der Wechselspannung) Magnetfeld an der Primärspule (Eingangsspule) erzeugt. Durch dieses Magnetfeld wird an der Sekundärspule gemäß Gesetz 1 eine Ausgangsspannung induziert. Die resultierende Spannung ist dabei abhängig vom Wicklungsverhältnis der Spulen, was sich mit dem Ausdruck

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

beschreiben lässt. Der magnetische Fluss Φ lässt sich mit dem Magnetfeld B , der Fläche A , der magnetischen Feldstärke H , Stromstärke I , Windungszahlen n und den Konstanten μ bzw. μ_0 weiters in folgender Form beschreiben:

$$\Phi = BA = \mu\mu_0 HA = \mu\mu_0 \frac{A}{l} n I \quad (3)$$

Sollte die Magnetisierungskurve $\Phi = \Phi(t)$ eine Hysterese, also eine verzögerte Entmagnetisierung von Ferromagnetischen Stoffen, aufweisen, so wird dem System Leistung entzogen und der Stromverlauf sieht wie folgt aus:

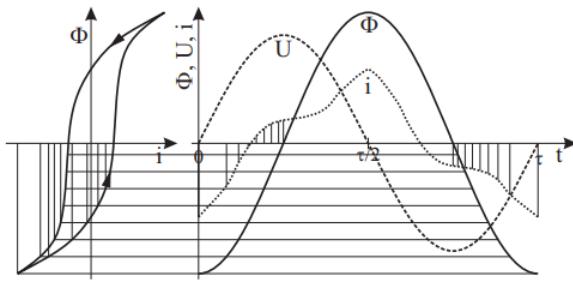


Abb. 2: Magentischer Fluss mit Hysterese [2]

Die Fläche innerhalb der in Abbildung 2 gezeigten Hystereseschleife gibt Auskunft über die Hystereseverluste, welche gemeinsam mit den Wirbelstromverlusten die Eisenverluste am Trafo ergeben.

Außerdem werden für die Auswertung noch folgende Zusammenhänge benötigt:

$$\text{Scheinleistung primär} \quad P_{S1} = U_1 * I_1 \quad \Delta P_{S1} = \left| \frac{\partial P_{S1}}{\partial U_1} * \Delta U_1 \right| + \left| \frac{\partial P_{S1}}{\partial I_1} * \Delta I_1 \right| \quad (4)$$

$$\text{Leistungsfaktor} \quad \cos(\Phi) = \frac{P_1}{S_1} \quad \Delta \cos(\Phi) = \left| \frac{\partial \cos(\Phi)}{\partial P_1} * \Delta P_1 \right| + \left| \frac{\partial \cos(\Phi)}{\partial S_1} * \Delta S_1 \right| \quad (5)$$

$$\text{Verlustleistung gesamt} \quad P_V = P_1 - P_2 \quad \Delta P_V = \left| \frac{\partial P_V}{\partial P_1} * \Delta P_1 \right| + \left| \frac{\partial P_V}{\partial P_2} * \Delta P_2 \right| \quad (6)$$

$$\text{Blindleistung primär} \quad P_{Q1} = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} \quad \Delta P_{Q1} = \left| \frac{\partial P_{Q1}}{\partial S_1} * \Delta S_1 \right| + \left| \frac{\partial P_{Q1}}{\partial P_1} * \Delta P_1 \right| \quad (7)$$

$$\text{Wirkleistung sekundär} \quad P_{W2} = U_2 * I_2 \quad \Delta P_{S1} = \left| \frac{\partial P_{W2}}{\partial U_2} * \Delta U_2 \right| + \left| \frac{\partial P_{W2}}{\partial I_2} * \Delta I_2 \right| \quad (8)$$

$$\text{Wirkungsgrad} \quad \eta = \frac{P_2}{S_1} \quad \Delta \eta = \left| \frac{\partial \eta}{\partial P_2} * \Delta P_2 \right| + \left| \frac{\partial \eta}{\partial S_1} * \Delta S_1 \right| \quad (9)$$

$$\text{Ohm'sche Gesetz} \quad R = \frac{U}{I} \quad \Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial U} * \Delta U \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial I} * \Delta I \right| \quad (10)$$

3 Versuchsanordnung

Das Herzstück des Versuches ist natürlich der Trafo, wobei bei diesem Experiment gleich zwei zum Einsatz kommen. Der gesamte Versuch basiert auf einer Grundschaltung, welche mit jedem Aufgabepunkt ein wenig erweitert wird.

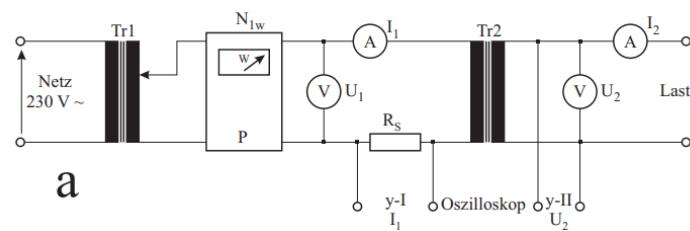


Abb. 3: Aufbau der Grundschaltung [2]

In der Realität sieht der Aufbau wie folgt aus:

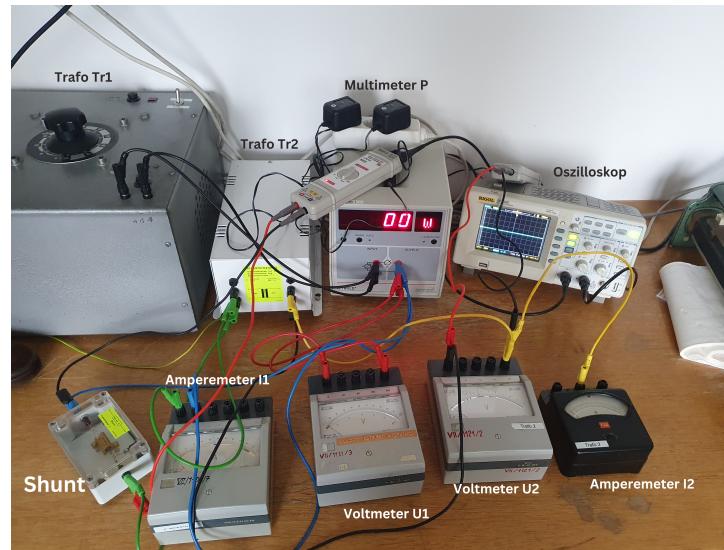


Abb. 4: Realer Aufbau der Grundschaltung

Im weiteren Verlauf des Experiments wurde die Schaltung nicht wie in Abbildung 4 im Leerlauf, sondern mit einem Lastwiderstand R_L betrieben. Dadurch konnte nun auch ein Verbraucherstrom I_2 gemessen werden. Aufgebaut sieht der Versuch nun so aus:

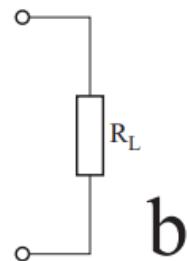


Abb. 5: Hinzugefügter Lastwiderstand [2]

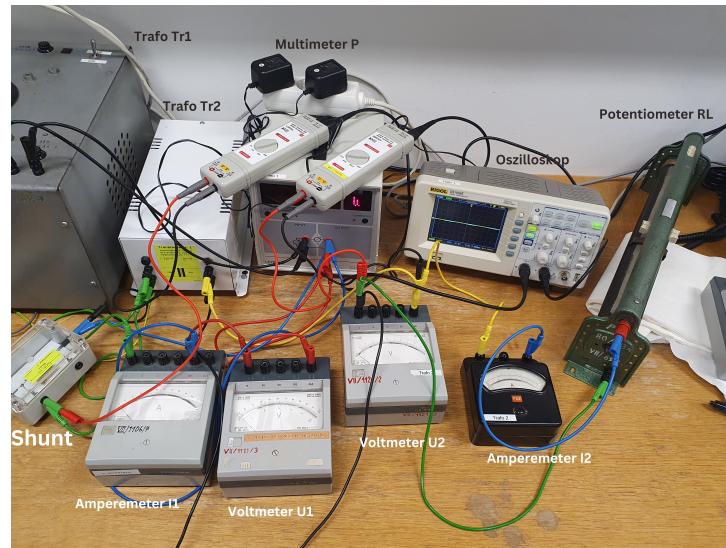


Abb. 6: Realer Aufbau mit Lastwiderstand

Für die letzte Erweiterung der Grundschaltung wurde nun noch eine Spule seriell an das Potentiometer angeschlossen. Weiters wurde nun ein zusätzliches Voltmeter zur Bestimmung der Spannung U_R , welche später für die Berechnung der Leistung P_2 noch benötigt wird, miteingebaut.

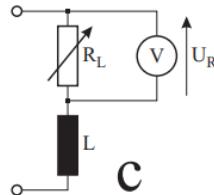


Abb. 7: Potentiometer und Spule als zusätzliche Verbraucher [2]

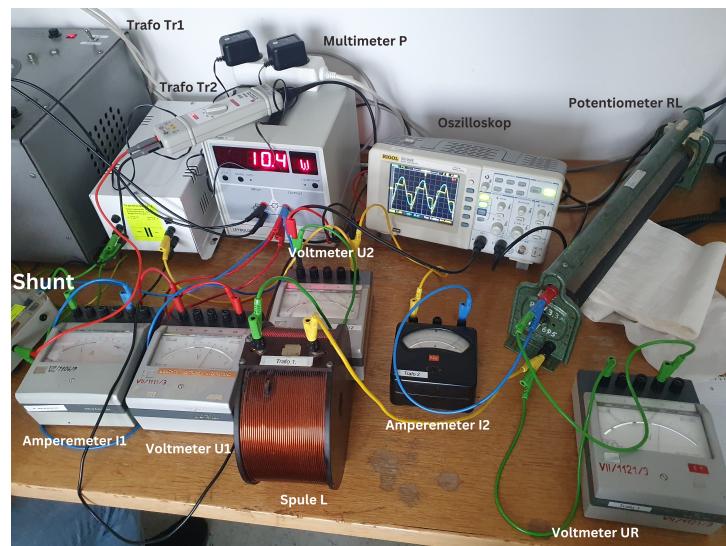


Abb. 8: Realer Aufbau mit Potentiometer und Spule

4 Geräteliste

Tab. 1: Im Versuch verwendete Geräte und Utensilien.

Gerät	Gerätenummer	Unsicherheit
Oszilloskop	n.a	n.a
Trafo Tr1	n.a	n.a
Trafo Tr2	n.a	n.a
Multimeter P	n.a	$\pm 0.01W$ [1]
Potentiometer	n.a	n.a
Shunt	n.a	n.a
Voltmeter U1	n.a	$\pm 0.5\% + 2$ digit
Voltmeter U2	n.a	$\pm 0.5\% + 2$ digit
Voltmeter UR	n.a	$\pm 0.5\% + 2$ digit
Amperemeter I1	n.a	$\pm 1.5\% + 2$ digit
Amperemeter I2	n.a	$\pm 0.5\% + 2$ digit
Spule	n.a	n.a

5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

5.1 Leerlauf

Zu Beginn des ersten Teiles des Versuches wurde die grundlegende Schaltung laut 3 aufgebaut und vom Betreuer kontrolliert. Wie in der Aufgabenstellung erwähnt befindet sich hier noch kein Lastwiderstand im System, weshalb kein Sekundärstrom I_2 fließt. Sobald der Aufbau abgeschlossen war, wurde der Stromkreis durch einschalten des Trafo 1 geschlossen und es konnten alle benötigten Werte von den Messgeräten abgelesen werden. Hierbei galt noch zu Beachten, dass die angezeigten Werte der alten Volt- und Amperemeter nicht einfach zu übernehmen waren. Der Maximalwert der Skala war gleich dem Wert des jeweiligen Anschlusses (in Abbildung 9 grün markiert):

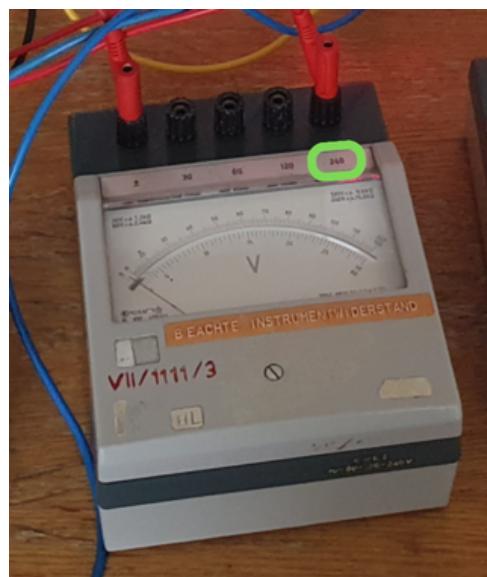


Abb. 9: Messgeräte Werte

Somit ergibt sich als Beispiel für dieses Voltmeter aus Abbildung 9 ein Maximalwert von 240V. Wenn der Zeiger also beispielsweise bei der Hälfte wäre, dann hätte die Spannung nicht wie beschriftet 60V, sondern 120V ($\frac{240}{2}$). Diese Umrechnung wurde für die gemessenen Werte bei den jeweiligen Messgeräten bereits durchgeführt und nur die tatsächlichen Zahlen in die Tabelle eingetragen.

Tab. 2: Messwerte Leerlauf

Primärstrom I_1 / A	Primärspannung U_1 / V	Sekundärspannung U_2 / V	Wirkleistung P_1 / W
0.170 ± 0.011	160.0 ± 1.4	17.3 ± 0.5	6.90 ± 0.01

Die oszillographische Darstellung des Primärstromes (gelb) und der Sekundärspannung (cyan) werden in folgender Abbildung grafisch dargestellt.

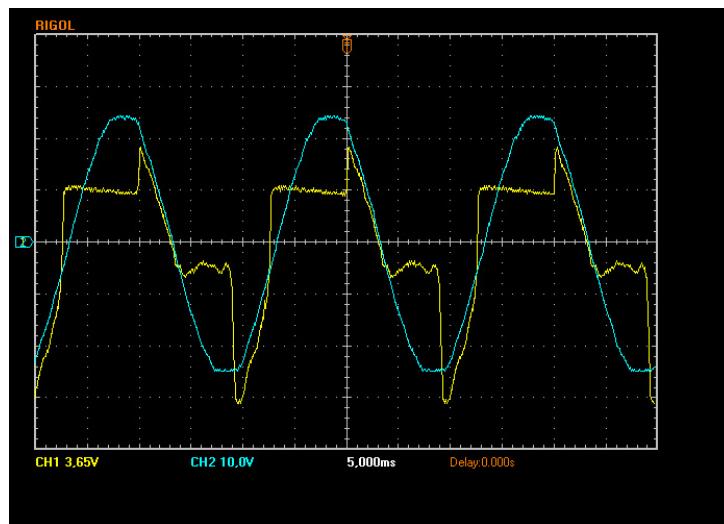


Abb. 10: Oszillographische Darstellung Primärstromes und Sekundärspannung

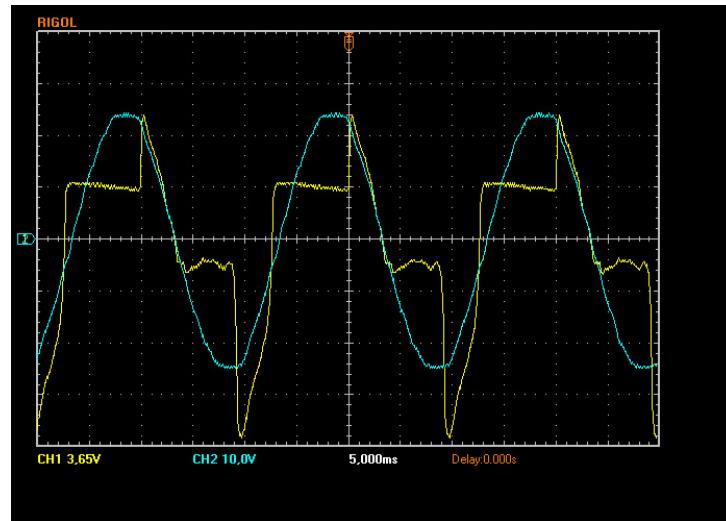
5.2 Ohm'sche Last sekundärseitig

Im nächsten Aufgabenteil wurde nun die Grundschaltung mit dem Potentiometer (Abbildung 5) erweitert. Nachdem die Schaltung wieder kontrolliert wurde, konnten die Werte mit dem selben System wie im vorherigen Punkt abgelesen und umgerechnet werden. Jedoch konnte nun auch der Sekundärstrom I_2 bestimmt werden. Der Schieberegler des Potentiometers wurde dabei ungefähr auf die Mitte geschoben, was einem Widerstand von etwa 42 Ohm entspricht.

Tab. 3: Messwerte Ohm'sche Last

P. Strom I_1 / A	P. Spannung U_1 / V	Strom I_2 / A	S. Spannung U_2 / V	Wirkleistung P_1 / W
0.195 ± 0.011	160.0 ± 1.4	0.640 ± 0.007	17.0 ± 0.5	17.90 ± 0.01

Die grafische Darstellung des Primärstromes (gelb) und der Sekundärspannung (cyan) mittels Oszilloskop sind in folgendem Bild ersichtlich.

**Abb. 11:** Oszillographische Darstellung Primärstromes und Sekundärspannung

5.3 Ohm'sche-induktive Last

Beim dritten Abschnitt des Versuches wird die Schaltung wieder etwas erweitert. Nun kommt zum Potentiometer noch eine Spule L (Abbildung 7) hinzu. Außerdem wird nun kein fester Widerstand am Potentiometer eingestellt, sondern dieser wird Schrittweise verschoben, sodass 22 Messungen entstehen. Weiters wurde zur späteren Bestimmung der Wirkleistung P_2 die Spannung U_R am Potentiometer gemessen.

Tab. 4: Messwerte Ohm'sche und induktive Last

Nr.	$I_1 \pm 0.011 / A$	$U_1 \pm 1.4 / V$	$I_2 \pm 0.007 / A$	$U_2 \pm 0.5 / V$	$P_1 \pm 0.01 / W$	$U_R \pm 0.14 / V$
1	0.180	160.0	0.220	17.0	10.40	15.20
2	0.183	160.0	0.220	17.0	10.50	15.20
3	0.185	160.0	0.230	17.0	10.60	15.00
4	0.185	160.0	0.240	17.0	10.60	15.00
5	0.189	160.0	0.240	17.0	10.70	14.90
6	0.189	160.0	0.250	17.0	10.80	14.80
7	0.189	160.0	0.250	17.0	10.80	14.60
8	0.189	160.0	0.260	17.0	10.90	14.40
9	0.188	160.0	0.270	17.0	11.00	14.30
10	0.190	160.0	0.280	17.0	11.10	14.10
11	0.190	160.0	0.290	17.0	11.30	13.80
12	0.190	160.0	0.300	17.0	11.40	13.60
13	0.193	160.0	0.320	17.0	11.50	13.20
14	0.195	160.0	0.330	17.0	11.50	13.00
15	0.195	160.0	0.340	17.0	11.60	12.60
16	0.198	160.0	0.360	17.3	11.70	12.20
17	0.200	160.0	0.380	17.0	11.80	11.60
18	0.203	160.0	0.400	17.0	11.80	11.00
19	0.205	160.0	0.420	17.0	11.70	10.40
20	0.205	160.0	0.430	17.0	11.80	10.00
21	0.210	160.0	0.450	17.0	11.70	9.30
22	0.215	160.0	0.480	17.0	11.40	8.00

6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse

In der Auswertung werden zur erhöhten Genauigkeit durchgehend ungerundete Werte bis zu den Endergebnissen verwendet und nur zur Darstellung gerundet.

Zur Berechnung der Unsicherheiten wird, wenn nicht anders angegeben, die Größtunsicherheitsmethode verwendet.

6.1 Leerlauf

Mittels Formeln 4, 5 und 7 werden nun gemeinsam mit den gemessenen Werten aus Tabelle 2 die Scheinleistung P_{S1} , die Blindleistung P_{Q1} und der Leistungsfaktor $\cos(\Phi)$ berechnet.

Tab. 5: Berechnungen Leerlauf

P_{S1} / W	P_{Q1} / W	$\cos(\Phi)$ /
27 ± 2	26 ± 3	0.26 ± 0.02

6.2 Ohm'sche Last sekundärseitig

Auch hier sollen mit den Formeln 4, 5, 7, 6, 8 und 9 werden nun gemeinsam mit den gemessenen Werten aus Tabelle 3 die Scheinleistung P_{S1} , die Blindleistung P_{Q1} , der Leistungsfaktor $\cos(\Phi)$, die Verlustleistung P_V , die sekundärseitige Wirkleistung P_2 und der Wirkungsgrad η berechnet.

Tab. 6: Berechnungen Ohm

P_{S1} / W	P_{Q1} / W	$\cos(\Phi)$ /	P_V / W	P_2 / W	η /
32 ± 3	26 ± 3	0.58 ± 0.04	7.1 ± 0.6	10.9 ± 0.5	0.40 ± 0.04

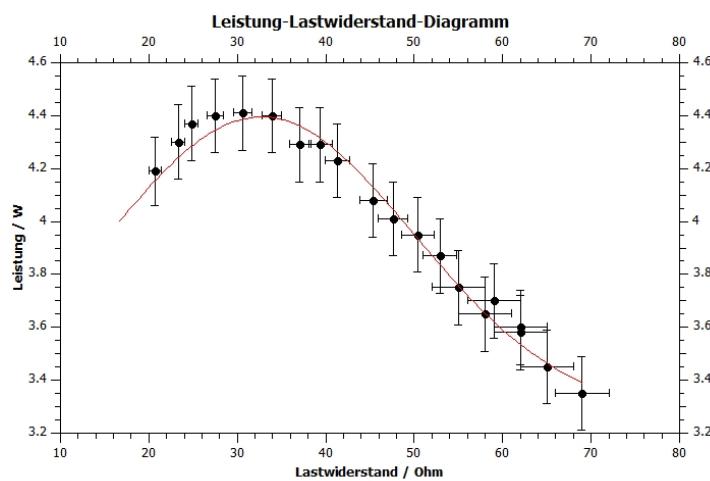
6.3 Ohm'sche-induktive Last

Für den letzten Aufgabenpunkt soll nun ein Leistung-Lastwiderstand-Diagramm erstellt werden. Hierzu wird mittels Formel 8 und den gemessenen Werten zu jedem Widerstandswert aus Tabelle 4 die Leistung an den jeweiligen Potentiometerpositionen ermittelt. Außerdem wurde mittels Ohm'schen Gesetz 10 der eingestellte Widerstand am Potentiometer berechnet.

Tab. 7: Berechnete Werte für R_{Pot} und P_2

Nr.	R_{Pot} / Ω	P_2 / W
1	69 ± 3	3.35 ± 0.14
2	69 ± 3	3.35 ± 0.14
3	65 ± 3	3.45 ± 0.14
4	62 ± 3	3.60 ± 0.14
5	62 ± 3	3.58 ± 0.14
6	59 ± 3	3.70 ± 0.14
7	58 ± 3	3.65 ± 0.14
8	55 ± 3	3.75 ± 0.14
9	52.9 ± 1.9	3.87 ± 0.14
10	50.4 ± 1.8	3.95 ± 0.14
11	47.6 ± 1.7	4.01 ± 0.14
12	45.4 ± 1.6	4.08 ± 0.14
13	41.3 ± 1.4	4.23 ± 0.14
14	39.4 ± 1.3	4.29 ± 0.14
15	37.1 ± 1.2	4.29 ± 0.14
16	33.9 ± 1.1	4.40 ± 0.14
17	30.6 ± 1.0	4.41 ± 0.14
18	27.5 ± 0.9	4.40 ± 0.14
19	24.8 ± 0.8	4.37 ± 0.14
20	23.3 ± 0.8	4.30 ± 0.14
21	20.7 ± 0.7	4.19 ± 0.13
22	16.7 ± 0.6	3.84 ± 0.13

Die fett markierte Zeile ist jene mit der höchsten Leistung. Sie stellt weiters das Maximum in dem mit den Werten aus Tabelle 7 erstellten Leistung-Lastwiderstand-Diagramm dar.

**Abb. 12:** Leistung-Lastwiderstand-Diagramm

Die bereits im zweiten Aufgabenpunkt geforderten Parameter wurden auch hier mittels Formeln 4, 5, 7, 6, 8 und 9 und den Werten aus Tabelle 4 berechnet. Einige Werte wurden auch der Tabelle 7 entnommen, wobei in beiden Fällen nur jene aus dem Maximum verwendet wurden.

Tab. 8: Berechnungen Ohm'sche-Induktive Last

P_{S1} / W	P_{Q1} / W	$\cos(\Phi)$ /	P_V / W	P_2 / W	η /
32 ± 3	30 ± 4	0.37 ± 0.04	7.39 ± 0.15	4.41 ± 0.14	0.374 ± 0.018

Das Oszilloskopbild mit Primärstrom (gelb) und Sekundärspannung (cyan) an der Stelle, an der die Leistung maximal wird, lässt sich in folgender Grafik erkennen.

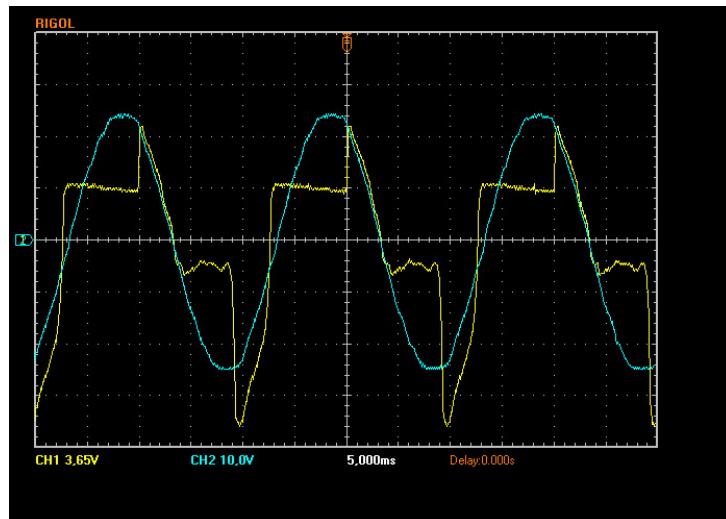


Abb. 13: Oszilloskop Diagramm am Maximum

7 Diskussion

Die berechneten Werte der Wirkleistung P_2 bilden wie erwartet eine Kurve, welche in etwa beim Punkt (30.6/4.41) ein Maximum besitzt. Da das Potentiometer in relativ großen Abständen verschoben wurde, könnte das tatsächliche Maximum auch im umliegenden Bereich dieses Punktes (aber auf jeden Fall zwischen den benachbarten Punkten) liegen. Dieses Maximum kommt zustande, da der Sekundärstrom I_2 immer größer- und die Spannung U_R immer kleiner wird. Dadurch, dass die beiden Größen multipliziert werden, ergibt sich ein Maximumspunkt.

Die exportierten Oszilloskopbilder weisen eine sehr ungewöhnliche Form des Primärstromes auf, dessen Verschulden nach gezieltem herumbasteln, messen und mit Hilfe von letztemlichem Ausschlussverfahren wahrscheinlich auf das Shunt fällt. Womöglich ist dieses-, oder das dazugehörige Oszilloskop-Interface (womöglich auch ein Kabel davon) defekt, was sich bei erneuter Versuchsdurchführung mit Ersatzgeräten vermeiden liese. Auch ein genauer Vergleich der Phasenverschiebung wird durch dieses Problem zusätzlich erschwert.

Da sich für eine solche Schaltung keinerlei Literaturwerte finden lassen, kann auch nur Schwer über die Richtigkeit der Berechnungen geurteilt werden. Jedoch wurden die Messwerte bereits während der Versuchsdurchführung mit den Erwartungswerten des Laborleiters verglichen, wodurch auf eine fehlerfreie Ausführung des Experiments geschlossen werden kann.

8 Zusammenfassung

Alle berechneten Werte und resultierende Diagramme werden in diesem Kapitel noch einmal übersichtlich dargestellt und zusammengefasst.

8.1 Leerlauf

Tab. 9: Berechnungen Leerlauf

P_{S1} / W	P_{Q1} / W	$\cos(\Phi)$ /
27 ± 2	26 ± 3	0.26 ± 0.02

8.2 Ohm'sche Last sekundärseitig

Tab. 10: Berechnungen Leerlauf

P_{S1} / W	P_{Q1} / W	$\cos(\Phi)$ /	P_V / W	P_2 / W	η /
32 ± 3	26 ± 3	0.58 ± 0.04	7.1 ± 0.6	10.9 ± 0.5	0.40 ± 0.04

8.3 Ohm'sche-induktive Last

Tab. 11: Berechnete Werte für R_{Pot} und P_2

Nr.	R_{Pot} / Ω	P_2 / W
1	69 ± 3	3.35 ± 0.14
2	69 ± 3	3.35 ± 0.14
3	65 ± 3	3.45 ± 0.14
4	62 ± 3	3.60 ± 0.14
5	62 ± 3	3.58 ± 0.14
6	59 ± 3	3.70 ± 0.14
7	58 ± 3	3.65 ± 0.14
8	55 ± 3	3.75 ± 0.14
9	52.9 ± 1.9	3.87 ± 0.14
10	50.4 ± 1.8	3.95 ± 0.14
11	47.6 ± 1.7	4.01 ± 0.14
12	45.4 ± 1.6	4.08 ± 0.14
13	41.3 ± 1.4	4.23 ± 0.14
14	39.4 ± 1.3	4.29 ± 0.14
15	37.1 ± 1.2	4.29 ± 0.14
16	33.9 ± 1.1	4.40 ± 0.14
17	30.6 ± 1.0	4.41 ± 0.14
18	27.5 ± 0.9	4.40 ± 0.14
19	24.8 ± 0.8	4.37 ± 0.14
20	23.3 ± 0.8	4.30 ± 0.14
21	20.7 ± 0.7	4.19 ± 0.13
22	16.7 ± 0.6	3.84 ± 0.13

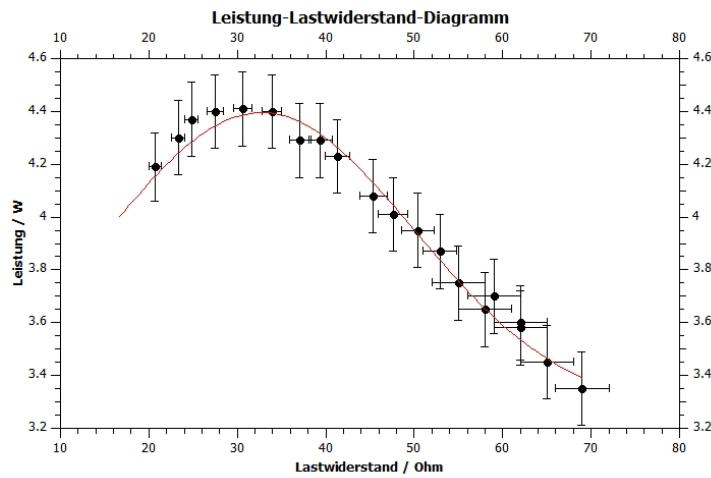


Abb. 14: Leistung-Lastwiderstand-Diagramm

Tab. 12: Berechnungen Ohm'sche-Induktive Last

P_{S1} / W	P_{Q1} / W	$\cos(\Phi)$ /	P_V / W	P_2 / W	η /
32 ± 3	30 ± 4	0.37 ± 0.04	7.39 ± 0.15	4.41 ± 0.14	0.374 ± 0.018

9 Anhang

In diesem Abteil werden die Unsicherheitsrechnungen zur eventuellen Fehlersuche abgebildet. Für Unsicherheiten von Größeren Tabellen wird jeweils die Rechnung des ersten Wertes als Beispiel für die restlichen Größen gezeigt.

$$\begin{aligned}\Delta U_1 &= 240 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} \\ \Delta I_1 &= 0,6 \cdot 1,5\% + 2 \text{ digit} \\ \Delta P_1 &= 0,001 \text{ W} \\ \Delta U_2 &= 60 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} \\ \Delta I_2 &= 1 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} \\ \Delta U_K &= 24 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit}\end{aligned}$$

3.) Unsicherheiten

1.) Leerlauf

$$\begin{aligned}\Delta I_1 &= 0,6 \cdot 1,5\% + 2 \text{ digit} = 0,009 + 2 \text{ digit} = 0,011 \\ \Delta U_1 &= 240 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 1,2 + 2 \text{ digit} = 1,4 \\ \Delta U_2 &= 60 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 0,3 + 2 \text{ digit} = 0,5 \\ \Delta P_1 &= 0,001 \text{ W}\end{aligned}$$

2.) Ohm'sche Last

$$\begin{aligned}\Delta I_1 &= 0,6 \cdot 1,5\% + 2 \text{ digit} = 0,009 + 2 \text{ digit} = 0,011 \\ \Delta U_1 &= 240 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 1,2 + 2 \text{ digit} = 1,4 \\ \Delta I_2 &= 1 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 0,005 + 2 \text{ digit} = 0,007 \\ \Delta U_2 &= 60 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 0,3 + 2 \text{ digit} = 0,5 \\ \Delta P_1 &= 0,001 \text{ W}\end{aligned}$$

3.) Ohm'sche + Ind. Last

$$\begin{aligned}\Delta I_1 &= 0,6 \cdot 1,5\% + 2 \text{ digit} = 0,009 + 2 \text{ digit} = 0,011 \\ \Delta U_1 &= 240 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 1,2 + 2 \text{ digit} = 1,4\end{aligned}$$

Abb. 15: Unsicherheitsrechnungen

$$\begin{aligned}\Delta I_2 &= 1 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 0,005 + 2 \text{ digit} = 0,007 \\ \Delta U_2 &= 60 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 0,3 + 2 \text{ digit} = 0,5 \\ \Delta P_1 &= 0,01 \vee \\ \Delta U_R &= 24 \cdot 0,5\% + 2 \text{ digit} = 0,12 + 2 \text{ digit} = 0,14\end{aligned}$$

4.) $A \cup -Leerlauf$

$$\begin{aligned}\Delta P_{S1} &= \left| \frac{\Delta P_{S1}}{\Delta U_1} \right| \cdot \Delta U_1 + \left| \frac{\Delta P_{S1}}{\Delta I_1} \right| \cdot \Delta I_1 = |I_1| \cdot \Delta U_1 + |U_1| \cdot \Delta I_1 = 0,170 \cdot 1,4 + 160 \cdot 0,011 = \\ &= 1,998 = 2\end{aligned}$$

$$\Delta P_{S2} = \left| \frac{\Delta P_{S2}}{\Delta S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{\Delta P_{S2}}{\Delta P_1} \right| \cdot \Delta P_1 = 2,06869 + 0,02673 = 2,10573 = 3$$

$$\Delta w_2(t) = \left| \frac{\Delta P_2}{S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{\Delta P_2}{P_1} \right| \cdot \Delta P_1 = 0,0193 = 0,02$$

5.) Ohn'sche Leitst.

$$\begin{aligned}\Delta P_{S1} &= \left| \frac{\Delta P_{S1}}{\Delta U_1} \right| \cdot \Delta U_1 + \left| \frac{\Delta P_{S1}}{\Delta I_1} \right| \cdot \Delta I_1 = |I_1| \cdot \Delta U_1 + |U_1| \cdot \Delta I_1 = 2,023 = 2,1 \\ \Delta P_{S2} &= \left| \frac{\Delta P_{S2}}{\Delta S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{\Delta P_{S2}}{\Delta P_1} \right| \cdot \Delta P_1 = 2,57074 = 3 \\ \Delta w_2(t) &= \left| \frac{\Delta P_2}{S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{\Delta P_2}{P_1} \right| \cdot \Delta P_1 = 0,038926 = 0,04\end{aligned}$$

$$\Delta P_V = 1 \cdot \Delta P_1 + 1 \cdot \Delta P_2 = 0,51 = 0,6$$

$$\Delta P_{U2} = I_2 \cdot \Delta U_2 + U_R \cdot \Delta I_2 = 0,439 = 0,5$$

$$\Delta \eta = \left| \frac{\Delta P_2}{S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{\Delta P_2}{P_1} \right| \cdot \Delta P_1 = 0,03954 = 0,04$$

Abb. 16: Unsicherheitsrechnungen

6.) Ohm + Ind.

$\Delta R_{\text{pot}} = \left| \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} \right| \cdot \Delta U_2 + \left| \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right| \cdot \Delta I_2 = \left| \frac{1}{I_2} \right| \cdot \Delta U_2 + \left| \frac{-U_1}{I_2^2} \right| \cdot \Delta I_2 \approx 2,83471 \approx 3$

$\Delta p_{\text{Zule 1}}: \Delta P_1 = \left| \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right| \cdot \Delta U_1 + \left| \frac{\Delta P_2}{\Delta I_1} \right| \cdot \Delta I_1 = I_1 \cdot \Delta U_1 + U_1 \cdot \Delta I_1 \approx 0,1372 \approx 0,14$

$\Delta P_{S1} = \left| \frac{\Delta P_1}{\Delta U_1} \right| \cdot \Delta U_1 + \left| \frac{\Delta P_2}{\Delta I_1} \right| \cdot \Delta I_1 = \left| I_1 \right| \cdot \Delta U_1 + \left| U_1 \right| \cdot \Delta I_1 \approx 2,24 \approx 3$

$\Delta P_{S2} = \left| \frac{\Delta S_1}{\Delta U_1 - P_1^2} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{-P_2}{\Delta S_1^2 - P_2^2} \right| \cdot \Delta P_2 = 3,23741 \approx 3,3$

$\Delta u_{\text{rel}}(\%) = \left| \frac{\Delta P_1}{S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{1}{S_1} \right| \cdot \Delta P_1 \approx 0,034883 \approx 0,04$

$\Delta P_V = 1 \cdot \Delta P_1 + 1 \cdot \Delta P_2 = 0,15$

$\Delta P_{U2} = I_2 \cdot \Delta U_2 + U_2 \cdot \Delta I_2 = 0,14$

$\Delta \eta = \left| \frac{\Delta P_2}{S_1} \right| \cdot \Delta S_1 + \left| \frac{1}{S_1^2 - P_2^2} \right| \cdot \Delta P_2 = 0,017295 \approx 0,018$

Abb. 17: Unsicherheitsrechnungen

Literatur

- [1] leybold-shop.at. *Digitalmultimeter P Betriebsanleitung. Kurs: PHYD20UF*. (besucht am 11.11.2023). URL: <https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/5/531/531832d.pdf>.
- [2] TU Graz TeachCenter. *"Laborübungen 2: Elektrizität, Magnetismus, Optik". Kurs: PHYD30UF*. (besucht am 11.11.2023). URL: <https://tc.tugraz.at/main/course/view.php?id=796>.