



GEP
Praktikum 2

2021

B6-Brücke

4. Januar

Emily Antosch 2519935

Florian Tietjen

Karl Döring

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	2
1 Einführung	3
2 Messung der Wicklungswiderstände beider Seiten	4
3 Leerlaufversuch am Transformator	4
3.1 Messung I_{10} und P_{10}	4
3.2 Bestimmung des Spannungsverhältnisses	4
3.3 Stromverlauf im Nennpunkt	5
3.4 Einschaltmoment der Primärseite	5
4 Kurzschlussversuch	7
4.1 Messung der Kurzschlussspannung und der Kurzschlussleistung	7
5 Belastungsversuch	7
5.1 Messung der Spannung, des Stroms und der Leistung mit Wirklast	8
5.2 Messung der Sekundärspannung bei Wirklast	8
6 Auswertung	8
6.1 Bestimmung der Ersatzimpedanzen R_{Fe} und X_{1h}	8
6.2 Bestimmung der Ersatzimpedanzen R_k und X_k	9
6.3 Ermittlung des Wirkungsgrads für den Nennpunkt	10
7 Konklusion	10

Abbildungsverzeichnis

1	Ersatzschaltbild eines Transformators	3
2	Aufbau des Leerlaufversuchs	4
3	Die beiden Funktionen $I_{10} = f(U_{10})$ und $P_{10} = f(U_{10}^2)$	5
4	Der Stromverlauf am Transformator bei voller und halber Nennspannung	5
5	Einschaltverhalten am Transformator bei positiver Halbwelle, $\alpha = 0^\circ$ Zündwinkel und 50 Perioden	6
6	Einschaltverhalten am Transformator bei positiver Halbwelle, $\alpha \in \{45^\circ, 90^\circ\}$ und 50 Perioden	6
7	Beispielhafte Bilder vom Oszilloskop	7
8	Aufbau des Belastungsversuchs	8
9	Die Spannung $U_2 = f(I_2)$ als Funktion des Stromes	9

Tabellenverzeichnis

1	Strom und Leistung in Abhängigkeit von der Spannung U_{10}	4
2	Messreihe Kurzschlussversuch	7
3	Messreihe des Belastungsversuch	8

1 Einführung

Dieser Laborbericht zum dritten Praktikum in Grundlagen der Energietechnik befasst sich mit den Eigenschaften von Transformatoren im Kontext der Energietechnik. Dabei wird ein Einphasentransformator untersucht und die Parameter des Ersatzschaltbildes ermittelt.

Im Allgemeinen nutzt man Transformatoren zur Änderung des Spannungspegels von Wechselspannungen. Die Änderung der Spannung von der Primärseite zur Sekundärseite ist dabei direkt proportional zum Übersetzungsverhältnis. Dieses wird durch die Menge an Wicklungen um einen gemeinsamen Eisenkern bestimmt. Dieser zur Verbesserung der Induktion, was zu einem besseren Wirkungsfaktor führt. Über die Eigenschaft von elektrischen Strömen in Leitern Magnetfelder zu erzeugen wird von der Primärseite eine Spannung in der Sekundärseite induziert, welche dem vorher genannten Übersetzungsverhältnis entspricht.

Um bestimmte physikalische Prozesse, die zu Verlusten bei der Transformation der Spannung entstehen, besser im elektrotechnischen Kontext beschreiben zu können, wird ein allgemeines Ersatzschaltbild verwendet. Dabei beziehen sich die verschiedenen Größen auf die Primärseite. Alle Bauteile mit einer 1 im Index ist auf der Primärseite, alle Bauteile mit einer 2 sind hingegen auf der Sekundärseite.

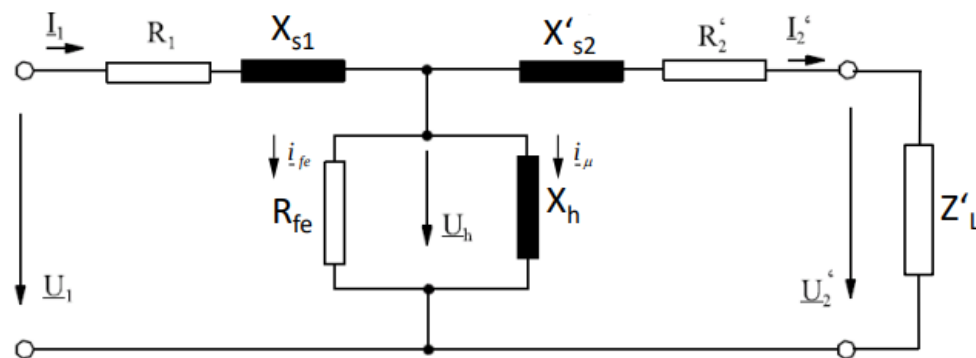


Abbildung 1: Ersatzschaltbild eines Transformators

Die Messungen an unserem Transformator werden maßgeblich von seinen Kenndaten beeinflusst, die wir vom Typenschild im Labor ablesen. Dabei haben wir auf der Primärseite $U_N = 380V$ und $I_N = 9,5A$ und auf der Sekundärseite $U'_N = 220V$ und $I'_N = 16A$. Mit diesen Angaben können wir nun bestimmte Messungen die Parameter des ESB Stück für Stück bestimmen.

2 Messung der Wicklungswiderstände beider Seiten

Wir messen zunächst die Wicklungswiderstände beider Seiten, indem wir ein Ohmmeter an die jeweiligen Klemmen des Transformators anschließen. Die Werte ergeben sich zu:

$$R_1 = 0,55\Omega, R_2 = 0,3\Omega$$

3 Leerlaufversuch am Transformator

Beim Leerlaufversuch am Transformator wollen wir verschiedene Messungen vornehmen, indem wir auf der Sekundärseite des Transformators keine Last zu schalten, sodass die Klemmen offen sind. Lediglich ein Voltmeter zur Spannungsmessung wird hinzugeschaltet.

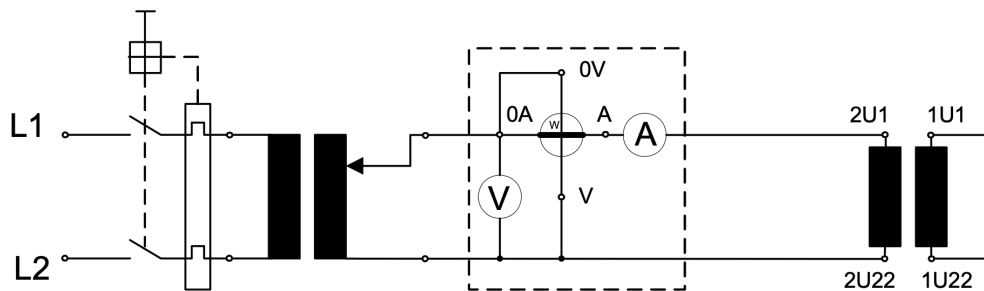


Abbildung 2: Aufbau des Leerlaufversuchs

3.1 Messung I_{10} und P_{10}

U_{10}	I_{10}	P_{10}
22V	95,4mA	980mW
44V	145,6mA	3,56W
66V	193mA	7,03A
88V	249mA	11,36W
110V	323mA	16,86W
132V	418mA	22,8W
154V	559,8mA	30,15W
176V	797mA	39,5W
198V	1,12A	52,02W
220V	1,61A	71,2W
242V	2,24A	99,2W

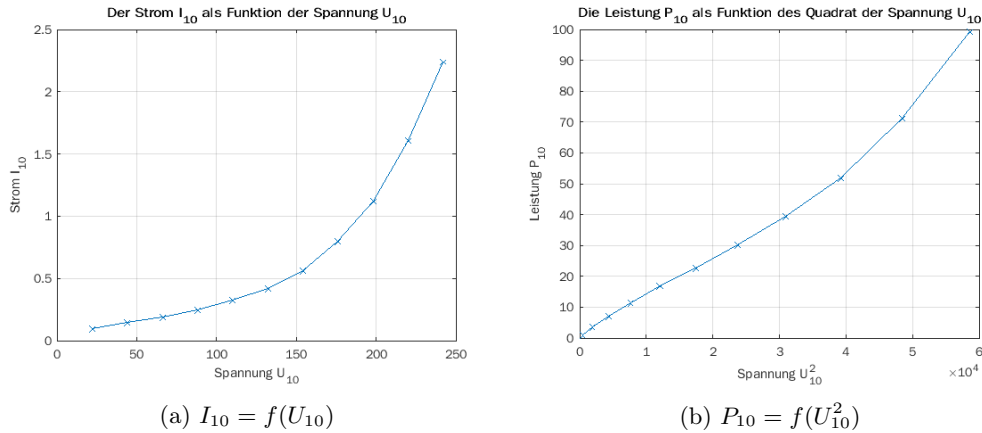
Tabelle 1: Strom und Leistung in Abhängigkeit von der Spannung U_{10}

Im Anschluss stellen wir die beiden Werte als Funktion der Spannung U_{10} dar:

3.2 Bestimmung des Spannungsverhältnisses

Im Nennpunkt für $U_{1N} = 220V$ messen wir beide Seiten des Transformators. Die Primärseite weist dabei eine Spannung von $U_2 = 359V$ auf, wodurch man mit

$$\ddot{u} = \frac{U_2}{U_{1N}} = \frac{359V}{220V} = 1.6318$$

(a) $I_{10} = f(U_{10})$ (b) $P_{10} = f(U_{10}^2)$ Abbildung 3: Die beiden Funktionen $I_{10} = f(U_{10})$ und $P_{10} = f(U_{10}^2)$

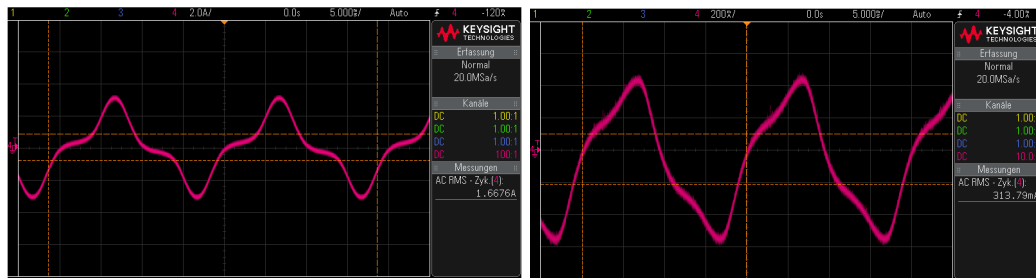
einen Spannungsübertragungsverhältnis berechnen. Die Differenz zur theoretischen Übertragung

$$\ddot{u} = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{380V}{220V} = 1.727$$

liegt bei $\Delta \ddot{u} = 1.727 - 1.6318 = 0.0952$, was sich über die Herstellungsunterschiede der Transformatoren erklären lässt. Gleichzeitig ist zu bemerken, dass der im Labor verwendete Transformator schon relativ alt ist, wodurch möglicherweise bereits Schäden an der Wicklung entstanden sein könnten.

3.3 Stromverlauf im Nennpunkt

Im nächsten Schritt wird der Stromverlauf bei Nennspannung und bei halber Nennspannung mithilfe einer Stromzange am Oszilloskop betrachtet:



(a) Volle Nennspannung

(b) Halbe Nennspannung

Abbildung 4: Der Stromverlauf am Transformator bei voller und halber Nennspannung

Es fällt ziemlich deutlich auf, dass bei dem Anlegen der vollen Nennspannung eine vollständige Hystereschleife im Eisenkern des Transformators passiert und der Kern schließlich in die Sättigung geht. Bei halber Nennspannung ist der Effekt auch vorhanden jedoch weitaus weniger deutlich als bei voller Nennspannung. Anhang dieses Beispiels lässt sich die Eigenschaft des Transformators, die sich aus dem Aufbau und Wirkungsweise des Eisenkerns ergibt, gut ableiten. Je nach Umpolung der Magnetfeldkennlinien entsteht eine mehr oder weniger deutliche Hystereschleife im Verlauf des Stroms auf der anderen Seite.

3.4 Einschaltmoment der Primärseite

Mithilfe eines Schaltwinkelstellers betrachtet man nun den Einschaltvorgang auf der Primärseite des Transformators. Dabei können wir unseren Schaltwinkelsteller auf einen bestimmten Winkel, eine

Dauer in Perioden und die positive oder negative Halbwelle einstellen. Bei einer positiven Halbwelle, welche für diese Oszillogramme gewählt wurde, schlägt der Transformator bei voller Umpolung der Magnetfeldkennlinien für die eingestellten Perioden um. Die folgenden drei Bilder sind jeweils für 0° , 45° , 90° und 50 Perioden.

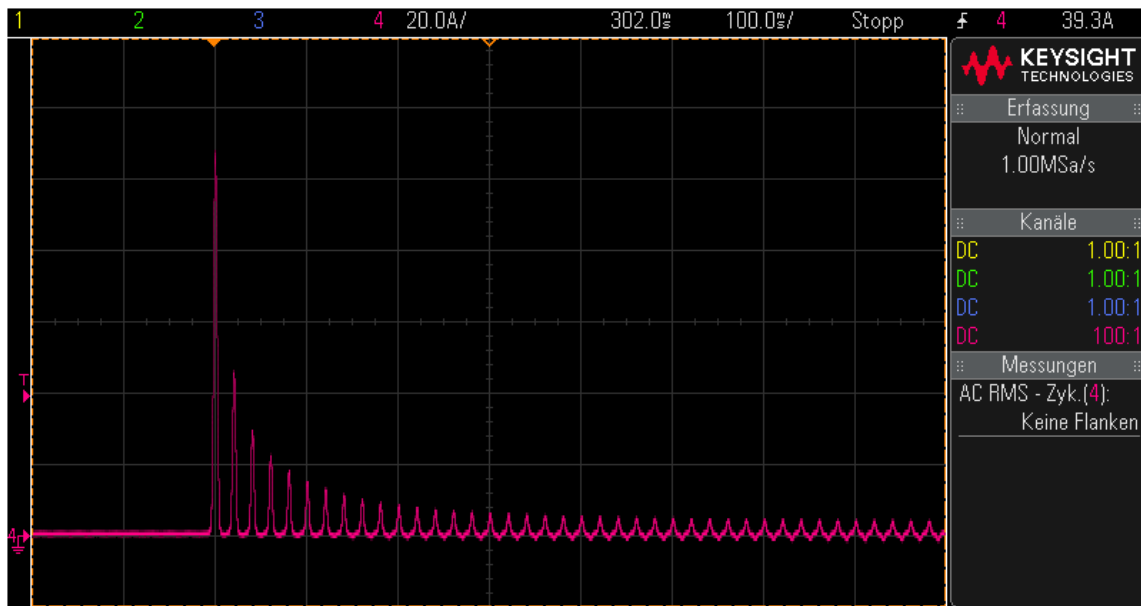
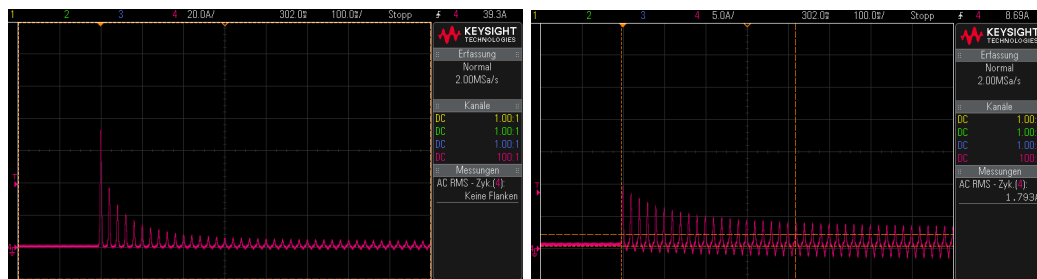


Abbildung 5: Einschaltverhalten am Transformator bei positiver Halbwelle, $\alpha = 0^\circ$ Zündwinkel und 50 Perioden

Bei einem Einschaltwinkel von 0° entstehen augenscheinlich die höchsten Einschaltströme. Dies lässt sich dadurch erläutern, dass der Kern nach dem Ausschalten vormagnetisiert ist. Beim Einschalten des Transformators bei der positiven Halbwelle und bei einem Winkel von 0° wird der Eisenkern zum schlechtesten Zeitpunkt ummagnetisiert, welches die höchste Energie bzw. die höchsten Ströme verursacht. Diesen Effekt nennt man auch Rush-Effekt.



(a) $\alpha = 45^\circ$

(b) $\alpha = 90^\circ$

Abbildung 6: Einschaltverhalten am Transformator bei positiver Halbwelle, $\alpha \in \{45^\circ, 90^\circ\}$ und 50 Perioden

Bei einem Erhöhen des Winkels verringert sich der Einschaltstrom deutlich. Da durch ein späteres Einschalten in der positiven Halbwelle ein kleiner Effektivwert der Spannung verwendet wird, läuft der Transformator deutlich langsamer und leichter an. Der Rush-Effekt sorgt, ohne Einschaltwinkelsteller, für extrem hohe Einschaltströme die das Netz belasten können. Typischerweise wird daher ein solcher Winkelsteller auf einen Winkel von z.B. 45° gestellt. Diese Vorkehrung sorgt für geringere Einschaltströme und einen sanften Anlauf, der keine Belastung für das Netz darstellt.

4 Kurzschlussversuch

Beim Kurzschluss speisen wir nun von der Primärseite vom Stelltransformator ein und schließen die Sekundärseite kurz. Dabei messen wir dann sowohl $U_k = f(I_k)$ und $P_k = f(I_k)$.

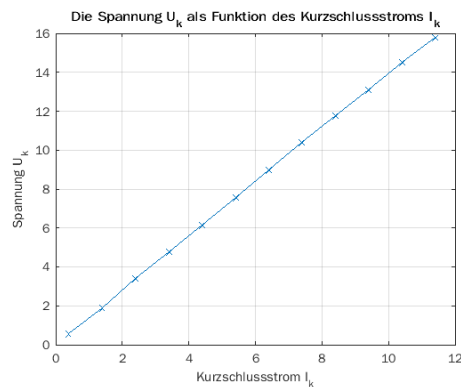
4.1 Messung der Kurzschlussspannung und der Kurzschlussleistung

Die Messreihe ergibt folgende Werte:

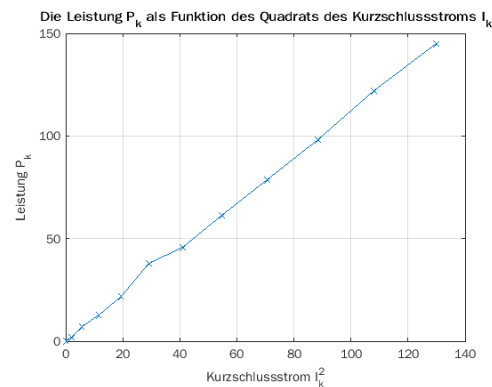
I_k	U_k	P_k
11,4A	15,78V	145W
10,4A	14,5V	122,7W
9,4A	13,1V	98,5W
8,4A	11,76V	78,9W
7,4A	10,38V	61,52W
6,4A	8,97V	45,9W
5,4A	7,58V	37,76W
4,4A	6,17V	21,73W
3,4A	4,76V	12,936W
2,4A	3,4V	7W
1,4A	1,9V	2,02W
0,4A	0,56V	0,178W

Tabelle 2: Messreihe Kurzschlussversuch

Im Anschluss tragen wir nun die Spannung $U_k = f(I_k)$ als Funktion des Stromes und die Leistung $P_k = f(I_k^2)$ als Funktion des quadrierten Stromes auf:



(a) Oszilloskopbild zur Messung 3.1 für den Winkel $24,2^\circ$



(b) Oszilloskopbild zur Messung 3.1 für den Winkel $96,2^\circ$

Abbildung 7: Beispielhafte Bilder vom Oszilloskop

Das Stromübersetzungsverhältnis I bei $I_k \approx I_n$ lautet dann

$$I = \frac{I_k}{I'} =$$

5 Belastungsversuch

Beim Belastungsversuch verbinden wir mit der Sekundärseite des Transformators ein Potentiometer mit hoher Leistungsbelastbarkeit und messen dann die Spannung $U_2 = f(I_2)$ als Funktion des Stromes. Dies machen wir dann für $U_1 = U_{1n} = \text{konst.}$ und $I_2 \approx 1,2 \cdot I_n$.

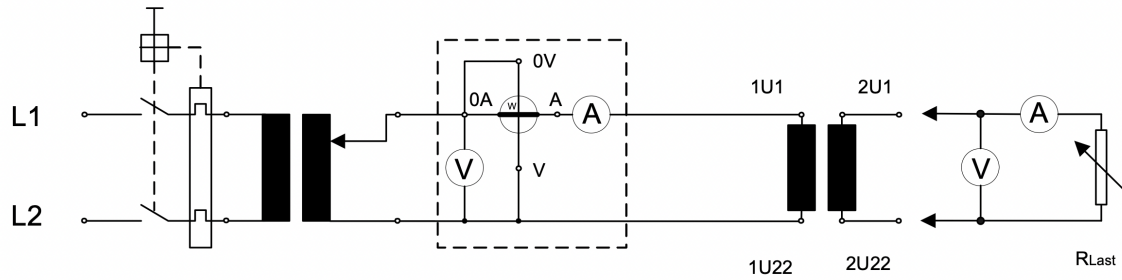


Abbildung 8: Aufbau des Belastungsversuchs

5.1 Messung der Spannung, des Stroms und der Leistung mit Wirklast

R_2	I_2	U_2	P_N
90Ω	$230V$	$2,55A$	$688,2W$
78Ω	$232V$	$2,9A$	$780W$
66Ω	$231,2V$	$3,4A$	$899W$
54Ω	$230V$	$4,2A$	$1,08kW$
42Ω	$230V$	$5,4A$	$1,33kW$
36Ω	$230V$	$6,3A$	$1,56kW$
30Ω	$230V$	$7,5A$	$1,818kW$
24Ω	$227,4V$	$9,4A$	$2,289kW$
18Ω	$226,6V$	$12,4A$	$3,025kW$
12Ω	$224,1V$	$18,6A$	$4,488kW$

Tabelle 3: Messreihe des Belastungsversuch

Erneut wird nun die Spannung $U_2 = f(I_2)$ als Funktion des Stroms gezeichnet:

5.2 Messung der Sekundärspannung bei Wirklast

6 Auswertung

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der Messungen dahingehend ausgewertet, das Modell zur Beschreibung eines Transformators, also das ESB des Einphasentransformators, mit Parametern zu befüllen.

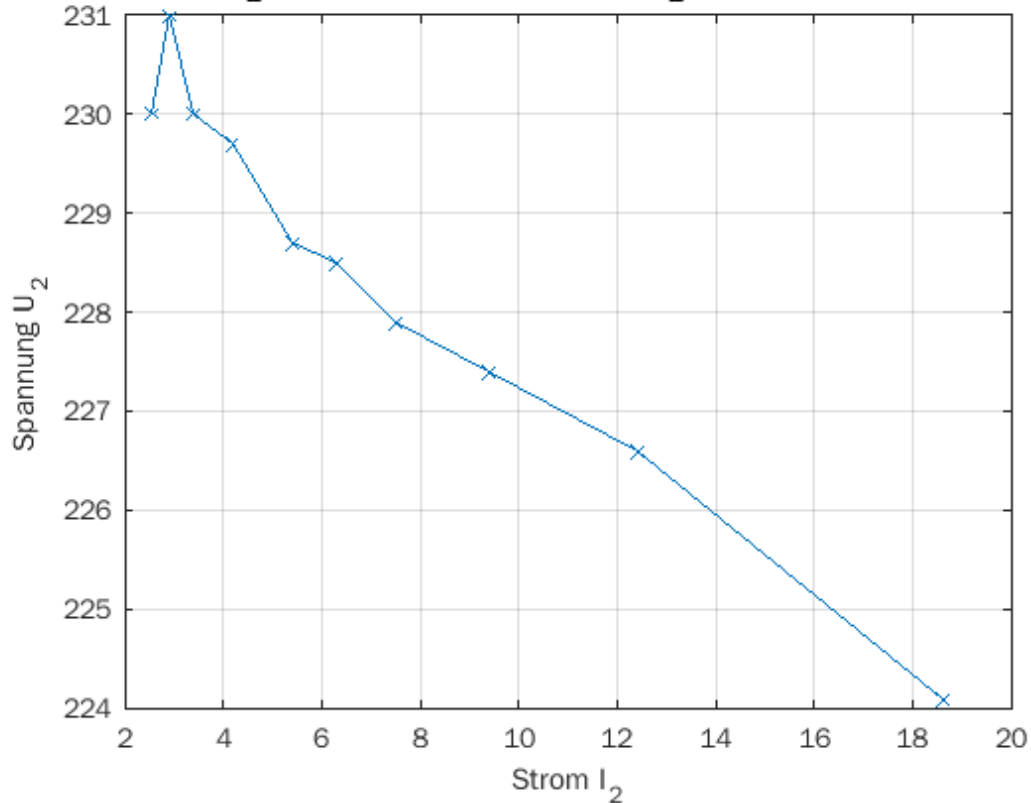
6.1 Bestimmung der Ersatzimpedanzen R_{Fe} und X_{1h}

Aus dem Leerlaufversuch können nun die Ersatzimpedanzen R_{Fe} und X_{1h} bestimmt werden. Zunächst wird der Eisenwiderstand R_{Fe} bestimmt. Dieser wird allein von der Wirkleistung erzeugt, daher ergibt sich im Nennpunkt:

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{(220V)^2}{71,2W} = 679.775280899\Omega$$

Um nun die die magnetische Hauptreaktanz X_{1h} zu berechnen, betrachten wir das ESB und rechnen dann:

$$X_{1h} = \frac{U_{10}}{I_\mu} = \frac{U_{10}}{\sqrt{I_{10}^2 - I_{Fe}^2}} = \frac{U_{10}}{\sqrt{I_{10}^2 - \left(\frac{U_{1N}}{R_{Fe}}\right)^2}} = \frac{220V}{\sqrt{1.61A^2 - 0.323638A^2}} = \frac{220V}{1.5771A} = 139,5\Omega$$

Die Spannung U_2 als Funktion des Stromes I_2 bei verschiedenen WirklastenAbbildung 9: Die Spannung $U_2 = f(I_2)$ als Funktion des Stromes

6.2 Bestimmung der Ersatzimpedanzen R_k und X_k

Aus dem Kurzschlussversuch können nun im Anschluss die beiden Impedanzen R_k und X_k bestimmt werden. Zunächst wird der Kurzschlusswiderstand R_k im Nennbetrieb bestimmt über:

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{98,5W}{(9,4A)^2} = 1.11\Omega$$

Als nächstes können wir nun auch die Kurzschlussreaktanz über

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{U_k}{I_k}\right)^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{13.1V}{9.4A}\right)^2 - (1.11\Omega)^2} = 0.8426\Omega$$

berechnen.

Um nun R_k mit dem in Messreihe 2 ermittelten Wicklungswiderständen zu vergleichen, transformieren wir R_2 auf die Primärseite über:

$$R'_2 = R_2 \cdot \ddot{u}^2 = 0.3\Omega \cdot 1,6318^2 = 0.7988\Omega$$

und rechnen dann:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 0,55 + 0,7988 = 1.3488$$

Die Abweichung des gemessenen R_k und des aus der Wicklungswiderstandsmessung ermittelten R_k beträgt ca. 23%, was ziemlich beachtlich ist. Diese Abweichung lässt sich größtenteils auf Messungenauigkeiten und der Ungenauigkeit des Ohmmeters bei kleinen Messbereichen.

6.3 Ermittlung des Wirkungsgrads für den Nennpunkt

Zuletzt wollen wir nun den Wirkungsgrad mit verschiedenen Methoden bestimmen. Dabei nutzen wir sowohl den Belastungsversuch als auch die Ergebnisse der verschiedenen Versuche, um ein Ergebnis zu berechnen. Wir bestimmen den Wirkungsgrad nun zunächst über direkte Messung:

$$\eta_{mess} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{U_2 \cdot I_2}{P_1} = \frac{224,1V \cdot 18,6A}{4,488kW} = 0,9286 \implies 92,68\%$$

Zum Vergleich berechnen wir den Wirkungsgrad über die Ergebnisse der anderen Versuche:

$$\eta_{rech} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_1 - P_{10} - P_k}{P_1} = \frac{4,488kW - 98,5W - 71,2W}{4,488kW} = 0,9621 \implies 96,21\%$$

Wir erkennen eine Abweichung von ca. $\Delta\eta = \eta_{rech} - \eta_{mess} = 0,9621 - 0,9286 = 0,335$, also 3,35%. Dies lässt sich anhand von Messungenauigkeiten und auch Ungenauigkeiten in den Messgeräten erklären, die über die verschiedenen Versuche zum Einsatz kamen. Im Anschluss bestimmen wir nun auch den Wirkungsgrad bei einer Temperatur von $75^\circ C$ bestimmen.

Mithilfe des vorher bestimmten Werte $R_{k,20^\circ C} = 1,11\Omega$ und dem Temperaturkoeffizienten von Kuper $\alpha_{Cu} = 3,93 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ können wir nun den Widerstandswert bei $75^\circ C$ berechnen:

$$R_{k,75^\circ C} = R_{k,20^\circ C} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \Delta\vartheta) = 1,11\Omega \cdot (1 + 3,93 \cdot 10^{-3} K^{-1} \cdot 55K) = 1,3499\Omega$$

Nun wollen wir noch den Leistungsverlust für diese Erhöhung der Last berechnen:

$$\Delta P_k = I_k^2 \cdot (R_{k,75^\circ C} - R_{k,20^\circ C}) = 9,4^2 A^2 \cdot 0,2399\Omega = 21,197W$$

Damit können wir nun unseren angepassten Wirkungsgrad von

$$\eta = \frac{P_N - P_{10} - P_k - \Delta P_k}{P_N} = \frac{4488W - 71,2W - 98,5W - 21,197W}{4488W} = 0,957 \implies 95,7\%$$

Der Wirkungsgrad ist also, wie erwartet, geringer als der theoretische Wirkungsgrad ohne Berücksichtigung der Temperatur, da dadurch noch mehr Widerstand in den Spulen beim Übertragen der Energie entsteht.

7 Konklusion

Wir haben in diesem Praktikum sehr viele Eigenschaften des Einphasentransformators verinnerlichen können. Auch das Berechnen der wichtigen Eckdaten des Ersatzschaltbildes des Transformators konnte geübt werden. Das strukturierte Messen von Transformatoren wurde durchgeführt, weshalb man nun die Eigenarten bekannt sind. Auch das Nutzen von verschiedenen Analysemöglichkeiten wie zum Beispiel das graphische Darstellen von Messdaten stellte sich als sehr sinnvoll heraus. Besonders interessant war das Verwenden des Stellwinkelstellers zur genauen Untersuchung des Einschaltverhaltens des Transformators.