Versuchsprotokoll

Martin Opitz, Frank Pilhofer

Mittwoch, 26. Januar 1994

Physikalisches Anfängerpraktikum Teil II

Messungen am Transformator

Versuch 11 / Platz c

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 2

Grundlagen 2

- Prinzip eines Transformators 2
- Induktionsgesetz 2
- Idealer Transformator 3
  - Leerlauf 3
  - Sekundärseitige Belastung 4
- Realer Transformator 5

Versuchsdurchführung 5

- Versuchsaufbau 5
- Leerlauf-Spannungsübersetzung 6
- Belastungs-Stromübersetzung 6
  - Windungsverhältnis 500:1000 7
  - Windungsverhältnis 500:250 7
  - Auswertung 8
- Zusammenstellung der Kenndaten 9
- Fehlerrechnung 9

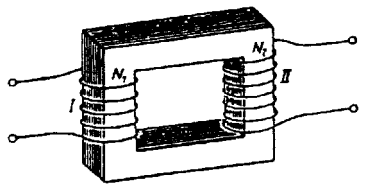
Einleitung

Ein Transformator dient zur Änderung der Amplitude einer Wechselspannung ohne Frequenzänderung. In diesem Versuch soll das Verhalten zweier Transformatoren in Abhängigkeit von der Primärspannung und des Sekundärstromes gemessen werden.

Grundlagen

Prinzip eines Transformators

Ein Transformator besteht aus zwei Spulen verschiedener Windungszahlen. Fließt durch die erste Spule (die "Primärspule) ein Wechselstrom, so bildet sich ein zeitlich veränderliches Magnetfeld. Dieses induziert in der zweiten Spule ("Sekundärspule") einen Wechselstrom. Je nach dem Verhältnis der Windungen beider Spulen hat die Wechselspannung auf der Sekundärseite eine andere Amplitude.



Grafik 1 - Prinzip eines Transformators

Beide Spulen umschließen normalerweise einen hochpermeablen, ringförmigen Eisenkern, der den Magnetfluß bündelt. Schematisch ist dieser Aufbau in Grafik (1) dargestellt.

Induktionsgesetz

Nach dem Induktionsgesetz gilt für den magnetischen Fluß $\Phi = \iint_A BdA$. Die magnetische Flußdichte und die Fläche sind Vektorgrößen, zwischen ihnen steht das Skalarprodukt. Im hier behandelten Transformator haben beide Größen die gleiche Richtung (der magnetische Fluß durchtritt die Spule senkrecht), sie können daher betragsweise multipliziert werden, $\Phi = BA$. Für die magnetische Flußdichte gilt die Formel $B = \mu n \frac{I}{l}$. Zusammengesetzt bleibt die Formel $\Phi = \mu n \frac{I}{l} A$ übrig. Die spulenspezifischen Parameter der Windungszahl, Länge und Querschnittsfläche werden sinnvollerweise zur Induktivität $L_{sp} = \mu n^2 \frac{A}{l}$ zusammengefaßt:

$$\Phi = \frac{1}{n} LI \qquad (1)$$

Ein sich ändernder magnetischer Fluß induziert eine Spannung längs des Umfanges der betroffenen Fläche: $u_i = -\frac{d\Phi}{dt}$. In einer Spule tritt dieser Effekt in jeder einzelnen Windung der Spule auf; wir erhalten

$$u_i = -n \frac{d\Phi}{dt} = -n\dot{\Phi} \ . \qquad (2)$$

Eine ideale Spule besitzt keinen ohm'schen Widerstand. Wird eine Spannung an die Spule angelegt, so wird das sich aufbauende Feld auch in die Spule selber eine Spannung induzieren. Nach dem ohm'schen Gesetz gilt nun

$$u + u_i = iR = 0 \qquad (3)$$

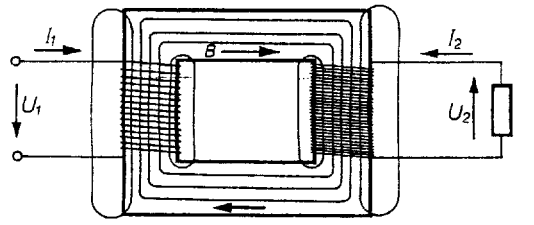
wegen R=0, das heißt, die Induktionsspannung neutralisiert die angelegte Wechselspannung völlig: $u_i = -u$. Aus den Formeln (2) und (3) folgt für die Spule

$$u = n\dot{\Phi} \ . \qquad (4)$$

Idealer Transformator

Für den idealen Transformator werden gegenüber dem realen Transformator einige Vereinfachungen gemacht. So wird der ohm'sche Widerstand der Spulen vernachlässigt (keine Kupferverluste). Es gebe weiterhin keine Wirbelströme im Eisenkern, der keine Hysterese habe, so daß das magnetische Feld phasengleich dem Strom folgen kann (keine Eisenverluste). Das Magnetfeld sei ganz im Eisenkern konzentriert und durchdringe beide Spulen in gleicher Stärke (kein Streufluß).

Um lästige Vorzeichendiskussionen zu vermeiden, werden Ströme und Spannungen nach Grafik (2) normiert. Die Spannung wird auf der Sekundärseite "von unten nach oben" definiert, da der magnetische Fluß die Sekundärspule in der entgegengesetzten Richtung der Primärseite durchdringt.



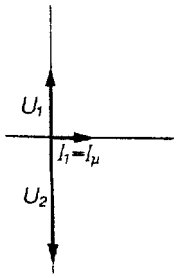
Grafik 2 - Normierung der Spannungen

Nach Formel (4) folgt für die in der ersten Spule erzeugte Flußänderung $\dot{\Phi} = \frac{u_1}{n_1}$. Da der magnetische Fluß und dessen Änderung ungehindert auch die zweite Spule erreicht, wird dort nach Formel (2) eine Spannung $u_2 = -n_2\dot{\Phi} = -n_2 \frac{u_1}{n_1}$ induziert. Die Spannungsübertragung ist daher $\frac{u_2}{u_1} = -\frac{n_2}{n_1}$. Das Vorzeichen drückt die Gegenläufigkeit der beiden Spannungen aus.

Leerlauf

Im unbelasteten Zustand ist der sekundäre Stromkreis offen, durch ihn kann kein Strom fließen. Der magnetische Fluß in beiden Spulen ist hier nur durch den Strom in der ersten Spule bestimmt. Wir setzen Formel (1) in Formel (4) ein und erhalten $u_1 = L\dot{i}_{10}$ (Der Index 0 soll den Leerlauf kennzeichnen). In komplexer Schreibweise kann die zeitliche Ableitung einer harmonischen Funktion wie des Stromflusses durch eine Multiplikation mit $j\omega$, der imaginären Einheit und der Kreisfrequenz der Schwingung, ausgedrückt werden:

$$U_1 = j\omega L_1 I_{10} \tag{5}$$



Grafik 3 - Zeiger am unbelasteten realen Transformator

Die Spannung ist bekannt. Lösen wir nach dem Strom auf, $I_{10} = \frac{U_1}{j\omega L_1} = -j\frac{U_1}{\omega L_1}$, so sehen wir, daß der Strom gegenüber der Spannung um 90° verschoben, also nur ein Blindstrom ist. Damit ist die primärseitige Leerlaufleistung 0; sekundärseitig wird ja auch keine Leistung entnommen. Das Zeigerdiagramm für diesen Fall ist nebenstehend wiedergegeben.

Sekundärseitige Belastung

Bei Belastung liegt ein Verbraucher mit dem komplexen Widerstand Z im Sekundärkreis, durch den nun ein Strom fließen kann. Der Strom hat die Größe $I_2 = \frac{U_2}{Z}$. Dieser Strom fließt auch durch die Sekundärspule und trägt zum Magnetfluß Φ bei. Trotzdem darf sich der gesamte magnetische Fluß nicht gegenüber dem Leerlaufwert ändern, da weiterhin Formel (3) erfüllt sein muß, was den Fluß bestimmt.

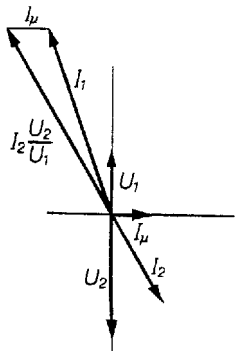
Daher muß bei Belastung in der Primärspule noch ein zusätzlicher Strom fließen, dessen Fluß gerade den Sekundärfluß kompensiert, d.h. $\Phi_{1z} = -\Phi_{2z}$. Ausgehend von den Gleichungen, die zur Herleitung von Formel (1) verwendet wurden, folgt daraus $\frac{\mu n_1 I_{1z} A}{l} = -\frac{\mu n_2 I_2 A}{l}$. Werden gleiche Spulenquerschnitte und Spulenlängen vorausgesetzt (gleiche Permeabilität ist wegen des gemeinsamen Eisenkerns gegeben), so muß

$$I_{1z} = -\frac{n_2}{n_1} I_2 \tag{6}$$

gelten. Der Gesamtstrom durch die erste Spule ist (immer noch in komplexer Schreibweise) als Summe des Blindstroms und des zusätzlichen Induktionsstroms gegeben.

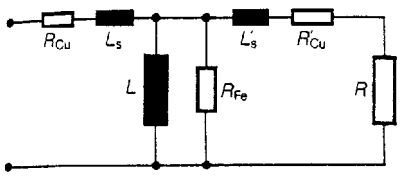
$$I_1 = I_{10} + I_{1z} = I_{10} - \frac{n_1}{n_2} I_2 = I_{10} + \frac{U_2}{U_1} I_2 \tag{7}$$

Im Zeigerdiagramm (Grafik 4) erkennt man diese Beziehungen wieder. Der Strom I_2 ist gegenüber der Spannung in der Phase verschoben. Mit dem Spannungsverhältnis (dieses ist negativ!) multipliziert und zum rein imaginären Blindprimärstrom addiert ergibt sich der Primärstrom I_1. Für die Stromamplitude des Primärstroms gilt die Beziehung $\hat{I}_1 = \sqrt{I_{10}^2 + \left(\frac{U_2}{U_1}\hat{I}_2\right)^2}$. Es ist zu beachten, daß diese Formel wirklich nur für die Stromspitzen gilt, da nur zu diesem Zeitpunkt der nur zu diesem Zeitpunkt rein reale Sekundärstrom senkrecht auf dem Primärblindstrom steht.



Grafik 4 - Zeigerdiagramme am belasteten realen Transformator

Realer Transformator



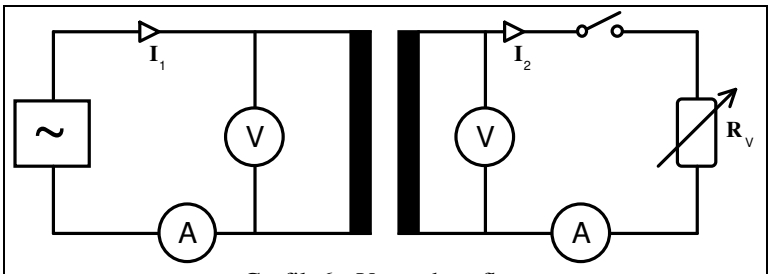
Grafik 5 - Ersatzschaltbild des realen Transformators

Der reale Transformator ist in seinem Verhalten nur schwer zu beschreiben. Hier werden die ohm'schen Widerstände der Spulen nicht vernachlässigt. Wirbelströme im Eisenkern (verschieben die Phase zwischen dem Strom und dem magnetischen Fluß) werden ebenso wie Streuverluste des Magnetfeldes (keine Gleichheit der Flüsse auf beiden Seiten) und nicht mehr vernachlässigt. Zur Vereinfachung sei hier ein Ersatzschaltbild angegeben.

Beide Spulen sind hier zu einer Gesamtinduktivität L zusammengefaßt. Der Widerstand R_{Fe} sorgt für die Eisenverluste der Wirbelströme und der Hysteresis. Auf beiden Seiten sind kleine Induktivitäten L_s, L_s' eingebaut. Beide Spulen sind nicht an der Transformation beteiligt und repräsentieren die Streuverluste. Nach der gleichen Idee wird der ohm'sche Widerstand der Spulen durch die Widerstände R_{Cu}, R_{Cu}'. Alles, was trotzdem noch auf der rechten Seite ankommt, darf den Verbraucher betreiben.

Versuchsdurchführung

Versuchsaufbau



Grafik 6 - Versuchsaufbau

Der Versuch wurde wie in der nebenstehenden Abbildung aufgebaut. Gespeist wurde der Primärtransformator von einer variablen Wechselspannungsquelle, dessen Spannung von einem Voltmeter gemessen wurde. Mit einem passenden Strommeßgerät wurde gleichzeitig der Primärstrom gemessen. Sekundärseitig wurde zunächst die Spannung gemessen. Ein weiterer Stromkreis konnte über einen Schalter zu- und abgeschaltet werden. In diesem Kreis befand sich ein als Schiebewiderstand getarnter Verbraucher und ein Strommeßgerät.

Für die Transformation konnten verschiedene Werte eingestellt werden. Der Transformator bestand aus zwei um einen ringförmigen Eisenkern gewickelten Spulen mit den Windungszahlen 500 und 1000. Da beide Spulen über einen Mittelabgriff verfügten, konnten auch andere Verhältnisse abgegriffen werden. Bei den Messungen verwendet wurde außer den vollen Windungen nur noch das Verhältnis 500:250 (beide Spulen in der Mitte abgegriffen).

Leerlauf-Spannungsübersetzung

In dieser ersten Messung blieb der zweite Stromkreis geöffnet. Es wurde gemessen, wie sich die Spannungsübertragung bei verschiedenen Primärspannungen verhält.

	Verhältnis $\frac{n_1}{n_2} = \frac{500}{1000}$		Verhältnis $\frac{n_1}{n_2} = \frac{500}{250}$	
U_1 [V]	U_2 [V]	U_1/U_2	U_2 [V]	U_1/U_2
0,79±5,7%	1,34±3,4%	0,590±6,6%	0,2±22,5%	3,950±23,2%
1,5±3,0%	2,5±6,0%	0,600±6,7%	0,61±7,4%	2,459±8,0%
2,5±6,0%	4,39±3,4%	0,569±6,9%	1,09±4,1%	2,294±7,3%
4±3,8%	7,1±6,3%	0,563±7,4%	1,73±8,7%	2,312±9,5%
5±3,0%	9,0±5,0%	0,556±5,8%	2,21±6,8%	2,262±7,4%
8±5,6%	14,5±3,1%	0,552±6,4%	3,62±4,1%	2,210±8,5%
12±3,8%	22±6,8%	0,545±7,8%	5,6±8,0%	2,143±8,9%
16±9,4%	29±5,2%	0,552±10,7%	7,2±6,3%	2,222±11,3%
20±7,5%	37,5±4,0%	0,533±8,5%	9,3±4,8%	2,151±8,9%
24±6,3%	45±3,3%	0,533±7,1%	11,25±4,0%	2,133±7,5%
28±5,4%	52±8,7%	0,538±10,2%	13,3±3,4%	2,105±6,4%
32±4,7%	62±7,3%	0,516±8,7%	15,3±2,9%	2,092±5,5%
36±4,2%	70±6,4%	0,514±7,7%	17,5±8,6%	2,057±9,8%
40±3,8%	77±5,8%	0,519±6,9%	19,5±7,7%	2,051±8,6%
42±3,6%	81±5,6%	0,519±6,7%	20,5±7,3%	2,049±8,1%

Man erkennt (wenn nicht an den Zahlen, dann an den Grafiken im Anhang), daß die Spannungsübertragung in allen Fällen über dem "Literaturwert" 0,5 bzw. 2,0 liegt. Das heißt, daß die übertragene Spannung etwas kleiner ist als sie eigentlich sein sollte. Insbesondere bei dem Spulenverhältnis 500:250 erkennt man für sehr kleine Spannungen gut, daß der Quotient stark ansteigt, mit anderen Worten die Sekundärspannung weit hinter den Erwartungen zurückbleibt. Diese Fehlspannung läßt sich leicht über die Vereinfachungen erklären, die beim idealen Transformator gemacht wurden. Insbesondere der magnetische Streufluß und der ohm'sche Widerstand der Spulen sollten sich hier bemerkbar machen.

Von der Kurve für das Verhältnis 500:1000 werden zwei Exemplare mitgeliefert. Die eine Version ist in das Koordinatensystem der anderen Kurve mit eingezeichnet worden. Weiterhin wurde der "interessante" Bereich auf die maximale Größe vergrößert. Zwar ist auch hier noch eine deutlich absteigende Tendenz zu erkennen, eine Interpolations-Gerade/Kurve läßt sich jedoch unmöglich einzeichnen, erst recht bei der doch eindrucksvollen Größe der Fehlerbalken. Es wurde daher darauf verzichtet, die Punkte zu verbinden.

Belastungs-Stromübersetzung

In dieser zweiten Meßreihe wurde der Schalter geschlossen und der Stromkreis auf der Sekundärseite zugeschaltet. Dadurch kann auch dort ein Strom fließen. Um die Messungen ver-

gleichbar zu halten, wurde die Primärspannung auf 20V±7,5% eingestellt und, wenn nötig, nachgeregelt. Gemessen wurden alle weiteren Werte, für die Meßgeräte eingebaut waren: Sekundärspannung und Sekundärstrom sowie Primärstrom. Der Schiebewiderstand wurde für die Messungen vom Anschlag bis zum Kurzschluß geregelt.

Windungsverhältnis 500:1000

I_1 [mA]	U_2 [V]	I_2 [mA]	P_1 [W]	P_2 [mW]	P_2/P_1
120±12,5%	36±4,2%	45±11,1%	2,4±14,6%	1620±11,9%	0,675±18,8%
137±10,9%	35±4,3%	49,8±10,0%	2,7±13,2%	1743±10,9%	0,646±17,1%
157±9,6%	34,8±4,3%	60±8,3%	3,1±12,2%	2088±9,3%	0,674±15,3%
198±7,6%	33,1±4,5%	80±6,3%	4,0±10,7%	2648±7,7%	0,662±13,2%
241±6,2%	32±4,7%	102±4,9%	4,8±9,7%	3264±6,8%	0,680±11,8%
311±4,8%	28,2±5,3%	135±11,1%	6,2±8,9%	3834±12,3%	0,618±15,2%
399±12,5%	22±6,8%	180±8,3%	8,0±14,6%	3960±10,7%	0,495±18,1%
418±12,0%	22±6,8%	190±7,9%	8,4±14,2%	4180±10,4%	0,498±17,6%
438±11,4%	18±8,3%	200±7,5%	8,8±13,6%	3600±11,2%	0,409±17,6%
455±11,0%	16±9,4%	210±7,1%	9,1±13,3%	3360±11,8%	0,369±17,8%
471±10,6%	13,1±3,4%	220±6,8%	9,4±13,0%	2882±7,6%	0,307±15,1%
492±10,2%	9,8±4,6%	230±6,5%	9,8±12,7%	2254±8,0%	0,230±15,0%
501±10,0%	8,1±5,6%	235±6,4%	10,0±12,5%	1903±8,5%	0,190±15,1%
512±9,8%	6±7,5%	240±6,3%	10,2±12,3%	1440±9,8%	0,141±15,7%
515±9,7%	1±4,5%	245±6,1%	10,3±12,3%	245±7,6%	0,025±14,5%
524±9,5%	0,2±22,5%	248±6,0%	10,5±12,1%	49,6±23,3%	0,005±26,3%

Windungsverhältnis 500:250

I_1 [mA]	U_2 [V]	I_2 [mA]	P_1 [W]	P_2 [mW]	P_2/P_1
104±14,4%	9,0±5,0%	130±11,5%	2,1±16,2%	1170±12,5%	0,557±20,5%
161±9,3%	8,4±5,4%	248±6,0%	3,2±11,9%	2083±8,1%	0,651±14,4%
188±8,0%	8,1±5,6%	303±5,0%	3,8±11,0%	2454±7,5%	0,646±13,3%
214±7,0%	7,7±5,8%	350±14,3%	4,3±10,3%	2695±15,4%	0,627±18,5%
241±6,2%	7,4±6,1%	400±12,5%	4,8±9,7%	2960±13,9%	0,617±16,9%
271±5,5%	7±6,4%	455±11,0%	5,4±9,3%	3185±12,7%	0,590±15,7%
295±5,1%	6,5±6,9%	502±10,0%	5,9±9,1%	3263±12,1%	0,553±15,1%
318±4,7%	6,2±7,2%	549±9,1%	6,4±8,9%	3404±11,6%	0,532±14,6%
329±15,2%	6±7,5%	580±8,6%	6,6±16,9%	3480±11,4%	0,527±20,4%
354±14,1%	5,4±8,3%	632±7,9%	7,1±16,0%	3413±11,5%	0,481±19,7%
368±13,6%	5,3±8,5%	660±7,6%	7,4±15,5%	3498±11,4%	0,473±19,2%
390±12,8%	4,6±3,3%	709±7,1%	7,8±14,8%	3261±7,8%	0,418±16,7%
414±12,1%	3,9±3,8%	755±6,6%	8,3±14,2%	2945±7,6%	0,301±16,1%
430±11,6%	3,45±4,3%	789±6,3%	8,6±13,8%	2722±7,6%	0,317±15,8%
455±11,0%	2,58±5,8%	840±6,0%	9,1±13,3%	2167±8,3%	0,238±15,7%

470±10,6%	1,9±7,9%	875±5,7%	9,4±13,0%	1663±9,7%	0,177±16,2%
499±10,0%	0,5±9,0%	935±5,3%	10,0±12,5%	467,5±10,4%	0,047±16,3%
510±9,8%	0,44±10,2%	955±5,2%	10,2±12,3%	420,2±11,4%	0,041±16,8%

Auswertung

Ein Blick zu den Meßkurven im Anhang zeigt schnell, was die Werte der Tabellen nicht sagen können. Der Primärstrom bildet als Funktion des Sekundärstromes eine Gerade, d.h. ersterer steigt proportional zur Belastung auf der Sekundärseite. Diese Gerade geht jedoch nicht durch den Koordinatenursprung, sondern ist nach oben verschoben. Die genauen Parameter dieser Gerade verrät uns eine lineare Regression mit dem Sekundärstrom als X-Werten und dem Primärstrom als Y-Werten (beide in Milliampère).

```
Steigung der Ausgleichsgeraden ..............  1.972
y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden .......  39.06
Streuung der y-Werte um die Ausgleichsgerade ..  4.12
Standardabweichung der Steigung ..............  1.41D-02
Standardabweichung des y-Achsenabschnittes ....  2.56
```

Lineare Regression beim Windungsverhältnis 500:1000

```
Steigung der Ausgleichsgeraden ..............  .491
y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden .......  42.62
Streuung der y-Werte um die Ausgleichsgerade ..  2.78
Standardabweichung der Steigung ..............  1.86D-03
Standardabweichung des y-Achsenabschnittes ....  1.01
```

Lineare Regression beim Windungsverhältnis 500:250

Wir erhalten also näherungsweise $I_1 = \beta + \frac{n_2}{n_1} I_2$, das ist jedoch ungefähr unsere Beziehung von Seite 4, wobei der y-Achsenabschnitt den Leerlaufstrom angibt.

Die Kurve für die Sekundärleistung in Abhängigkeit vom Sekundärstrom läßt sich in kein Schema pressen. Die Sekundärspule verhält sich bei Belastung ähnlich einer Stromquelle mit endlichem Innenwiderstand. Dieser Innenwiderstand wird sich hier aus dem ohm'schen Widerstand der Spule und anderen Parametern berechnen. Wird die Belastung erhöht, so sinkt die abgegebene Spannung. Es wird also einen endlichen Strom geben, für den die gesamte Spannung, die von der Primärspule übertragen wird, über diesen inneren Widerstand abfällt. Zu diesem Zeitpunkt wird die Leistung 0 betragen.

Während der Lastwiderstand verringert wird, steigt also der Strom bei sinkender Spannung. Zwischendurch wird die Leistung als Produkt beider Größen ein Maximum annehmen. Dies ist genau der Kurvenverlauf, wie er auf dem Blatt zu sehen ist.

Beim Vergleich mit der Primärleistung sehen wir im Bereich kleiner Ströme, daß sich der Quotient zwischen Sekundärleistung und Primärleistung kaum ändert. Erst bei hohen Strömen macht sich eine Änderung bemerkbar. Bei der Differenz handelt es sich wieder um die Verlustleistung, die am inneren Widerstand der Spulen entsteht.

Auffällig ist jedoch, daß bei beiden Leistungsmaxima das Leistungsverhältnis 2:1 vorherrscht. In diesem Fall wird am Lastwiderstand genauso viel Leistung verbraucht wie am Innenwiderstand. Offensichtlich ist dieser Zustand, in dem der äußere gleich dem inneren Widerstand ist, für die Beschaltung des Transformators optimal.

Zusammenstellung der Kenndaten

Hier noch einmal gebündelt und hübsch sowie übersichtlich zusammengestellt die Kenndaten der Transformatoren für eine Primärspannung von 20V:

	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{500}{1000}$	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{500}{250}$
Primärer Leerlaufstrom	39,06mA±6,6%	42,62mA±2,4%
Leerlauf-Spannungsübersetzung	0,533±8,5%	2,151±8,9%
Kurzschluß-Stromübersetzung	2,113±11,2%	0,534±11,1%
Maximale Sekundärleistung	4180mW±10,4%	3500mW±11,4%

Die Werte für den primären Leerlaufstrom stammen aus der linearen Regression. Die Leerlauf-Spannungsübersetzung wurde aus der entsprechenden Tabellenspalte der passenden Tabelle abgelesen. Die Kurzschluß-Stromübersetzung stammt aus der jeweils letzten Zeile der Stromübersetzungstabellen, aus denen auch die Maximalleistungen abgelesen wurden. Für letztere müßte die Fehlerschranke allerdings noch weiter erhöht werden, da ungewiß ist, wie genau der Punkt höchster Leistung getroffen wurde.

Fehlerrechnung

Da keine komplizierten Formeln, sondern nur Standardprodukte zu berechnen waren, vereinfachte sich die Fehlerrechnung deutlich. Für die Fehlerfortpflanzungen wurde der Gauß'sche Fehlerfortpflanzungssatz bemüht.

Die Spannungsmeßgeräte hatten eine Güteklasse von 3, die Strommeßgeräte gar nur von 5. Obwohl bei den Meßgeräten für jede Messung die optimale (kleinste) Einstellung gewählt wurde, ergeben sich prozentuale Fehlerwerte, die mit 10% bis 20% deutlich über dem Erträglichen liegen.

Probleme ergeben sich insbesondere bei der grafischen Auswertung von Hand. Hört es sich zunächst positiv an, eine Kurve so zu vergrößern, daß die gesamte Blattfläche ausgenutzt wird, so war dieser Versuch doch unpraktikabel - siehe Anhang A-2. Fehlerbalken (an gewählten Punkten eingezeichnet), die über die Hälfte der Seite gehen, machen diese Betrachtung wertlos.