

# TR Transformator

## 1. Motivation

Transformatoren werden in vielen Bereichen der Elektrotechnik eingesetzt. So ist die Erzeugung von Hochspannungswechselströmen von zentraler Bedeutung bei der Energieübertragung, jedoch finden Transformatoren auch bei niedrigen Spannungen häufigen Einsatz, wie etwa in Stromversorgungen für Elektronikgeräte, Halogenlampen usw.. In der Elektronik spielen sie eine wichtige Rolle als Impedanzwandler. Ziel des Praktikumsversuchs ist es, die grundlegenden Eigenschaften der Spannungs- und Stromtransformation bei realen Transformatoren unter ohmscher Last kennen zu lernen.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Leistung von Wechselströmen

Nicht nur wegen der Verwendung von Transformatoren in der Energieversorgung ist es wichtig, die Begriffe Schein-, Wirk- und Blindleistung zu kennen. Grundsätzlich ist die elektrische Leistung durch die Beziehung

$$P = UI \quad (\text{TR.1})$$

gegeben. Da jedoch Wechselstrom und -spannung zeitabhängig (und im allgemeinsten Fall auch noch unabhängig) sind, ist auch die Leistung zeitabhängig. In der Praxis interessiert jedoch meist nur die mittlere tatsächlich abgegebene Leistung während eines Zeitintervalls  $T$ , die sog. *Wirkleistung*:

$$P = \overline{P(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t) dt \quad (\text{TR.2})$$

Bei sinusförmiger Spannung  $U(t) = \hat{U} \sin \omega t$  und Strom  $I(t) = \hat{I} \sin(\omega t + \varphi)$  lässt sich zeigen (schriftlich in der Vorbereitung!), dass

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U} \sin \omega t \hat{I} \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{\hat{U} \hat{I}}{2} \cos \varphi \quad (\text{TR.3})$$

gilt, wenn man gerade über eine Periodendauer  $T$  mittelt. Diese Beziehung führt zur Definition von effektiver Stromstärke  $I_{\text{eff}} = \hat{I}/\sqrt{2}$  bzw. Spannung  $U_{\text{eff}} = \hat{U}/\sqrt{2}$ , die als Gleichstrom und -spannung die gleiche mittlere Leistung erzeugen würden. Diese Leistung  $P$  wird als Wirkleistung bezeichnet, den Ausdruck  $S = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}}$  bezeichnet man als Scheinleistung, entsprechend ist die Blindleistung  $Q$  über  $S^2 = P^2 + Q^2$  definiert, als Leistungsfaktor  $\lambda$  wird das Verhältnis zwischen Wirk- und Scheinleistung bezeichnet. Für sinusförmigen Wechselstrom und -spannung ergibt sich dann  $Q = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \varphi$ , den Faktor  $\cos \varphi$  bezeichnet man daher als Wirkfaktor, der hier dem Leistungsfaktor  $\lambda$  entspricht. Zur besseren Unterscheidbarkeit wird die Scheinleistung gemäß DIN 40110-1 in VA (Voltampere) angegeben, nur die Wirkleistung gibt man in W (Watt) an.

### 3. Modell des idealen Transformators

Ein Transformator besteht im wesentlichen aus zwei oder mehr Spulen, die um einen gemeinsamen ferromagnetischen Kern gewickelt sind. Alle Spulen umschließen den gemeinsamen magnetischen Fluss  $\Phi$ , bei dessen zeitlicher Änderung in allen Spulen gemäß dem Induktionsgesetz die Spannungen. Dazu ist das durch die Flussänderung  $\dot{\Phi}_j$  in der  $j$ -ten Spule induzierte elektrische  $\vec{E}$  längs des Spulendrahtes  $s_j$  zu integrieren.

$$\oint_{s_j} \vec{E} d\vec{s} = U_{j,\text{ind}} = -N_j \dot{\Phi}_j$$

induziert werden. Daher transformieren sich die Spannungen  $U_j$  entsprechend den Windungszahlen  $N_j$ :

$$\frac{U_i}{U_j} = \frac{N_i}{N_j}$$

Dieses Verhältnis wird meist mit  $\gamma$  (in der deutschen Literatur gelegentlich auch mit  $i$ ) bezeichnet. Die Transformation des Stroms hingegen ergibt sich aus dem Durchflutungssatz. Die Durchflutung  $\Theta$  gibt den Strom (bzw. bei mehreren Wicklungen die Summe aller Ströme durch die jeweiligen Drähte) durch eine Fläche an, die durch den Weg  $\vec{s}$  umschlossen wird (Amperesch Blatt):

$$\Theta = \oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum N_i \cdot I_i$$

Umschließt der Weg den Strom (bzw. die Ströme) vollständig, ist  $\Theta$  unabhängig von der Form des Weges. Dabei wird ein geschlossener Integrationsweg durch den Kern verwendet. Die Maxwell'schen Verschiebestrome können im Leiter vernachlässigt werden, da sie sehr klein sind; man kann sich also auf die Leiterströme beschränken. Für sehr große Werte der magnetischen Permeabilität  $\mu_r \rightarrow \infty$  gilt in guter Näherung  $\vec{H} = 0$  im Kern,  $\vec{B}$  wird allein durch die Magnetisierung  $\vec{M}$  getragen:

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \mu_r \vec{H} = \vec{H} + \vec{M}$$

$\vec{B}$  selber ist jedoch endlich, weil die Vormagnetisierung endlich ist und  $U_1$ , das die Flussänderungen vorgibt, gleichanteilsfrei ist und nur eine endliche Amplitude aufweist. Damit ist  $\Theta = 0$ . Fließt nun durch zwei Spulen Strom, so ergibt sich daraus

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0 \quad \longrightarrow \quad I_2 = -\frac{N_1}{N_2} I_1$$

Dieses Verhältnis lässt sich auch aus dem Energiesatz begründen: In einem idealen Trafo sind Primär- und Sekundärleistung zu jeder Zeit gleich, der Kern speichert also keine Energie und erzeugt im idealen Transformator keine Wärmeverluste.

Beim unbelasteten Transformator fließt auf der Sekundärseite kein Strom, d.h.  $I_2 = 0$ , es wird also keine Leistung abgegeben. Die Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Strom  $I_1$  und

Spannung  $U_1$  beträgt auf der Primärseite  $\varphi_1 = 90^\circ$ , daher wird auch auf der Primärseite keine (Wirk-)Leistung verbraucht.

Hilfreich ist es, die induktive Kopplung zwischen den Spulen durch die Induktivitäten zu beschreiben: Der Induktionsfluss durch eine Spule lässt sich dann folgendermaßen ausdrücken:

$$N_j \Phi_j = \sum_{i=1}^M L_{ij} I_i = -\mu_o \mu_r n_j l A \sum_{i=1}^M n_i I_i$$

Damit sind auch die Induktionskoeffizienten  $L_{ij} = \mu_o \mu_r V n_i n_j$  ( $n = N/l$  sind die Wicklungsdichten) definiert, wobei  $V = l \cdot A$  das von der Spule eingeschlossene Volumen ist. Für  $i = j$  spricht man von Selbstinduktivität, für  $i \neq j$  von Gegeninduktivität. Wie man sofort sieht, gilt  $L_{ij} = L_{ji} = \sqrt{L_{ii} L_{jj}}$ .

Für die induzierten Spannungen folgt daraus

$$U_{j,\text{ind}} = -N_j \dot{\Phi}_j = -\mu_o \mu_r n_j l A \sum_{i=1}^M n_i \dot{I}_i = - \sum_{i=1}^M L_{ij} \dot{I}_i \quad (\text{TR.4})$$

## 4. Realer Transformator

Ein realer Transformator verliert bei der Transformation einen Teil der elektrischen Energie in Form von Wärme. Ursachen sind der endliche Widerstand des Spulendrahts (sog. Kupferverluste) sowie die Eigenschaften des Kernes (sog. Eisenverluste), die durch Wirbelströme und Hysterese verursacht werden.

### 4.1. Kupferverluste

Da die Spulenwicklungen meist aus Kupfer hergestellt werden, hat sich in der Technik der Begriff *Kupferverluste* für die Verluste durch ohmsche Wärme eingebürgert. Minimieren lassen sich diese Verluste durch möglichst wenige Wicklungen mit möglichst großem Querschnitt. Allerdings sinkt dann zwangsläufig der Fluss im Kern, so dass in der Praxis solche Spulen nur bei höheren Frequenzen eingesetzt werden. Transformatoren für Netzfrequenz (50 Hz) sind daher in der Regel voluminöser als sog. Schaltnetzteile (50...100 kHz) gleicher Leistung. Bei noch höheren Frequenzen benutzt man wegen des Skin-effektes allerdings Hochfrequenzlitze statt massiver Drähte (z.B. in HF-Übertragern und Induktionsherden).

### 4.2. Wirbelstromverluste

Ein elektrisch leitender Kern kann als Sekundärspule mit nur einer Wicklung aufgefasst werden, in dem eine Spannung induziert wird. Da diese Spannung proportional zur Querschnittsfläche des Kernes ist und damit die Verlustleistung proportional zum Quadrat dieser Fläche ist, unterteilt man den Kern in elektrisch voneinander isolierte Elemente, üblicherweise Bleche von unter 1 mm Stärke. Für höhere Frequenzen müssen dünnere Bleche gewählt werden,

bei Frequenzen oberhalb ca. 1 kHz verwendet man meist (fast) nichtleitende Kerne aus Ferriten.

### 4.3. Hystereseverluste

Ferromagnetische Materialien weisen bei der Ummagnetisierung eine Hysterese auf, die entstehende Wärme ist für eine Periodendauer proportional zum Flächenintegral der Hysteresekurve. Transformatoren betreibt man sinnvollerweise weit unter der magnetischen Sättigung, um die Hystereseverluste klein zu halten oder man wählt Materialien geringer Koerzitivfeldstärke oder weichmagnetisches Material (sog. Dynamoblech). Bei hohen Frequenzen würde selbst magnetisch weiches Eisen zu großen Verlusten durch die Hysterese führen, so dass auch aus diesem Grunde weichmagnetische Ferrite geringer Remanenz als Kernmaterial verwendet werden.

### 4.4. Modell des realen Transformators

Der Übergang zum realen Transformator hat für die beim idealen Trafo eingeführten Größen Konsequenzen: Die relative magnetische Permeabilität  $\mu_r$  ist nicht mehr konstant, mit zunehmendem Gesamtstrom durch die Wicklungen folgt der Strom nicht mehr linear der Spannung, die Sinusform kann u.U. erheblich deformiert werden.

Die Wirbelströme sorgen für einen Wirkstrom bereits im Leerlauf. Ebenso müssen die Kupferverluste durch den Drahtwiderstand berücksichtigt werden.

Bei einem realen Transformator ist zudem der magnetische Fluss  $\Phi$  auf Grund der Streufelder nicht in allen Spulen gleich. Da der Transformator aber mit eingepprägter Spannung betrieben wird, folgt der Fluss streng der Spannung, das Übersetzungsverhältnis bleibt also konstant. Es gilt dann  $L_{ij} = k_{ij} \sqrt{L_{ii} L_{jj}}$  mit dem Kopplungsfaktor  $k = 0 \dots 1$ .

In der Elektrotechnik werden die Eigenschaften des Transformators oft mit einer sog. Ersatzschaltung entsprechend Abb. TR.1 modelliert.

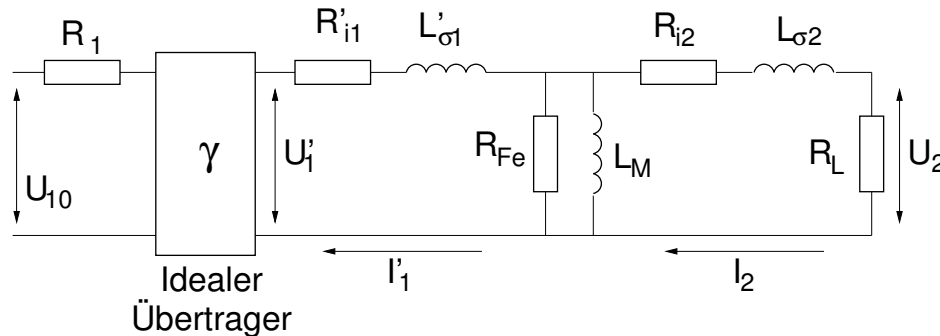


Abbildung TR.1: Ersatzschaltbild des realen Transformators

Dieses Modell macht von der Möglichkeit der Transformation von Spannungen, Strömen, Widerständen und Induktivitäten zwischen Primär- und Sekundärseite Gebrauch. Dadurch

ist eine Trennung in einen idealen Übertrager und die Zusatzbeschaltung zur Modellierung der sonstigen Eigenschaften des Transformators möglich. Für unseren Versuch haben wir alle Größen der Primärseite auf die Sekundärseite transformiert (gestrichene Größen), es wäre natürlich auch andersherum möglich. Die Größen im Ersatzschaltbild haben dabei folgende Bedeutung:

- $L_M$  ist die Hauptinduktivität. Sie bedingt den Magnetisierungsstrom, der etwa dem Leerlaufstrom entspricht und hängt (in sekundärseitiger Zählung) mit der Gegeninduktivität zusammen:  $L_M = L_{12}/\gamma = (L_{11} - L_{\sigma 1})/\gamma^2$
- Der sog. Eisenwiderstand  $R_{Fe}$  repräsentiert die Hysterese- und Wirbelstromverluste, er nimmt für große Lasten wegen der Sättigung des Eisens ab.
- $R_{i1}$  und  $R_{i2}$  sind die ohmschen Widerstände der Wicklungen.
- $L_{\sigma 1,2}$  sind die Streuinduktivitäten, die sich aus der nicht vollständigen Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspule ergeben:  $L'_{\sigma 1} = L_{\sigma 2} = \frac{1 - k_{12}}{2} L_{22}$  gilt für den symmetrischen Transformator.

Die meisten Größen in diesem Modell hängen vom jeweiligen Arbeitspunkt ab, sind also nicht konstant. Für die Auswertung des Versuches kann man die Ersatzschaltung entsprechend Abb. TR.2 noch weiter vereinfachen, wenn man die Innenwiderstände bzw. Streuinduktivitäten von Primär- und Sekundärseite zusammenfasst, was wegen  $R'_{i1} \ll R_{Fe}$  bzw.  $L'_{\sigma 1} \ll L_M$  gerechtfertigt ist.

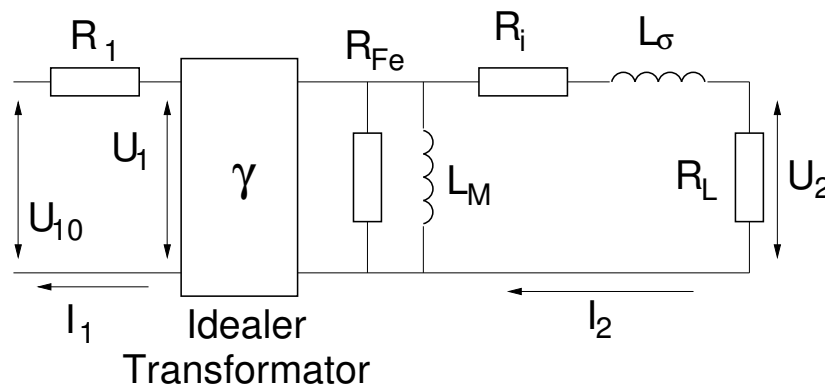


Abbildung TR.2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild

## 5. Versuchsaufbau

Zwischen dem zu untersuchenden Transformator und dem Netz ist ein Trenntransformator geschaltet, der die Primärspannung auf etwa 50 V reduziert. Als Messobjekte stehen Transformatoren verschiedener Ausführung (Ring- und EI-Kerne) und Größe zur Verfügung. Neben der Primär- und Sekundärspule besitzen diese Transformatoren noch eine weitere Spule.

Die Spannung  $U_\Phi \equiv U_3$ , die an dieser Spule praktisch stromlos abgegriffen werden kann, ist ein Maß für den magnetischen Fluss.

Der Versuch ist nach dem in Abb. TR.3 gezeigten Schaltplan aufzubauen. Zur Messung der Spannungen, Ströme und der Phasenverschiebung wird CASSY (mit 3 Modulen) verwendet. Es ist insbesondere darauf zu achten, die Messkanäle entsprechend ihrer Verwendung (Wechselspannungs- oder -strommessung) zu schalten sind. Werden Effektivwerte in zwei Kanälen des selben Moduls gemessen, so misst CASSY automatisch auch den Phasenwinkel zwischen beiden Größen. Die Spannungen und Ströme bewegen sich in folgenden Bereichen:

- Primärspannung  $U_1 < 70 \text{ V}$ , Primärstrom  $I_1 < 70 \text{ mA}$
- Sekundärspannung  $U_2 < 7 \text{ V}$ , Sekundärstrom  $I_2 < 2.1 \text{ A}$
- Spannung  $U_\Phi < 7 \text{ V}$

Die Messung darf erst begonnen werden, **nachdem** die Schaltung durch den Assistenten kontrolliert wurde!

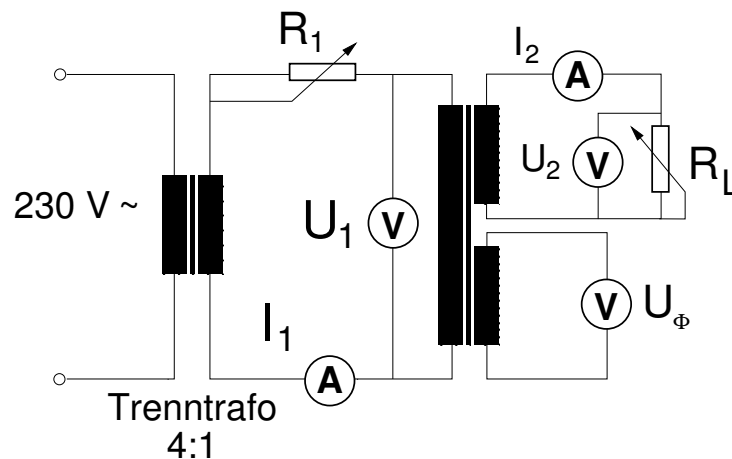


Abbildung TR.3: Schaltplan zur Messung

## 6. Messungen

Für die Messungen stehen verschiedene Wendelpotentiometer, ein logarithmischer Drehwiderstand sowie einige Festwiderstände im Bereich von  $0,05 \Omega$  bis  $1 \Omega$  zur Verfügung. Die grün gekennzeichneten Widerstände sind als primäre Vorwiderstände  $R_1$  vorgesehen, die rot gekennzeichneten Widerstände als sekundäre Lastwiderstände  $R_L$ . Für Messwerte nahe des Leerlaufes kann es sinnvoll sein, das logarithmische  $47 \text{ k}\Omega$ -Potentiometer als  $R_1$  und eines der roten Wendelpotentiometer ( $2 \text{ k}\Omega$  bzw.  $200 \Omega$ ) zu verwenden. In der Nähe des Kurzschlusses können die niederohmigen Festwiderstände parallel zum  $10 \Omega$ -Wendelpotentiometer gesteckt werden. Auf keinen Fall darf das  $47 \text{ k}\Omega$ -Potentiometer mit  $R_L < 200 \Omega$  betrieben werden, da es sonst überhitzt!

Es empfiehlt sich, drei Module SENSOR-CASSY zusammen zu stecken, im linken Modul  $I_1$ ,  $U_1$  und  $\cos \varphi_1$  (Notation in CASSY: IA1, UB1, cos&j1) zu messen, im mittleren Modul  $I_2$  und  $U_2$  (IA2 und UB2) sowie im rechten Modul  $U_\Phi$ . Achten Sie auf guten Kontakt der Module untereinander!

1. Man variiere im Leerlauf ( $I_2 = 0$ ) in Schritten von ca. 1 V die Primärspannung  $U_1$  und messe die Größen  $U_2$ ,  $U_\Phi$ ,  $I_1$ ,  $\varphi_1$ . Dazu verändert man  $R_1$  von 0 bis 47 k $\Omega$  (bei den Ringkerntrafos sollte man sogar mehrere der 47 k $\Omega$ -Widerstände in Reihe schalten).
2. Mit konstanter Spannung  $U_1$  sind bei belastetem Sekundärkreis folgende Größen zu messen: Sekundärspannung und Strom ( $U_2$ ,  $I_2$ ), das Maß für den magnetischen Fluss  $U_\Phi$ , der Primärstrom  $I_1$  und der Phasenwinkel  $\varphi_1$  zwischen  $U_1$  und  $I_1$ . Variieren Sie dazu den Lastwiderstand  $R_L$  in einem weiten Bereich von Kurzschluss bis zum Maximalwert. Empfehlenswert ist, sich in CASSY den Lastwiderstand berechnen und anzeigen zu lassen. Dann kann man, ausgehend vom Minimalwert,  $R_L$  schrittweise um jeweils den Faktor 1.5 bis 2 erhöhen. Die konstant zu haltende Primärspannung  $U_1$  richtet sich nach dem sekundären Kurzschlussstrom, der 2 A nicht übersteigen darf. Zu empfehlen ist eine Spannung von max. 19 V beim großen Ringkerntrafo bzw. 40 V bei allen anderen Transformatoren. Verwenden Sie beim großen Ringkerntrafo als Potentiometer  $R_1 = 0 \dots 2000 \Omega$  nur den großen Schiebewiderstand, keinesfalls das Wendelpotentiometer! Die thermische Belastung ist zu groß!
3. Der Innenwiderstand  $R_{iq}$  der Stromquelle (Trenntrafo + Vorwiderstand  $R_1$ ) wird auf einen Wert  $200 \Omega \leq R_{iq} \leq 500 \Omega$  erhöht ( $R_{iq}$  unbedingt notieren). Zur Einstellung wird dieser Widerstand  $R_{iq}$  mit einem der Multimeter gemessen (Achten Sie dabei darauf, dass der Trenntrafo ausgeschaltet ist und Sie keinen Widerstand parallel angeschlossen haben). Man verändere anschließend wieder den Lastwiderstand  $R_L$  in einem weiten Bereich und achte darauf, auch genügend Messwerte unter 1  $\Omega$  aufzunehmen, im gesamten Bereich mind. 20 Messpunkte.

## 7. Auswertung

Für die Auswertung können Sie weitgehend CASSY-Lab verwenden, allerdings ist das Zeichnen parametrischer Funktionen sowie die Fehlerrechnung mit CASSY-Lab nicht möglich. Hier müssen Sie ggf. geeignete andere Programme verwenden. Für die Berechnung der gesuchten Größen können Sie auf das vereinfachte Ersatzschaltbild in Abb. TR.2 zurück greifen.

1. Messungen im Leerlauf:
  - a) Man trage in ein gemeinsames Diagramm  $I_1$ ,  $U_2$  und  $\varphi_{1,0}$  in Abhängigkeit von der Primärspannung  $U_1$  auf.
  - b) Man ermittle aus den Daten das Übersetzungsverhältnis  $\gamma$ , den Eisenwiderstand  $R_{Fe}$  sowie die Hauptinduktivität  $L_M$  des Transformators und trage diese ebenfalls in Abhängigkeit von  $U_1$  auf.
  - c) Ermitteln Sie  $\gamma$ ,  $\varphi_{1,0}$ ,  $R_{Fe}$  und  $L_M$  für die in Aufgabe 2 eingestellte Primärspannung  $U_1$ .
  - d) Man bestimme den Blindstromanteil  $I_{10} \cdot \sin \varphi_{1,0}$  (Magnetisierungsstrom) und den Wirkstromanteil  $I_{10} \cdot \cos \varphi_0$  (Verluststrom) des Transformators im Leerlaufbetrieb für die eingestellte Primärspannung  $U_1$ .
2. Messungen bei  $U_1 = \text{const.}$ :
  - a) Man trage (wieder in einem gemeinsamen Diagramm)  $U_2$ ,  $I_1$  und  $\varphi_1$  als Funktion des Sekundärstroms  $I_2$  auf.
  - b) Man bestimme aus  $U_2(I_2)$  den effektiven Innenwiderstand  $R_i$  des Transformators.
  - c) Man bestimme die effektive Streuinduktivität  $L_\sigma$  aus der Abhängigkeit  $\varphi_1(I_2)$  durch Anpassung des theoretischen Zusammenhangs.
  - d) Es ist der Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Sekundärleistung aus den Werten von Aufgabe 2 darzustellen. Dazu trage man die parametrische Kurve  $\eta(R_L)$  gegen  $P_2(R_L)$  auf. Zeichnen Sie dazu die theoretische Kurve mit den bereits ermittelten Werten für  $R_{Fe}$  und  $R_i$  für  $R_L = 0 \dots \infty$ . Die Kurve lässt sich auch in CASSY-Lab zeichnen, allerdings müssen Sie dann  $\eta$  als (zweideutige!) Funktion von  $P_2$  darstellen und beide mögliche Funktionen mittels freier Anpassung einzeichnen.
3. Zeichnen Sie die Zeigerdiagramme für Ströme und Spannungen für einen realen Transformator entsprechend Abb. TR.2. Tragen Sie alle im Zeigerdiagramm verwendeten Ströme und Spannungen auch in das Ersatzschaltbild ein!
4. Stellen Sie die Flussspannung  $U_\Phi$  in Abhängigkeit von  $I_2$  dar. Warum nimmt der Fluss mit zunehmender Belastung ab? Leiten Sie den Zusammenhang ausgehend von Gl. TR.4 unter Einbeziehung der Kopplungsfaktoren her!
5. Messungen mit  $R_L = \text{const.}$ :
  - a) Tragen Sie die Ergebnisse aus Messung 3 in ein Diagramm  $P_2(R_L)$  ein (abgegebene Leistung als Funktion des Lastwiderstands).
  - b) Zeigen Sie, dass die von einem Generator mit dem Innenwiderstand  $R_i$  an einen Verbraucher  $R_L$  abgegebene Leistung  $P$  maximal ist, wenn  $R_i = R_L$  ist (sog. Leistungsanpassung). Ein belasteter Transformator verhält sich wie ein Generator mit Innenwiderstand, d.h. aus dem Übersetzungsverhältnis  $\gamma$  lässt sich bei

Kenntnis des Innenwiderstands der Lastwiderstand  $R_L$ , bei dem die abgegebene Leistung maximal ist, berechnen. Beachten Sie, dass bei Aufgabe 3  $U_1$  nicht konstant gehalten wurde, so dass der Einfluss von  $R_1$  berücksichtigt werden muss, am einfachsten durch die Widerstandstransformation auf die Sekundärseite. Zeichnen Sie daher zum Vergleich auch die entsprechenden Werte aus Aufgabe 2 ( $U_1 = \text{const.}$ ) dazu ein und vergleichen Sie beides mit dem theoretischen Verlauf.

Leiten Sie zu allen Auswertungen die theoretischen Zusammenhänge aus dem vereinfachten Schaltbild nach Abb. TR.2 her. Wenn eine Größe aus verschiedenen Messungen ermittelbar ist, vergleichen Sie diese miteinander und diskutieren Sie evtl. Unterschiede. Dafür ist eine Bestimmung der Messunsicherheiten unerlässlich.

## 8. Fragen zur Auswertung

(schriftlich zu beantworten!)

1. Wie wirkt sich eine Änderung der Windungszahlen (bei gleichem Übersetzungsverhältnis) auf die Verluste aus?
2. Welchen Einfluss hat der Querschnitt des Eisenkerns sowie seine Form? Ziehen Sie für die Antwort die Transformatorhauptgleichung heran.
3. Welchen Effekt hat ein Luftspalt im Trafokern?
4. Bei welcher Last  $R_L$  wird der Wirkungsgrad maximal und wie groß ist er dann? Vergleichen Sie diesen Wert mit Ihren Messungen. In welchem Verhältnis stehen dann Kupfer- und Eisenverluste? Verwenden Sie dazu wieder das vereinfachte Ersatzschaltbild, berechnen Sie  $\eta_{\max}$  durch Ableitung nach  $R_L$ .
5. Die verwendeten Transformatoren sind alle für Netzspannung (230 V) ausgelegt. Berechnen Sie aus den gemessenen Parametern die Wärmeentwicklung unter Netzspannung bei maximalem Wirkungsgrad sowie bei maximaler Sekundärleistung! (Hinweis: Der Eisenwiderstand muss aus den Messungen aus Aufgabe 1 auf  $U_1 = 230 \text{ V}$  extrapoliert werden, der Innenwiderstand kann als konstant angenommen werden.)
6. Wie funktioniert ein Schaltnetzteil? Nennen Sie die wesentlichen Unterschiede zu einem „normalen“ Transformator!