



## Versuch 3 Eigenschaften eines Transformators

### 1 Theorie

Transformatoren gehören zu den häufigsten Bauelementen der Elektrotechnik. Sie dienen zur Übertragung elektrischer Energie über ein elektromagnetisches Wechselfeld, meistens aus Systemen mit gegebener Spannung heraus in Systeme mit gewünschten Spannungen. In der Starkstromtechnik werden sie vor allem zur Übertragung elektrischer Energie eingesetzt. Dabei ist der Leistungswirkungsgrad von besonderer Bedeutung. In der Messtechnik werden kleinere Übertrager zur Anpassung und galvanischen Trennung von Messgeräten verwendet. In der Nachrichtentechnik liegt die Hauptanwendung in der Übertragung von Impulsen und in der Anpassung von Leitungen und Antennen über einen großen Frequenzbereich.

#### 1.1 Der reale Transformator

Ein idealer **1:1**-Transformator würde nur aus einem Kern und zwei Wicklungen mit den Induktivitäten  $L_1$  und  $L_2$  mit den Windungszahlen  $N_1$ ,  $N_2$  bestehen. In der Praxis muss man zusätzlich mindestens noch die Verlustwiderstände durch den ohmschen Drahtwiderstand ( $R_1$  primär,  $R_2$  sekundär), die Streuinduktivitäten aufgrund des Wicklungsaufbaus und der Kernform ( $L_{S1}$  primär,  $L_{S2}$  sekundär) und den Verlustwiderstand  $R_{FE}$ , der die Eisenverluste des Kernmaterials darstellen soll, berücksichtigen. Realistischerweise muss man auch davon ausgehen, dass das  $\mu_R$  des Kernmaterials (Trafoblech, Ferrit, Permalloy) nicht in allen Bereichen der Kennlinie gleich / konstant ist. Dadurch wird die Größe der Induktivität abhängig vom Arbeitspunkt bzw. der Aussteuerung.

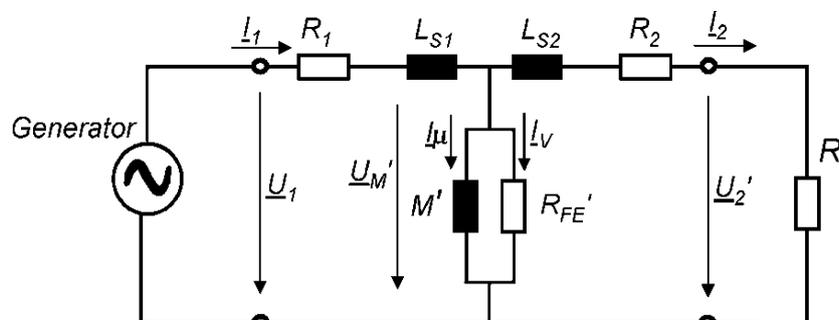


Bild 1.1: Ersatzschaltbild des realen Transformators

In dieser Darstellung des Ersatzschaltbildes wird der Wirbelstromverlust, der im Betrieb den Eisenkern erwärmt, durch einen Wirkwiderstand  $R_{FE}$  parallel zur Magnetisierungsinduktivität  $M$  dargestellt, der bei größeren und korrekt ausgelegten Transformatoren häufig vernachlässigbar

ist. Um die unvollständige magnetische Kopplung  $k$  zwischen den Wicklungen zu berücksichtigen, wird die Gegeninduktivität  $M$  zu

$$M' = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}; \quad \text{mit: } 0,8 \leq k \leq 1$$

Ist das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  des Trafos ungleich 1, so müssen die Werte der Sekundärbauteile entsprechend mit  $\frac{N_1}{N_2}$  skaliert werden. In diesem Laborversuch wird ein 1:1 Transformator verwendet.

Will man bei Transformatoren, besonders solchen mit geringen Leistungen, das Verhalten in einer Anwendungsschaltung voraussagen, muss man die Nennwerte für die Elemente der Ersatzschaltung bestimmen.

## 1.2 Bestimmung der Ersatzelemente

Zur Bestimmung der Größen der Elemente im Ersatzschaltbild gibt es unterschiedliche Methoden. Wünschenswert wäre, sie unter realen Betriebsbedingungen des Trafos zu ermitteln, um die Auswirkungen der Kernblecheigenschaften zu berücksichtigen.

Zuerst wird durch eine Messung mit Gleichstrom der ohmsche Widerstand der Primär- und Sekundärwicklung  $R_1$  und  $R_2$  bestimmt.

Die Magnetisierungsinduktivität  $M$  wird näherungsweise im Leerlauf (Sekundärstrom  $I_2 = 0$ ) bestimmt.

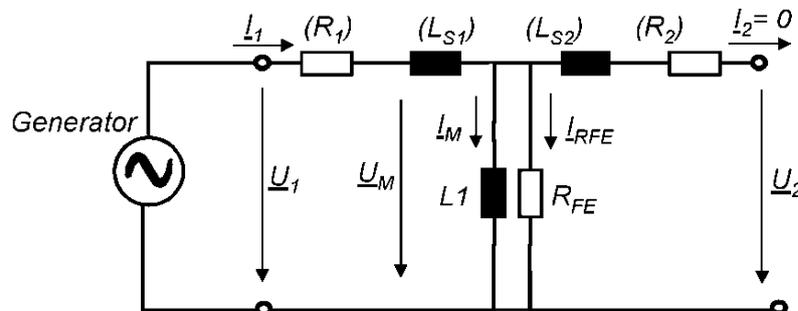


Bild 1.2: Leerlaufversuch

Bei einem 1:1 Transformator vereinfacht sich

$$M_{1:1} = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \approx 1 \cdot \sqrt{L_1^2} \approx L_1$$

Dabei wird angenommen, dass die Streuinduktivität  $L_{S1}$  bzw.  $L_{S2}$  vernachlässigbar klein gegenüber  $M$  ist. Der Leerlauf-Eingangswiderstand  $Z_{\text{ein}}$  ist damit

$$\underline{Z}_{\text{ein}} = \frac{U_1}{I_1} = R_1 + j\omega L_1$$

Damit kann  $L_1 \approx M \approx L_2$  bestimmt werden. Dieses  $L$  im Betriebsarbeitspunkt des Transformators kann sich erheblich vom Wert der Induktivität  $L$  extern gemessen ohne Stromfluss unterscheiden.

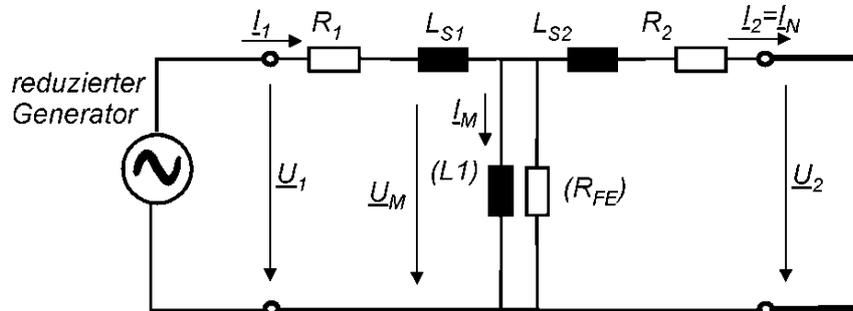


Bild 1.3: Kurzschlussversuch

Zur Bestimmung der Streuinduktivitäten muss ein größerer Strom fließen. Im Kurzschlussversuch legt man eine geringe Spannung an die Primär-Eingangsklemmen bei einem sekundärseitigen Kurzschluss und erhöht diese Spannung so lange, bis sekundärseitig (nur!) der Nennstrom fließt. Damit werden der ohmsche Verlustwiderstand und die Streuinduktivität vom Nennstrom durchflossen, an der Magnetisierungsinduktivität liegt aber nur die geringe Kurzschlussspannung der Eingangsklemmen, so dass ihr Einfluss häufig vernachlässigt werden kann. Die Werte für  $R_{s,N}$  und  $L_{s,N}$  ergeben sich durch Aufteilung der gemessenen Werte.

### 1.3 Einfluss des Kernmaterials

Bei den in der Energietechnik für Übertrager eingesetzten Kernmaterialien, dem Trafoblech, ist das magnetische Verhalten stark nichtlinear. Einmal ist die Permeabilität  $\mu_R$  abhängig vom Arbeitspunkt. Bei großen Aussteuerungen (großes  $B$ ) und beginnender Sättigung wird der Wert der Permeabilität kleiner. Damit wird der Wert der Trafoinduktivitäten veränderlich und abhängig von dem Augenblickswert der magnetischen Flussdichte  $B$ .

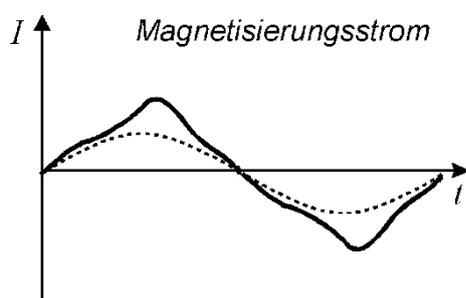


Bild 1.4: typischer Verlauf des Magnetisierungsstroms

Bei dem üblicherweise verwendeten Trafoblech handelt es sich um einen weichmagnetischen Werkstoff, eine Magnetisierung bleibt also nicht erhalten, sondern klingt schnell wieder ab. Je nach der Werkstoffzusammensetzung des Blechs kann aber ein Teil der Magnetisierung innerhalb einer Netzspannungsperiode noch erhalten bleiben und so die Flussdichte beeinflussen.

Mit dem Ziel einer guten Ausnutzung eines kleinen Kernquerschnitts für hohe Leistungen werden kleine Trafokerne häufig bis fast in die Sättigung angesteuert. Durch die nichtlinearen Einflüsse wird der Magnetisierungsstrom  $I_M$  dann verzerrt und zeigt die typische Hut-Form anstelle eines Sinus, auch bei sinusförmiger Anschlussspannung.

## 1.4 Oberwellen

Aus der Fourier-Analyse ist bekannt, dass jede beliebig geformte periodische Funktion sich aus einer Grundwelle und Anteilen mit ungradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz, den Oberwellen oder Harmonischen zusammensetzt. Mit dem nicht mehr sinusförmigen Stromfluss im Transformator entstehen auch Oberwellen-Anteile im primären Stromkreis. Sie belasten das Versorgungsnetz in der Form der Verzerrungsblindleistung. Enthält der Stromkreis, bestehend aus dem Versorgungsnetz, dem Trafo und dem Lastkreis, noch weitere Induktivitäten und Kapazitäten, so können durch die Oberwellen lokale Resonanzeffekte angeregt werden, die in der Kurvenform der Ströme sichtbar werden können.

## 1.5 Messung des Stroms

Der einfachste Fall einer Strommessung geschieht indirekt über die Messung des Spannungsabfalls an einem bekannten Widerstand bzw. über die Erweiterung eines Strommess-Instruments durch Parallelschaltung eines Messwiderstands (Stromteiler). In der Energietechnik werden zur Vermeidung unnötiger Verlustleistungen für Wechselspannungsnetze Stromtransformatoren eingesetzt. Eine Sonderform davon ist die "Stromzange", ein Strommesssensor, der die untersuchte Leitung umschließt, ohne dass man sie auftrennen müsste. Sie bildet einen Stromtransformator mit einer Primärwicklung (der Leitung) und entsprechenden zahlreichen Sekundärwicklungen. Andere Stromzangen-Sensoren messen das die Leitung umgebende Magnetfeld mit Halbleitersensoren (z.B. Hall-Sensoren) und sind damit auch für Gleichströme einsetzbar.

## 1.6 Messung des Phasenwinkels

Die Messung des Phasenwinkels  $\phi$  bezieht sich stets auf eine Periode  $T$  der untersuchten Funktion, ist damit bei veränderlichen Frequenzen schwierig zu realisieren. Phasenwinkel der Netzfrequenz können über die Zeitverzögerung zwischen den Nulldurchgängen gemessen werden, denn die Netzfrequenz ist weitgehend konstant. Für diese Messung kann auch mit hoher Verstärkung gearbeitet werden, solange nur der Nulldurchgang betrachtet wird. Eine Veränderung der Signalgröße bleibt damit weitgehend unberücksichtigt.

Spezielle Phasenwinkelmesser oder Signalanalytoren berechnen den Phasenwinkel aus der Signalform.

## 1.7 Belastungsfälle

Ein idealer Transformator würde den Stromkreis galvanisch auftrennen, ansonsten aber eine Last auf der Ausgangsseite unverändert auf die Primärseite abbilden. Unter realen Umständen zeigen sich Abweichungen. Zur Messung des Verhaltens eines Transformators im praktischen Betrieb werden in dem Laborversuch 2 Belastungsfälle untersucht.

Der Transformator wird zuerst mit einem entsprechenden Belastungswiderstand als rein ohmschem Widerstand belastet. Im Idealfall würde der 1:1 Trafo die Last des Sekundärkreises ohne Veränderung auf die Primärseite übertragen.

Im 2. Fall wird der Transformator mit einer komplexen Last belastet, einem Kondensator von  $100 \mu\text{F}$ . Dieser verursacht einen beträchtlichen kapazitiven Laststrom ohne wirklichen Leistungsverbrauch.

 Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Fachbereich Elektrotechnik		
<b>Labor für elektrische Messtechnik</b>		Laborbericht Versuch 3 Eigenschaften eines Transformators
Semester	Gruppen-Nr.	Name: _____ Matr.Nr: _____
-----	-----	Name: _____ Matr.Nr: _____
Datum	Vortestat	Testat/Note/Bemerkung:
-----	-----	-----

## 2 Vorbereitung

- (1) Zeichnen Sie ein vollständiges maßstäbliches Zeigerdiagramm für den Leerlauf-Fall des Transformators für angenommene Werte  $L_1 = 50 \text{ mH}$ ,  $R_1 = 1 \Omega$ ,  $R_{FE} = 100 \Omega$ ,  $L_{S1} = 0$ ,  $U_{NETZ} = 10 \text{ V}$ . Berechnen Sie den zu erwartenden Leerlauf-Eingangsstrom  $I_1$ .
- (2) Zeichnen Sie die Messschaltungen für die Teilversuche mit den notwendigen Messinstrumenten.

## 3 Durchführung

- (1) Messen Sie den Gleichstrom-Widerstand der Primär- und Sekundärspule mit Hilfe eines Gleichstrom-Netzteils und Multimetern bei einem Messstrom von ca. 100..150 mA.
- (2) Machen Sie sich mit dem Induktivitätsmessgerät (RLC-Messbrücke im Labor) vertraut, wobei die interne messbereichsabhängige Messfrequenz bei der Messung zu notieren ist (z.B. Frequenzmessbereich eines Multimeters benutzen).  
Messen Sie die Induktivität und Innenwiderstände auf der Primär- und Sekundärseite mit Hilfe des Induktivitätsmessgerätes. Notieren Sie den Verlustwiderstand als Serien- (Button „ $R_s$ “) und als Parallel-Widerstand (Button „ $G$ “). Vergleichen Sie bitte den Gleichstromwiderstand mit dem Ergebnis.
- (3) Messen Sie den **Primärstrom** und **Phasenwinkel** im Leerlauffall bei Speisespannungen von 10 / 12 / 13 / 14 V. (Teilen Sie den bei 10V abgelesenen Winkel mit, bevor Sie fortfahren.)  
Speichern Sie die Oszibilder (Zeitverlauf des Stromes  $I_1$  und der Spannung bei 10 V und 12 V Eingangsspannung) auf ihrem USB-Stick für die Auswertung.  
(Sie können (4) vorziehen; Reihenfolge im Bericht aber bitte beibehalten!)
- (4) Ermitteln Sie die erforderliche Primärspannung, die erforderlich ist, auf der Sekundärseite einen Kurzschlussstrom von 1,5 A hervorzurufen. (Kurzschlussversuch, **ohne** Shunt!).
- (5) Schließen Sie als Belastung sekundärseitig den Schiebwiderrstand für  $100 \Omega$  an. Beurteilen Sie bitte zuerst die Eigenschaft des Widerstandes mit der RLC-Messbrücke, ob der Schiebwiderrstand rein ohmsch oder induktiv ohmsch ist. Belasten Sie den Trafo damit sekundärseitig bei einer Primärspannung von 10 V und messen Ströme, Spannungen und den primären Phasenwinkel.
- (6) Schließen Sie als Belastung sekundärseitig die Kondensatoren mit  $100 \mu\text{F}$  an.

## 4 Auswertung

- (1) Stellen Sie eine Tabelle der Werte für die Elemente des Ersatzschaltbildes aus den verschiedenen Teiluntersuchen auf.
- (2) Stellen Sie für die 2 Belastungsversuche ein vereinfachtes Netzwerk aus den Elementen des Trafoersatzbildes und der angeschlossenen Lastwiderstände auf (Elemente mit geringem Einfluss weglassen). Prüfen Sie, ob die anfangs ermittelten Werte für die durchgeführten Belastungstests und den beobachteten Strömen und Spannungen richtig oder sinnvoll sind.
- (3) Optional: berechnen Sie den unter 3 (4) gemessenen Kurzschlussstrom.
- (4) Diskutieren Sie kurz die Ergebnisse.

Alle Formeln werden **allgemein** und **zusätzlich mit den eingesetzten Messwerten** dargestellt; nur so können ihre Betreuer ihre Ergebnisse effizient nachrechnen.

Außer bei der Berechnung der Streuinduktivitäten können Sie Widerstandswerte von  $\frac{1}{4} \Omega$  vernachlässigen, damit die Formeln einfacher werden.

Wenn sich in einem Diagramm/Screenshot aus 3.3 ein negativer Phasenwinkel ergibt, müssen Sie den begründen (Bezug, von wo nach wo?).

## 5 Prüfling, Geräte und Bauteile

### Bei dem Versuch eingesetzter Prüfling



Transformator mit Primär- und Sekundärseite

Datenblätter und Anleitungen zu den Geräten finden Sie am Messplatz.

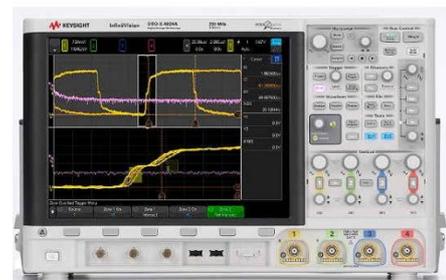
### Bei dem Versuch eingesetzte Geräte:



Gleichstrom- und Wechselstrom-Netzteil



Induktivitätsmessgerät (RLC-Messbrücke)



Oszilloskop „DSO-X 4024A“

### Bei dem Versuch eingesetzte Bauteile: Schiebwiderstand



### Kondensatoren mit jeweils 50 $\mu\text{F}$

