

# Fachpraktikum

## Elektrische Maschinen

### Versuch 4:

## Transformatoren

Theorie & Fragen

Basierend auf den Unterlagen von

LD Didactic

Entwickelt von

Thomas Reichert

am Institut von

Prof. J. W. Kolar

## Vorbereitung vor dem Praktikumsnachmittag

Lesen Sie bitte **vor dem Versuchsnachmittag** den Theorieteil sowie die Versuchsanleitung zum Transformator durch. Ausserdem ist das Ausfüllen der Theorieaufgaben vor dem Praktikum obligatorisch, um die praktischen Versuche durchführen zu dürfen.

## Theorie zum Transformator

Basierend auf den folgenden Quellen:

- Versuchsunterlagen von LD Didactic
- M. Albach, "Grundlagen der Elektrotechnik 1", Pearson Studium
- G. Müller und B. Ponick, "Grundlagen elektrischer Maschinen", WILEY-CCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Transformatoren werden verwendet, um verschiedene Wechselspannungsniveaus zu verbinden. Insbesondere bei der Energieübertragung sind verschiedene Spannungsebenen nötig. Nach der Stromerzeugung mittels Generator werden hohe Spannungen (z. B. 220 oder 380 kV) erzeugt, da somit die elektrische Energie mit geringeren Verlusten (kleinere Ströme) über grosse Distanzen übertragen werden kann. Beim Verbraucher werden diese dann wieder in mehreren Stufen auf die uns bekannten Spannungslevel (z.B. 230 V) heruntergewandelt. Ferner werden Transformatoren auch in Elektrogeräten eingesetzt, um verschiedene Spannungsebenen zu erzeugen. Ein weiterer Vorteil des Transformators liegt in der Möglichkeit, die beiden Spannungsseiten galvanisch zu trennen.

Im Folgenden werden die Eigenschaften des Transformators hergeleitet. Wir beginnen mit dem einphasigen idealen Transformator. Dieser wird anschliessend zum realen Transformator erweitert. Zum Schluss schauen wir uns den dreiphasigen Transformator und die verschiedenen Schaltungsarten an.

### 1. Der ideale Transformator

Ein Transformator besteht aus zwei Wicklungen, die über ein hochpermeables Material gekoppelt sind. Durch sinusförmige Bestromung der Wicklungen wird magnetischer Fluss erzeugt, welcher sich durch beide Wicklungen schliesst. Dadurch wird in den Wicklungen wiederum eine Spannung induziert (siehe Abb. 1). Beim idealen Transformator besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Strom und Fluss und es entstehen keinerlei Verluste und keine Streuflüsse, so dass der magnetische Fluss auf beiden Seiten identisch ist.

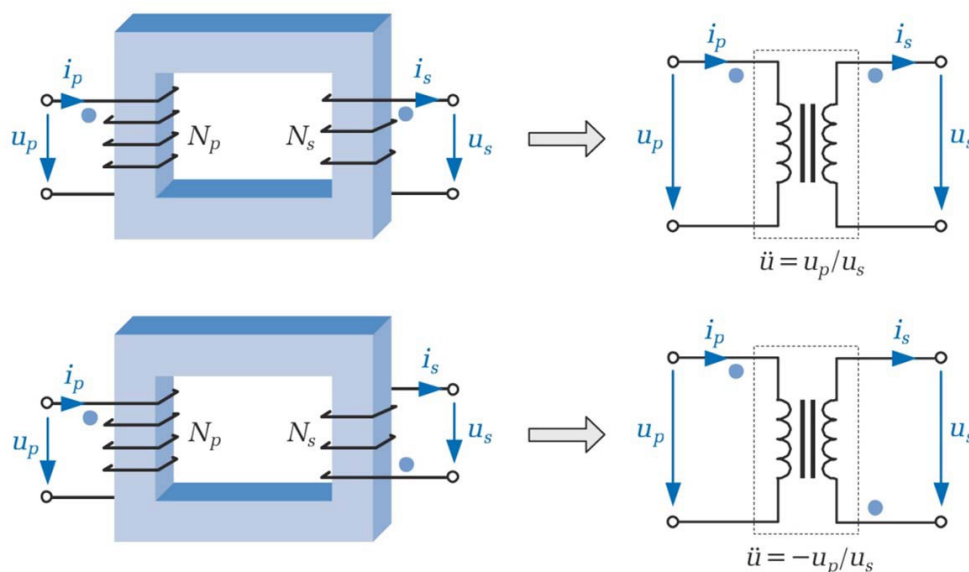


Abb. 1: Idealer Transformator mit unterschiedlichem Wicklungssinn

In diesem Fall können die folgenden charakteristischen Gleichungen aufgestellt werden:

$$u_p = -e_p = \frac{d\Psi_p}{dt} = \frac{d(N_p \Phi_p)}{dt}, \quad (1.1)$$

$$u_s = -e_s = \frac{d\Psi_s}{dt} = \frac{d(N_s \Phi_s)}{dt}. \quad (1.2)$$

Da beim idealen Transformator  $\Phi_p = \Phi_s$  gilt, muss für die Ströme

$$i_p N_p + i_s N_s = 0 \quad (1.3)$$

erfüllt sein. Durch Umformen wird klar, dass das Spannungs- und Stromübersetzungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärseite direkt durch das Verhältnis  $\ddot{u}$  der Windungszahlen bestimmt wird:

$$\frac{u_p}{u_s} = \frac{i_s}{i_p} = \ddot{u} = \frac{N_p}{N_s}. \quad (1.4)$$

Bei Belastung auf der Sekundärseite kann das folgende Zeigerdiagramm verwendet werden:

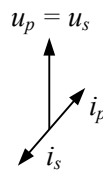


Abb. 2: Beispielhaftes Zeigerdiagramm für  $\ddot{u} = 1$  und ohmsch-induktive Last.

## 2. Der reale Transformator

Der reale Transformator unterscheidet sich vom idealen Transformator in vier wesentlichen Punkten:

- Durch Streuflüsse sind die beiden Wicklungen nicht zu 100% gekoppelt.
- In den Windungen entstehen ohmsche Verluste.
- Im hochpermeablen Material entstehen ebenfalls Verluste.
- Der Zusammenhang zwischen Strom und Fluss ist nicht linear, da das hochpermeable Material ab einer bestimmten Grösse des magnetischen Flusses sättigt.

Um trotzdem noch mit linearen Elementen rechnen zu können wird der letzte Punkt oft vernachlässigt und man geht davon aus, dass der Transformator nicht oder nur sehr schwach sättigt. Die Abb. 3 zeigt ein mögliches Ersatzschaltbild für einen realen Transformator. Es besteht aus einer Koppelinduktivität ( $M$ ) und zwei Streuinduktivitäten ( $L_{11}, L_{22}$ ). Die ohmschen Verluste der Wicklungen ( $R_{11}$  und  $R_{22}$ ) sowie die Eisenverluste ( $R_h$ ) werden mit Widerständen modelliert. Ausserdem ist auf der Sekundärseite ein Lastwiderstand ( $R_2$ ) und auf der Primärseite eine reale Spannungsquelle mit Innenwiderstand ( $R_1$ ) angeschlossen.

Ergänzend soll erwähnt werden, dass in der Literatur verschiedene Ersatzschaltbilder verwendet werden, je nachdem wie die einzelnen Komponenten definiert (oder auch zusammengefasst) werden. Oft ist es hinreichend (unter Annahme idealer Stromkopplung), das vereinfachte Ersatzschaltbild gemäss Abb. 4 zu verwenden.

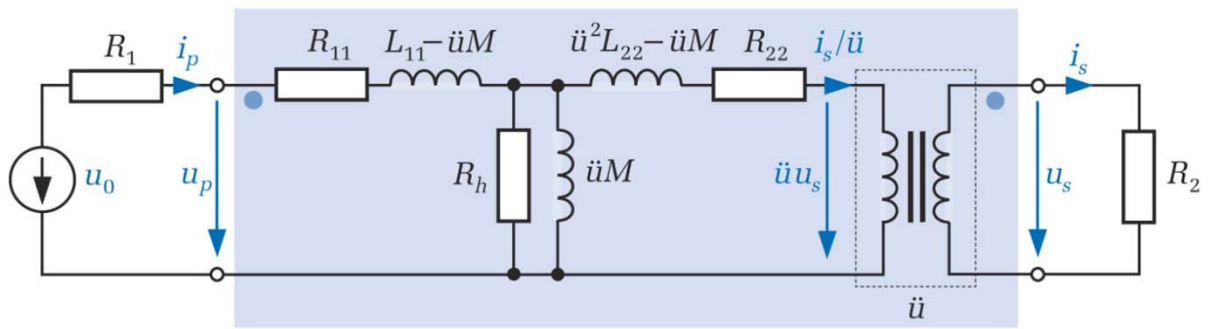


Abb. 3: Detailliertes Ersatzschaltbild eines realen Transformators mit Quelle und Last

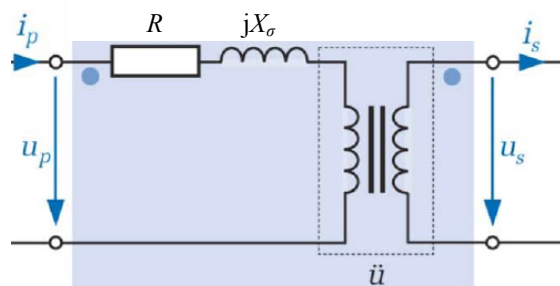


Abb. 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines realen Transformators

Die einzelnen Komponenten des Transformators können mittels Leerlauf- und Kurzschlussversuch bestimmt werden. Das Zeigerdiagramm bei angeschlossener Last ist in Abb. 5 gezeigt.

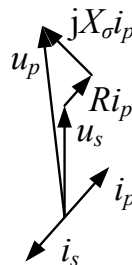


Abb. 5: Beispielhaftes Zeigerdiagramm für  $\ddot{u} = 1$  und ohmsch-induktive Last.

Im Vergleich zur Leerlaufspannung  $u_{s,0}$  auf der Sekundärseite, kann der Einfluss der Last qualitativ gemäss Abb. 6 aufgezeigt werden.

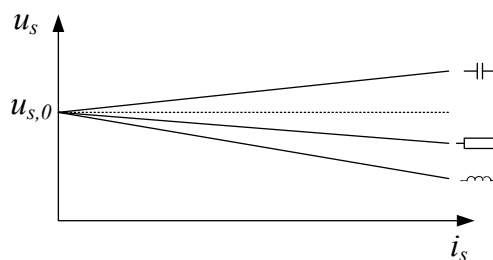


Abb. 6: Belastungskennlinien des Transformators

### 3. Dreiphasiger Transformator (Drehstromtransformator)

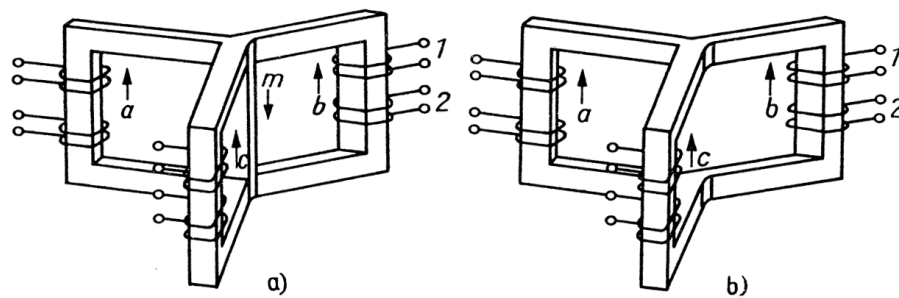


Abb. 7: Dreiphasiger Transformator mit (a) und ohne (b) Mittelschenkel

Für dreiphasige Systeme könnten theoretisch drei einphasige Transformatoren verwendet werden. Vorteilhaft werden diese jedoch zusammenschaltet, wie dies in Abb. 7(a) zu sehen ist. Da sich bei gleichmässigem Betrieb die Summe der Flüsse im Mittelschenkel stets zu Null ergänzen, kann eine vereinfachte Version gemäss Abb. 7(b) gebaut werden.

Wie aus der Drehstromtheorie bekannt, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Phasen miteinander zu verschalten. Sowohl auf Primär- wie auch auf Sekundärseite kann entweder eine Stern- oder eine Dreieckschaltung realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Z-Schaltung, welche den Fluss pro Phase auf der Sekundärseite auf 2 Schenkel aufteilt. Zur Kennzeichnung der eingesetzten Verschaltungsart werden primärseitig Gross- und sekundärseitig Kleinbuchstaben verwendet (D, d: Dreieckschaltung, Y, y: Sternschaltung, Z, z: Zickzackschaltung). Ferner kann die Phasendifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite über die Anschlussverdrahtung als Vielfaches von 30° beeinflusst werden. Dies wird mit einer Zahl zwischen 0 und 11 angegeben (z.B. 5 → 5 x 30° = 150°). In Tab. 1 werden einige Möglichkeiten aufgezeigt.

Schaltgruppe	Schaltungsbild		Zeigerbild		Über- setzungs- verhältnis $\frac{U_1}{U_2}$
	Seite 1	Seite 2	Seite 1	Seite 2	
Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$
Dy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$
Yd5					$\frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$
Yz5					$\frac{2 \cdot N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$

Tab. 1: Vier mögliche Schaltungsarten beim Drehstromtransformator

## Theoriefragen zum Transformator

Beantworten Sie die folgenden Fragen **vor dem Versuchsnachmittag**. Die Lösungen werden zu Beginn des Versuchsnachmittags mit den Assistenten besprochen. Das Bearbeiten der Aufgaben ist Voraussetzung für die Teilnahme am Praktikumsversuch.

### Aufgabe 1:

Wie ist beim idealen Transformator das Verhältnis zwischen der aufgenommenen Leistung auf der Primärseite und der abgegebenen Leistung auf der Sekundärseite wenn das Übersetzungsverhältnis

$\dot{u} = \frac{N_p}{N_s}$  beträgt? \_\_\_\_\_

### Aufgabe 2:

Zeichnen Sie qualitativ den typischen Verlauf einer Magnetisierungskurve im 1. Quadranten für das hochpermeable Transformatormaterial.



Abb. 8: Magnetisierungskurve im 1. Quadranten

### Aufgabe 3:

Was können Sie mittels Leerlauf- bzw. Kurzschlussversuch bestimmen, wenn Sie von einem Transformator nur die Primärnennspannung kennen? Verwenden Sie für Ihre Überlegungen das Ersatzschaltbild aus Abb. 4.

Leerlaufversuch: \_\_\_\_\_

Kurzschlussversuch: \_\_\_\_\_

### Aufgabe 4:

Der Widerstand  $R_h$  des Ersatzschaltbildes aus Abb. 3 beschreibt die Eisenverluste. Woraus setzen sich diese zusammen:

\_\_\_\_\_

### Aufgabe 5:

Der Lastwiderstand  $R_2$  aus Abb. 3 soll auf die Primärseite transformiert werden, so dass der ideale Transformator weggelassen werden kann. Wie gross wäre dann  $R_2'$ , wenn  $R_2 = 120 \Omega$  misst und das

Übersetzungsverhältnis  $\dot{u} = \frac{N_p}{N_s} = 2$  beträgt:

\_\_\_\_\_

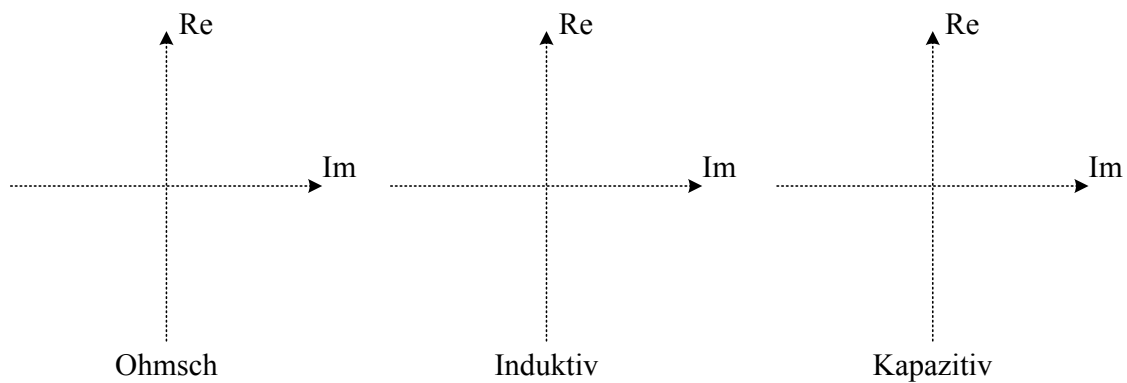
**Aufgabe 6:**

Welche Art von Last ist auf der Sekundärseite angeschlossen, wenn die gemessene Spannung grösser als die Leerlaufspannung ist?

---

**Aufgabe 7:**

Man zeichne jeweils qualitativ ein Zeigerdiagramm bei Belastung mit rein ohmscher, induktiver oder kapazitiver Last (Betrag der Primärspannung konstant, Sekundärspannung in der Realachse).

**Aufgabe 8:**

Welche Schaltgruppe sollte beim Dreiphasentransformator verwendet werden um bei gegebener Wicklung ein möglichst grosses Übersetzungsverhältnis zu erhalten:

---