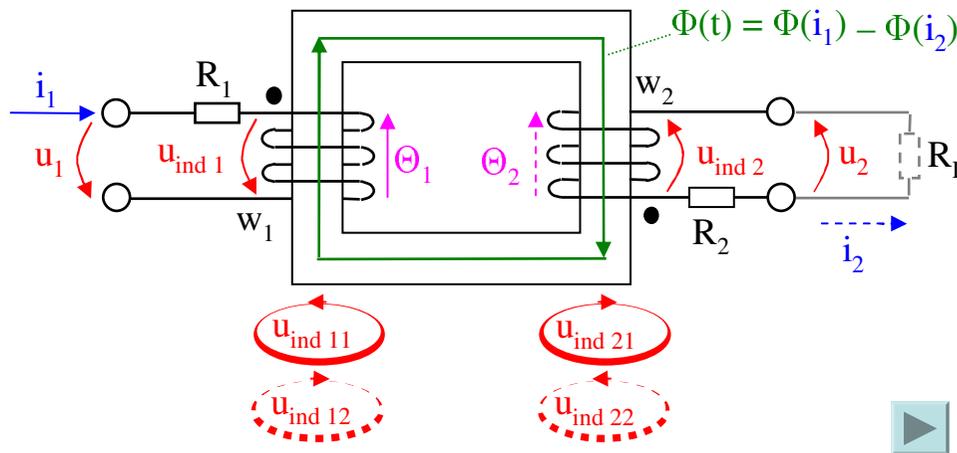


## 2.2 Maschinen für Wechselstrom

### Transformator als ruhende Maschine

Transformator → Strom in Primärwicklung → magnetische Ursprung  $\Theta_1$   
 → Induktion – elektrische Spannung  $u_{11}$  und in Sekundärwicklung  $u_{21}$ ,  
 fließt Sekundärstrom  $i_2$  → Rückwirkung  $\Theta_2$ ,  $u_{22}$  und  $u_{12}$  in Gegenrichtung.



$$u_{\text{ind } 11} = w_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} \quad \text{und}$$

$$u_{\text{ind } 21} = w_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt}$$

$$u_{\text{ind } 12} = w_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad \text{und}$$

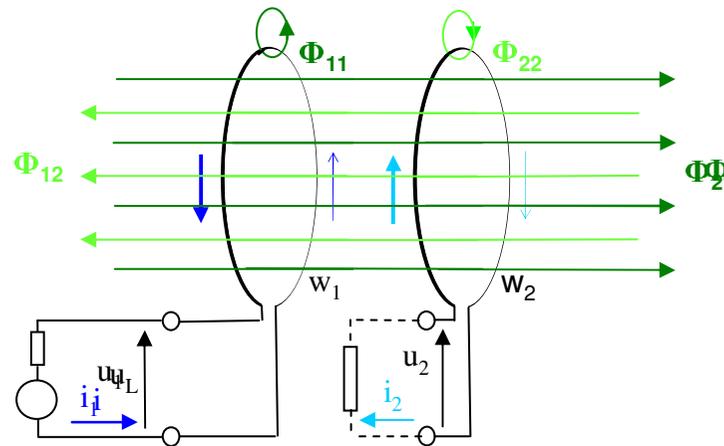
$$u_{\text{ind } 22} = w_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt}$$

$$u_{\text{ind } 1} = u_{\text{ind } 11} - u_{\text{ind } 12} \quad \text{und} \quad u_{\text{ind } 2} = u_{\text{ind } 21} - u_{\text{ind } 22}$$

$$u_1 = i_1 R_1 + u_{\text{ind } 11} - u_{\text{ind } 12} \quad \text{und} \quad u_2 = u_{\text{ind } 21} - u_{\text{ind } 22} - i_2 R_2$$

Für die meisten Anwendungen ist es hilfreich die Ruheinduktion in **Selbst- und Gegeninduktion** zu unterteilen.

Richtungen immer nach der Rechten-Hand-Regel



$$u_1 = u_{\text{ind } 11} - u_{\text{ind } 12} \quad \text{und}$$

$$u_2 = u_{\text{ind } 21} - u_{\text{ind } 22}$$

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_{11}(i_1)}{dt} - w_1 \frac{d\Phi_{12}(i_2)}{dt} \quad \text{und}$$

$$u_2 = w_2 \frac{d\Phi_{21}(i_1)}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_{22}(i_2)}{dt}$$

**nur Selbstinduktion**

$$u_L = w \frac{d\Phi(i)}{dt}$$

**mit Gegeninduktion**

$$u_{\text{ind } 11} = w_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} \quad \text{und}$$

$$u_{\text{ind } 21} = w_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt}$$

$$u_{\text{ind } 12} = w_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad \text{und}$$

$$u_{\text{ind } 22} = w_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt}$$

Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung

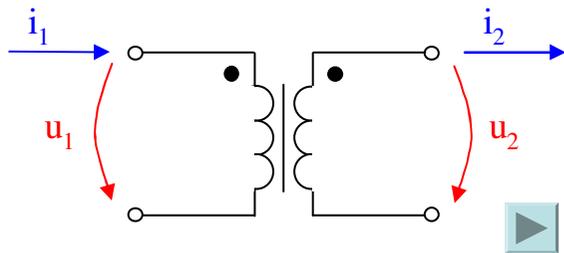
Mit dem jeweiligen Induktionsgesetz wird daraus:

$$u_1 = i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi(i_1)}{dt} - w_1 k \frac{d\Phi(i_2)}{dt}$$

$$u_2 = w_2 k \frac{d\Phi(i_1)}{dt} - w_2 \frac{d\Phi(i_2)}{dt} - i_2 R_2$$

Mit  $\Phi(i_x) = \Theta_x / R_m = w_x i_x / R_m$  sowie  $L_x = w_x^2 / R_m$  und  $M = k w_1 w_2 / R_m = k(L_1 L_2)^{1/2}$  folgen die

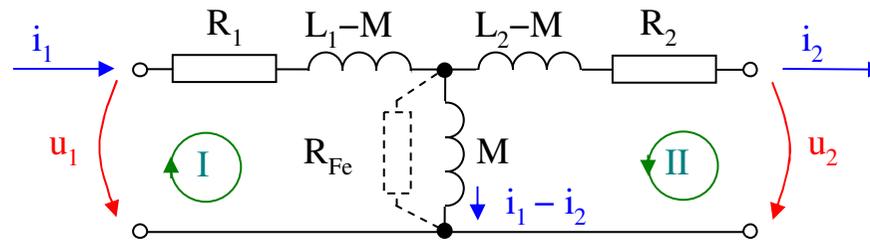
**Transformatorgleichungen:**



$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} - i_2 R_2$$

Gleichen Vierpolgleichungen ergibt die **Ersatzschaltung des Transformators**.



Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung

Widerstand  $R_{Fe}$  zusätzlich eingefügt  $\rightarrow$  Wirkleistungsverluste des Eisenkerns (Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste)

Maschensätze in komplexer Schreibweise ( $di/dt \rightarrow j\omega \underline{i}$ )

$$\underline{u}_1 = R_1 \underline{i}_1 + j\omega (L_1 - M) \underline{i}_1 + j\omega M(\underline{i}_1 - \underline{i}_2)$$

$$\underline{u}_2 = -R_2 \underline{i}_2 - j\omega (L_2 - M) \underline{i}_2 + j\omega M(\underline{i}_1 - \underline{i}_2)$$

Nachteil dieses Ersatzschaltbilds: negative Werte  $L_1 - M$  oder  $L_2 - M$   
 $\rightarrow$  reduzierten Ersatzschaltbildes

Umwandlung aller Größen einer Seite einschließlich der Elemente an den Klemmen entsprechend des Verhältnisses der Windungszahlen

$\rightarrow$  Transformator mit dem reduzierten Windungszahlverhältnis 1:1

$$u_2' = u_2 w_1/w_2$$

$$i_2' = i_2 w_2/w_1$$

$$R_2', L_2' = R_2, L_2 \cdot (w_1/w_2)^2$$

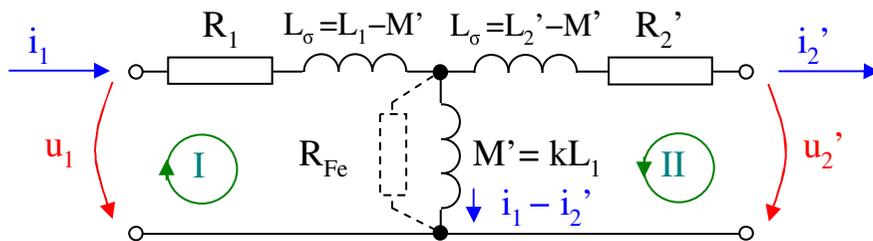
$$M' = M w_1/w_2$$

$$\rightarrow u_2' = u_1 \text{ (wenn } k=1 \text{ und } R_1=R_2=0 \text{ wären)}$$

$$\rightarrow i_2' = i_1 \text{ (bei } k=1, R_1=R_2=0 \text{ und } \omega M \rightarrow \infty)$$

$$\rightarrow R_2' \approx R_1, L_2' = L_1$$

$$\rightarrow M' = k(L_1 L_2')^{1/2} = kL_1$$



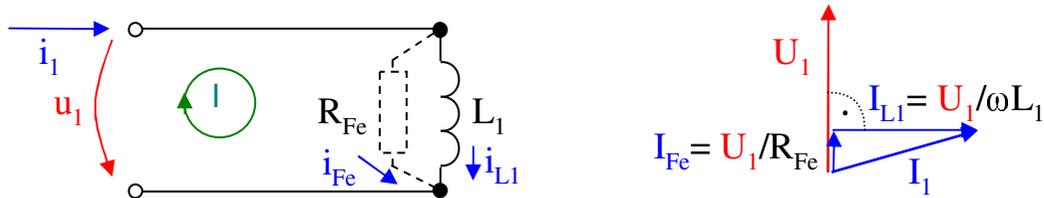
Dadurch werden:

$$L_1 - M' = (1-k)L_1 = (1-k)L_2' = L_2' - M' = L_\sigma = L_{1\sigma} = L_{2\sigma}'$$

## Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung

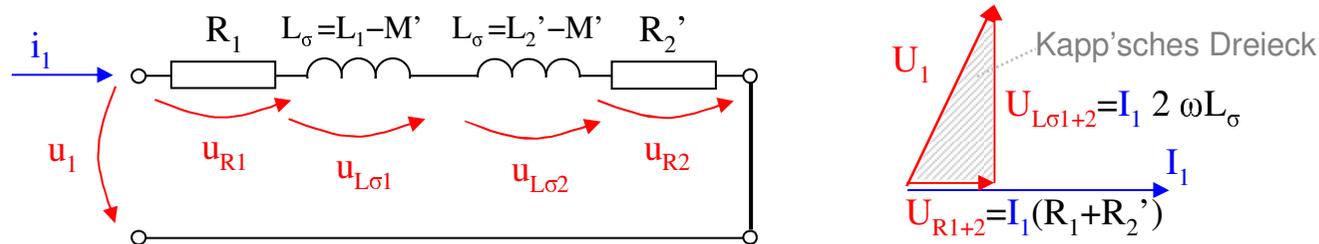
Untersuchung der reduzierten Ersatzschaltung bei **Leerlauf**, **Kurzschluss** und **Nennlast** mit Zeigerbildern

**Leerlauf:**  $i_2' = 0$ , Spannungsabfälle an  $R_1$  und  $L_{1\sigma}$  vernachlässigbar;  $M \cong L_1$



Messen von  $U_1$ ,  $I_1$ , und  $\varphi_1 \rightarrow R_{Fe} = U_1 / (I_1 \cos\varphi_1)$  und  $L_1 = U_1 / (I_1 \omega \sin\varphi_1)$

**Kurzschluss:** Widerstände  $R_2$  und  $L_{2\sigma}$  so klein, dass  $R_{Fe}$  und  $M$  vernachlässigbar



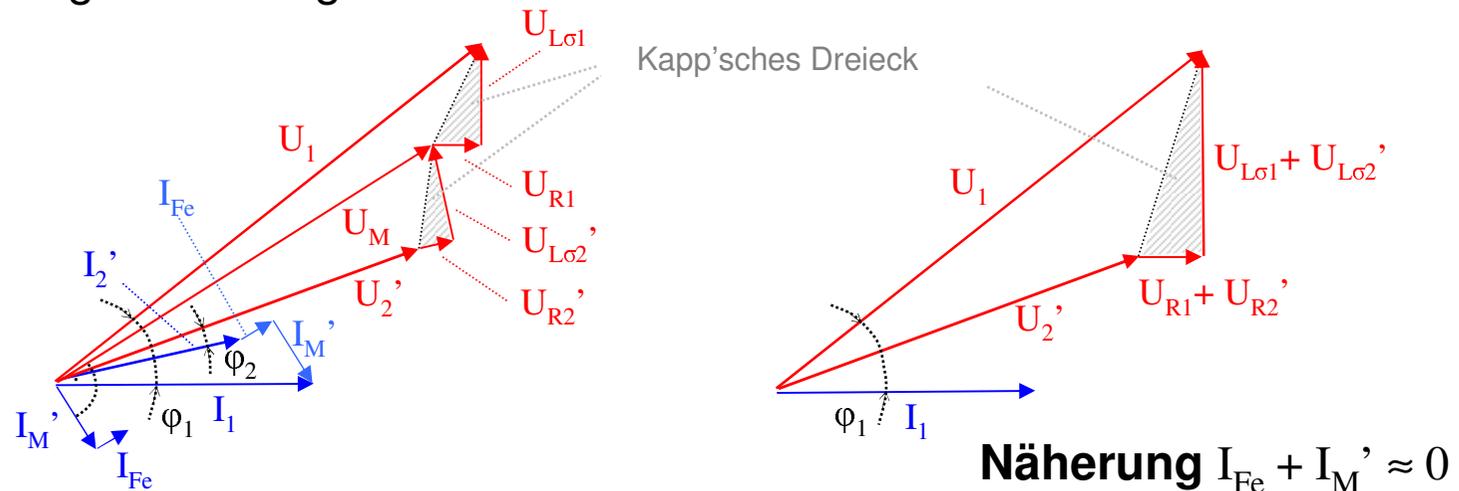
Messen von  $U_1$ ,  $I_1$ , und  $\varphi_1 \rightarrow R_1 + R_2' = U_1 \cos\varphi_1 / I_1$  und  $2 L_\sigma = U_1 \sin\varphi_1 / (I_1 \omega)$

$L_\sigma$  und  $L_1 \rightarrow k = 1 - L_\sigma / L_1$ ,  $M' = kL_1$  und  $L_2' = L_1$

Aufteilung  $R_1 + R_2$  durch Widerstandsmessung

→ Alle Parameter des Transformators mit Hilfe von **Leerlauf- und Kurzschluss**  
 Das **Kapp'sche Dreieck** → Maß für die **Kurzschlussfestigkeit** → **Luftspalt**

**Nennlast:** ergibt das Zeigerbild



$R_1 + R_2$  Leistungsverluste,  $L_\sigma$  nur Spannungsverlust →  $U_1/U_2$  nicht  $w_1/w_2$

Da das **Ersatzschaltbild** die gleichen Vierpolgleichungen ergibt, kann es **immer** anstatt des Transformators mit seiner magnetischen Durchflutung und Induktion genutzt werden. Selbst bei Gleichstrom ( $\omega M = 0$ ) folgt das richtige Ergebnis. Nur die **galvanische Trennung** wird **nicht richtig** wiedergegeben.

**Idealer Transformator**  $\rightarrow U_1/U_2 = w_1/w_2$  und  $I_1/I_2 = w_2/w_1$  und somit  $P_{w1} = P_{w2}$

**Realen Transformator**  $\rightarrow P_{w2} = P_{w1} - P_{V RFe} - P_{V R1+R2}$

**Leistungsverluste** minimieren:

$\rightarrow$  Wahl der Drahtstärken (Wickelfenster voll ausnutzen)

$\rightarrow$  Transformatorbleche mit geringen Ummagnetisierungsverlusten (Weicheisen mit sehr schmaler Hysteresekurve)

$\rightarrow$  dünne Bleche mit gegenseitiger Isolation (zur Unterdrückung der Wirbelströme)

$\rightarrow$  Wichtig, dass magnetische Fluss nicht die Sättigungsgrenze erreicht

**Wirkungsgrad**  $\eta$  bei Kleintransformatoren ( $P < 300$  W) ca. 60 ... 70 %,

bei Großtransformatoren ( $P > 100$  kW) Werte von 95 ... 99,7 %.

Transformatoren werden bis ca. 1 GW hergestellt

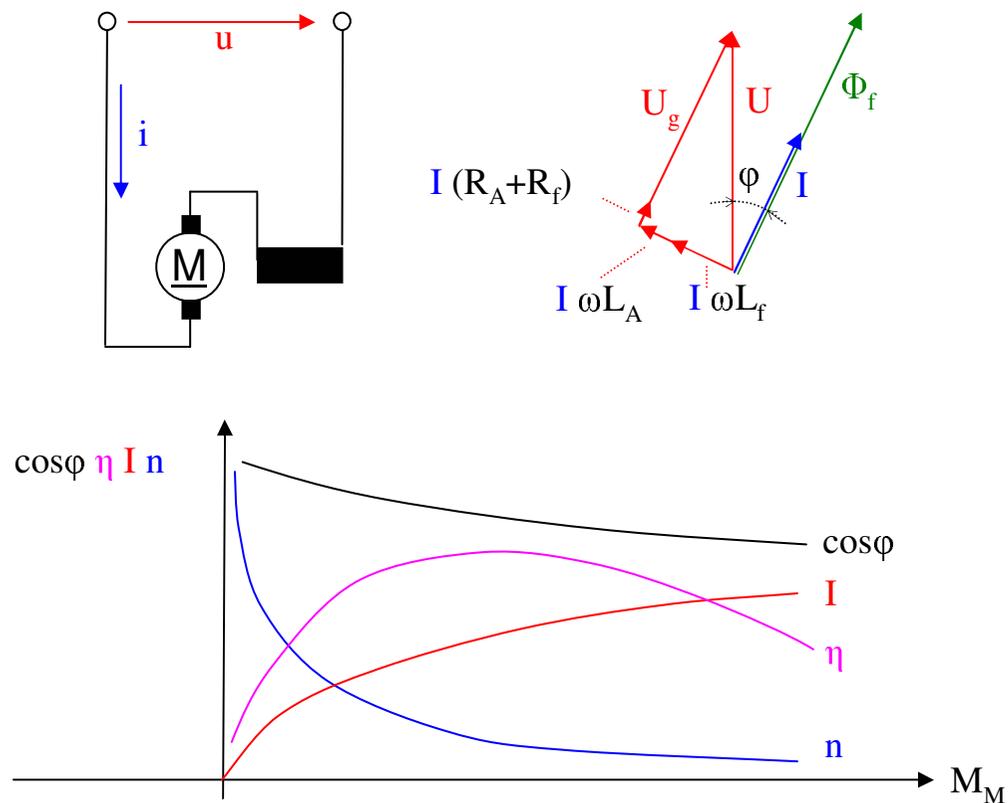
**Kühlung** bei kleinen Transformatoren durch die Oberfläche,  
bei großen durch einen Kühlkreislauf mit Spezialöl

Als **Spezialformen** gibt es:

- **Spartransformatoren** – Sekundärwicklung durch Anzapfung der Primärwicklung (Sie besitzen keine galvanische Trennung; auch induktiver Spannungsteiler)
- **Trenntransformatoren** – Windungszahlverhältnis 1:1, galvanische Trennung
- **Stelltransformatoren** – viele Anzapfungen der Primär- (Sparvariante) oder Sekundärwicklung  $\rightarrow$  feine Einstellung der Sekundärspannung

## Universalmotor

Reihenschlussmotor durch Anker und Feldwicklung **derselbe Strom** → bei Wechselstrom beide gleichzeitig umgepolt, Drehrichtung bleibt



**Reihenschlussmaschine** (Hauptschlussmaschine) →

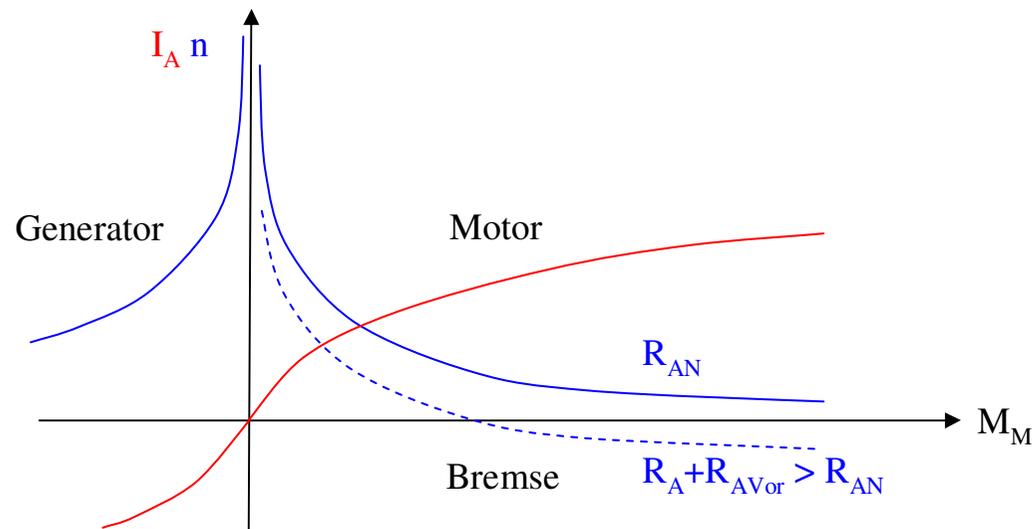
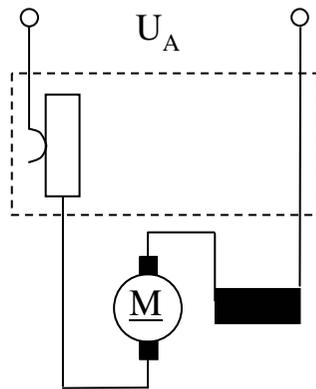
Unterschied zum Nebenschluss → Erreger- **und** Ankerfeld ← **derselbe** Strom

wiederum Maschinenkonstante → Feld  $\Phi_f = c_3 I_A$

**Strom- Drehmoment- und die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie**

damit wird  $I_A = \sqrt{\frac{M_M}{c_2 c_3}}$  und  $n = \frac{U_A}{\sqrt{c_1^2 c_3 / c_2}} \frac{1}{\sqrt{M_M}} - \frac{R_A}{c_1 c_3}$

d.h.  $n_0 (M_M \rightarrow 0) \rightarrow \infty$



**Aufbau** entspricht **Gleichstromreihenschlussmaschine**, Eisenteile für magnetischen Fluss → **Bleche wie beim Transformator**  
→ Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste zu minimieren.

- Betriebsverhalten wie Gleichstromreihenschlussmotors.
- **Zusätzlich induktive Blindleistung** →  $\cos\varphi$  → Verluste aus Betriebsspannung
- nur Wicklungswiderstände Leistungsverluste
  
- Hauptanwendung sind **Kleinmaschinen** (Haushalt, Heimwerker ...)
- Leistungen in der Regel  $< 500 \text{ W}$
- (bei hohen Drehzahlen ca.  $2 \text{ kW}$ ) und Drehzahlen von 3000 bis 15000 U/min
- **Drehzahlregelung** heute fast ausschließlich durch Phasenanschnittsteuerung
- Langsam Austausch dieser **billigen, kleinen, leichten** Motore gegen frequenzgeregelter Asynchronmotore

**Bahnmotore** mit  $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ , ca.  $300 \text{ kW}$  und ca.  $500 \text{ V}$   
erfolgreich durch **Stromrichteranordnungen** und die insbesondere wartungsärmeren und robusteren **Asynchronkurzschlussläufermotore**

### **Aufgabe 2.2.1**

Auf einem Trenntransformator befinden sich die folgenden Angaben:  
Eingang 220 V, Ausgang 220 V, Scheinleistung 550 VA und Frequenz 50 Hz.  
Frage: Welcher Strom kann maximal genutzt werden?

### **Aufgabe 2.2.2**

Ein vorhandener Transformator für ein Netzteil hat lediglich die Angaben:  
Eingang 230 V, Ausgang 24 V bei einer Scheinleistung 75 VA und Frequenz 50 Hz. Im Leerlauf werden am Ausgang 27 V gemessen. Da nur 18 V Ausgangsspannung bei ca. 70 VA benötigt werden, muss der Ausgang verändert werden. Es besteht die Möglichkeit, Windungen auf den Wickel dazuzuwickeln. An fünf Testwindungen wird eine Leerlaufspannung von 4,3 V gemessen.

Frage 1: Wie viel Windungen werden benötigt?

Hinweis: Gehen Sie als Näherung davon aus, dass das Spannungsverhältnis der Primärseite zur Sekundärseite bei Belastung und bei Leerlauf gleiche ist.

Frage 2: Wie sind die zusätzlichen Windungen anzuschließen und was wird aus nicht ganzzahligen Windungen?

### Aufgabe 2.2.3

Bei Leerlauf werden an einem Transformator  $U = U_N = 230\text{V}$ ,  $I = 102\text{ mA}$  und  $\cos\varphi = 0,2$  gemessen und bei Kurzschluss  $I = I_N = 2,5\text{ A}$ ,  $U = 105\text{ V}$  und  $\cos\varphi = 0,66$ .

Frage 1: Wie lauten  $R_1+R_2'$ ,  $L_\sigma$ ,  $L_1$ ,  $k$  und  $R_{\text{Fe}}$ ?

Frage 2: Wie groß sind  $U_2'$  und  $\eta$  bei rein Ohm'scher Last im Nennbetrieb sowie  $U_2$  bei  $w_1/w_2 = 12$ ?

Hinweis: Benutzen Sie bei Belastung die Näherung mit Vernachlässigung von  $I_{\text{Fe}}$  und  $I_M'$ .

### Aufgabe 2.2.4

Ein Universalmotor hat folgende Angaben:  $U_N = 220\text{ V}$ ,  $I_N = 0,8\text{ A}$ ,  $\cos\varphi = 0,75$ ,  $P = 70\text{ W}$ ,  $n = 2730\text{ U/min}$  und  $f = 50\text{ Hz}$ .

Frage: Wie groß ist der Wirkungsgrad?

Zusatzfrage: Wie sieht das Zeigerbild aus und wie groß ist die induzierte Gegenspannung, wenn  $R_A + R_f = 75\ \Omega$  gemessen wurde?