

GET it digital

Modul 11: Elektrische Maschinen

Stand: 22. Oktober 2025



Weiternutzung als OER ausdrücklich erlaubt: Dieses Werk und dessen Inhalte sind lizenziert unter CC BY 4.0. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. Nennung gemäß TULLU-Regel bitte wie folgt: „GET it digital Modul 11: Elektrische Maschinen“ von Dr.-Ing. Ralf Wegener, Grzegorz Pawel Lisicki, Josef Kirschner Lizenz: CC BY 4.0.

Der Lizenzvertrag ist hier abrufbar:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Das Werk ist online verfügbar unter:

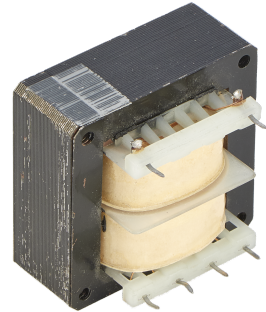
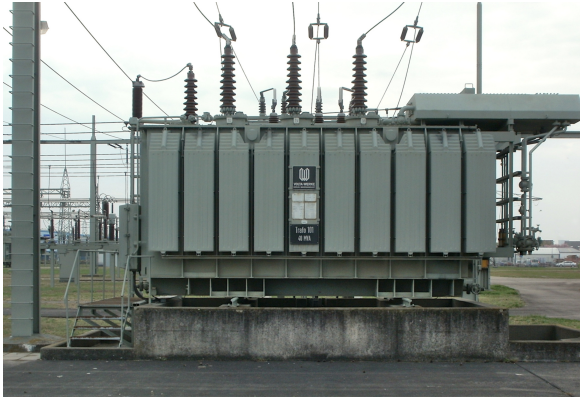
<https://getitdigital.uni-wuppertal.de/module/modul-11-elektrische-maschinen>

Lernziele: Elektrische Maschinen

Die Studierenden

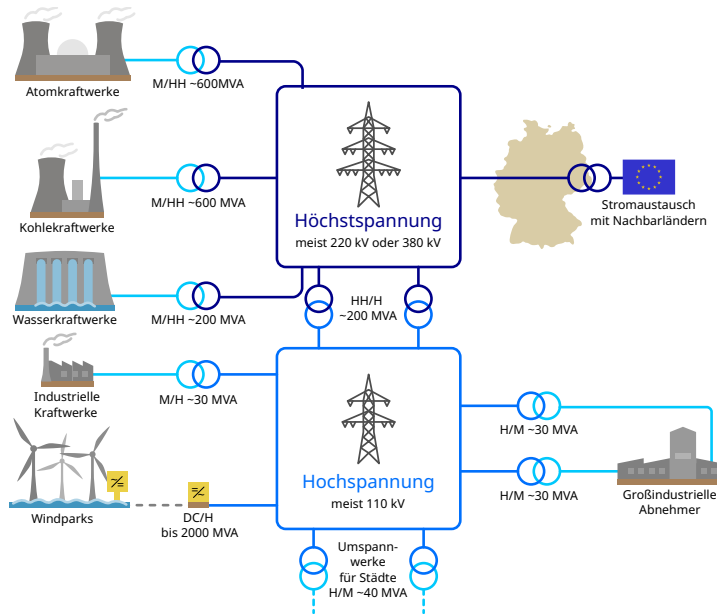
- ▶ kennen die verschiedenen Arten elektrischer Maschinen.
- ▶ können grundlegende Aufgabenstellung im Themenbereich der elektrischen Maschinen lösen.

Der Transformator

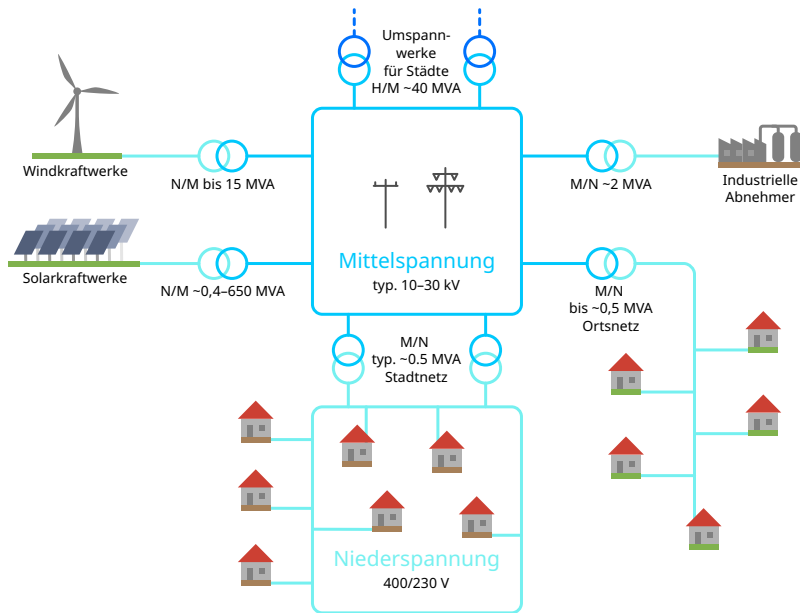


- ▶ Wandlung elektrische Energie $\rightarrow$ elektrische Energie
- ▶ Spannungswandler

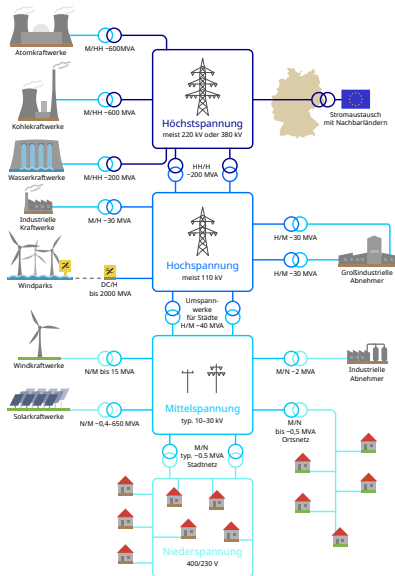
Öffentliche Stromversorgung



Öffentliche Stromversorgung



Öffentliche Stromversorgung



Verluste proportional zum quadratischen Strom.

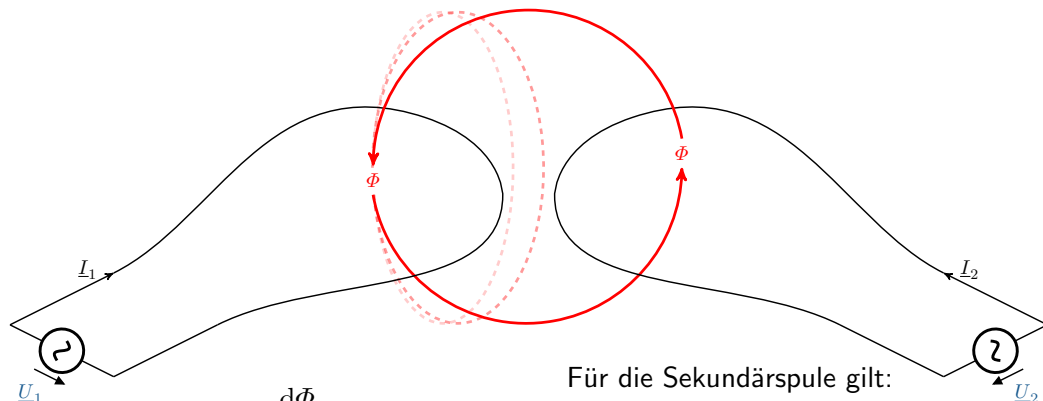
$$P_v = 3 \cdot R_L \cdot I_L^2$$

Übertragene Leistung:

$$\underline{S}_N = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_N \cdot \underline{I}_L^*$$

Verluste proportional zu $\frac{1}{\underline{U}_N^2}$

Prinzip des Transformators

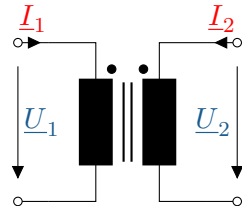
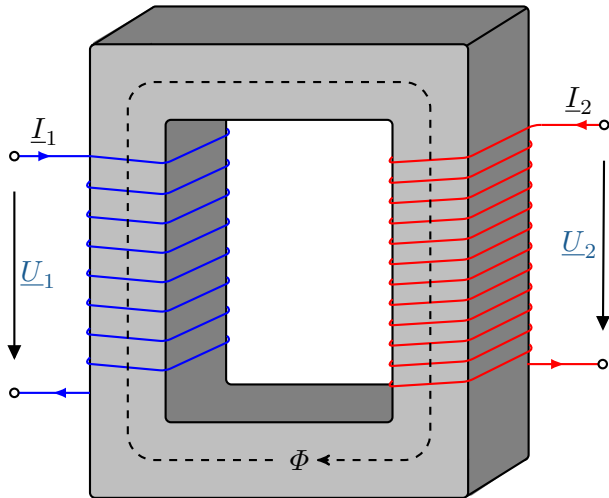


$$u_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$
$$u = \hat{U} \cdot \cos(\omega t)$$
$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot \underline{U}_1}{2\pi \cdot N_1 \cdot f}$$

Für die Sekundärspule gilt:

$$u_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$
$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{-N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}}{-N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}$$

Aufbau des Transformators



$\ddot{u} < 1 \rightarrow$ Spannung hoch

$\ddot{u} > 1 \rightarrow$ Spannung runter

Angegeben wird immer $\ddot{u} > 1$

Beispiel: Idealer dreiphasiger Netztransformator

Ein idealer dreiphasiger Netztrafo hat eine Leistung von $\underline{S}_N = 100 \text{ kVA}$, eine Oberspannung von $\underline{U}_1 = 20 \text{ kV}$ (Dreieck) und eine Unterspannung von $\underline{U}_2 = 400 \text{ V}$ (Dreieck).

- a) Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis?

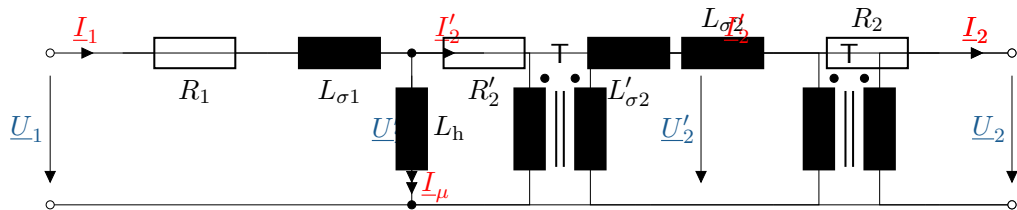
$$\begin{aligned}\ddot{u} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{N_1}{N_2} \\ &= \frac{20 \text{ kV}}{400 \text{ V}} = 50\end{aligned}$$

- b) Wie groß sind der Primär- und Sekundärstrom im Nennbetrieb bei einem Leistungsfaktor $\cos(\varphi) = 1$?

$$\cos(\varphi) = 1 \rightarrow |\underline{S}| = P$$

$$P = U \cdot I$$

$$I_1 = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ kW}}{20 \text{ kV}} = 5 \text{ A}$$
$$P \quad 100 \text{ kW}$$



$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2$$

$$L'_{\sigma 2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot L_{\sigma 2}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_2 + \underline{I}_{\mu} + \underline{I}_{\mu} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_{\mu} + \underline{I}_{\mu}$$

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2$$

L_h Hauptinduktivität

L_{σ} Streuinduktivität

R Widerstandsverluste

Der ideale Trafo rechts wird meistens weggelassen.

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

Ein realer dreiphasiger Netztrafo ($f = 50 \text{ Hz}$) hat folgende Daten:

- ▶ Leistung: $\underline{S}_N = 100 \text{ kVA}$
- ▶ Oberspannung $\underline{U}_1 = 20 \text{ kV}$
- ▶ Übersetzungsverhältnis: 50
- ▶ $L_h = 500 \text{ H} \Rightarrow \underline{Z}_{Lh} = j157,08 \text{ k}\Omega$
- ▶ $L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = 190 \text{ mH} \Rightarrow \underline{Z}_{L\sigma} = j59,69 \Omega$
- ▶ $R_1 = R'_2 = 30 \Omega$

a) Wie groß ist die Leerlaufspannung $\underline{U}_2$ bei diesem Übersetzungsverhältnis?

$$\begin{aligned}\underline{U}'_2 &= \underline{U}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_h}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_{\sigma 1} + R_1} \\ &= 19,992 \text{ kV} \cdot e^{j0,011^\circ} \\ \underline{U}_2 &= 399,85 \text{ V} \cdot e^{j0,011^\circ}\end{aligned}$$

b) Wie groß ist der Leerlaufstrom (auf der Primärseite)?

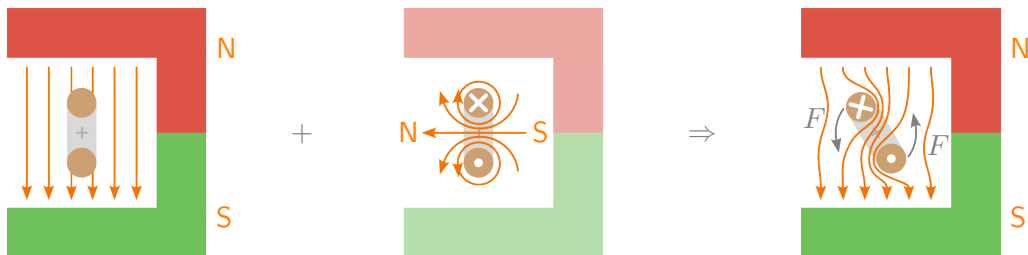
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_{\sigma 1} + R_1}$$

Vorteile:

- ▶ Einfacher und kostengünstiger Aufbau der Stromrichter
- ▶ Hohe Regeldynamik
- ▶ Direkter Betrieb der Maschine mit Akkumulatoren möglich
- ▶ Große Überlastfähigkeit

Nachteile:

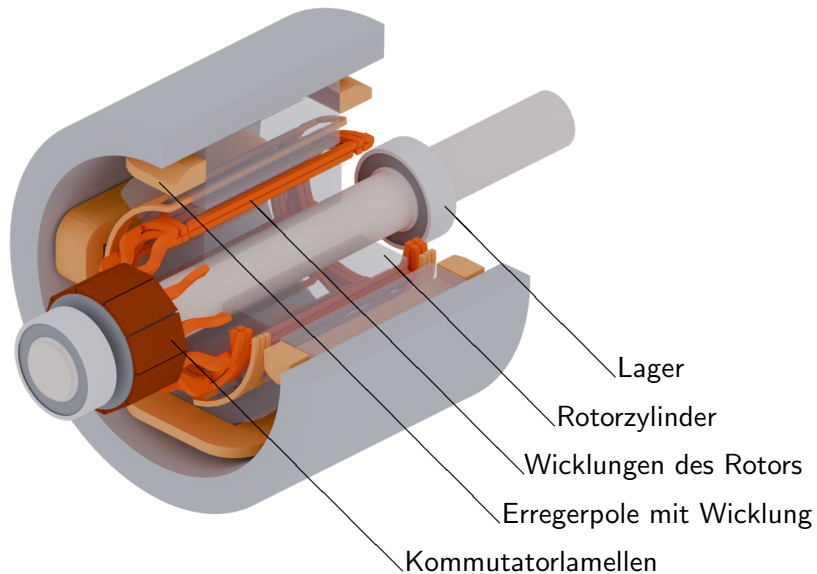
- ▶ Hoher Konstruktionsaufwand
- ▶ Wartungsintensiv (Bürsten)
- ▶ Geringe Leistungsdichte
- ▶ Kosten

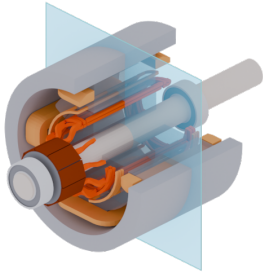


$$F = B \cdot I \cdot \ell \cdot N$$

Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von $B = 0,8 \text{ T}$. Unter den Polen befinden sich insgesamt $N = 400$ Ankerdrähte, die mit einem Strom von $I = 10 \text{ A}$ durchflossen werden. Die wirksame Leiterlänge ist $\ell = 150 \text{ mm}$. Berechnen Sie die Kraft F am Umfang des Ankers.

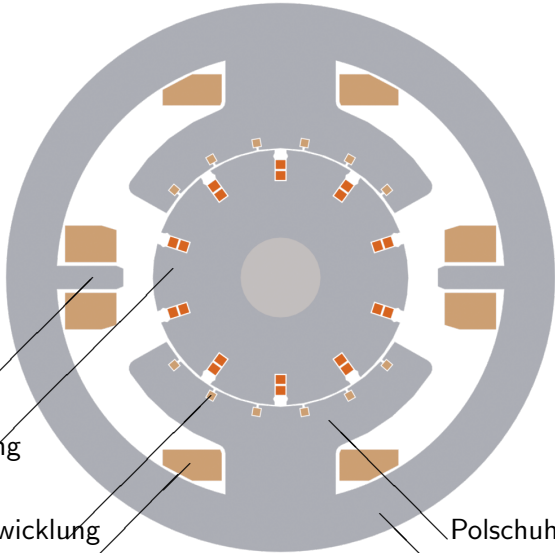
$$\begin{aligned} F &= B \cdot I \cdot \ell \cdot N \\ &= 0,8 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 10 \text{ A} \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 400 \\ &= 480 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{m}}{\text{s}^3 \cdot \text{A} \cdot \text{m}^2} = 480 \text{ N} \end{aligned}$$





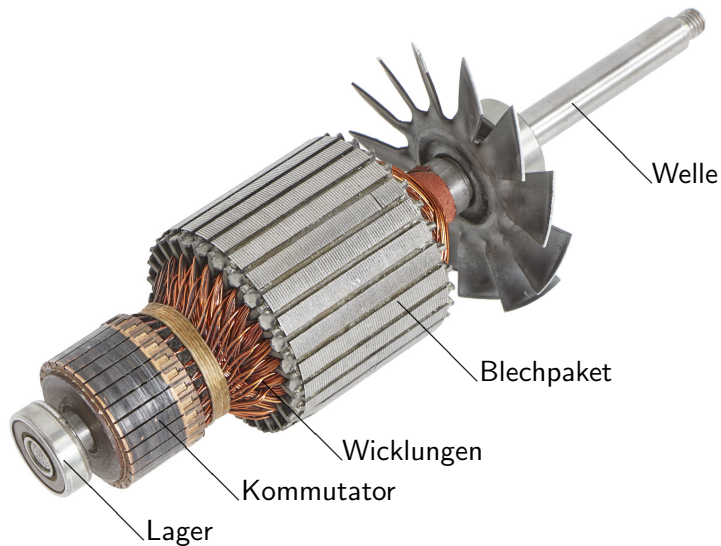
Wendepole mit Wicklung
Rotorzylinder mit Wicklung

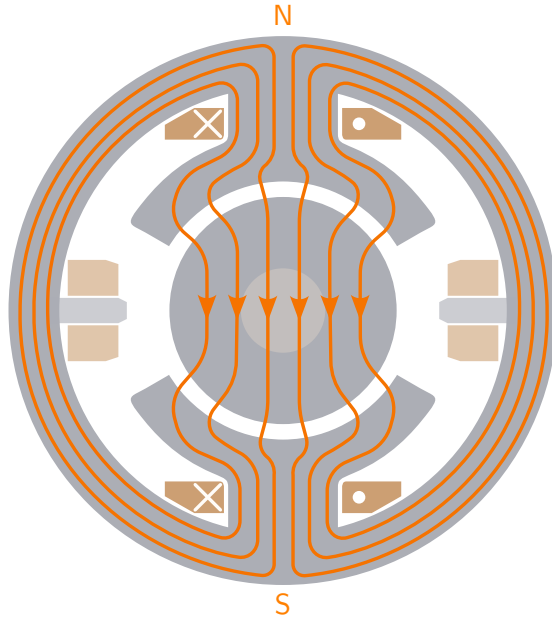
Kompensationswicklung
Pol mit Erregerwicklung



Polschuh
Ständerjoch

Rotor und Kommutator





$$U_q = K \cdot \Phi \cdot \omega$$

- ▶ Induzierte Spannung (Quellenspannung): U_q [V]
- ▶ Ankerkonstante: K [1]
- ▶ Fluss: Φ [Vs]
- ▶ Winkelgeschwindigkeit: ω_{mech} [rad/s]

$$P_i = U_q \cdot I_A = P_{\text{mech}} = M_i \cdot \omega$$

- ▶ innere elektrische Leistung: P_i [W]

$$M_i = K \cdot \Phi \cdot I_A$$

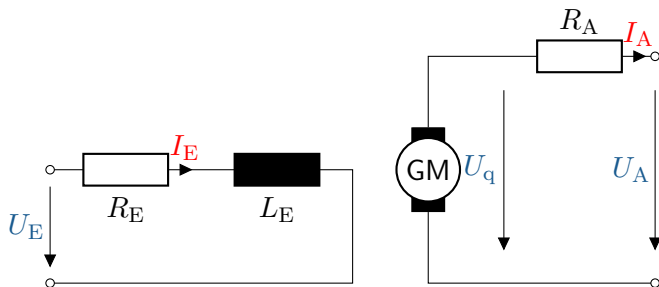
- ▶ Inneres elektrisches Moment: M_i [Nm]
- ▶ Ankerkonstante: K [1]
- ▶ Fluss: Φ [Vs]
- ▶ Ankerstrom: I_A [A]

$$M = M_i - M_V$$

$$M = \eta_1 \cdot M_i$$

- ▶ Verlustmoment: M_V [Nm]
- ▶ Wirkungsgrad: η [1]

Fremderregte Gleichstrommaschine



$$U_A = U_q + I_A \cdot R_A$$

$$n = \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} - \frac{R_A \cdot M_i}{2\pi (K \cdot \Phi)^2}$$

$$I_A = \frac{M_i}{K \cdot \Phi}$$

Eine fremderregte Gleichstrommaschine mit der Ankerkonstante $K = \frac{1}{2\pi}$ hat bei der Spannung $U_A = 400 \text{ V}$ eine Leerlaufdrehzahl von $n = 1200 \frac{1}{\text{min}}$. Der Ankerwiderstand beträgt $R_A = 2,3 \Omega$.

a) Wie groß ist der Erregerfluss Φ ?

Im Leerlauf ist das innere Moment M_i gleich Null. Der lastabhängige Drehzahlabfall entfällt daher:

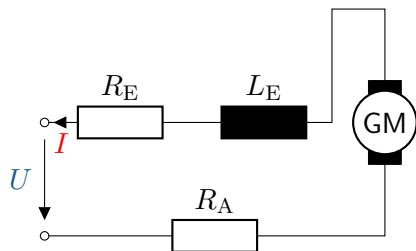
$$n = \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi}$$
$$\Phi = \frac{U_A}{2\pi K \cdot n} = \frac{400 \text{ V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 1200 \frac{1}{\text{min}} \cdot 60 \frac{1}{\text{min}}} = 20 \text{ Vs}$$

b) Wie schnell dreht die Maschine bei einem inneren Drehmoment von $M_i = 10 \text{ Nm}$?

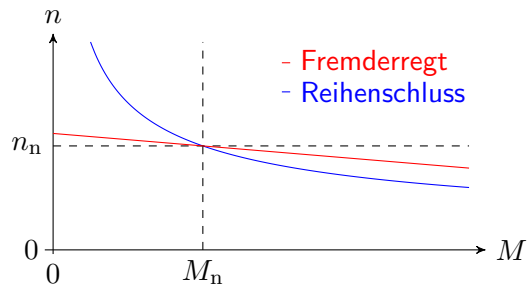
$$\begin{aligned}
 n &= \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} - \frac{R_A \cdot M_i}{2\pi (K \cdot \Phi)^2} \\
 &= \frac{400 \text{ V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 20 \text{ Vs}} - \frac{2,3 \Omega \cdot 10 \text{ Nm}}{2\pi \left(\frac{1}{2\pi} \cdot 20 \text{ Vs}\right)^2} \\
 &= 20 \frac{1}{\text{s}} - 0,362 \frac{1}{\text{s}} = 19,638 \frac{1}{\text{s}} = 1178,3 \frac{1}{\text{min}}
 \end{aligned}$$

c) Wie groß ist der Ankerstrom?

$$I_A = \frac{M_i}{K \cdot \Phi} = \frac{10 \text{ Nm}}{\frac{1}{2\pi} \cdot 20 \text{ Vs}} = 3,61 \text{ A}$$



- ▶ Auch für Wechselspannung einsetzbar
- ▶ hohes Anzugsmoment



Die Synchronmaschine dreht netzsynchron mit konstanter Drehzahl **Vorteile:**

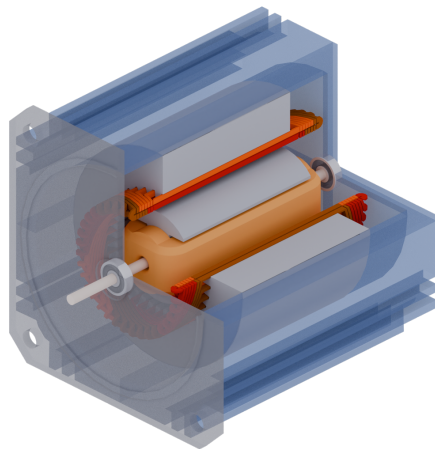
- ▶ Robust und wartungsfrei.
- ▶ Hohe Regeldynamik.
- ▶ Hohe Leistungsdichte bei geringem Bauvolumen.
- ▶ Überlastfähigkeit.

Nachteile:

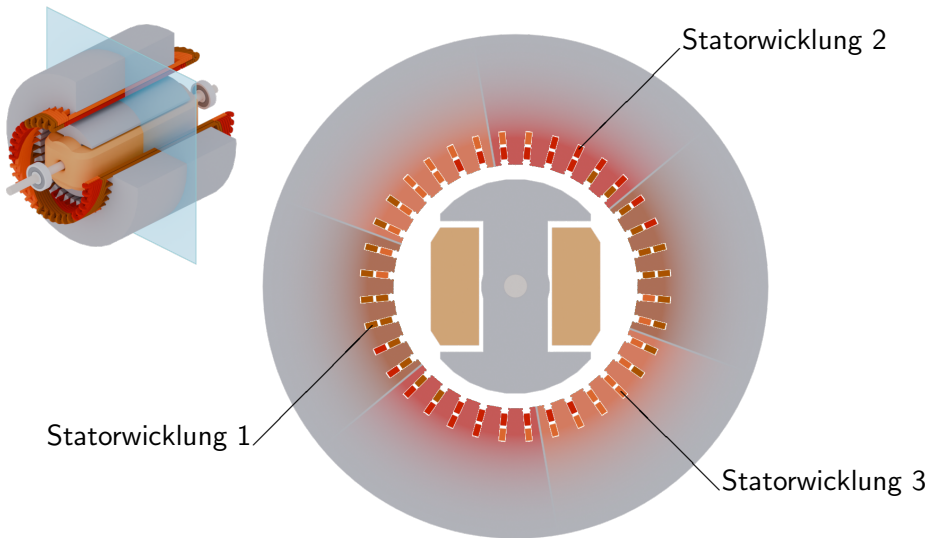
- ▶ Aufwendige Umrichtertechnik.
- ▶ Aufwendige Regelung.
- ▶ Gesteuerter Betrieb nur mit großem Aufwand oder gar nicht möglich.

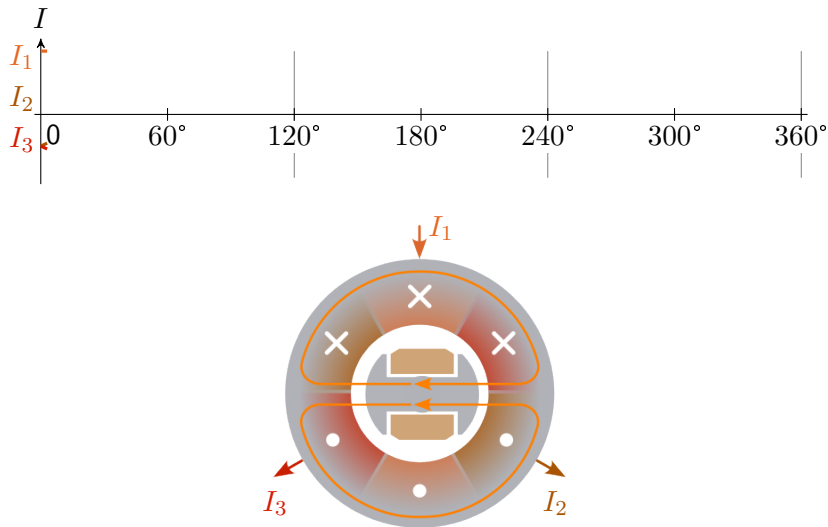
Aufbau einer fremderregten Synchronmaschine

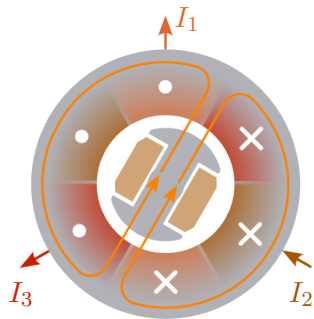
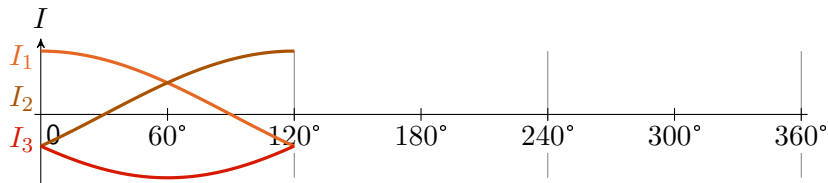
- ▶ Drei Statorwicklungen, die 120° zueinander versetzt sind.
- ▶ Geblechte Ausführung des Stators, da dieser ein magnetisches Wechselfeld erfährt.
- ▶ Im Läufer befindet sich die Erregerwicklung.
- ▶ Der Läufer wird teilweise nicht geblecht.

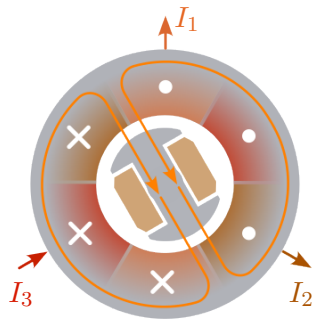
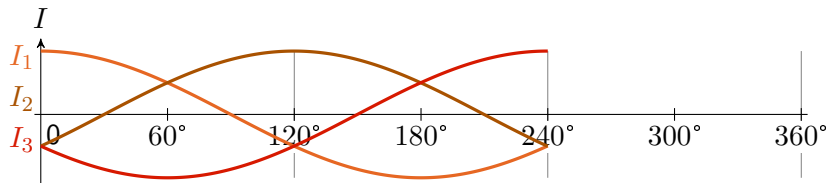


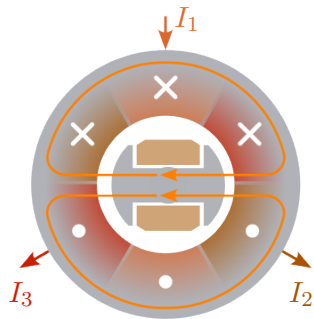
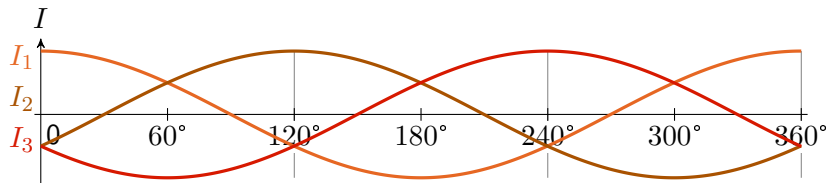
Aufbau einer fremderregten Synchronmaschine



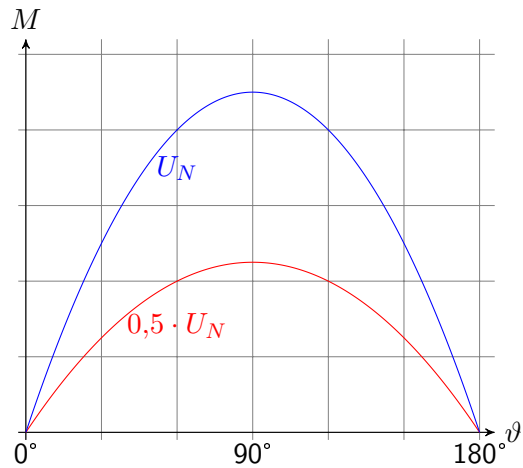




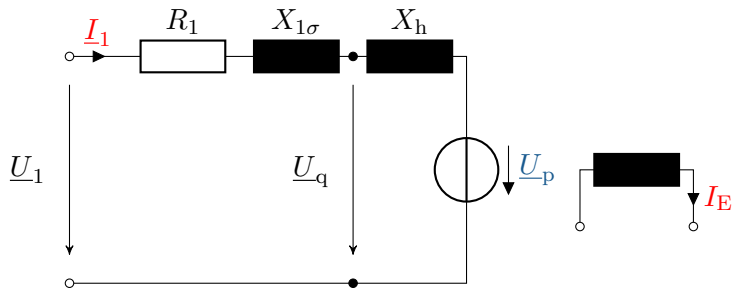




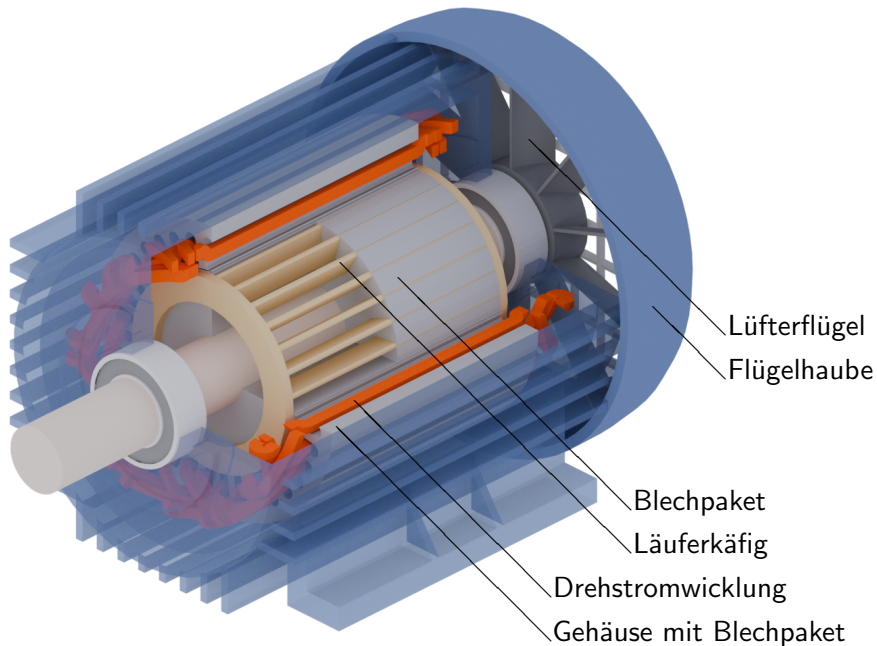
- ▶ Der Statorfluss entsteht durch die Überlagerung der Flüsse der drei Wicklungen.
- ▶ Der Läuferfluss entsteht durch die Erregerwicklung.



Komplexes einphasiges ESB des Vollpolgenerators (z.B. im Netzbetrieb):

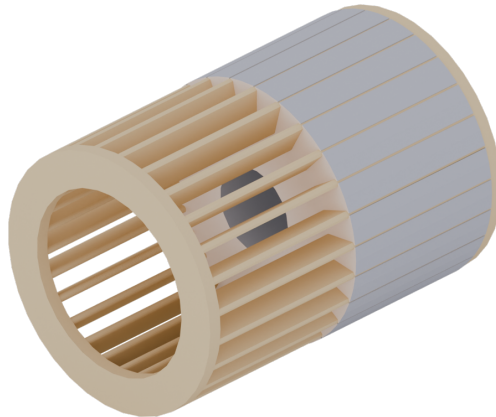


Asynchronmaschine Aufbau



Käfigläufer

- ▶ In den Nuten des Läuferblechpaketes liegen leitfähige Stäbe.
- ▶ Stirnseitig sind die Stäbe durch Kurzschlussringe miteinander verbunden.
- ▶ Zusammen bilden diese Komponenten einen Käfig (ähnlich Hamsterkäfig).
- ▶ Stäbe werden geschrägt ausgeführt zur Reduktion von Oberwellen im umlaufenden magnetischen Feld.



- ▶ Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_s = \frac{\omega_0}{p}$.
- ▶ Der ruhende Läufer sieht ein veränderliches Feld mit der Frequenz ω_s .
- ▶ Das magnetische Drehfeld durchsetzt den Läufer und induziert eine Spannung mit der Frequenz ω_s .
- ▶ Aus der Spannungsinduktion resultiert ein Stromfluss, da die Läuferwicklungen kurzgeschlossen sind.
- ▶ Der induzierte Rotorstrom wirkt der von ihm gesehenen Änderung des Statorfeldes entgegen (Lenzsche Regel).
- ▶ Statorfeld und Rotorstrom wechselwirken durch die Lorentzkraft- es kommt zur Ausbildung eines Drehmoments.
- ▶ Das Drehmoment wirkt in Richtung des Ständerdrehfelds.
- ▶ Der Läufer beginnt sich zu drehen.

- ▶ Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_r = \omega_s - \omega_{\text{mech}}$.
- ▶ Mit steigender Drehzahl sinkt sowohl der Betrag als auch die Frequenz der induzierten Spannung im Rotor.
- ▶ Der Betrag des Drehmoments sinkt.
- ▶ Drehen sich der Läufer und Ständerfeld mit der gleichen Frequenz, ist die synchrone Drehzahl erreicht.
- ▶ Die Läuferwicklungen sehen keine Änderung des Feldes.
- ▶ Induzierter Strom und Moment der Maschine werden zu Null.
- ▶ Durch Reibungseffekte wird der Rotor wieder abgebremst - es kommt zur erneuten Ausbildung eines Moments.
- ▶ Im Gleichgewichtszustand stellt sich eine Drehzahl knapp unter der synchronen ein.

Schlupf:

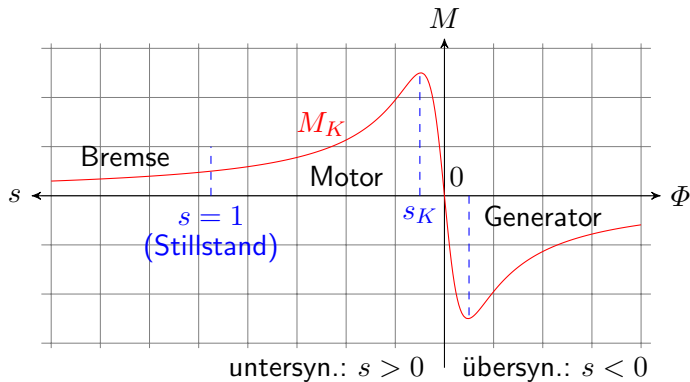
$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Klosssche Gleichung

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$$

Schlupf entspricht den prozentualen Verlusten:

$$\eta \approx 1 - s$$



Beispiel: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

- ▶ Nennleistung: 10 kW
- ▶ Frequenz: 50 Hz
- ▶ Nenndrehzahl: $1440 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
- ▶ Kippschlupf: 25%

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

$$P_N = M_N \cdot \omega_N = M_N \cdot 2\pi n_N$$

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi n_N} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ W}}{2\pi \cdot 1440 \frac{1}{60 \text{ s}}} = 66,31 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} s_N &= \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \\ &= \frac{2\pi \cdot 1500 \frac{1}{60 \text{ s}} - 2\pi \cdot 1440 \frac{1}{60 \text{ s}}}{2\pi \cdot 1500 \frac{1}{60 \text{ s}}} \\ &= 0,04 \end{aligned}$$

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$$