GET it digital

Modul 11: Elektrische Maschinen

Stand: 5. September 2025

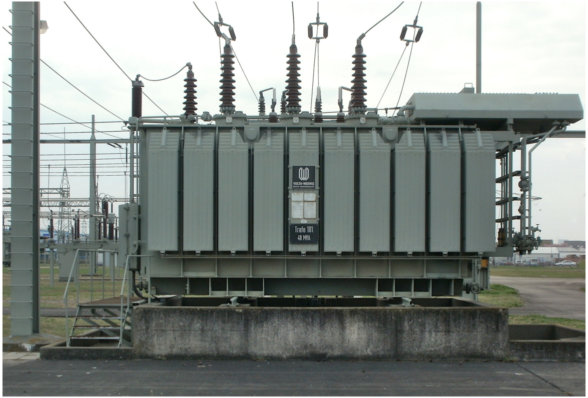
Lizenz

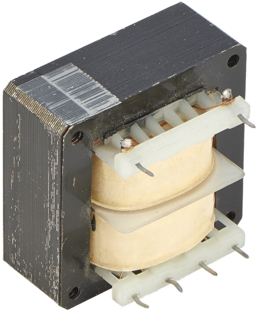
Lernziele: Elektrische Maschinen

Die Studierenden

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

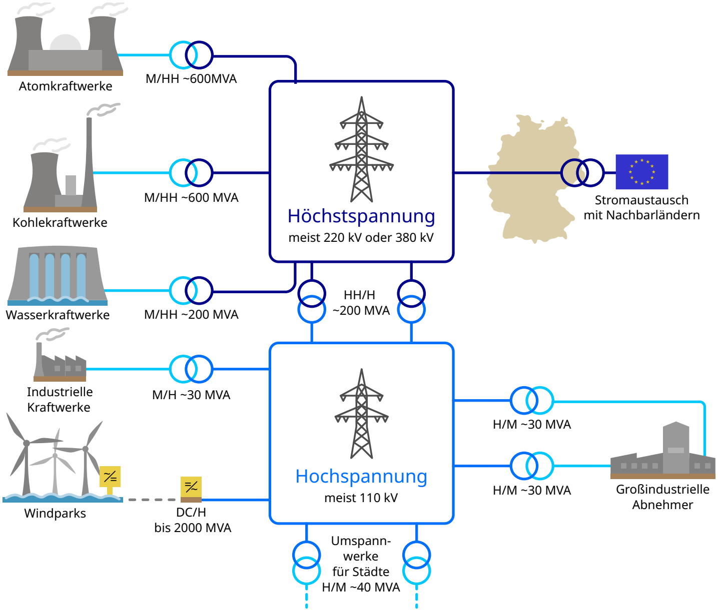
Der Transformator



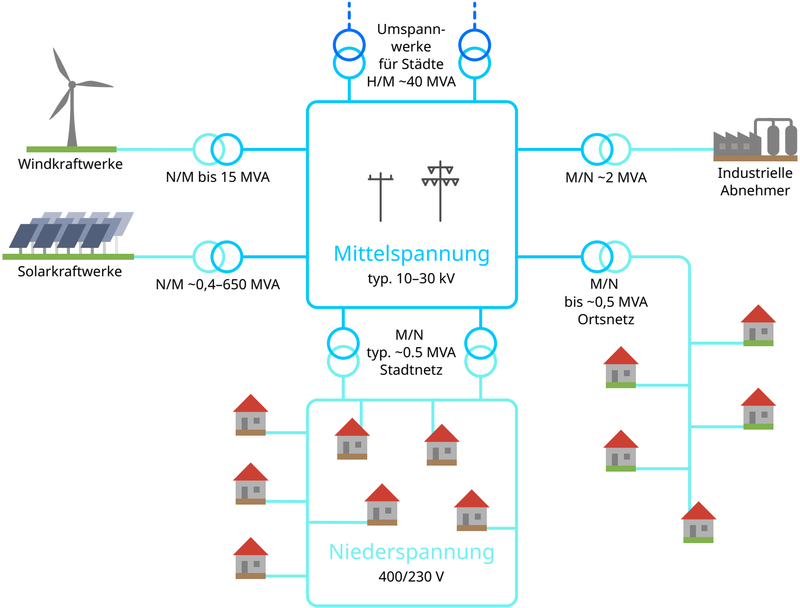


- Wandlung elektrische Energie $\longrightarrow$ elektrische Energie
- Spannungswandler

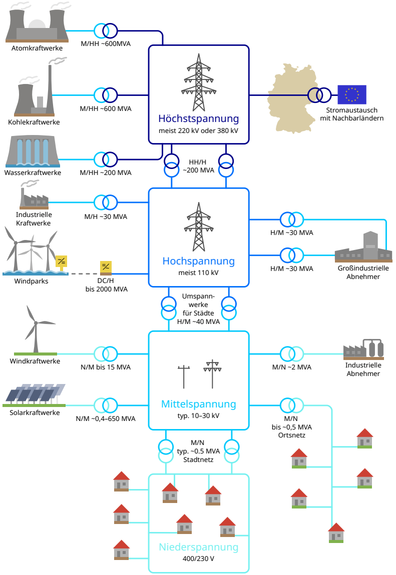
Öffentliche Stromversorgung



Öffentliche Stromversorgung



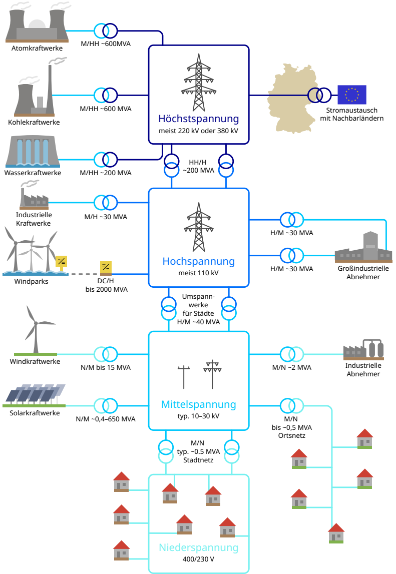
Öffentliche Stromversorgung



Verluste proportional zum quadratischen Strom.

$$P_\mathrm{v} = 3 \cdot R_\mathrm{L} \cdot I_\mathrm{L}^2$$

Öffentliche Stromversorgung



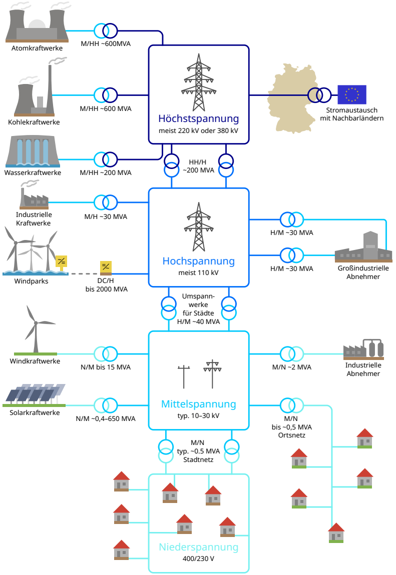
Verluste proportional zum quadratischen Strom.

$$P_\mathrm{v} = 3 \cdot R_\mathrm{L} \cdot I_\mathrm{L}^2$$

Übertragene Leistung:

$$\underline{S}_\mathrm{N} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_\mathrm{N} \cdot \underline{I}_\mathrm{L}^*$$

Öffentliche Stromversorgung



Verluste proportional zum quadratischen Strom.

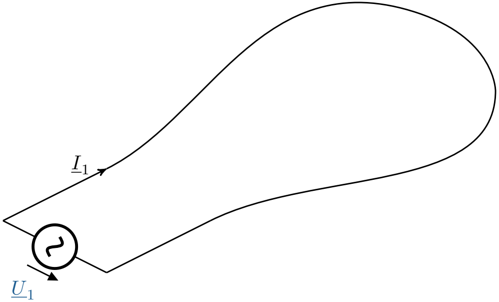
$$P_\mathrm{v} = 3 \cdot R_\mathrm{L} \cdot I_\mathrm{L}^2$$

Übertragene Leistung:

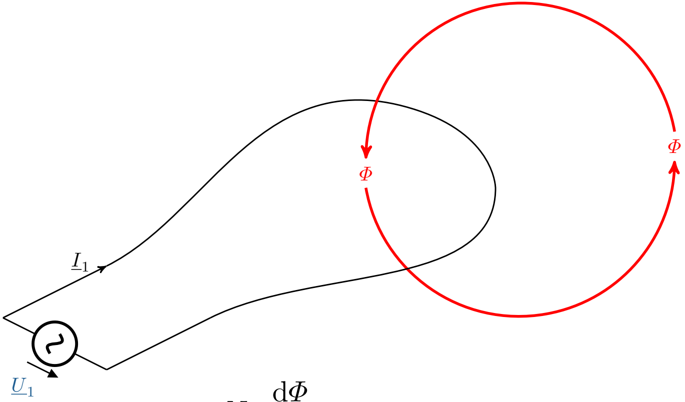
$$\underline{S}_\mathrm{N} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_\mathrm{N} \cdot \underline{I}_\mathrm{L}^*$$

Verluste proportional zu $\frac{1}{\underline{U}_\mathrm{N}^2}$

Prinzip des Transformators



Prinzip des Transformators

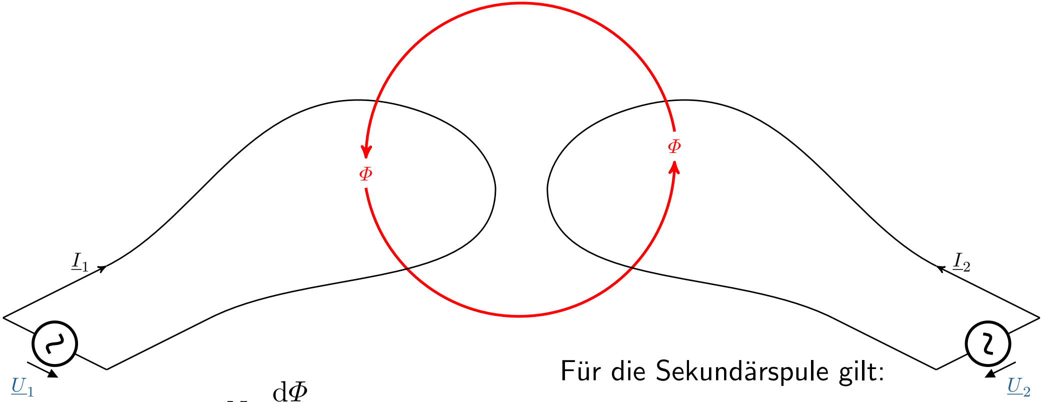


$$u_\mathrm{i} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

$$u = \hat{U} \cdot \cos(\omega t)$$

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot \underline{U}_1}{2\pi \cdot N_1 \cdot f}$$

Prinzip des Transformators



$$u_\mathrm{i} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

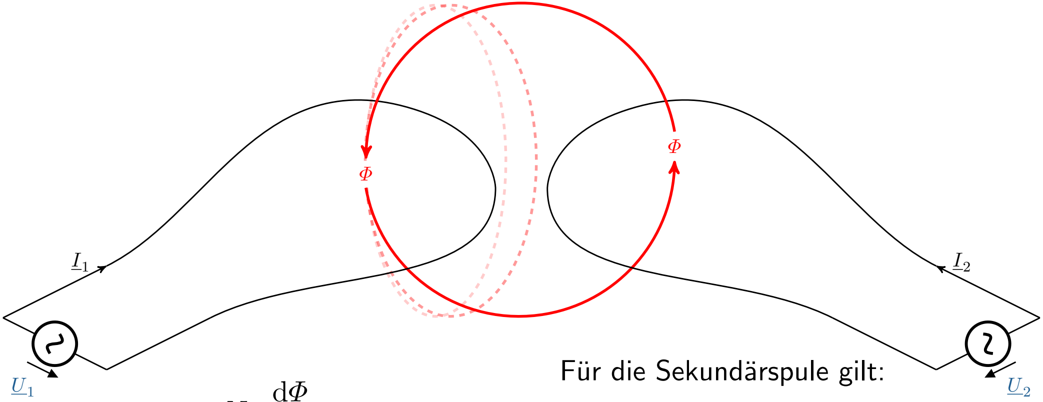
$$u = \hat{U} \cdot \cos(\omega t)$$

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot \underline{U}_1}{2\pi \cdot N_1 \cdot f}$$

Für die Sekundärspule gilt:

$$u_2 = -N_2 \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

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



$$u_\mathrm{i} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

$$u = \hat{U} \cdot \cos(\omega t)$$

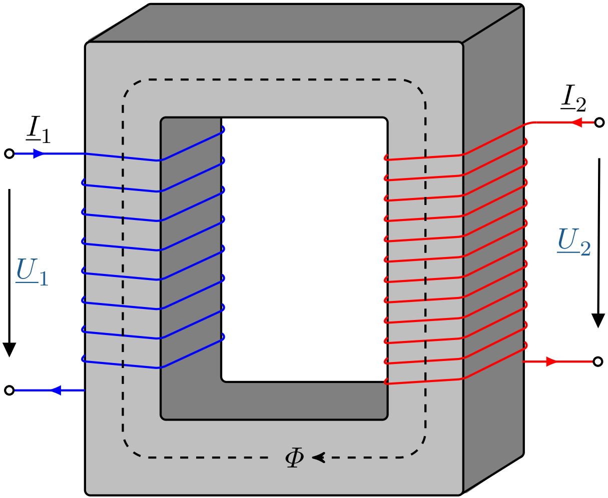
$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot \underline{U}_1}{2\pi \cdot N_1 \cdot f}$$

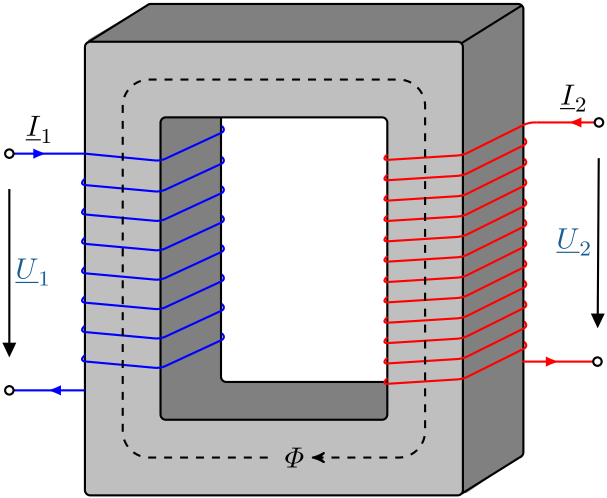
Für die Sekundärspule gilt:

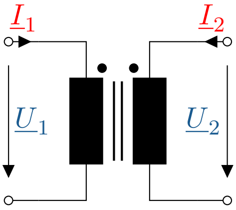
$$u_2 = -N_2 \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{-N_1 \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}}{-N_2 \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}} = \frac{N_1}{N_2} = ü$$

Aufbau des Transformators







$ü < 1 \rightarrow$ Spannung hoch

$ü > 1 \rightarrow$ Spannung runter

Angegeben wird immer $ü > 1$

Beispiel: Idealer dreiphasiger Netztransformator

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

a) Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis?

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

a) Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis?

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

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

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

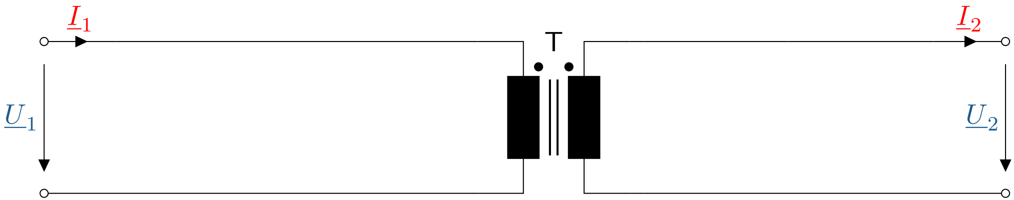
$$\cos(\varphi) = 1 \rightarrow |\underline{S}| = P$$

$$P = U \cdot I$$

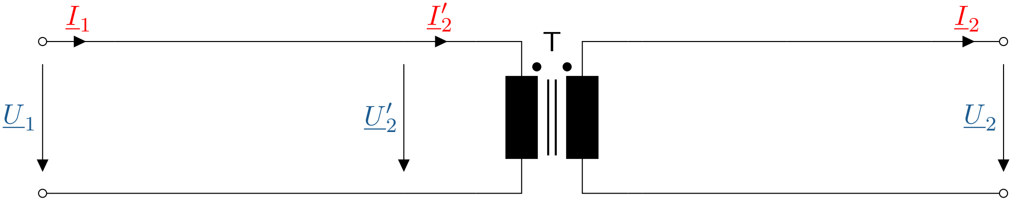
$$I_1 = \frac{P}{U} = \frac{100\,\mathrm{kW}}{20\,\mathrm{kV}} = 5\,\mathrm{A}$$

$$I_2 = \frac{P}{U} = \frac{100\,\mathrm{kW}}{400\,\mathrm{V}} = 250\,\mathrm{A}$$

Ersatzschaltbild



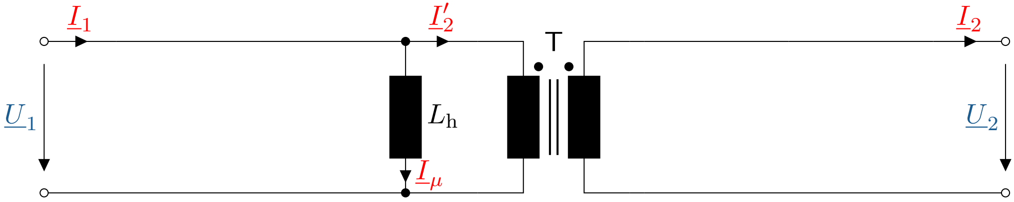
Ersatzschaltbild



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

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

Ersatzschaltbild

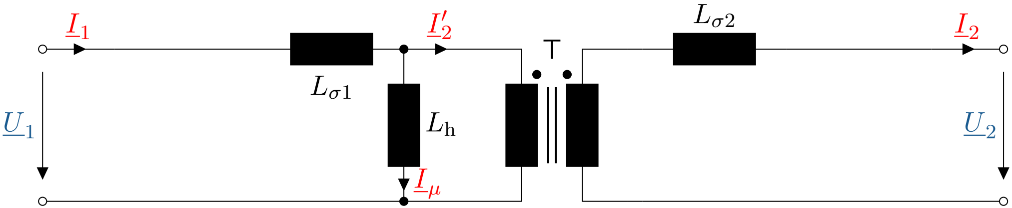


$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2$$

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

L_h Hauptinduktivität

Ersatzschaltbild



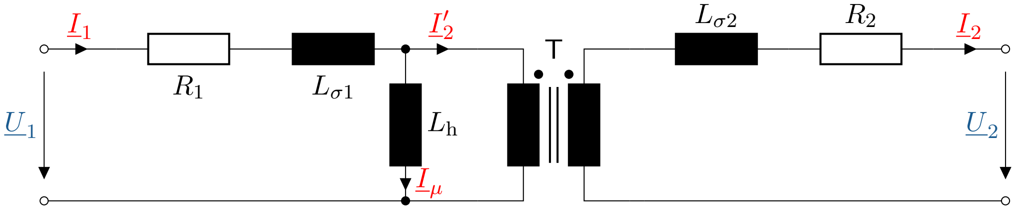
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2$$

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

L_h Hauptinduktivität

L_σ Streuinduktivität

Ersatzschaltbild

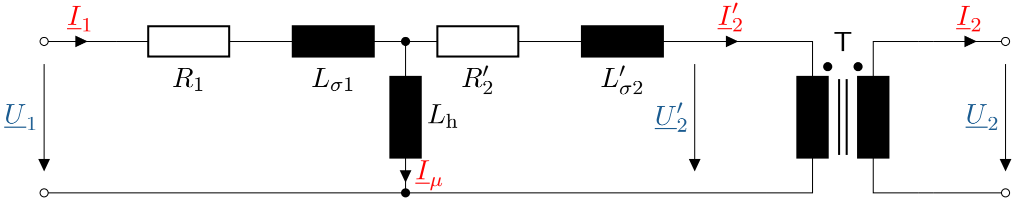


$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2$$

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

- L_h Hauptinduktivität
- L_σ Streuinduktivität
- R Widerstandsverluste

Ersatzschaltbild



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

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

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

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

L_h Hauptinduktivität

L_σ Streuinduktivität

R Widerstandsverluste

Der ideale Trafo rechts wird meistens weggelassen.

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

- Leistung: $\underline{S}_\mathrm{N} = 100\,\mathrm{kVA}$
- Oberspannung $\underline{U}_1 = 20\,\mathrm{kV}$
- Übersetzungsverhältnis: 50
- $L_\mathrm{h} = 500\,\mathrm{H}$
- $L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = 190\,\mathrm{mH}$
- $R_1 = R'_2 = 30\,\Omega$

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

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

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

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

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

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

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

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_\mathrm{h}}{\underline{Z}_\mathrm{h} + \underline{Z}_{\sigma 1} + R_1}$$
$$= 19{,}992\,\mathrm{kV} \cdot e^{j0{,}011^\circ}$$
$$\underline{U}_2 = 399{,}85\,\mathrm{V} \cdot e^{j0{,}011^\circ}$$

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

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

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

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

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

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

$$
\begin{aligned}
\underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_\mathrm{h} + \underline{Z}_{\sigma 1} + R_1} \\
&= \frac{20\,\mathrm{kV}}{157{,}139\,\mathrm{k\Omega} \cdot e^{j89{,}989^\circ}} \\
&= 127{,}28\,\mathrm{mA} \cdot e^{-j89{,}989^\circ}
\end{aligned}
$$

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

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

c) Wie groß sind die Leerlaufverluste?

Beispiel: Realer dreiphasiger Netztransformator

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

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

c) Wie groß sind die Leerlaufverluste?

$$\begin{aligned}\underline{S}_\mathrm{v} &= \underline{U} \cdot \underline{I}^* \\ &= 20\,\mathrm{kV} \cdot (127{,}28\,\mathrm{mA} \cdot e^{-j89{,}989^\circ})^* \\ &= 2{,}546\,\mathrm{kVA} \cdot e^{j89{,}989^\circ}\end{aligned}$$

Vorteile:

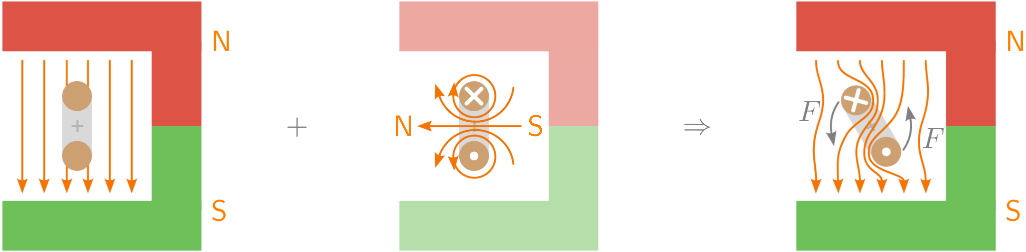
- Einfacher und kostengünstiger Aufbau der Stromrichter
- Hohe Regeldynamik
- Direkter Betrieb der Maschine mit Akkumulatoren möglich
- Große Überlastfähigkeit

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



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

Beispiel: Kraft einer Gleichstrommaschine

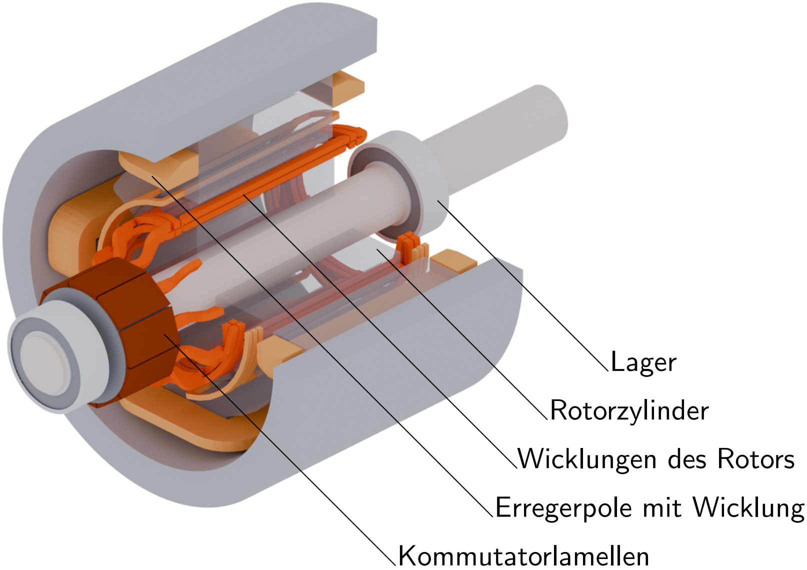
Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von $B = 0{,}8\,\mathrm{T}$. Unter den Polen befinden sich insgesamt $N = 400$ Ankerdrähte, die mit einem Strom von $I = 10\,\mathrm{A}$ durchflossen werden. Die wirksame Leiterlänge ist $\ell = 150\,\mathrm{mm}$. Berechnen Sie die Kraft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

Beispiel: Kraft einer Gleichstrommaschine

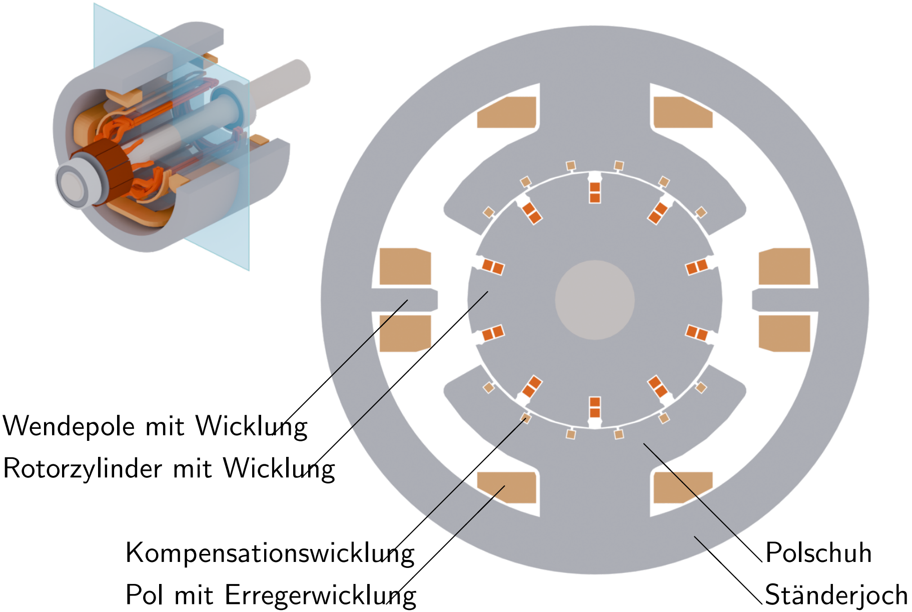
Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von $B = 0{,}8\,\mathrm{T}$. Unter den Polen befinden sich insgesamt $N = 400$ Ankerdrähte, die mit einem Strom von $I = 10\,\mathrm{A}$ durchflossen werden. Die wirksame Leiterlänge ist $\ell = 150\,\mathrm{mm}$. Berechnen Sie die Kraft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

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

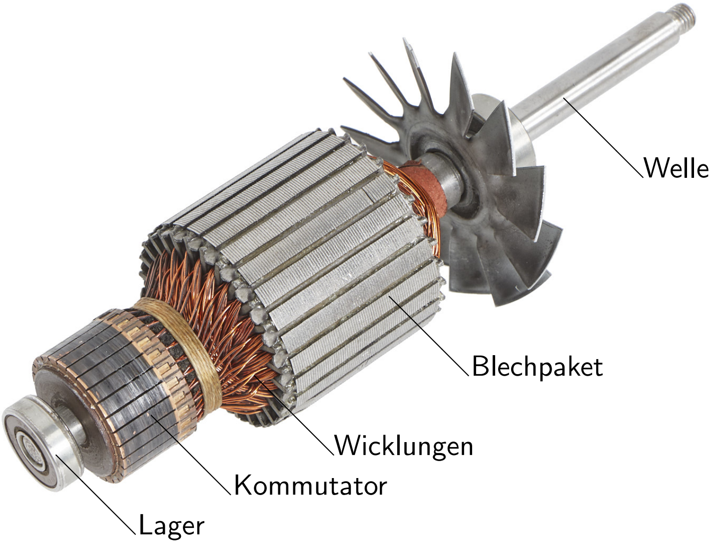
Aufbau


Lager
Rotorzylinder
Wicklungen des Rotors
Erregerpole mit Wicklung
Kommutatorlamellen

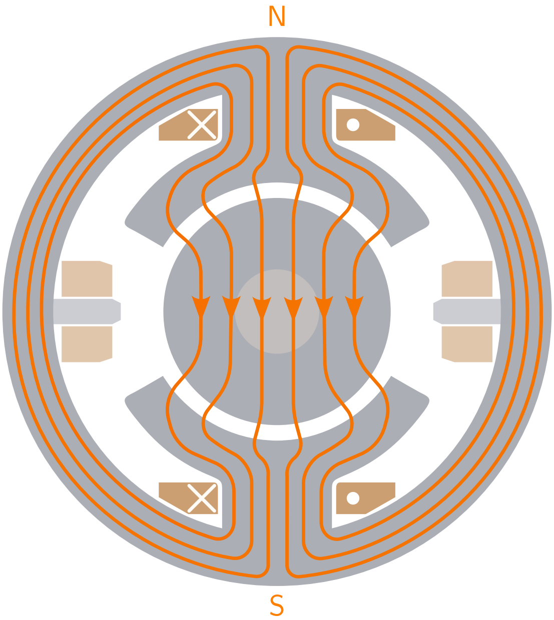
Aufbau


Wendepole mit Wicklung
Rotorzylinder mit Wicklung
Kompensationswicklung
Pol mit Erregerwicklung
Polschuh
Ständerjoch

Rotor und Kommutator



Erregerfeld



Induzierte Spannung

$$U_\mathrm{q} = K \cdot \Phi \cdot \omega$$

- Induzierte Spannung (Quellenspannung): U_q [V]
- Ankerkonstante: K [1]
- Fluss: Φ [Vs]
- Winkelgeschwindigkeit: ω_mech [rad/s]

Induzierte Spannung

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

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

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

- innere elektrische Leistung: P_i [W]

Inneres Moment

$$M_\mathrm{i} = K \cdot \mathit{\Phi} \cdot I_\mathrm{A}$$

- Inneres elektrisches Moment: M_i [Nm]
- Ankerkonstante: K [1]
- Fluss: $\mathit{\Phi}$ [Vs]
- Ankerstrom: I_A [A]

Inneres Moment

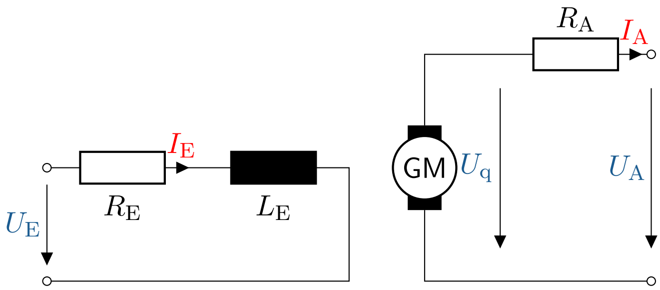
$$M_\mathrm{i} = K \cdot \Phi \cdot I_\mathrm{A}$$

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

$$M = M_\mathrm{i} - M_\mathrm{V} \qquad\qquad M = \eta_1 \cdot M_\mathrm{i}$$

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

Fremderregte Gleichstrommaschine



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

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

Beispiel: Fremderregte Gleichstrommaschine

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

a) Wie groß ist der Erregerfluss Φ?

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

a) Wie groß ist der Erregerfluss $\varPhi$?
Im Leerlauf ist das innere Moment M_i gleich Null. Der lastabhängige Drehzahlabfall entfällt daher:

$$n = \frac{U_\mathrm{A}}{2\pi K \cdot \varPhi}$$

$$\varPhi = \frac{U_\mathrm{A}}{2\pi K \cdot n} = \frac{400\,\mathrm{V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 1200\,\frac{1}{\mathrm{min}} \cdot \frac{1}{60\,\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{min}}}} = 20\,\mathrm{Vs}$$

Beispiel

b) Wie schnell dreht die Maschine bei einem inneren Drehmoment von $M_\mathrm{i} = 10\,\mathrm{Nm}$?

Beispiel

b) Wie schnell dreht die Maschine bei einem inneren Drehmoment von $M_\mathrm{i} = 10\,\mathrm{Nm}$?

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_\mathrm{A}}{2\pi K \cdot \Phi} - \frac{R_\mathrm{A} \cdot M_\mathrm{i}}{2\pi (K \cdot \Phi)^2} \\ &= \frac{400\,\mathrm{V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 20\,\mathrm{Vs}} - \frac{2{,}3\,\Omega \cdot 10\,\mathrm{Nm}}{2\pi (\frac{1}{2\pi} \cdot 20\,\mathrm{Vs})^2} \\ &= 20\,\frac{1}{\mathrm{s}} - 0{,}362\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 19{,}638\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 1178{,}3\,\frac{1}{\mathrm{min}} \end{aligned}$$

Beispiel

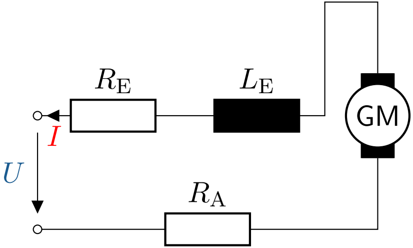
b) Wie schnell dreht die Maschine bei einem inneren Drehmoment von $M_\mathrm{i} = 10\,\mathrm{Nm}$?

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_\mathrm{A}}{2\pi K \cdot \varPhi} - \frac{R_\mathrm{A} \cdot M_\mathrm{i}}{2\pi (K \cdot \varPhi)^2} \\ &= \frac{400\,\mathrm{V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 20\,\mathrm{Vs}} - \frac{2{,}3\,\Omega \cdot 10\,\mathrm{Nm}}{2\pi(\frac{1}{2\pi} \cdot 20\,\mathrm{Vs})^2} \\ &= 20\,\frac{1}{\mathrm{s}} - 0{,}362\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 19{,}638\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 1178{,}3\,\frac{1}{\mathrm{min}} \end{aligned}$$

c) Wie groß ist der Ankerstrom?

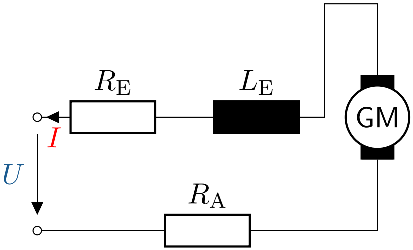
$$I_\mathrm{A} = \frac{M_\mathrm{i}}{K \cdot \varPhi} = \frac{10\,\mathrm{Nm}}{\frac{1}{2\pi} \cdot 20\,\mathrm{Vs}} = 3{,}61\,\mathrm{A}$$

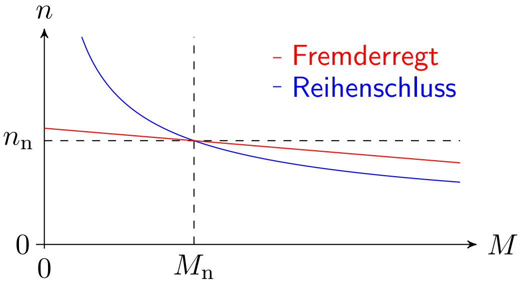
Reihenschlussmaschine



- Auch für Wechselspannung einsetzbar
- hohes Anzugsmoment

Reihenschlussmaschine





- Auch für Wechselspannung einsetzbar
- hohes Anzugsmoment

Synchronmaschine

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

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

Synchronmaschine

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

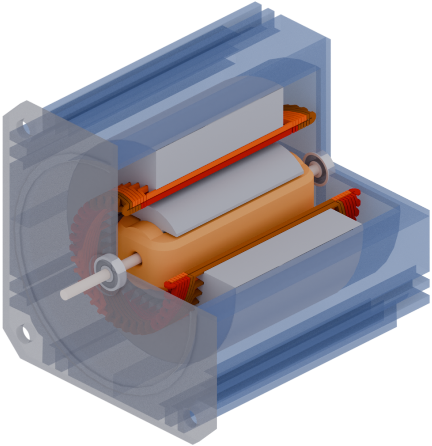
- Robust und wartungsfrei.
- Hohe Regeldynamik.
- Hohe Leistungsdichte bei geringem Bauvolumen.
- Überlastfähigkeit.

Nachteile:

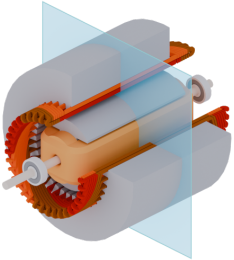
- Aufwendige Umrichtertechnik.
- Aufwendige Regelung.
- Gesteuerter Betrieb nur mit großem Aufwand oder gar nicht möglich.

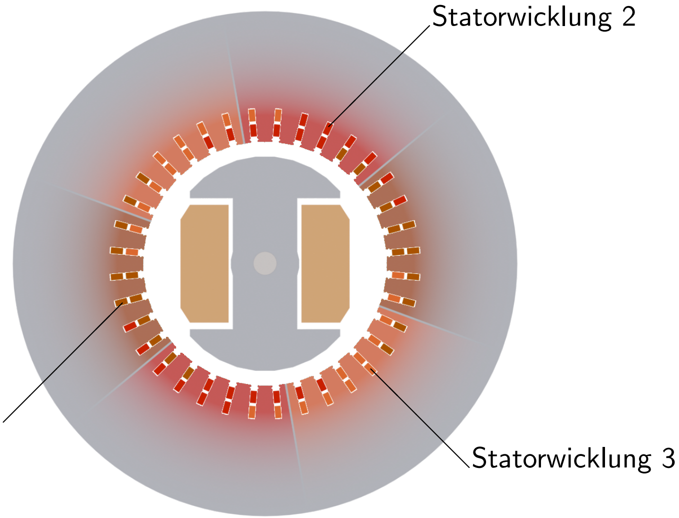
Aufbau einer fremderregten Synchronmaschine

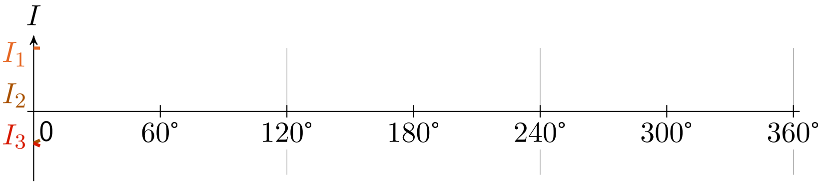
- Drei Statorwicklungen, die 120° zueinander versetzt sind.
- Geblechte Ausführung des Stators, da dieser ein magnetisches Wechselfeld erfährt.
- Im Läufer befindet sich die Erregerwicklung.
- Der Läufer wird teilweise nicht geblecht.



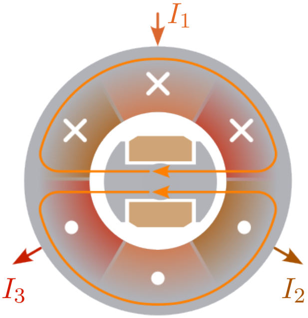
Aufbau einer fremderregten Synchronmaschine



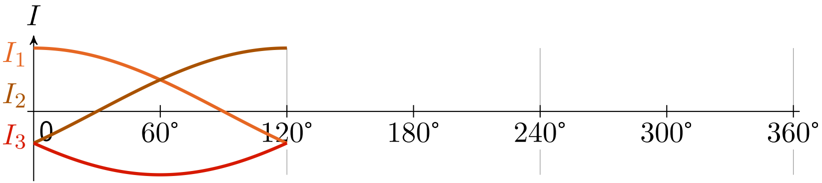




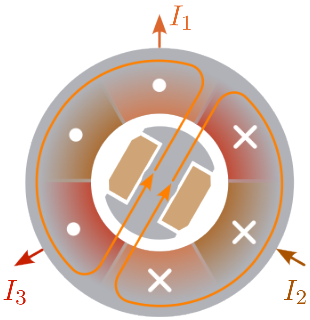
I
I_1
I_2
I_3
0
60°
120°
180°
240°
300°
360°



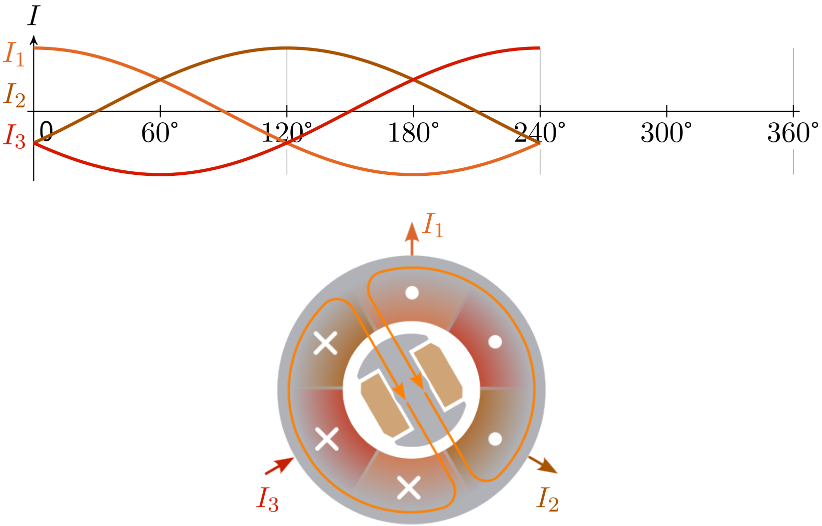
I_1
I_3
I_2



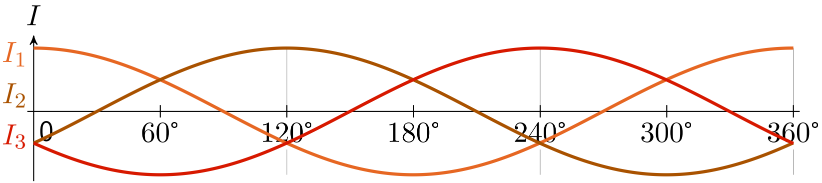
I
I1
I2
I3
0
60°
120°
180°
240°
300°
360°

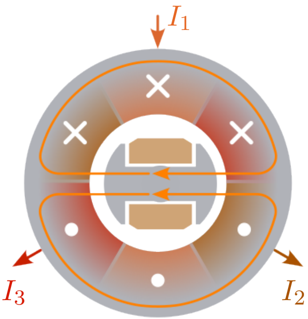


I1
I2
I3


I
I_1
I_2
I_3
0
60°
120°
180°
240°
300°
360°
I_1
I_3
I_2

Feldverläufe





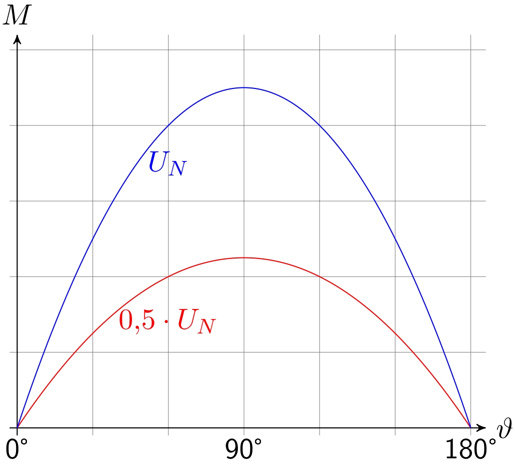
Feldverläufe

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

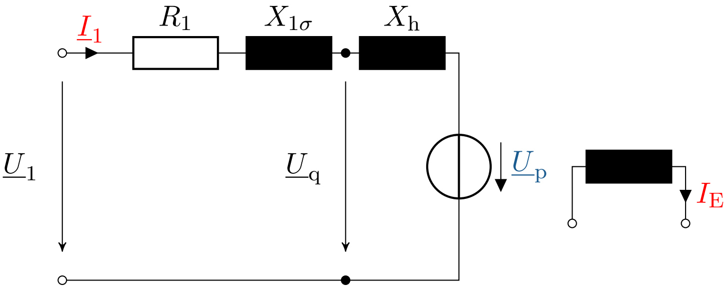
Feldverläufe

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

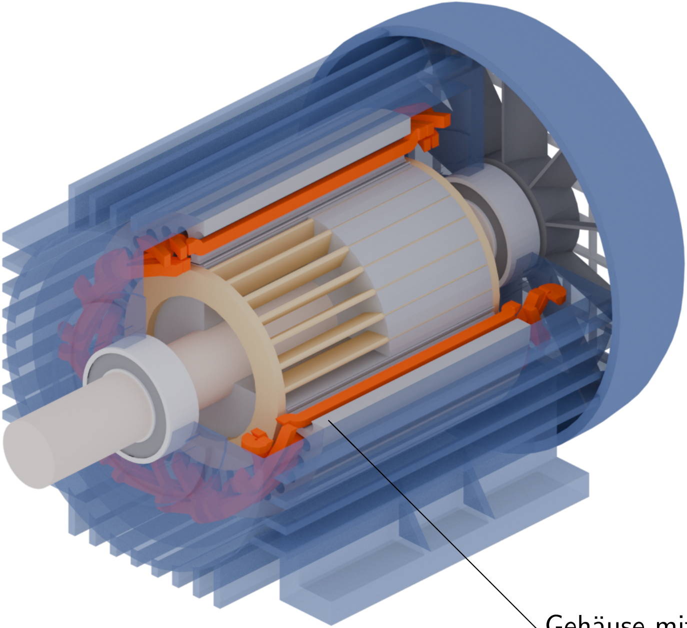
Drehmoment



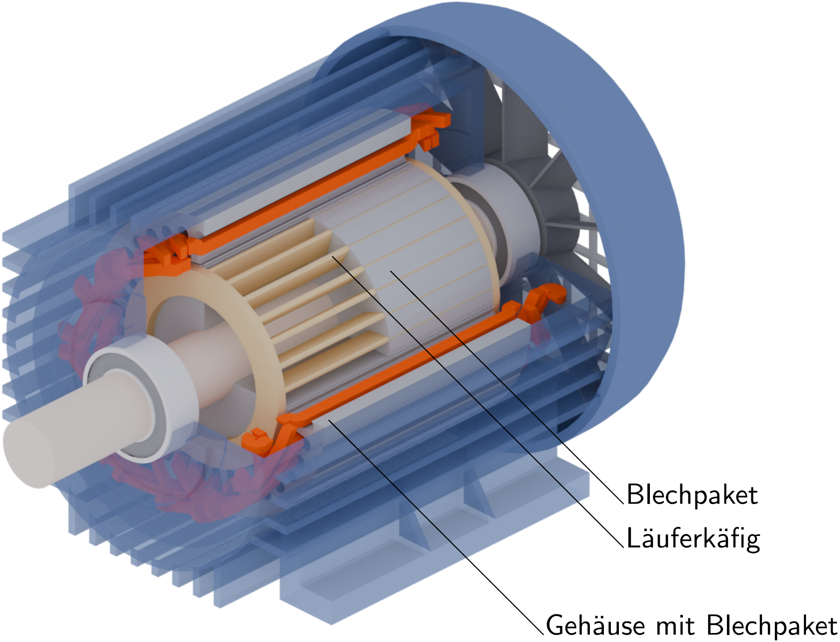
Komplexes einphasiges ESB des Vollpolgenerators (z.B. im Netzbetrieb):



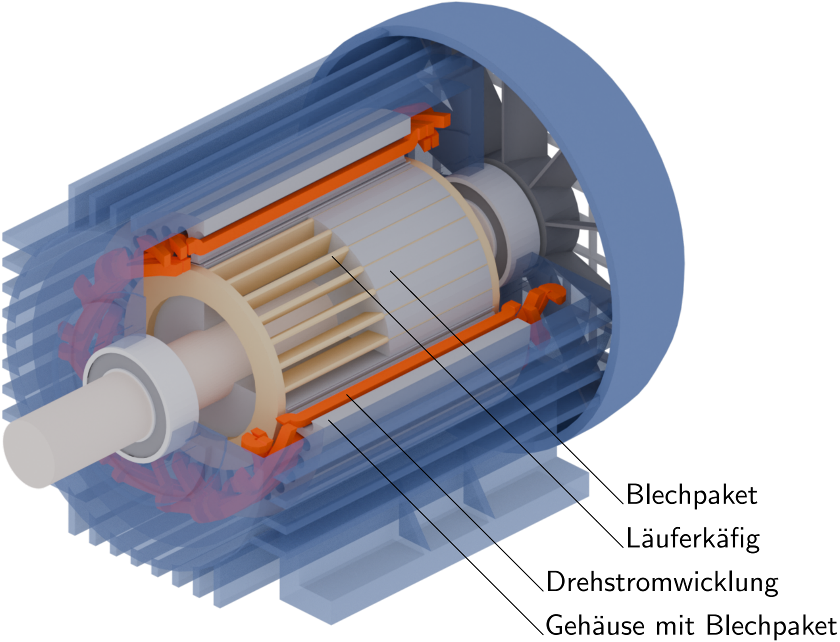
Asynchronmaschine Aufbau



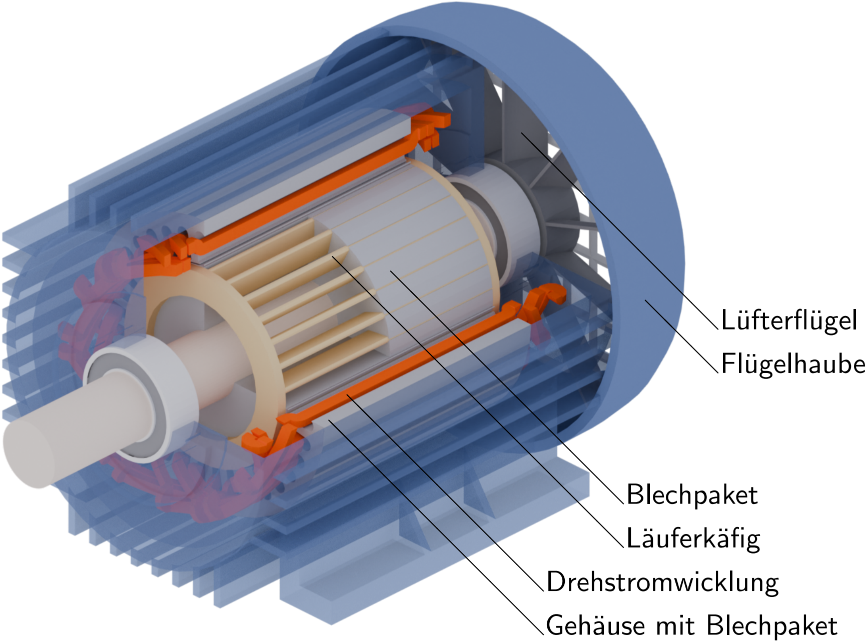
Asynchronmaschine Aufbau



Asynchronmaschine Aufbau

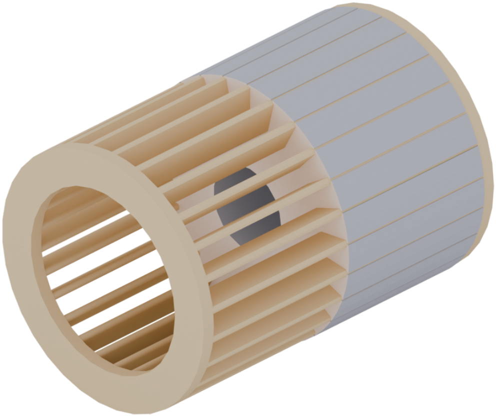


Asynchronmaschine Aufbau



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.



Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_\mathrm{s} = \frac{\omega_0}{p}$.

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_\mathrm{s} = \frac{\omega_0}{p}$.
- Der ruhende Läufer sieht ein veränderliches Feld mit der Frequenz ω_s.

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_\mathrm{s} = \frac{\omega_0}{p}$.
- 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.

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_\mathrm{s} = \frac{\omega_0}{p}$.
- 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.

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_\mathrm{s} = \frac{\omega_0}{p}$.
- 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).

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_{\mathrm{s}} = \frac{\omega_0}{p}$.
- 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 eins Drehmoments.

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_\mathrm{s} = \frac{\omega_0}{p}$.
- 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 eins Drehmoments.
- Das Drehmoment wirkt in Richtung des Ständerdrehfelds.

Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_{\mathrm{s}} = \frac{\omega_0}{p}$.
- 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 eins Drehmoments.
- Das Drehmoment wirkt in Richtung des Ständerdrehfelds.
- Der Läufer beginnt sich zu drehen.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- Mit steigender Drehzahl sinkt sowohl der Betrag als auch die Frequenz der induzierten Spannung im Rotor.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- Mit steigender Drehzahl sinkt sowohl der Betrag als auch die Frequenz der induzierten Spannung im Rotor.
- Der Betrag des Drehmoments sinkt.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- 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.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- 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.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- 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.

Betrieb der ASM

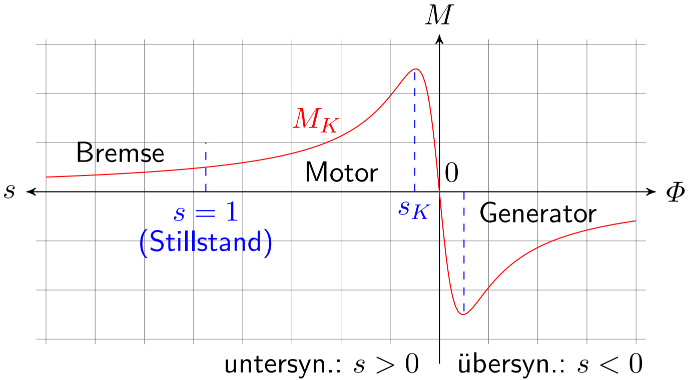
- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- Mit steigender Drehzahl sinkt sowohl der Betrag als auch die Frequenz der induzierten Spannung im Rotor.
- Der Betrag des Drehmoments sinkt.
- 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.

Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_\mathrm{r} = \omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{mech}$.
- 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:

$$s = \frac{\omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{r}}{\omega_\mathrm{s}}$$

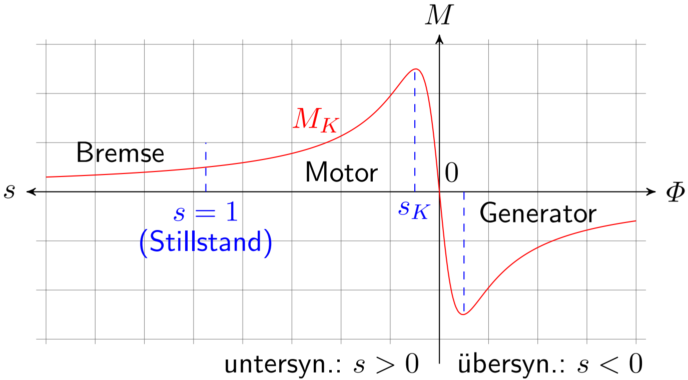


Schlupf:

$$s = \frac{\omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{r}}{\omega_\mathrm{s}}$$

Klosssche Gleichung

$$M = \frac{2 \cdot M_\mathrm{K}}{\frac{s_\mathrm{K}}{s} + \frac{s}{s_\mathrm{K}}}$$



Drehzahl/Drehmomenten-Kennlinie

Schlupf:

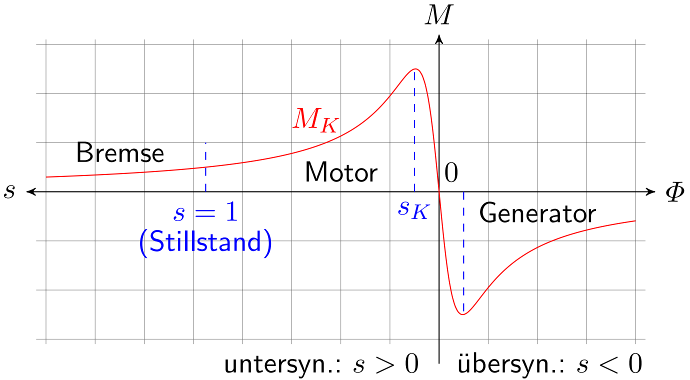
$$s = \frac{\omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{r}}{\omega_\mathrm{s}}$$

Klosssche Gleichung

$$M = \frac{2 \cdot M_\mathrm{K}}{\frac{s_\mathrm{K}}{s} + \frac{s}{s_\mathrm{K}}}$$

Schlupf entspricht den prozentualen Verlusten:

$$\eta \approx 1 - s$$



Beispiel: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

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

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

Beispiel: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

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

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

$$P_\mathrm{N} = M_\mathrm{N} \cdot \omega_\mathrm{N} = M_\mathrm{N} \cdot 2\pi n_\mathrm{N}$$

$$M_\mathrm{N} = \frac{P_\mathrm{N}}{2\pi n_\mathrm{N}} = \frac{10 \cdot 10^3\,\mathrm{W}}{2\pi \cdot 1440 \frac{1}{60\,\mathrm{s}}} = 66{,}31\,\mathrm{Nm}$$

Beispiel: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

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

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

$$P_\mathrm{N} = M_\mathrm{N} \cdot \omega_\mathrm{N} = M_\mathrm{N} \cdot 2\pi n_\mathrm{N}$$

$$M_\mathrm{N} = \frac{P_\mathrm{N}}{2\pi n_\mathrm{N}} = \frac{10 \cdot 10^3\,\mathrm{W}}{2\pi \cdot 1440 \frac{1}{60\,\mathrm{s}}} = 66{,}31\,\mathrm{Nm}$$

$$\begin{aligned} s_\mathrm{N} &= \frac{\omega_\mathrm{s} - \omega_\mathrm{r}}{\omega_\mathrm{s}} \\ &= \frac{2\pi \cdot 1500\,\frac{1}{60\,\mathrm{s}} - 2\pi \cdot 1440\,\frac{1}{60\,\mathrm{s}}}{2\pi \cdot 1500\,\frac{1}{60\,\mathrm{s}}} \\ &= 0{,}04 \end{aligned}$$

Beispiel: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

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

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

$$
\begin{aligned}
M &= \frac{2 \cdot M_{\mathrm{K}}}{\frac{s_{\mathrm{K}}}{s} + \frac{s}{s_{\mathrm{K}}}} \\
M_{\mathrm{K}} &= \frac{M_{\mathrm{N}}}{2} \cdot \left(\frac{s_{\mathrm{K}}}{s_{\mathrm{N}}} + \frac{s_{\mathrm{N}}}{s_{\mathrm{K}}} \right) \\
&= \frac{66{,}31\,\mathrm{Nm}}{2} \cdot \left(\frac{0{,}25}{0{,}04} + \frac{0{,}04}{0{,}25} \right) = 212{,}54\,\mathrm{Nm}
\end{aligned}
$$

Beispiel: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

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

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

$$M = \frac{2 \cdot M_\mathrm{K}}{\frac{s_\mathrm{K}}{s} + \frac{s}{s_\mathrm{K}}}$$

$$M_\mathrm{K} = \frac{M_\mathrm{N}}{2} \cdot \left(\frac{s_\mathrm{K}}{s_\mathrm{N}} + \frac{s_\mathrm{N}}{s_\mathrm{K}} \right)$$

$$= \frac{66{,}31\,\mathrm{Nm}}{2} \cdot \left(\frac{0{,}25}{0{,}04} + \frac{0{,}04}{0{,}25} \right) = 212{,}54\,\mathrm{Nm}$$

$$M_\mathrm{A} = \frac{2 \cdot 212{,}54\,\mathrm{Nm}}{\frac{0{,}25}{1} + \frac{1}{0{,}25}} = 100{,}02\,\mathrm{Nm}$$