

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

Kapitel 2: Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

→ **Kapitel 11:** Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Elektrische Antriebe

Inhalt Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

Stator erzeugt Drehfeld → Kapitel 7

11.1 Rotorbauformen

11.2 Rotor- und Statorfeld

11.3 Ersatzschaltbild

11.4 Zeigerdiagramm

11.5 Betrieb am starren Netz

11.6 Schenkelpolmaschine

11.7 PMSM mit vergabenen Magneten

11.8 Antriebssysteme

11.9 Ausführungsbeispiele

11.1 Rotorbauformen

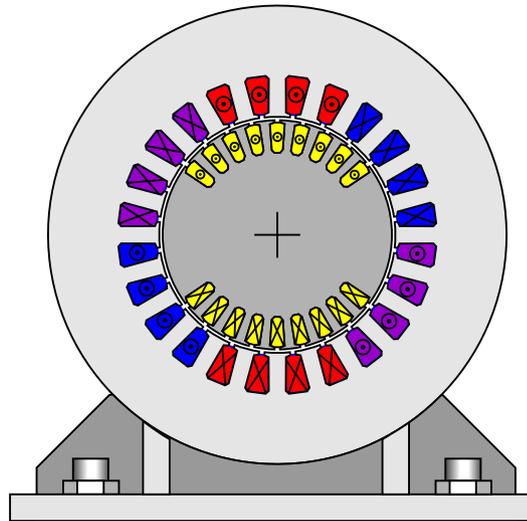
Erzeugung Erregerfeld - Vollpolbauweise

Rotor Synchronmaschine:

Erzeugt bei Drehung analog zum Stator eine umlaufende Feldwelle

Rotorbauform 1

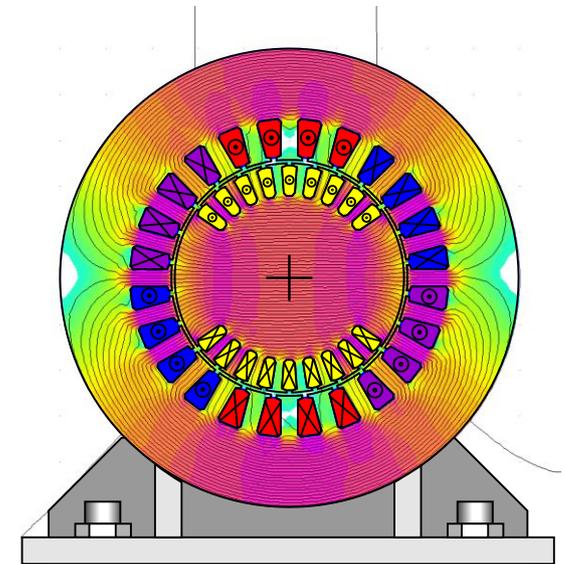
- Vollpolrotor
- nur Synchronmoment
- Fremderregung (d.h. elektrisch mit separat einstellbarem Feldstrom)



Blechschnitt mit Wicklung

- Sator:
- Strang U
 - Strang V
 - Strang W

- Rotor:
- Erregerwicklung (DC-Bestromung)



FEM-Simulation Rotorfeld

hier: $p = 1$

11.1 Rotorbauformen

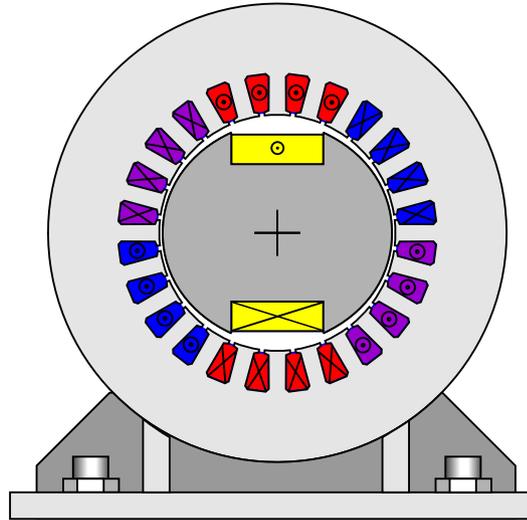
Erzeugung Erregerfeld - Schenkelpole

Rotor Synchronmaschine:

Erzeugt bei Drehung analog zum Stator eine umlaufende Feldwelle

Rotorbauform 2

- Schenkelpolrotor
- Synchron- und Reluktanzmoment
- Fremderregung
- Ausführung meist für $p \gg 1$



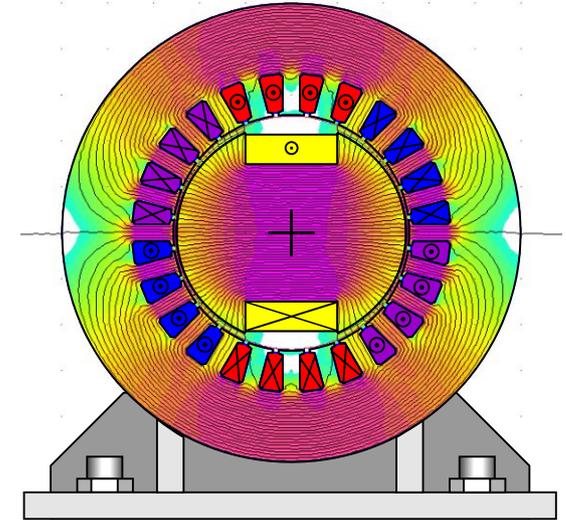
Blechschnitt mit Wicklung

Stator:

- Strang U
- Strang V
- Strang W

Rotor:

- Erregerwicklung (DC-Bestromung)



FEM-Simulation Rotorfeld

hier: $p = 1$

11.1 Rotorbauformen

Erzeugung Erregerfeld - Schenkelpole

Beispiel für hochpolige Schenkelpolmaschine, z.B. Generator in Laufwasserkraftwerk:

$p = 10$ ($N_{\text{syn}} = 300 \text{ Upm}$ für $f_{\text{el}} = 50 \text{ Hz}$) — aktiver Teil der Maschine wird ringförmig

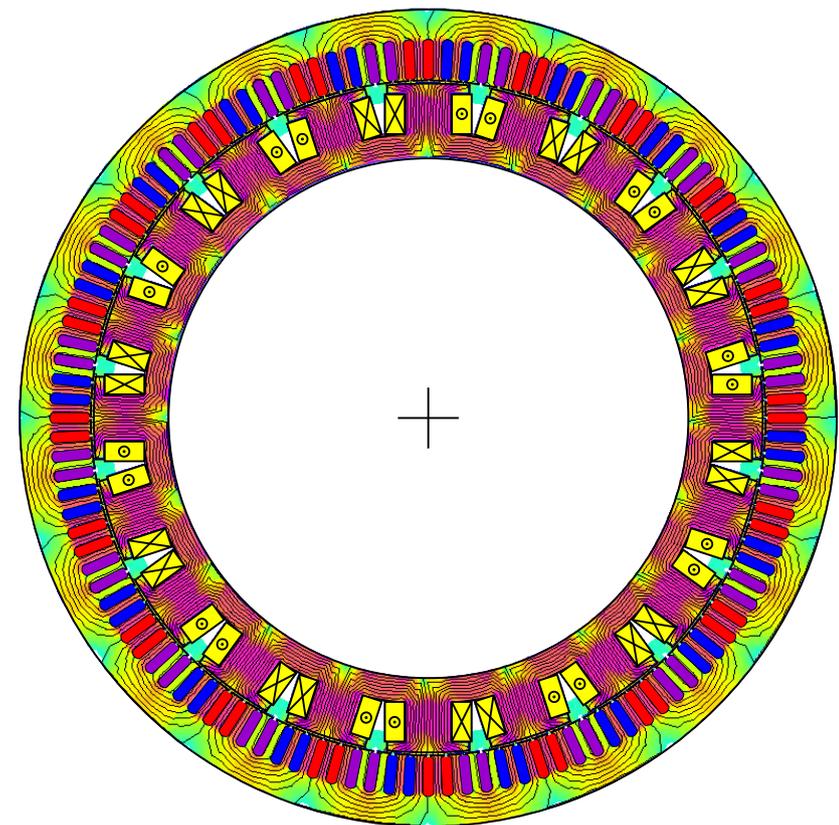
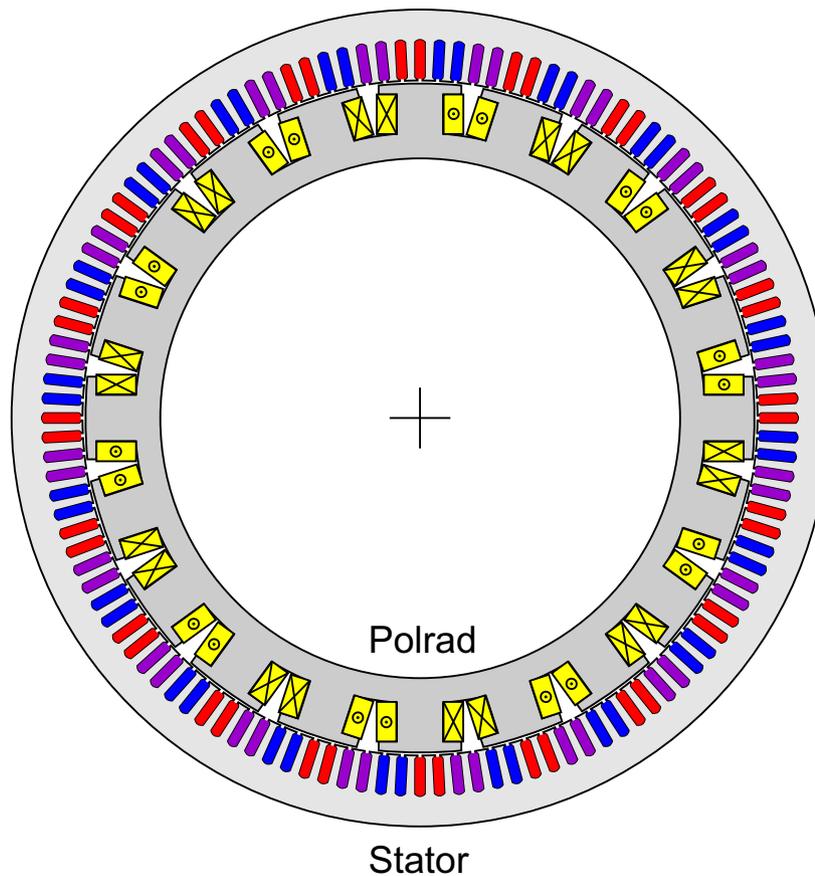
Blechschnitt
mit Wicklung

Stator:

- Strang U
- Strang V
- Strang W

Rotor:

- Erreger-
wicklung



11.1 Rotorbauformen

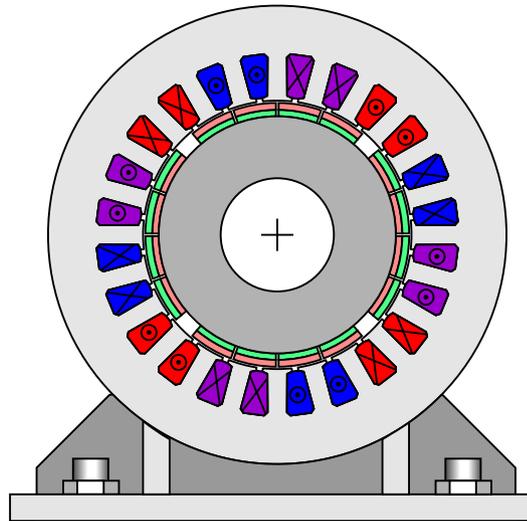
Erzeugung Erregerfeld - Oberflächenmagnetete

Rotor Synchronmaschine:

Erzeugt bei Drehung analog zum Stator eine umlaufende Feldwelle

Rotorbauform 3

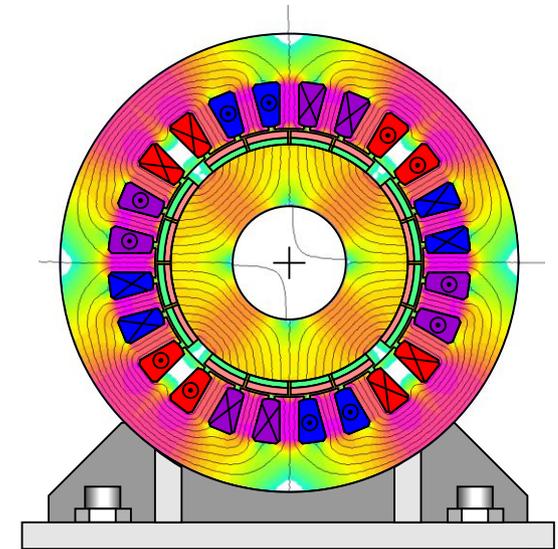
- Oberflächenmagnete
- nur Synchronmoment
- "S-PMSM":
Surface Permanent Magnet
Synchronous Motor



Blechschnitt mit Wicklung

- Stator:
- Strang U
 - Strang V
 - Strang W

- Rotor:
- Magnete



FEM-Simulation Rotorfeld

hier: $p = 2$

11.1 Rotorbauformen

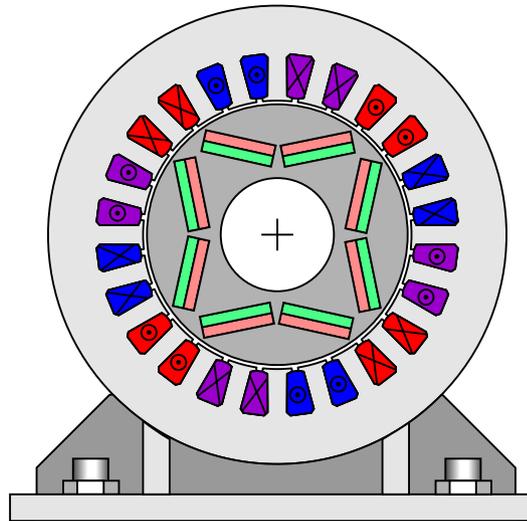
Erzeugung Erregerfeld - Vergrabene Magnete

Rotor Synchronmaschine:

Erzeugt bei Drehung analog zum Stator eine umlaufende Feldwelle

Rotorbauform 4

- Vergrabene Magnete
- Synchron- und Reluktanzmoment
- "I-PMSM":
Interior Permanent Magnet
Synchronous Motor
- auch: "Hybridmotor" (BMW i3)



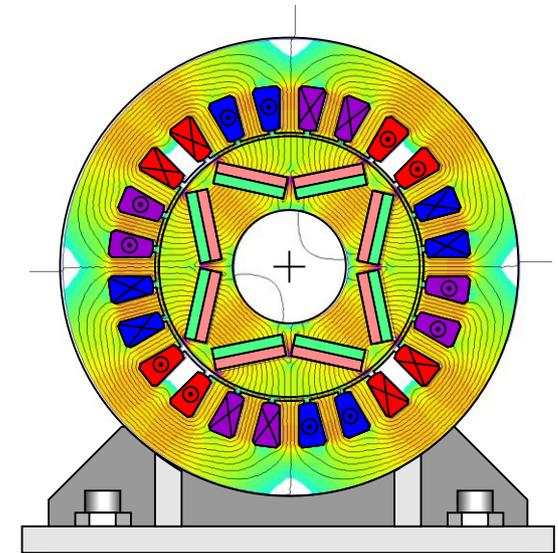
Blechschnitt mit Wicklung

Stator:

- Strang U
- Strang V
- Strang W

Rotor:

■ Magnete



FEM-Simulation Rotorfeld

hier: $p = 2$

11.2 Rotor- und Statorfeld

Wechselwirkung Rotorfeld – Statorfeld

Stator bestromt → Stator Drehfeld

Statorfeld läuft mit ω_{el}/p um

Rotor dreht sich → Rotordrehfeld

Rotordrehfeld läuft mit ω_{mech} um

Synchroner Betrieb:

$$p \cdot \omega_{mech} = \omega_{el}$$

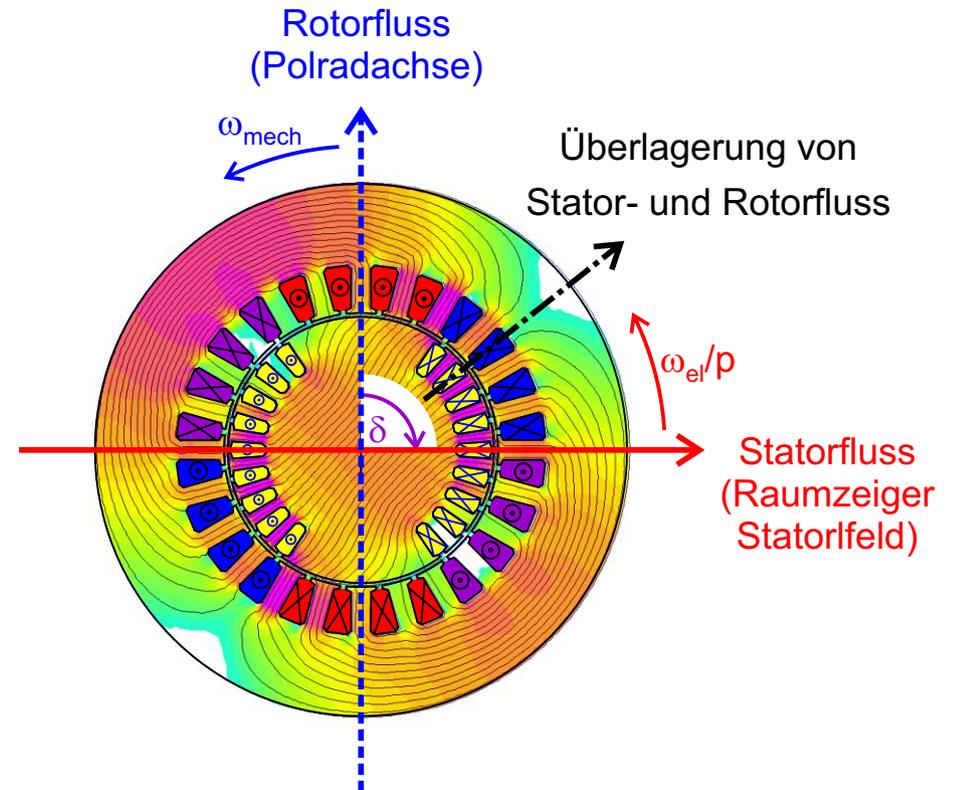
Motorbetrieb:

Statorfeld voreilend "zieht Rotorfeld hinter sich her"

Generatorbetrieb:

Rotordrehfeld voreilend "zieht Statorfeld hinter sich her"

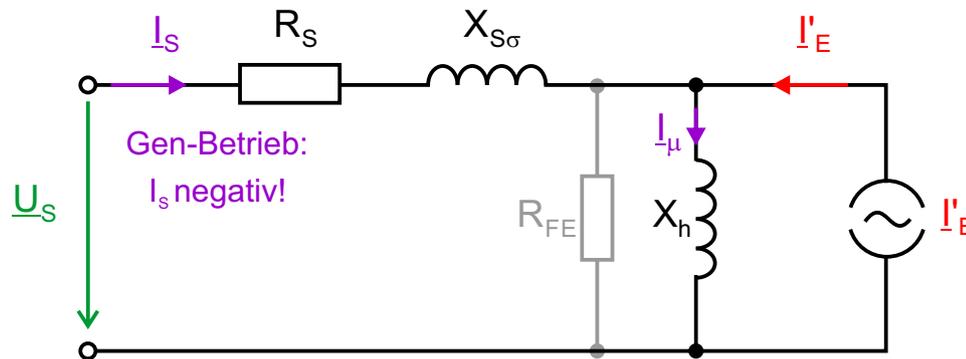
Drehmoment: ist von δ abhängig – Maximum bei $\delta = \pm 90^\circ$



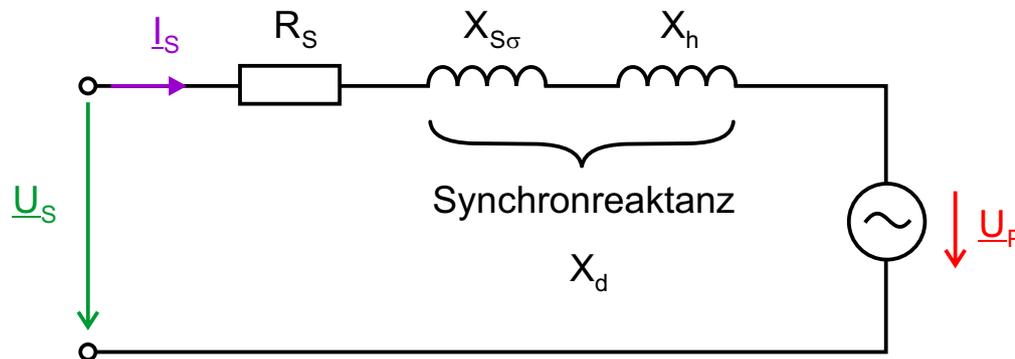
hier: Generatorbetrieb mit $\delta = -90^\circ$

11.3 Ersatzschaltbild

stationärer Betriebszustand: einphasiges ESB für ein symmetrisches Drehstromsystem



Umformung



Hauptreaktanz im Querzweig:

* Ansatz wie bei ASM

- Polrad erzeugt Erregerfluss Ψ_E im Statorsystem
- Nachbildung durch die Stromquelle I'_E
- Resultierender Hauptfluss: $\Psi_h = L_h \cdot I_\mu$

Hauptreaktanz im Längszweig:

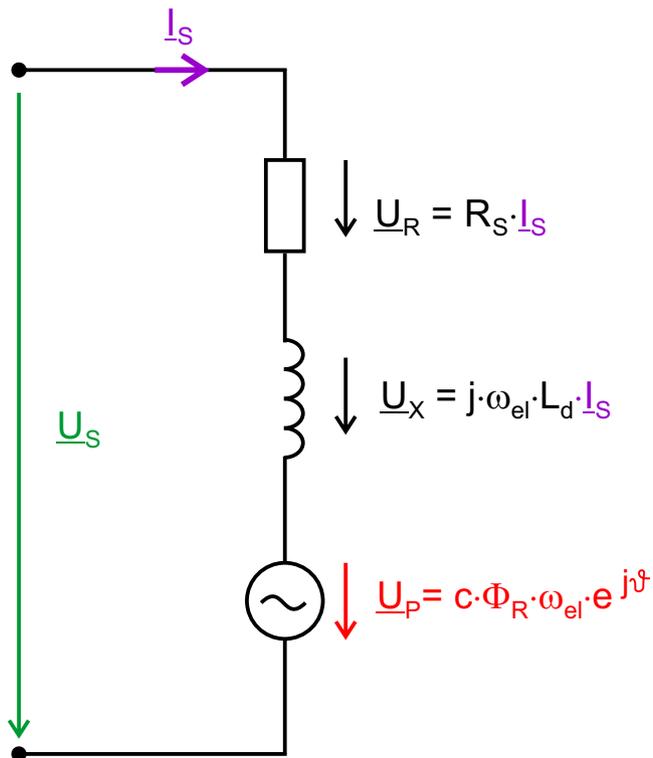
* Umgeformtes Ersatzschaltbild

- Serienschaltung von Spannungsquelle der Polradspannung U_p und Synchronreaktanz X_d
- Nachteil: Magnetisierungsstrom nicht sichtbar
- + Vorteil: einfaches Zeigerdiagramm

11.3 Ersatzschaltbild

Vergleich Synchronmaschine mit Gleichstrommaschine

Ersatzschaltbild



Synchronmaschine

Aufbau

- fremd- und Permanenterregung
- Erregung im Rotor (Polrad)
- Energiewandlung im Stator
- Kommutierung elektrisch

Induzierte Spannung

- Polradspannung U_P , "EMK"
- 3-Phasen-Wechselspannung
- Effektivwert: $U_P = c \cdot \Phi_R \cdot \omega_{el}$

Induktiver Spannungsfall

- Strom- und frequenzabhängig, benötigt Blindleistung entweder vom Netz oder aus der EMK

Gleichstrommaschine

Aufbau

- fremd- und Permanenterregung
- Erregung im Ständer
- Energiewandlung im Läufer (Anker)
- Kommutierung mechanisch

Induzierte Spannung

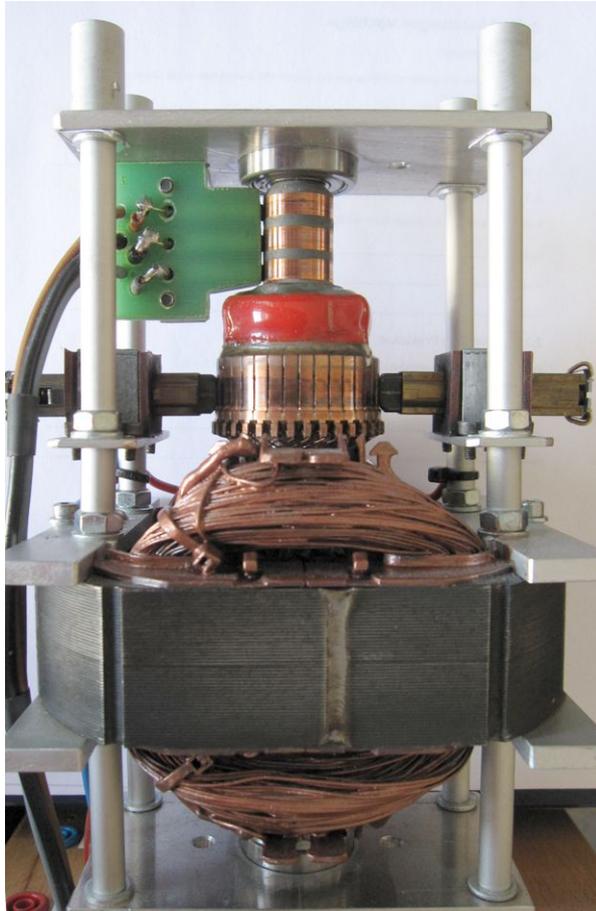
- U_{ind} , "EMK"
- Gleichspannung (an den Bürsten)
- Mittelwert: $U_{ind} = c \cdot \Phi \cdot \omega_{mech}$

Induktiver Spannungsfall

- stationär: $U_X = 0$
- transient: bei Stromänderung

11.3 Ersatzschaltbild

Umbau einer Gleichstrommaschine zu einer Synchronmaschine



G M

Originalmotor:
Reihenschlussmaschine
aus alter Waschmaschine

nicht vorhanden

Kommutator

Stator: Erregerwicklung

Rotor: Ankerwicklung

S M

nach Umbau: Betrieb als
fremderregte SM möglich
(Außenpolmaschine)

Schleifringe: Abgriff am
Kommutator mit 120° Versatz

ohne Funktion

Stator: Erregerwicklung
als stehendes Polrad
(Außenpolmaschine)

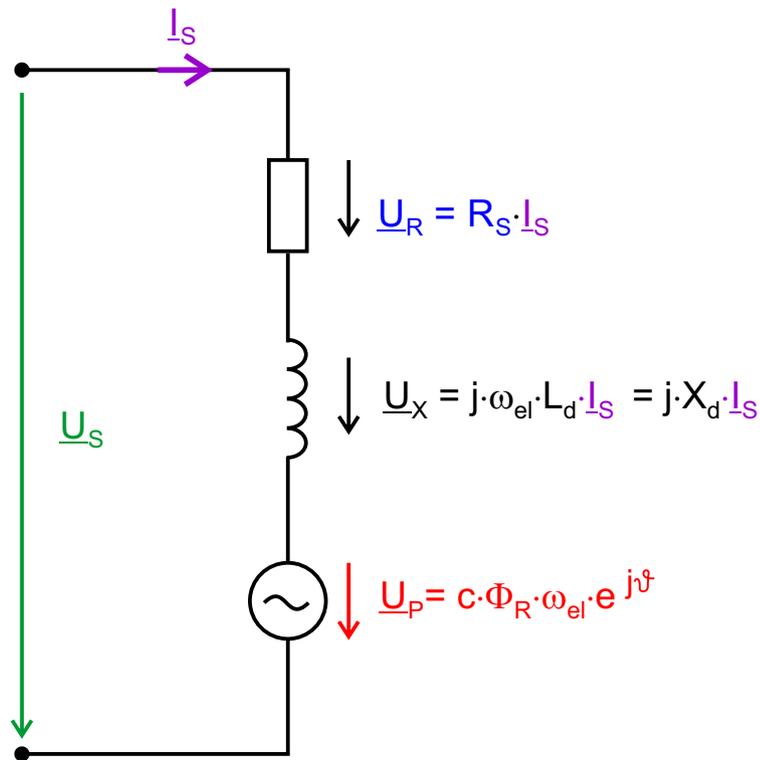
Rotor: Ankerwicklung
als Drehstromwicklung
in Dreieckschaltung

Bilde: A. Kleimaier / umgebaute Reihenschlussmaschine

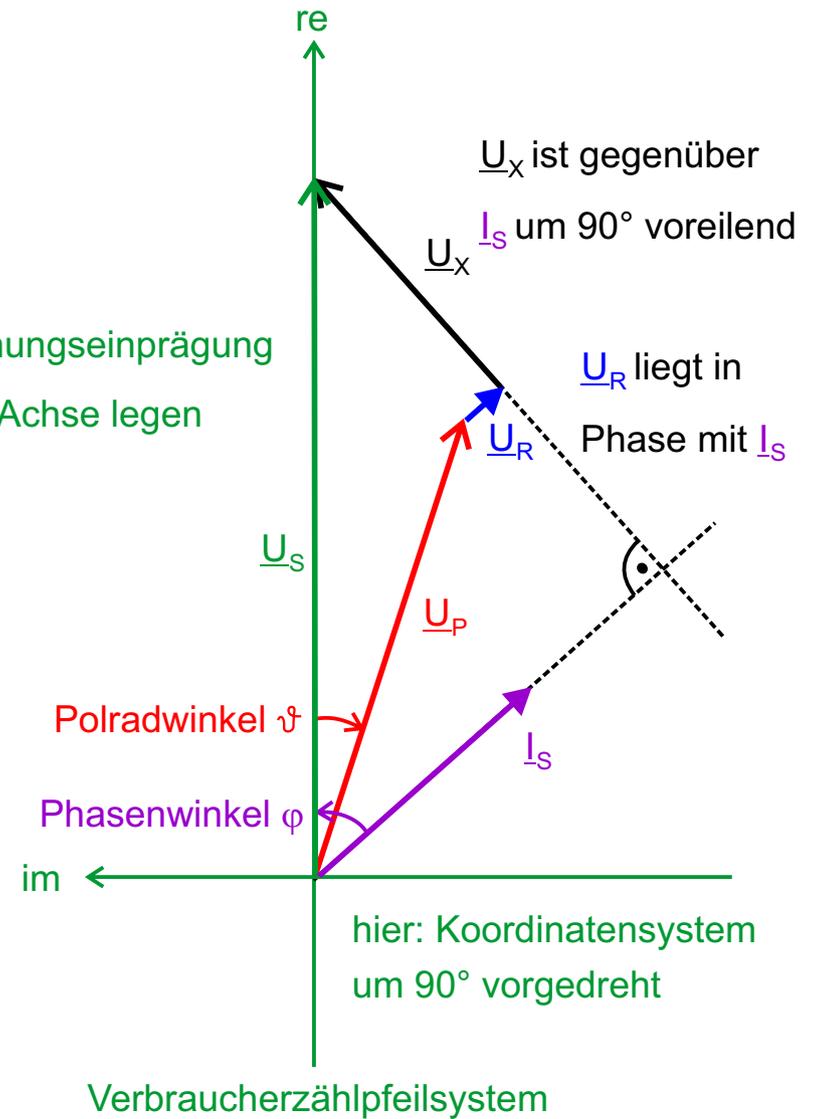
11.4 Zeigerdiagramm

Komplexe Wechselstromrechnung, Zeitzeiger

Spannungsgleichung: $\underline{U}_S = \underline{U}_R + \underline{U}_X + \underline{U}_P$



bei Spannungseinprägung
 \underline{U}_S auf re-Achse legen



11.5 Betrieb am starren Netz

Herleitung einer Beziehung für das Drehmoment

Netzbetrieb

- \underline{U}_S ist im Netzbetrieb gegeben
- \underline{U}_S liegt auf der re-Achse: $\underline{U}_S = U_S$

Wiederholung Grundlagen ET:

- $\underline{U}_S = U_S \cdot e^{j\varphi_U}$ (hier: $\varphi_U = 0^\circ$)
komplexer Spannungszeiger
Betrag (Länge) = Spannungseffektivwert

Ansatz: Vereinfachung

- $U_R = 0$ - d.h. keine Kupferverluste im Stator
- nur für große Maschinen zulässig
(Eisenverluste → Schleppmoment)

⇒ Innere Leistung P_i = Klemmenleistung P_{el}

$$\begin{aligned} &\uparrow \\ &M_i \cdot \omega_{mech} \\ &= M_i \cdot \omega_{el} / p \end{aligned}$$

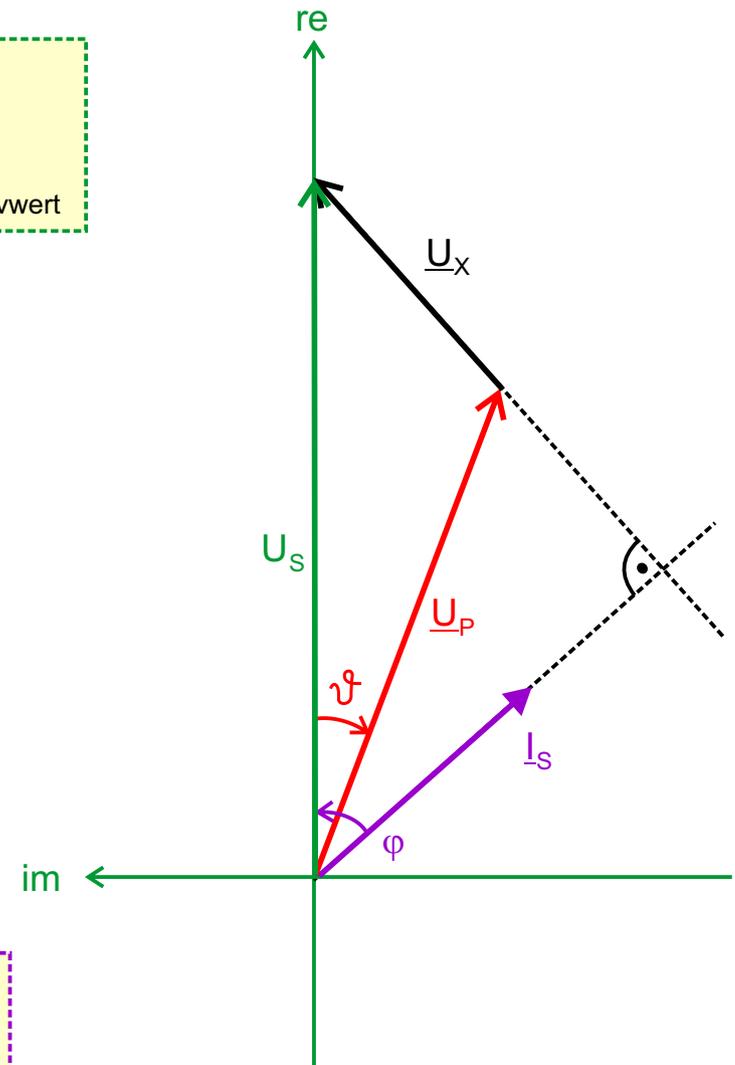
$$\begin{aligned} &\uparrow \\ &3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi \\ &= 3 \cdot U_S \cdot \operatorname{re} \{ \underline{I}_S \} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow M_i = \frac{3 \cdot p}{\omega_{el}} \cdot U_S \cdot \operatorname{re} \{ \underline{I}_S \}$$

- $\operatorname{re} \{ \underline{I}_S \} = ?$

Wiederholung Grundlagen ET:

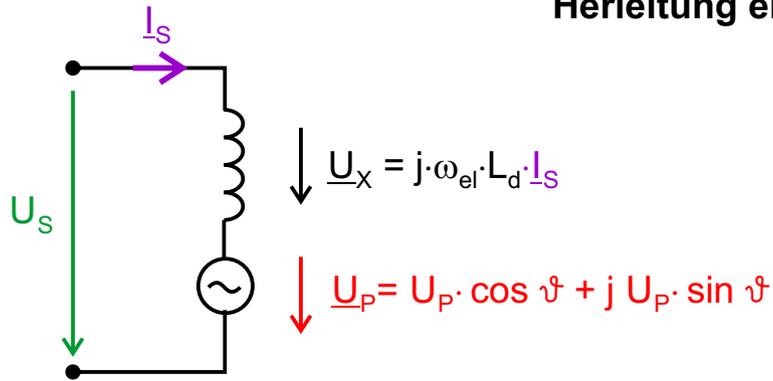
- $\underline{I}_S = I_S \cdot e^{-j\varphi} = I_S \cdot \cos \varphi - j I_S \cdot \sin \varphi$



Verbraucherzählpfeilsystem

11.5 Betrieb am starren Netz

Herleitung einer Beziehung für das Drehmoment



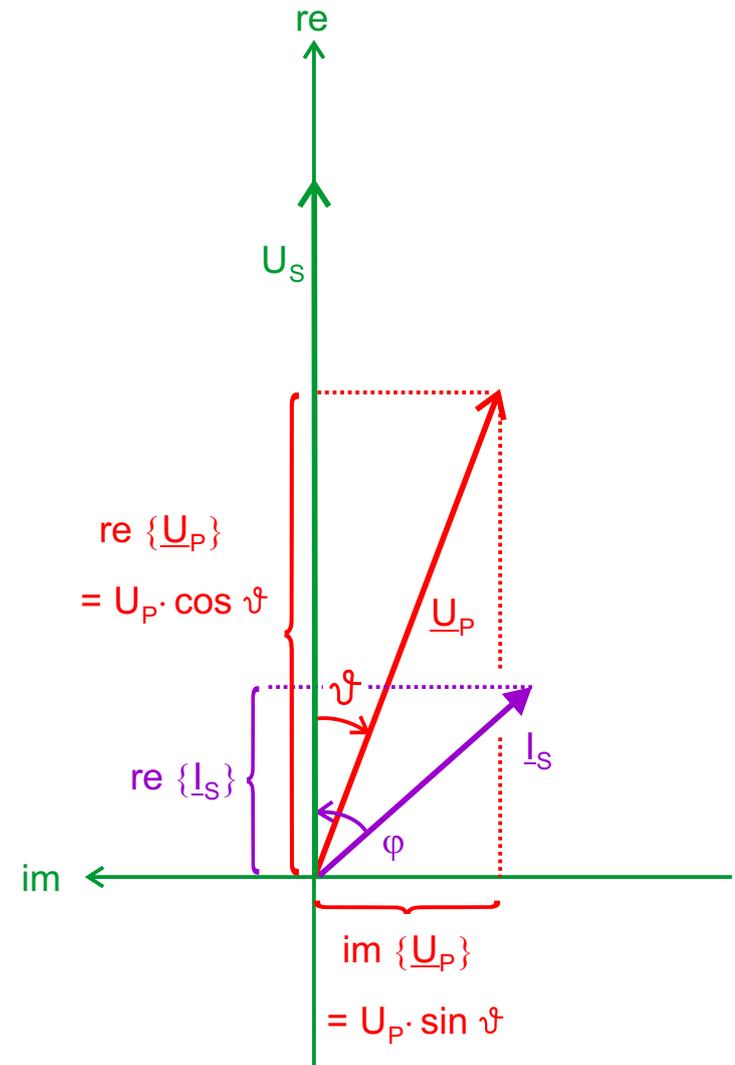
aus ESB: $\underline{U}_x = j \cdot \omega_{el} \cdot L_d \cdot \underline{I}_s = U_s - \underline{U}_p$

Grundl. ET:
 $\frac{1}{j} = \frac{j}{j^2} = -j$

daraus: $\underline{I}_s = \frac{U_s - \underline{U}_p}{j \cdot \omega_{el} \cdot L_d} = -j \frac{U_s}{\omega_{el} \cdot L_d} + j \frac{\underline{U}_p}{\omega_{el} \cdot L_d}$

$$= -j \frac{U_s}{\omega_{el} \cdot L_d} + j \frac{U_p \cdot \cos \vartheta}{\omega_{el} \cdot L_d} - \underbrace{\frac{U_p \cdot \sin \vartheta}{\omega_{el} \cdot L_d}}_{\text{re } \{ \underline{I}_s \}}$$

$M_i = \frac{3 \cdot p}{\omega_{el}} \cdot U_s \cdot \text{re } \{ \underline{I}_s \} \Rightarrow M_i = - \frac{3 \cdot p}{\omega_{el}^2 \cdot L_d} \cdot U_s \cdot U_p \cdot \sin \vartheta$



11.5 Betrieb am starren Netz

Alternative Herleitung im dq-System

Rotorflussverkettung mit Phase U:

$$\Phi_{R,U}(t) = c_R \cdot \Phi_R \cdot \cos(\omega t)$$

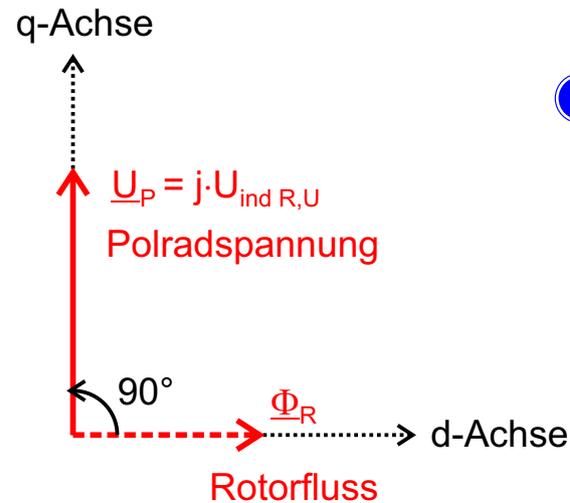
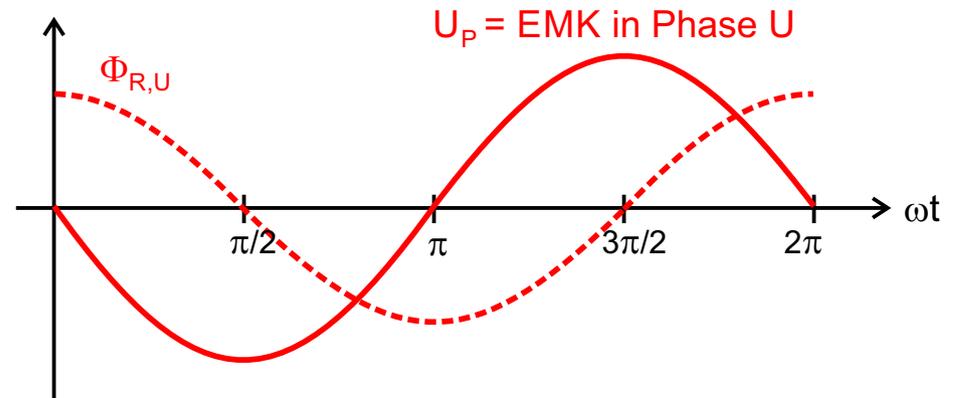
Induktion in Strangwicklung Phase U:

$$\begin{aligned} U_{\text{ind } R,U}(t) &= d\Phi_{R,U}(t) / dt \\ &= c_R \cdot \Phi_R \omega \cos(\omega t + \pi/2) \\ &= U_P \cdot \cos(\omega t + \pi/2) \end{aligned}$$

Polradspannung bzw. EMK:

Scheitelwert: $U_P = U_{\text{ind } R,U} = c_R \cdot \Phi_R \omega$

Zeiger: \underline{U}_P ist $\underline{\Phi}_R$ um 90° voreilend



i Genau genommen arbeiten wir im dq-System nicht mit **Zeitzeigern**, sondern mit **Raumzeigern**. Mehr dazu in der Mastervorlesung.

11.5 Betrieb am starren Netz

Alternative Herleitung im dq-System

Leistungsbilanz

- Wirkleistungsaustausch Stator \leftrightarrow Rotor:

Stromkomponente I_q parallel zu \underline{U}_P

- Blindleistungsaustausch Stator \leftrightarrow Rotor:

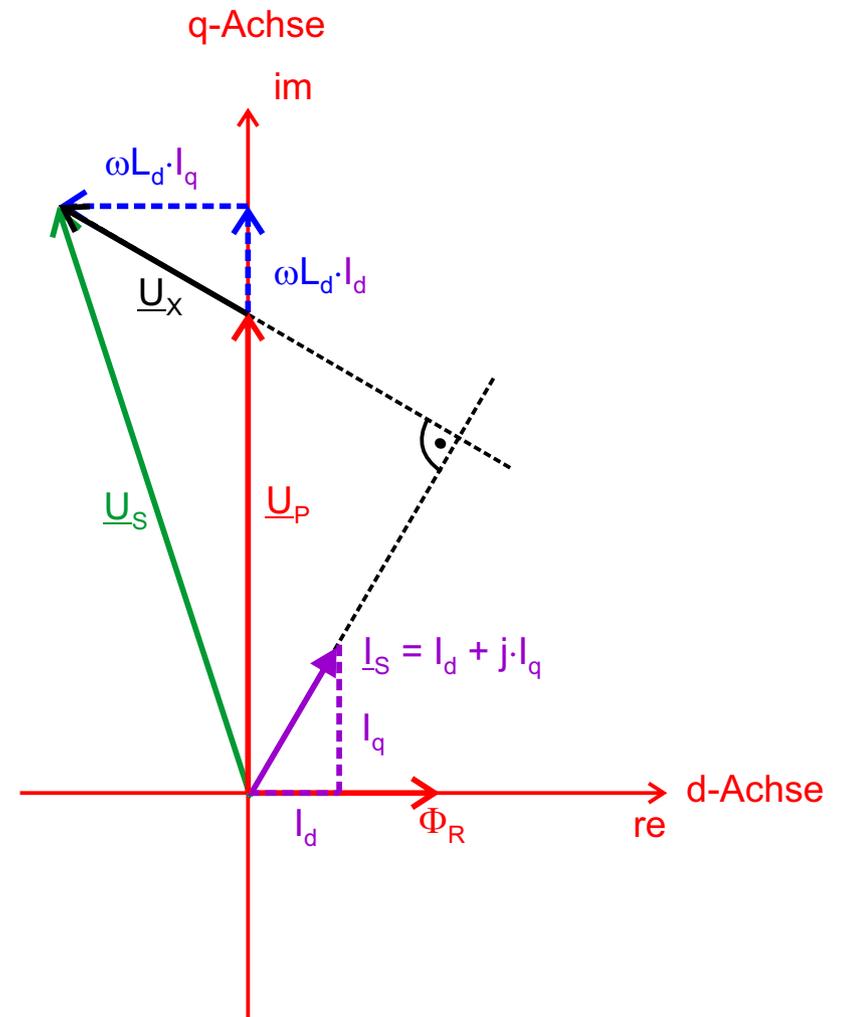
Stromkomponente I_d senkrecht zu \underline{U}_P

Betrieb mit Stromregelung

- Rechnung im d-q-System
- Elektromech. Energiewandlung, U_P und I_q Effektivwerte:

$$M_i \cdot \omega_{\text{mech}} = 3 \cdot U_P \cdot I_q \Rightarrow M_i = \frac{3 p}{\omega_{\text{el}}} U_P \cdot I_q$$

- Das Synchronmoment ist direkt proportional zu I_q



11.5 Betrieb am starren Netz

Alternative Herleitung im dq-System

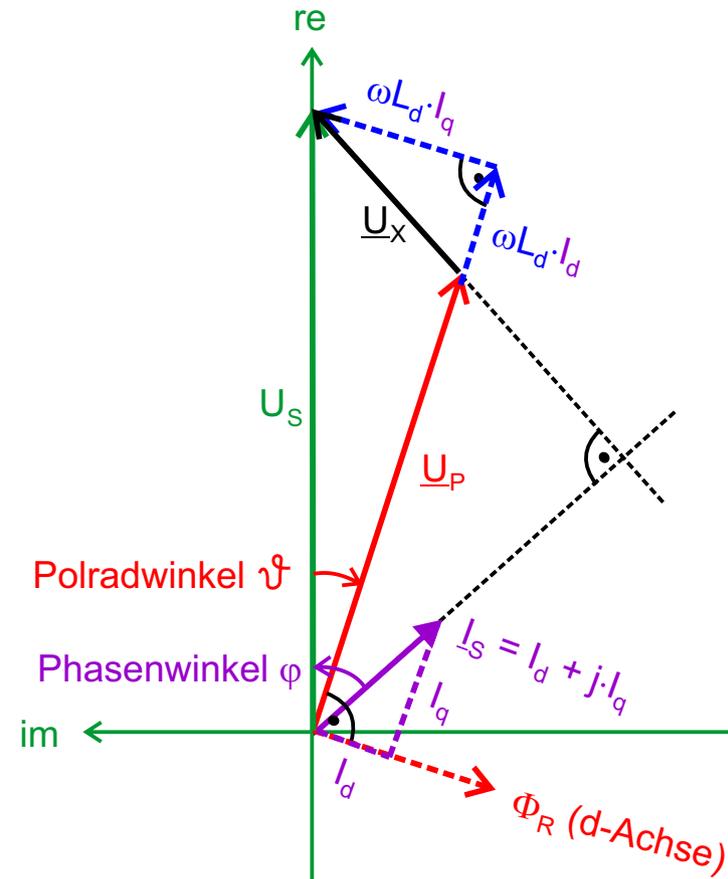
Einprägung der Spannung durch das Netz

- Bezugsgröße ist die Statorspannung U_S
- ⇒ Koordinatensystem auf U_S ausrichten
Koordinatensystem ist so gedreht,
dass \underline{U}_S reell wird
- Polradwinkel ϑ und Phasenwinkel φ stellen
sich belastungs- und erregestromabhängig ein
- Drehmoment für Netzbetrieb; U_S , U_P und I_q Effektivwerte:

$$\text{dq-System: } M_i = \frac{3 p}{\omega_{el}} \cdot U_P \cdot I_q$$

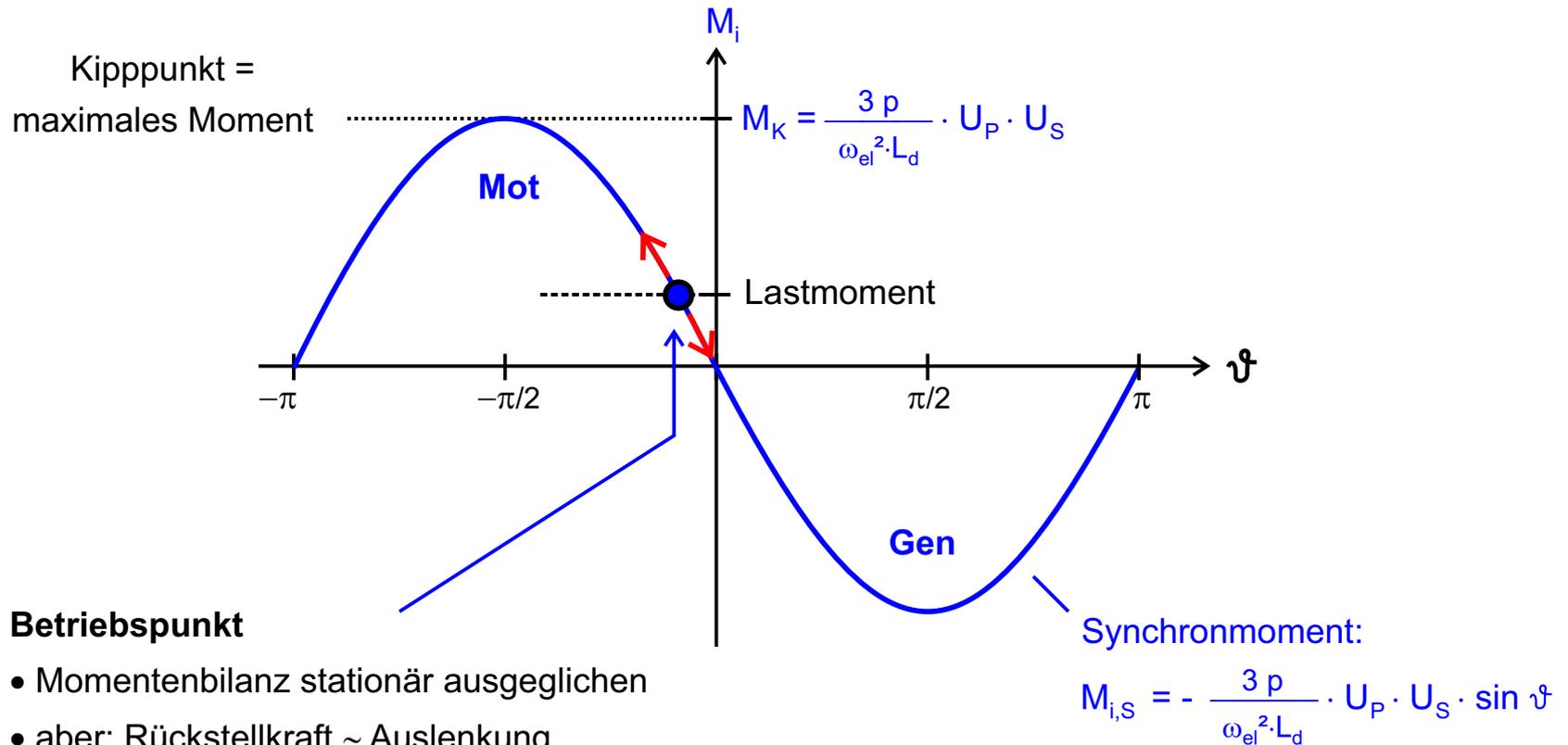
- aus Zeigerdiagramm: $-U_S \cdot \sin \vartheta = \omega_{el} L_d \cdot I_q$

$$\Rightarrow M_i = - \frac{3 p}{\omega_{el}^2 \cdot L_d} \cdot U_P \cdot U_S \cdot \sin \vartheta$$



11.5 Betrieb am starren Netz

Drehmoment über Polradwinkel bei der Vollpolmaschine



Betriebspunkt

- Momentenbilanz stationär ausgeglichen
- aber: Rückstellkraft ~ Auslenkung
⇒ schwingfähiges System
⇒ Abhilfe: **Dämpferwicklung** (ASM-Kurzschlusskäfig in das Polrad integriert)

- ① mit dem Dämpferkäfig ist ggf. ein asynchroner Hochlauf am Netz möglich.
Maschine wird nach Einschalten der Erregung in den Synchronismus gezogen.

11.5 Betrieb am starren Netz

Generatorbetrieb Vollpolmaschine, untererregt

- **Erregung**

so eingestellt, dass $U_P < U_S$

- **Wirkleistung**

$$P = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi$$

$$\varphi > 90^\circ$$

$\Rightarrow \cos \varphi$ und damit P negativ,
Abgabe von Wirkleistung

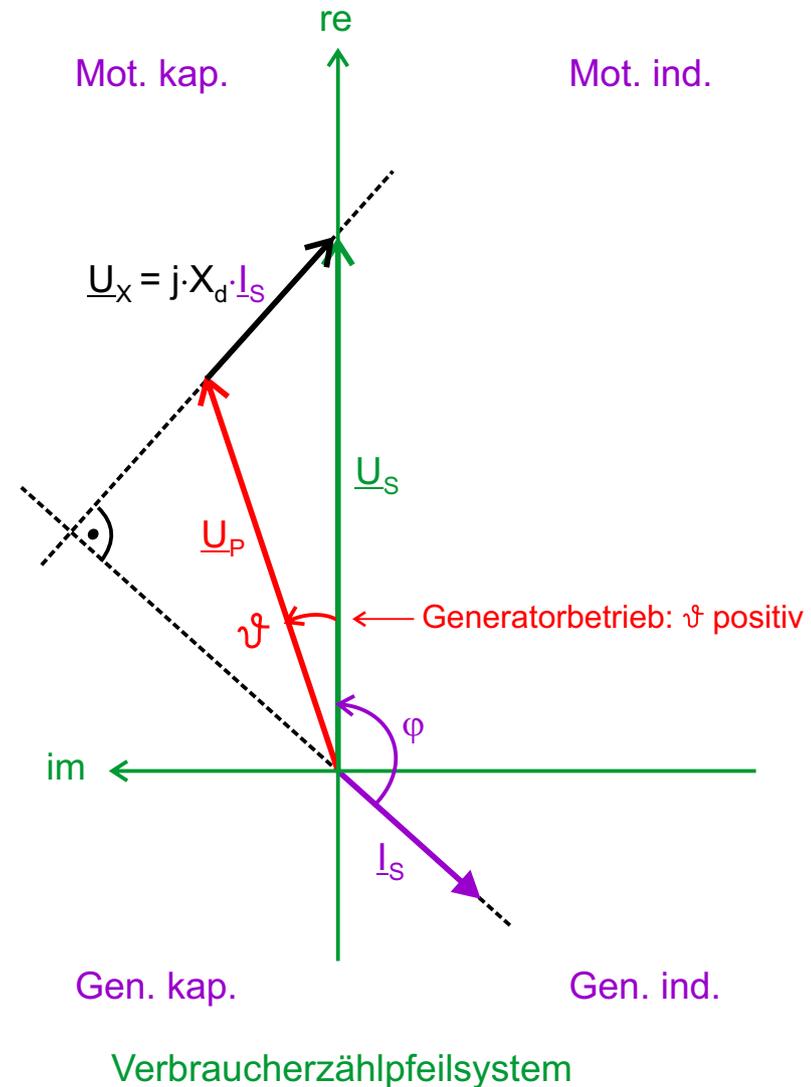
- **Blindleistung**

$$Q = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \sin \varphi$$

$$\varphi < 180^\circ$$

$\Rightarrow \sin \varphi$ und damit Q positiv
Aufnahme von ind. Blindleistung

Generatorbetrieb induktiv



11.5 Betrieb am starren Netz

Generatorbetrieb Vollpolmaschine, übererregt

- **Erregung**

so eingestellt, dass $U_p > U_s$

- **Wirkleistung**

$$P = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi$$

$$\varphi > 90^\circ$$

$\Rightarrow \cos \varphi$ und damit P negativ,
Abgabe von Wirkleistung

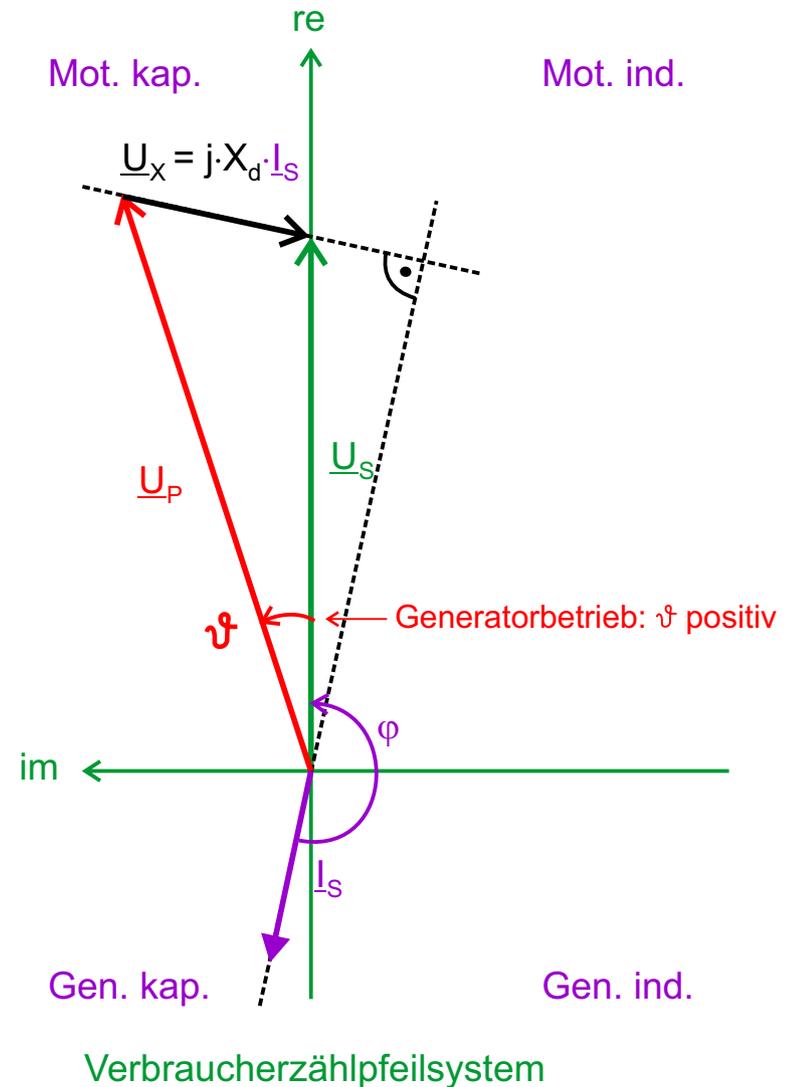
- **Blindleistung**

$$Q = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi$$

$$\varphi > 180^\circ$$

$\Rightarrow \sin \varphi$ und damit Q negativ,
Abgabe von ind. Blindleistung

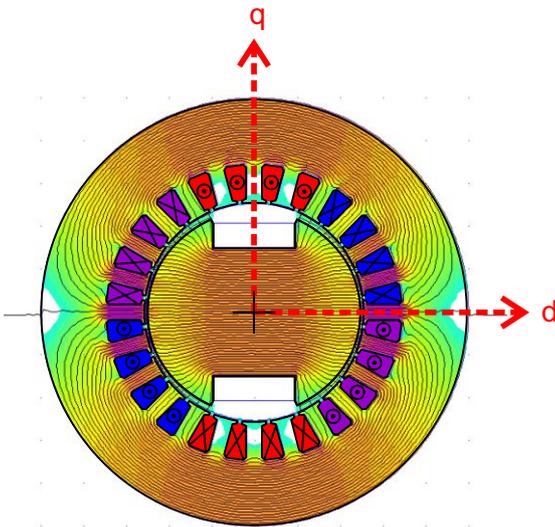
Generatorbetrieb kapazitiv



11.6 Schenkelpolmaschine

Verhalten des Schenkelpollläufers im Statorfeld

- Stator bestromt, $\omega \cdot t = 0^\circ$
 - Rotor unbestromt
- Ausrichtung parallel Statorfluss

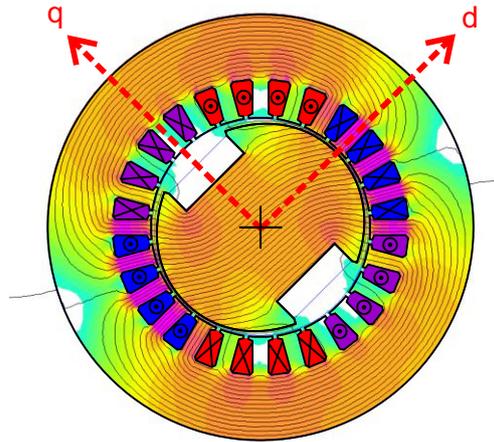


Induktivität

Statorkreis: $L_S = L_d = \max.$

Stabile Lage

- Stator bestromt, $\omega \cdot t = 0^\circ$
 - Rotor unbestromt
- Ausrichtung 45° zu Statorfluss



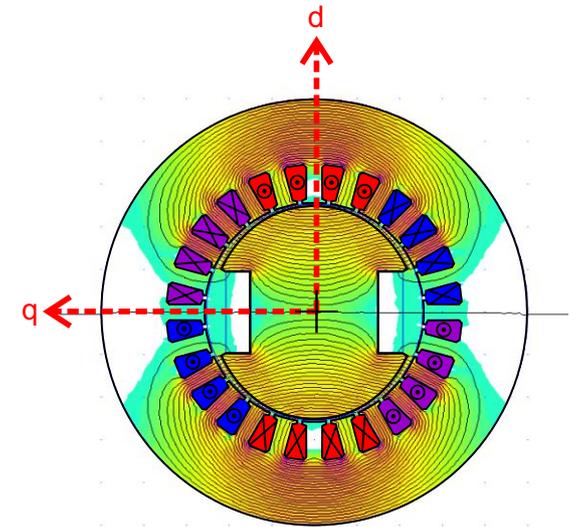
Induktivität

Statorkreis: $L_S = \frac{1}{2}(L_d + L_q)$

Rückstellmoment

= Reluktanzmoment

- Stator bestromt, $\omega \cdot t = 0^\circ$
 - Rotor unbestromt
- Ausrichtung senkrecht Statorfluss



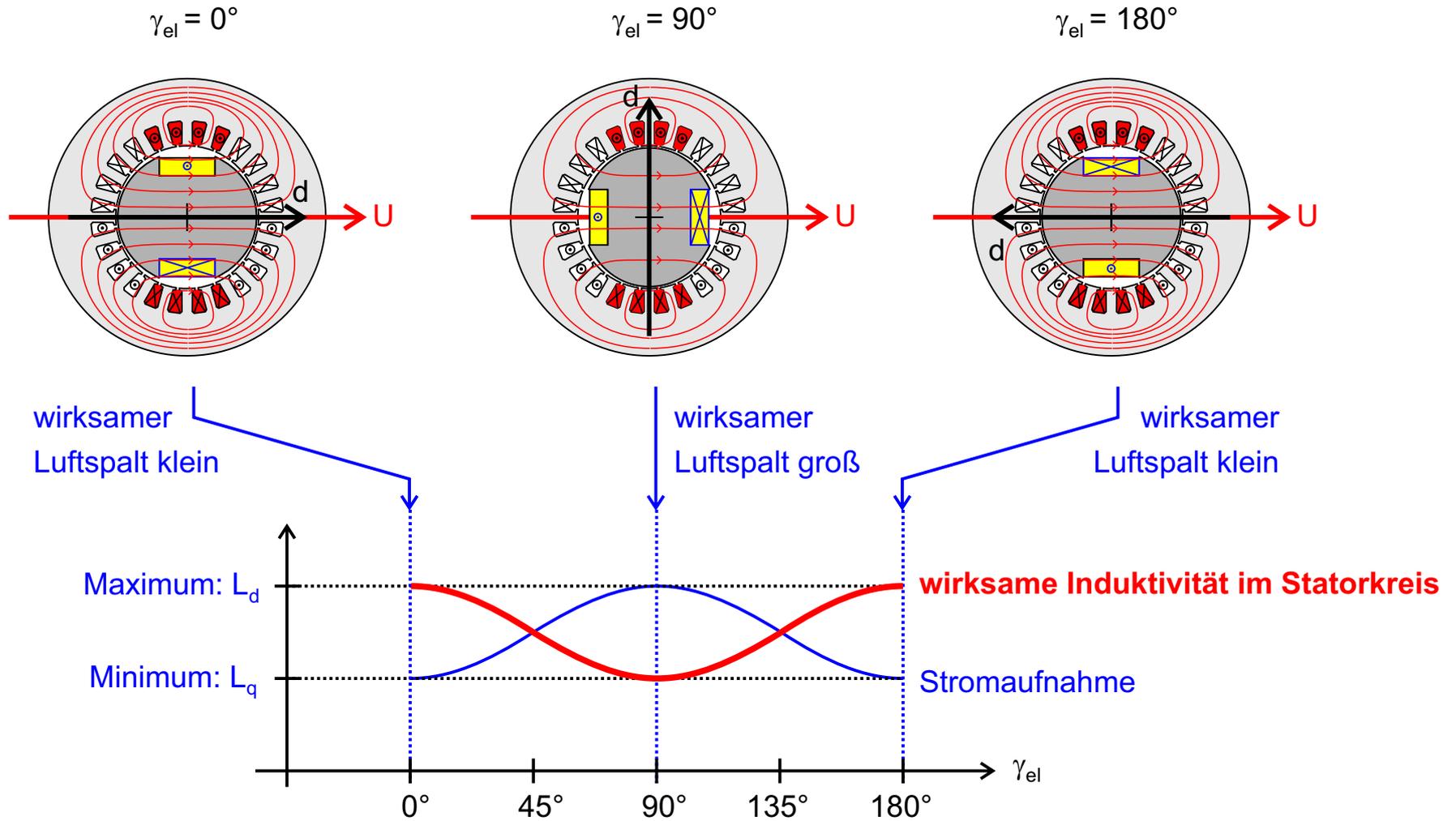
Induktivität

Statorkreis: $L_S = L_q = \min.$

Metastabile Lage

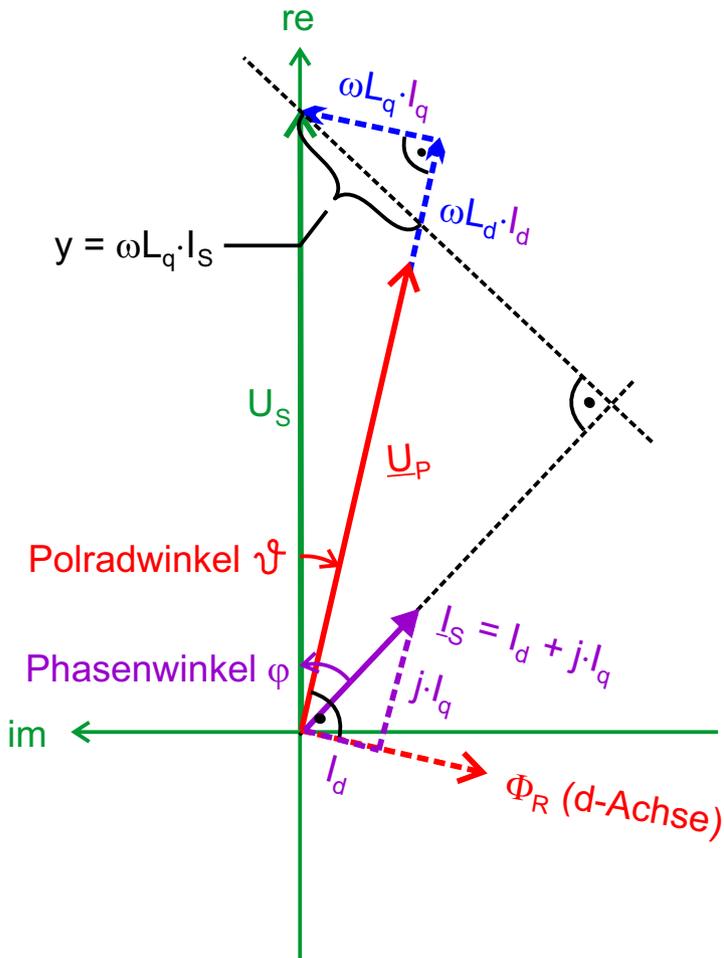
11.6 Schenkelpolmaschine

Verhalten des Schenkelpolläufers im Statorfeld



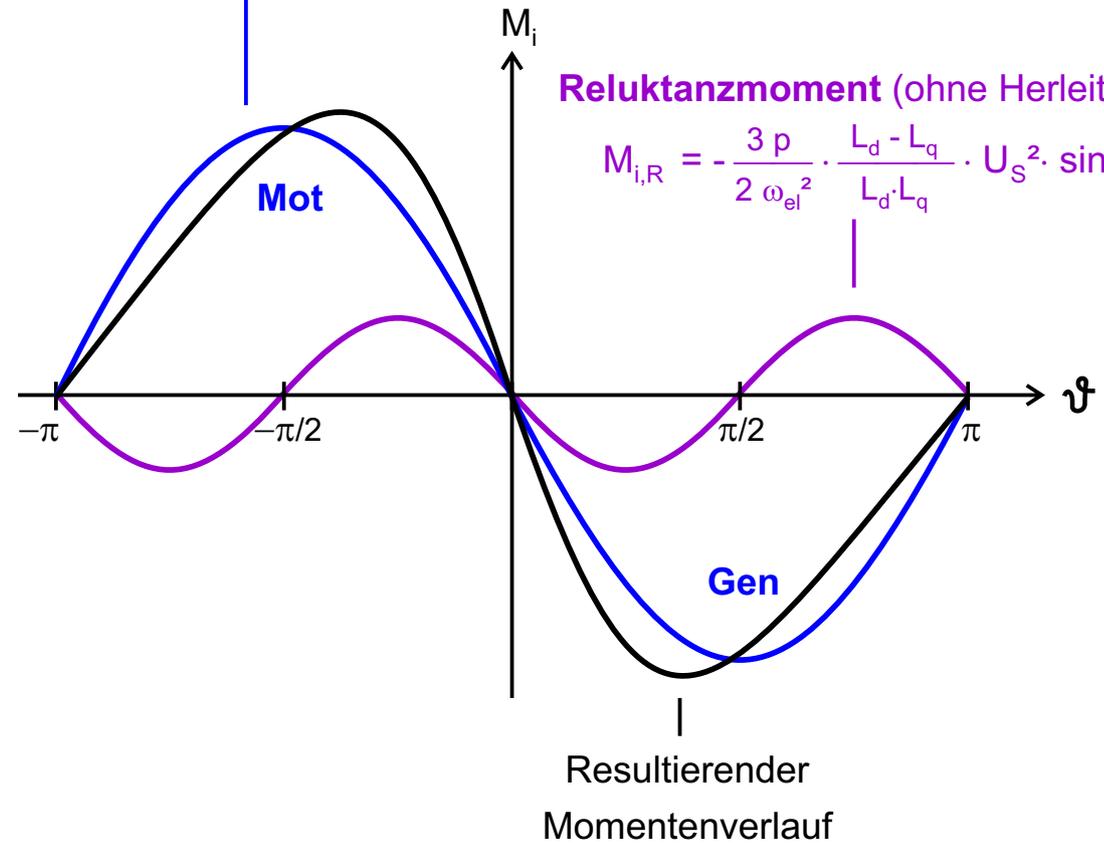
11.6 Schenkelpolmaschine

Drehmoment über Polradwinkel bei der Schenkelpolmaschine



Synchronmoment:

$$M_{i,S} = -\frac{3p}{\omega_{el}^2 \cdot L_d} \cdot U_P \cdot U_S \cdot \sin \psi$$



Reluktanzmoment (ohne Herleitung):

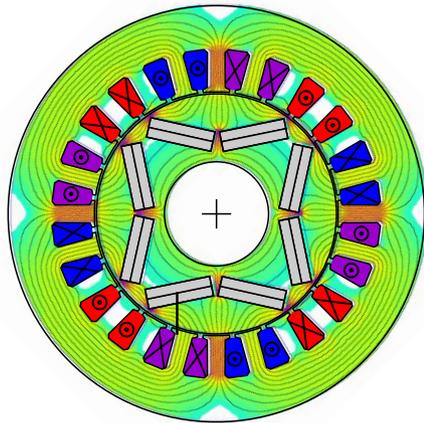
$$M_{i,R} = -\frac{3p}{2 \omega_{el}^2} \cdot \frac{L_d - L_q}{L_d \cdot L_q} \cdot U_S^2 \cdot \sin 2\psi$$

Resultierender Momentenverlauf

11.7 PMSM mit vergrabenen Magneten

Auch die PMSM mit vergrabenen Magneten erzeugt ein Reluktanzmoment

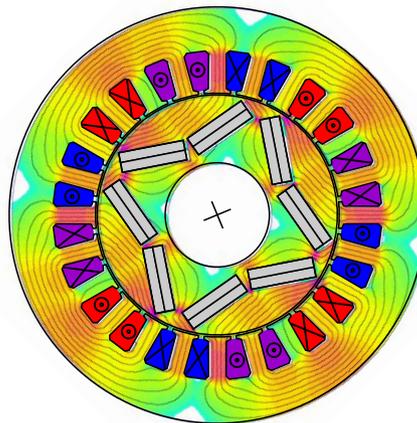
- Stator bestromt
- ohne Magneten im Rotor
Ausrichtung parallel Statorfluss



Induktivität

Statorkreis: $L_S = L_d = \min.$
Magnet-Ausschnitte wirken
als Flussbarrieren

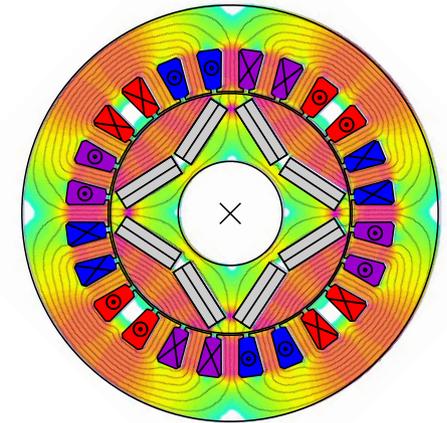
- Stator bestromt
- ohne Magneten im Rotor
Ausrichtung 45° zu Statorfluss



Induktivität

Statorkreis: $L_S = \frac{1}{2}(L_d + L_q)$
Rückstellmoment
= Reluktanzmoment

- Stator bestromt
- ohne Magneten im Rotor
Ausrichtung senkrecht Statorfluss

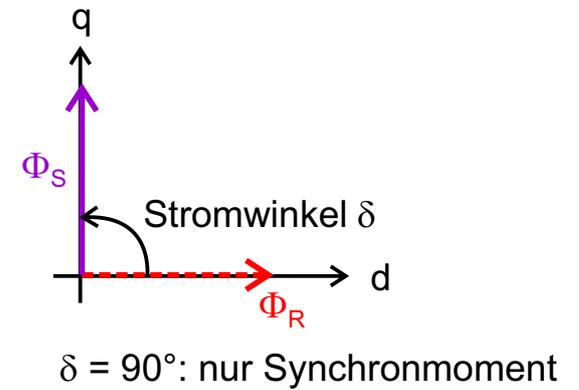
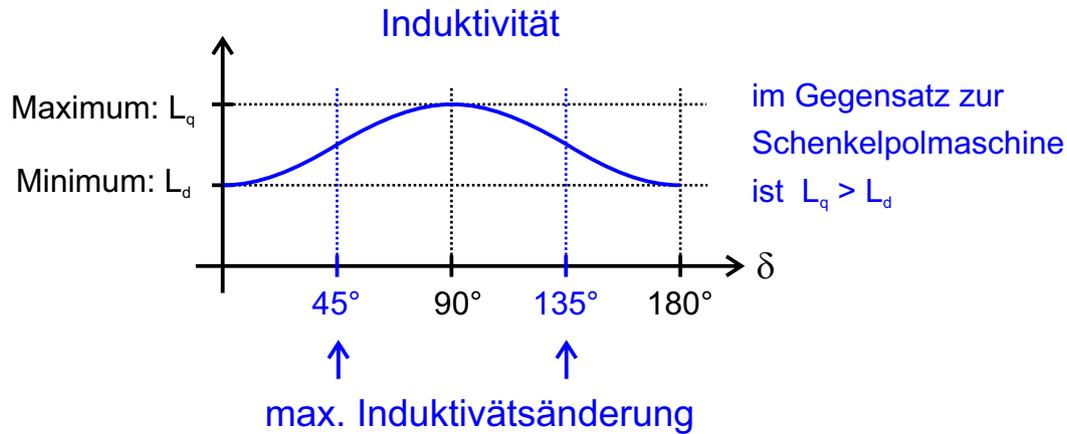


Induktivität

Statorkreis: $L_S = L_q = \max.$
stabile Lage

11.7 PMSM mit vergrabenen Magneten

Exkurs: Betrieb mit Stromregelung im dq-System

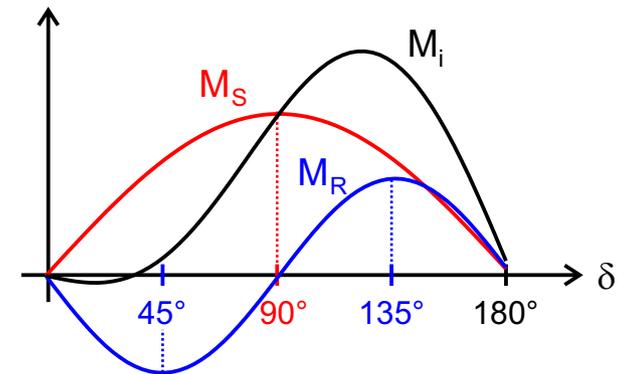
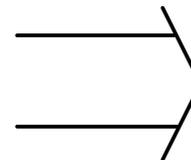


$$M_i = \underbrace{\frac{3p}{2\pi} \cdot k_{EMK} \cdot I_q}_{\text{Synchronmoment } M_S} + \underbrace{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_q \cdot I_d}_{\text{Reluktanzmoment } M_R}$$

ohne Herleitung

siehe Seite 16

Mehr dazu siehe Mastervorlesung



Drehmomentoptimum für $\delta > 90^\circ$

11.8 Antriebssysteme mit Synchronmaschinen

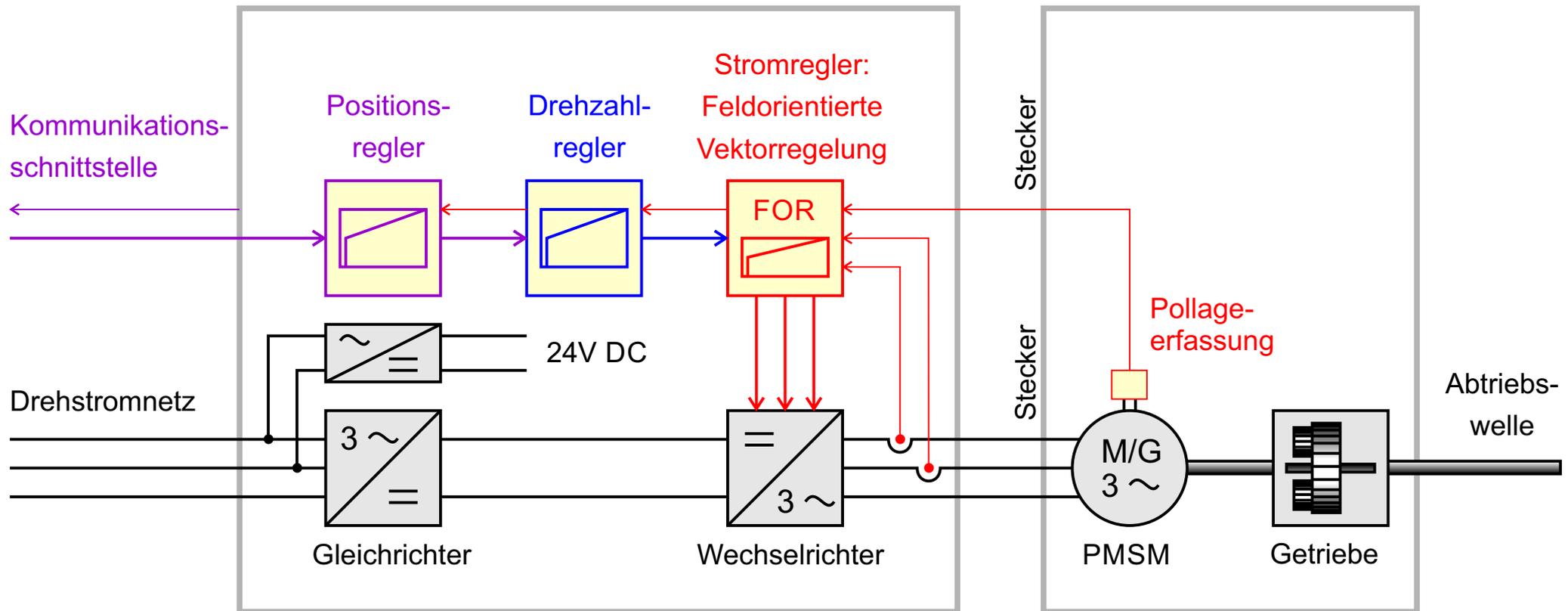
Maschine / Antrieb Typ. Einsatzgebiet	Bestromung Betriebsart	Steuerung Regelung
FSM / Feste Drehzahl Kesselspeisepumpe, Pumpspeicherkraftwerk	Hochlauf über Dämpferwicklung, Hochschleppen mit Zusatzmaschine Betrieb am starren Netz	Hochfahren / Betrieb / Stillstand
Schrittmotorantrieb Positionier-Kleinantrieb	el. Schrittmotoransteuerung Drehwinkelsteuerung	Gesteuert Pol für Pol Vor- bzw. Rückdrehen
Klein-PMSM / Drehzahlsteuerung Lüfter, Pumpen, Propeller	Wechselrichter / Motor Controller Betrieb als BLDC-Motor	Elektronische Kommutierung mit Halbleitern für Pollageerfassung
PMSM / Drehmomenteinprägung Traktionsantrieb	Drehstromwechselrichter drehzahlvariabler Betrieb	Feldorientierte Vektorregelung mit Strom- und Pollageerfassung
PMSM / Servoantrieb, Lageregelung Robotik, Automation	Drehstromwechselrichter drehzahlvariabler Betrieb	Feldorientierte Vektorregelung mit Strom- und Pollageerfassung

11.8 Antriebssysteme mit Synchronmaschinen

Blockschaltbild Servoantrieb

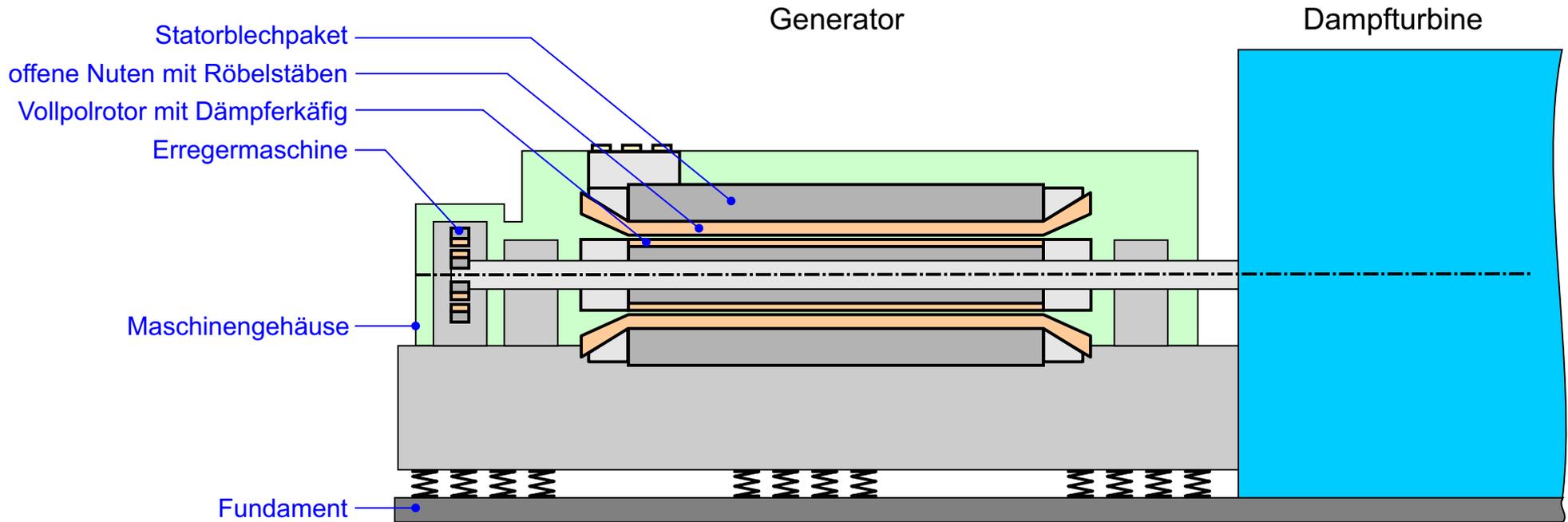
Frequenzumrichter
(Motorcontroller, Motioncontroller)

Motor mit Lagegeber,
ggf. mit Bremse / Getriebe



11.9 Ausführungsbeispiele

Turbogenerator



- Nennspannungen: • 20..30kV
- Wirkungsgrade: • bis 99%
- Kühlung: • Wasserstoff bzw. Wasser/Hohlleiter
- Erregung: • fremderregt, Ströme bis über 10kA
- Leistungen bis einige MW
- bürstenlos (ohne Schleifringe)

Vollpolläufer 2-polig, $N_{\text{Syn}} = 3000\text{Upm}$

- $D_{\text{max}} = \text{um } 1250\text{mm} \Rightarrow \text{sehr lange Maschinen}$
- $P_{\text{Grenz}} \approx 1000..1200 \text{ MVA}$

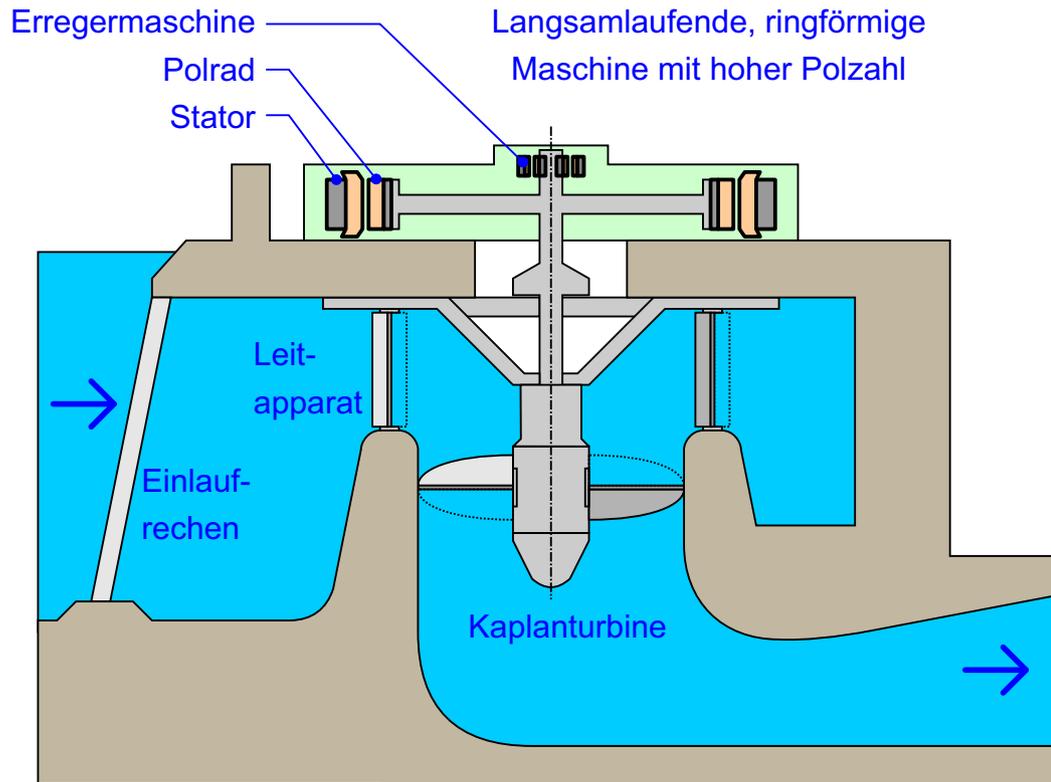
Vollpolläufer 4-polig, $N_{\text{Syn}} = 1500\text{Upm}$

- $P_{\text{Grenz}} \approx 1800..2000 \text{ MVA}$

11.9 Ausführungsbeispiele

Schenkelpolmaschine Laufwasserkraftwerk

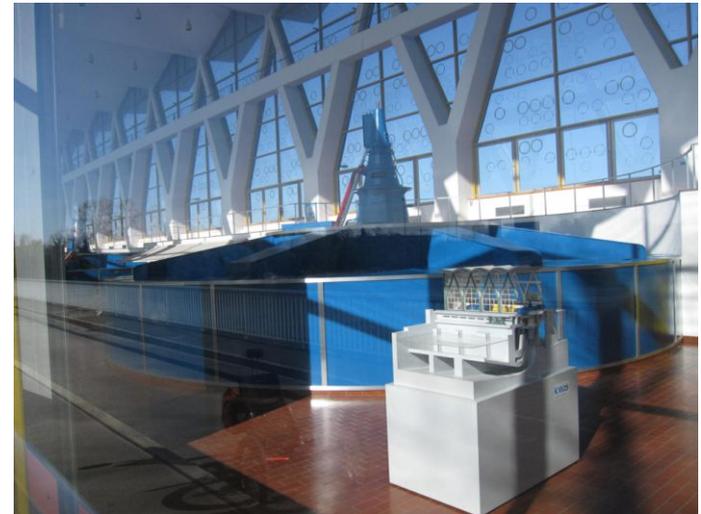
klassische, vertikale Anordnung:



Beispiel: KW Birsfelden

Ausbauwassermenge: 1500m³/s
Fallhöhe: 6.8m (durchflussabhängig) } 100MW

4 Maschinen mit je 30.8MVA
 $p = 44$, $N_{SYN} = 68.2\text{Upm}$

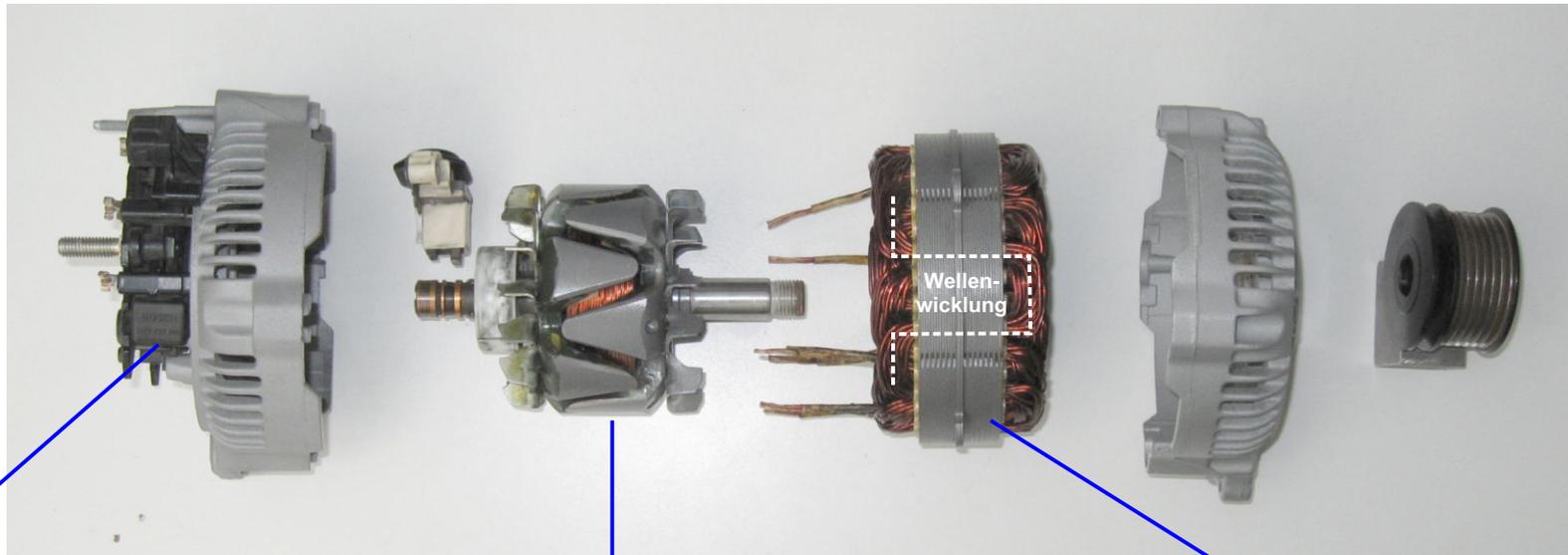


Alternative Bauformen: Rohrturbine, Strafloturbine

Bild: A. Kleimaier

11.9 Ausführungsbeispiele

Kfz-Lichtmaschine



Gehäuse mit Regler und Schleifringhalter

- Drehzahlbereich ca. 2000..16000Upm
- Diodengleichrichter (B6-Brücke) \Rightarrow 14V DC
- Spannungsregelung durch Nachführen des Erregerstroms

Polrad: Ringspule mit Klauenpolen

- Ringspule mit axialem Feld
- Bestromung über Schleifringe
- Flussführung durch Klauenpole (Vollmaterial)
- je 6 Klauen für 6 Nord/Südpole

Stator: Drehfeldwicklung

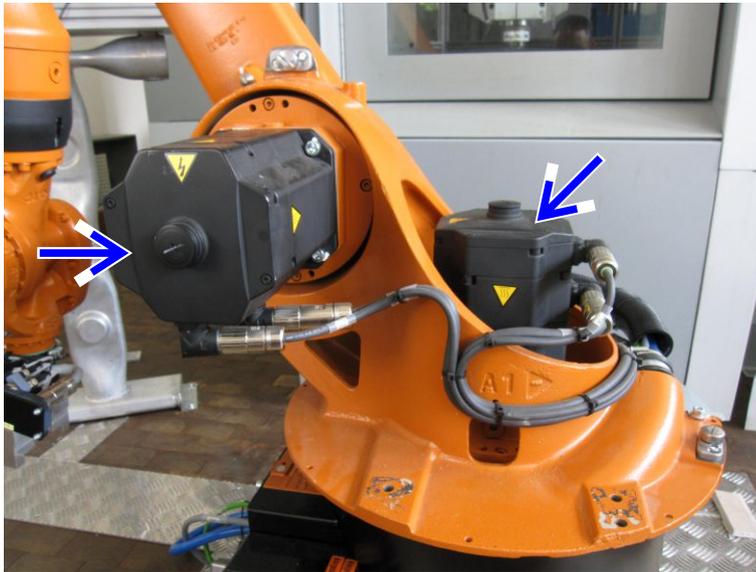
Ständerblechpaket mit Nuten

- Anzahl Nuten: $Q = 36$
- Strangzahl: $m = 3$
- Polpaarzahl: $p = 6$
- Nuten pro Pol und Strang: $q = 1$

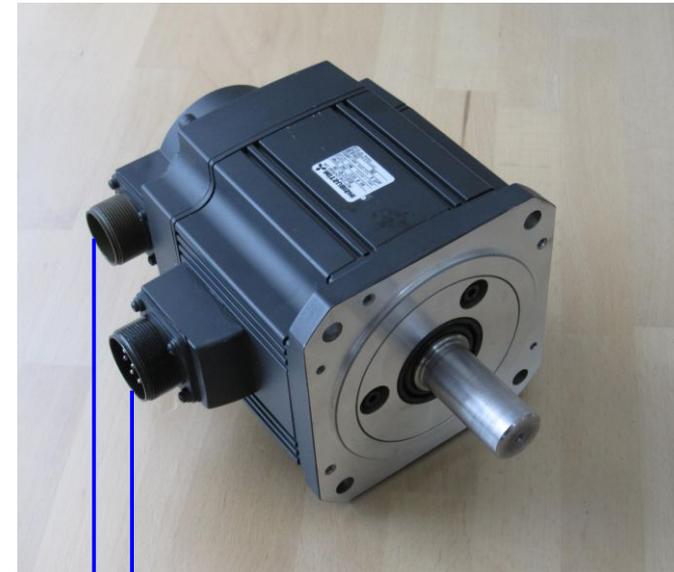
Bilder: A. Kleimaier, HS Landshut

11.9 Ausführungsbeispiele

Servomotoren in der Automatisierungstechnik



- Ausführung als PMSM
- Betrieb mit Umrichter und Vektorregelung
- Leistungen bis ca. 100kW
- im Vergleich zur ASM:
 - höhere Drehmomentausbeute, leichter
 - aber auch: teurer



Hier: 1kW 2000Upm 4.8Nm

Phasen U-V-W
ggf. Bremse 24V

Winkelgeber
(Encoder/Resolver)

Bilder: A. Kleimaier, HS Landshut

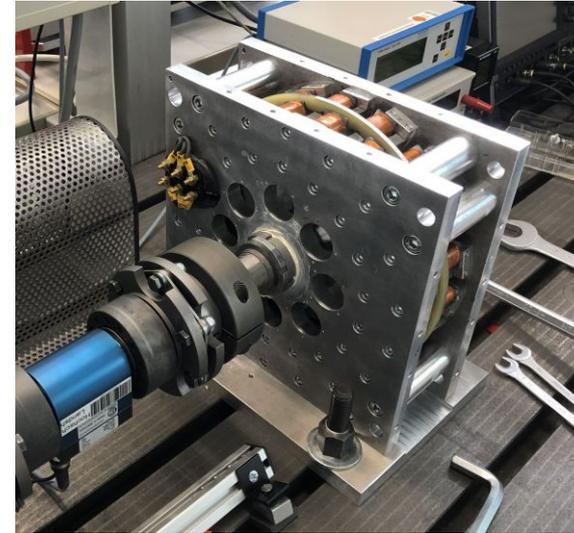
11.9 Ausführungsbeispiele

Traktionsmotoren für Elektrostraßenfahrzeuge



Traktionsmotor des Nissan Leaf

- IPMSM mit Getriebe und Differential
- Hier: Einbausituation im eMG (Prof. Prexler)
- Gewicht mit Gehäuse: 56 kg
- Maximaldrehmoment: 280 Nm
- Dauerleistung: 80 kW



AxMDM der HS Landshut

- Axialflussmaschine mit Scheibenläufer
- Funktionsmuster, noch kein Fahrzeugeinsatz
- Gewicht ohne Grundplatte: 27 kg
- Maximaldrehmoment: 320 Nm
- Dauerleistung: aktuell ca. 40 kW

Bild: A. Kleimaier, HS Landshut