

Energietechnik

Inhalt des Vorlesungsteils

I Elektrische Energiewandler

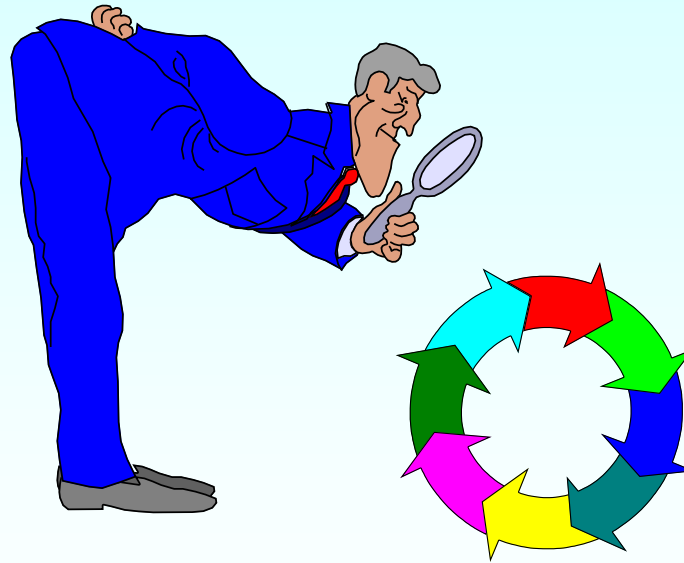
Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

Repetitorium: Grundlagen der Elektrotechnik

1. Elektrische Energiewandlung - Einführung
2. Transformatoren
3. Gleichstrommaschinen
- 4. Drehfeldmaschinen**



4. Drehfeldmaschinen

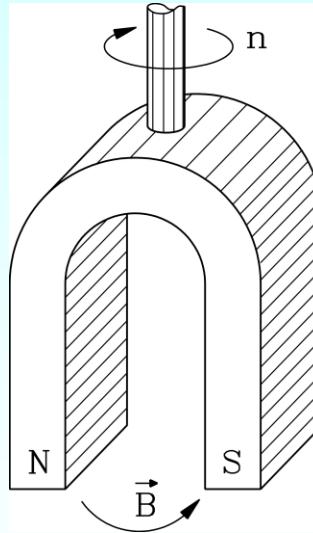


4. Drehfeldmaschinen

- 4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds
- 4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds
- 4.3 Drehfrequenz des Drehfelds
- 4.4 Asynchronmaschinen
- 4.5 Synchronmaschinen
- 4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (kein Prüfungsstoff!)

Was ist ein magnetisches Drehfeld ?

- Ein magnetisches Drehfeld ist ein **rotierendes** Magnetfeld. Während bei der Gleichstrommaschine das Magnetfeld räumlich still steht, rotiert es bei der **Synchron- und Asynchronmaschine** mit einer festen Drehzahl, der synchronen Drehzahl.
- Ein einfaches rotierendes Magnetfeld ist das eines drehenden **Hufeisenmagneten**.

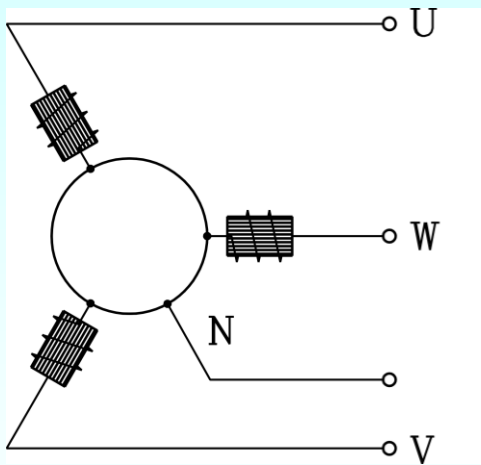


Quelle: Schreiner, Physik

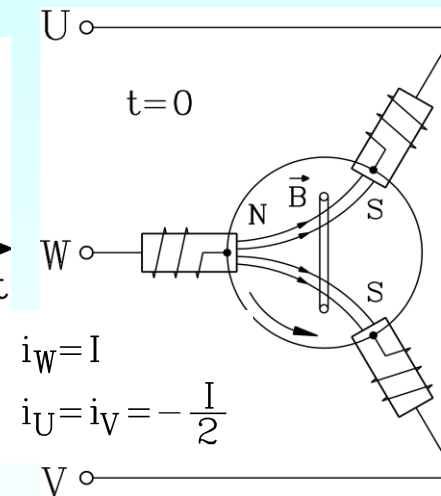
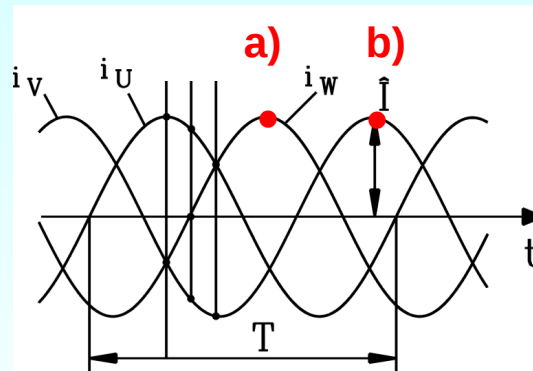
- In **Synchron- und Asynchronmaschinen** wird das Drehfeld durch eine sinnvoll gewählte Anordnung von **ruhenden** Spulen, die von Wechselströmen mit unterschiedlicher Phasenlage durchflossen sind, erzeugt.

Wie erzeugt man ein magnetisches Drehfeld prinzipiell?

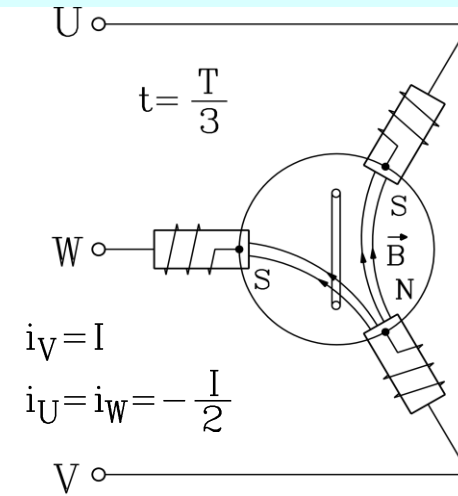
- Prinzip:** Drei räumlich um je ein Drittel des Umfangs versetzte Spulen auf Eisenkernen werden an das **Drehstromsystem** angeschlossen. In jeder der drei Spulen fließt einer der drei Phasenströme der Phasen U oder V oder W, so dass die Ströme in den drei Spulen zeitlich zueinander um je ein Drittel der Schwingungsperiode versetzt sind.



Quelle: Schreiner, Physik



a)



b)

- Dadurch entsteht ein **Magnetfeld als Summenwirkung der Einzelfelder** der drei Spulen, das seine Richtung im Sinne einer Rotation ständig ändert, wie die **Skizzen a) und b)** zeigen.

Zusammenfassung

Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

- Drehfeld: Rotierendes Magnetfeld
- Mehrphasensystem für Drehfelderzeugung nötig (meist drei)
- Einphasensystem: Nur Wechselfelderregung
- Drehfeld im Dreiphasensystem:
Drei am Umfang um ein Drittel der Wellenlänge versetzte Spulen mit drei um ein Drittel der Periode phasenverschobenen Wechselströmen gespeist

4. Drehfeldmaschinen

4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.3 Drehfrequenz des Drehfelds

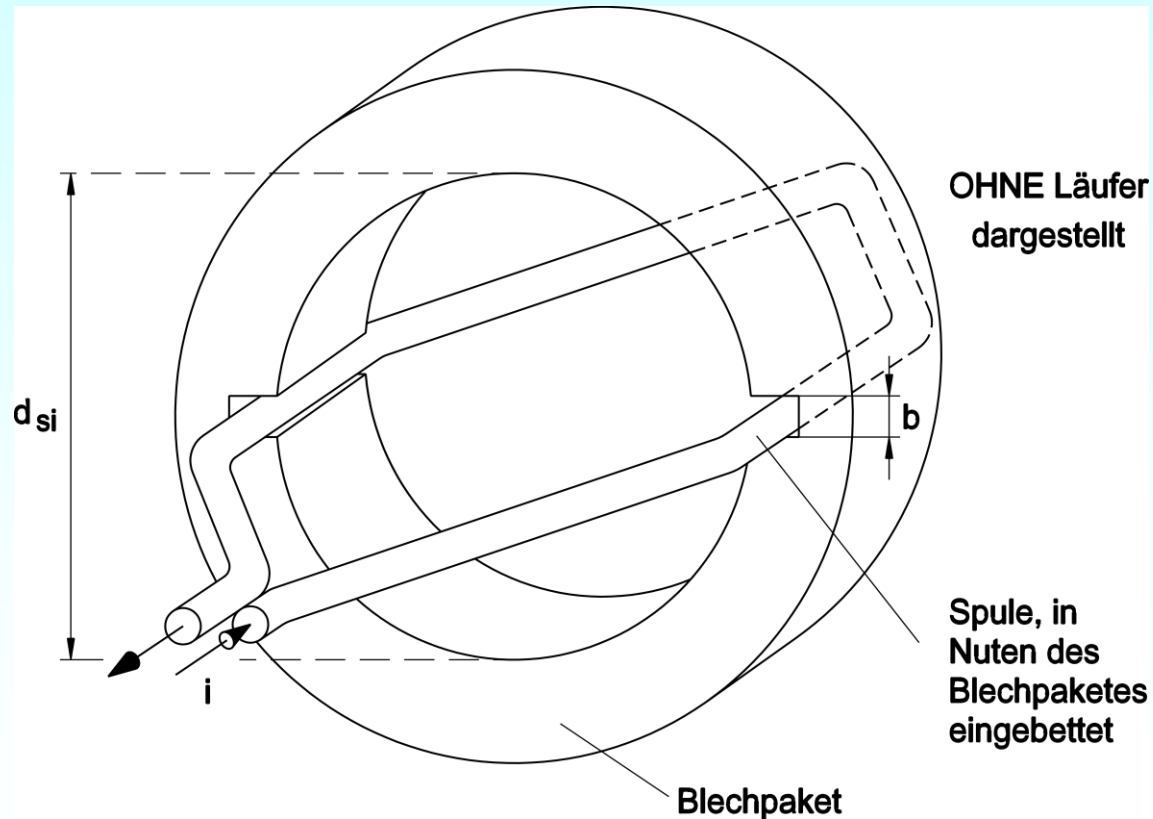
4.4 Asynchronmaschinen

4.5 Synchronmaschinen

4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (kein Prüfungsstoff!)

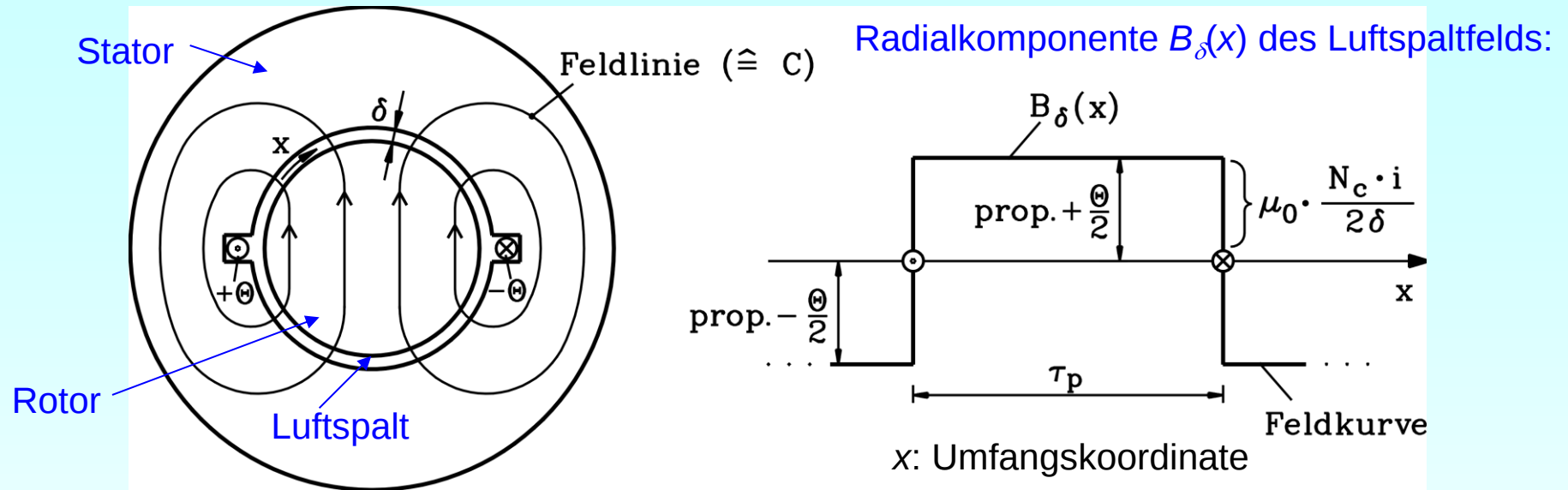
Einzelspule in zwei Ständernuten

- Die Spule liegt mit ihrem Hin- und Rückleiter in je einer Ständernut.
- Der in ihr fließende Strom (Pfeilrichtung!) erregt ein zweipoliges Magnetfeld, dessen Flusspfad sich in den Ständer"rücken" (Blechkpaket) schließt.



Quelle: Kleinrath, H.;
Studententext

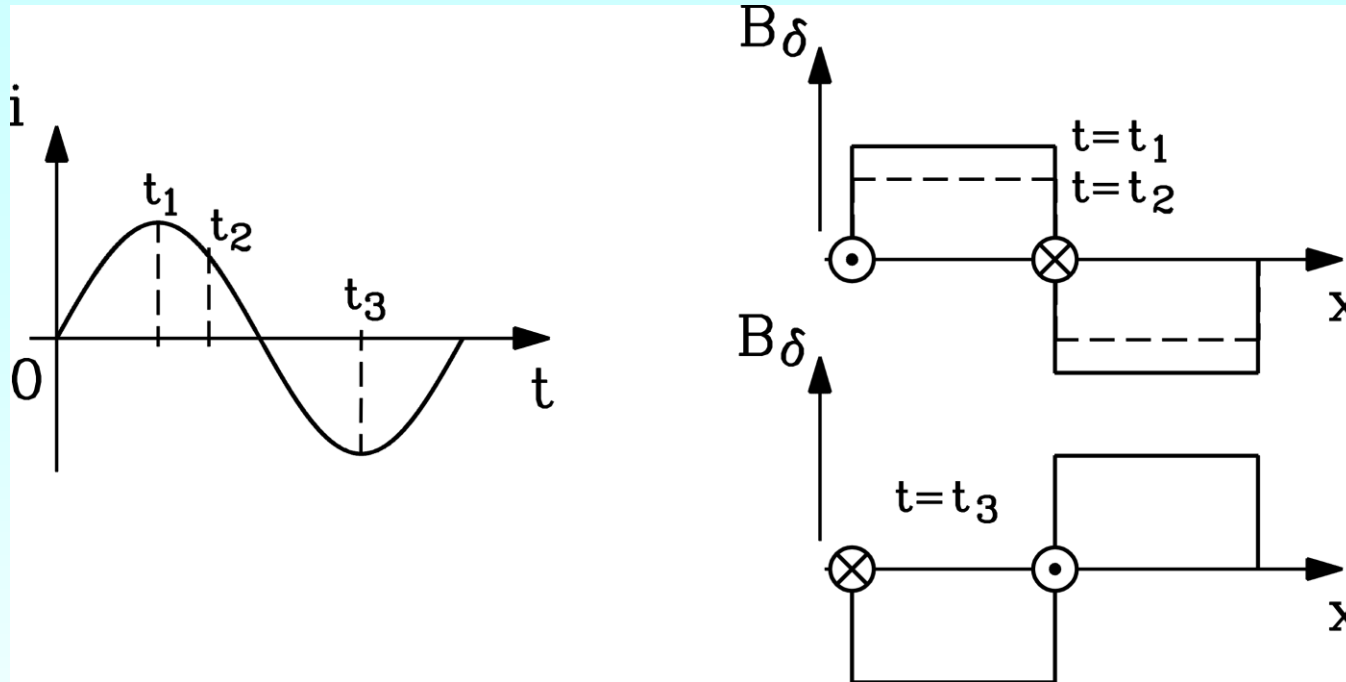
Luftspaltfeld einer Ständerspule



- Eine Spule** mit N_c Windungen, bestromt mit (Gleich-)Strom i :
 Durchflutungssatz ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$, $H_{Fe} = 0$) mit Feldlinie als geschlossener Kurve C:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2H_\delta \cdot \delta = N_c \cdot i = \Theta \rightarrow H_\delta = \frac{\Theta}{2\delta}$$
 Luftspalt-Flussdichte: $B_\delta = \mu_0 \frac{N_c i}{2\delta}$
- Es entsteht **zweipoliges** Luftspaltfeld mit **rechteckförmiger** Feldverteilung der Radialkomponente $B_\delta(x)$ des Luftspaltfelds. Am Ort x der Nut mit der Durchflutung Θ **“springt”** diese Feldverteilung um den Wert $\mu_0 \Theta / \delta$.

Pulsierendes Luftspaltfeld einer Ständerspule

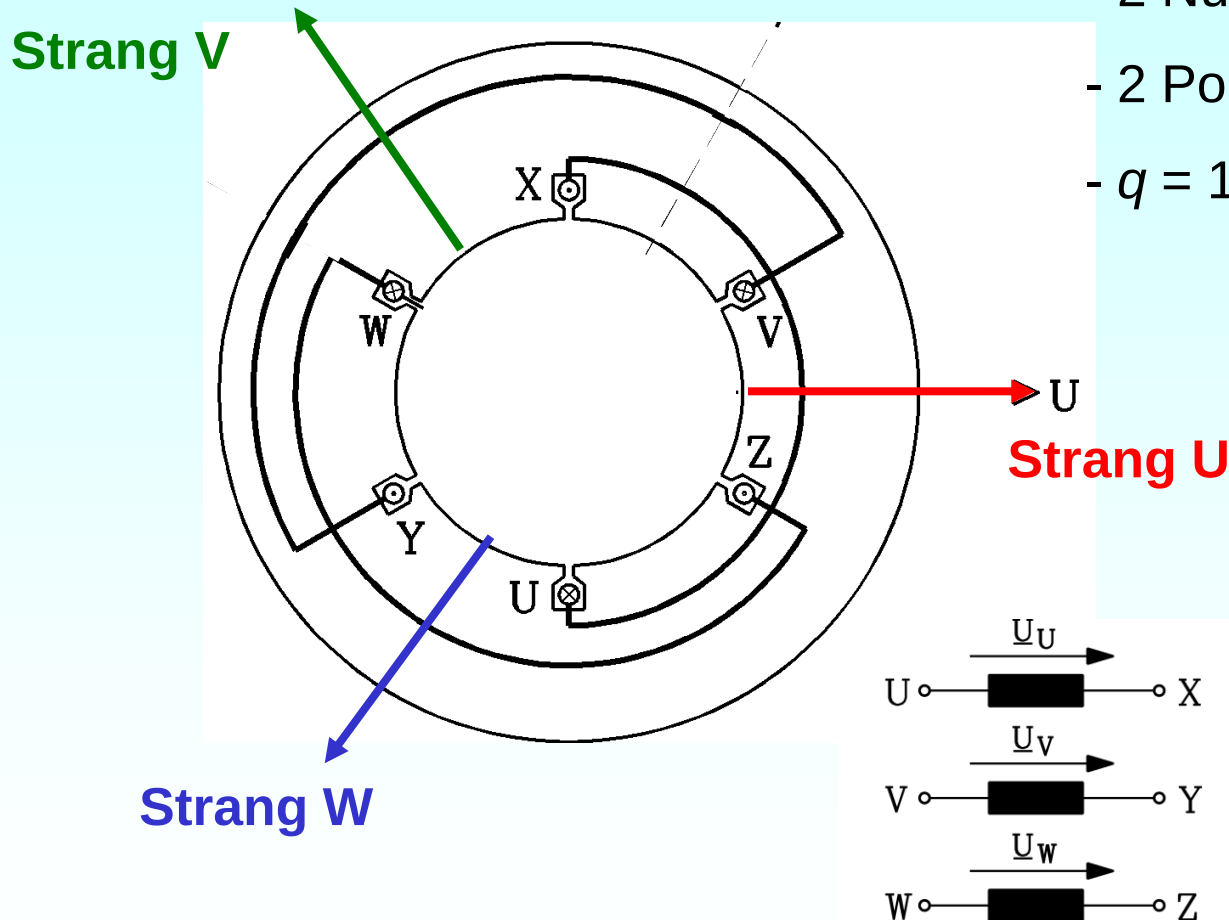


- Speisung der Ständerspule mit Wechselstrom $i(t)$: $i(t) = \hat{I} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$
- Das Luftspaltfeld ist WEITERHIN zweipolig und rechteckförmig, aber seine Amplitude pulsiert mit Frequenz f .

$$B_\delta(t) = \mu_0 \frac{N_c i(t)}{2\delta} = \mu_0 \frac{N_c \hat{I}}{2\delta} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Drehstrom-Wicklung: **drei Wicklungsstränge U, V, W**

Eisenständer, ohne Läufer dargestellt



- 1 Spule je Polpaar und je Strang
- 2 Nuten je Polpaar und Strang
- 2 Pole (N und S), 6 Nuten, 3 Stränge
- $q = 1$: Nuten je Pol und Strang

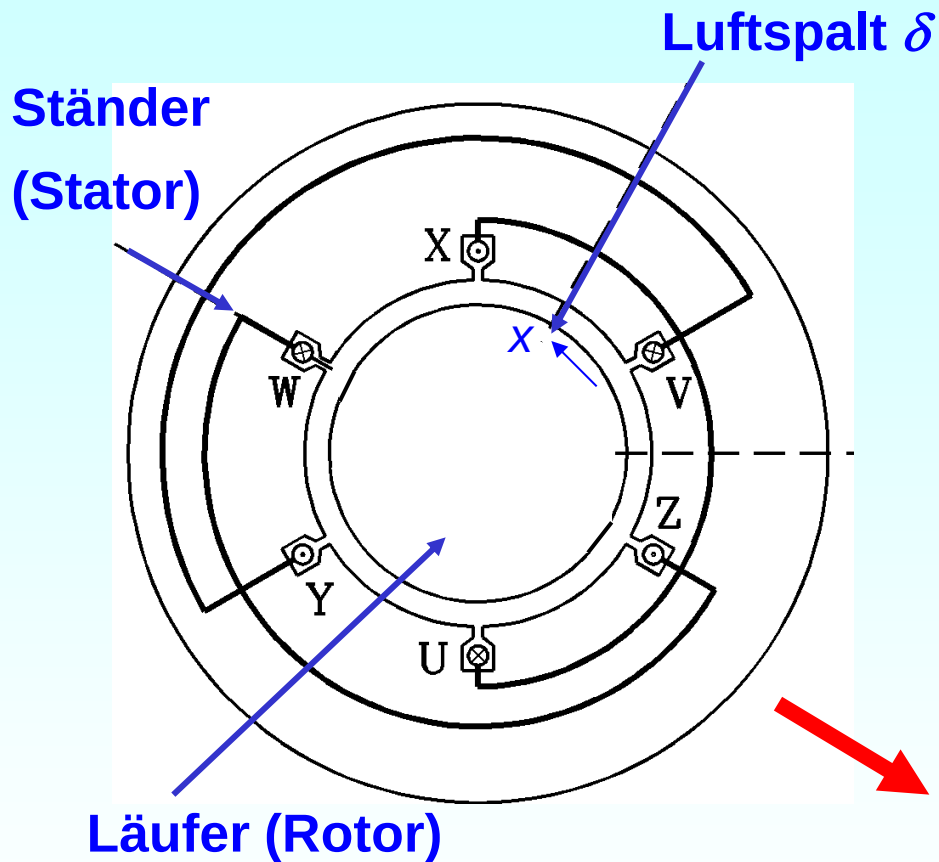
$$q = \frac{Q_s}{2p \cdot m} = \frac{6}{2 \cdot 3} = 1$$

Ständer-Nutzahl: $Q_s = 6$

Polzahl: $2p = 2$

Strangzahl: $m = 3$

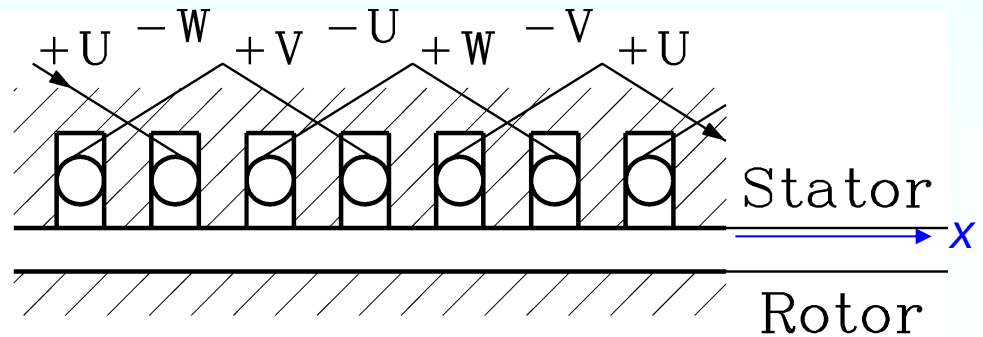
Ständer-Drehstromwicklung mit **Eisenläufer**



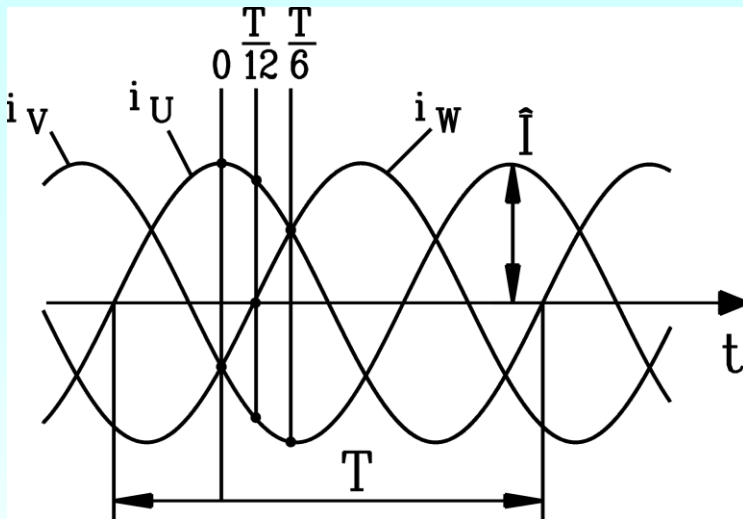
- Ständerfeld durch Drehstromwicklung
- Läufer aus Eisen
- konstanter Luftspalt δ
- Magnetfeld im Luftspalt
- Magnetfeld dreht
- Läufer dreht NICHT

$$X = -U \quad Y = -V \quad Z = -W$$

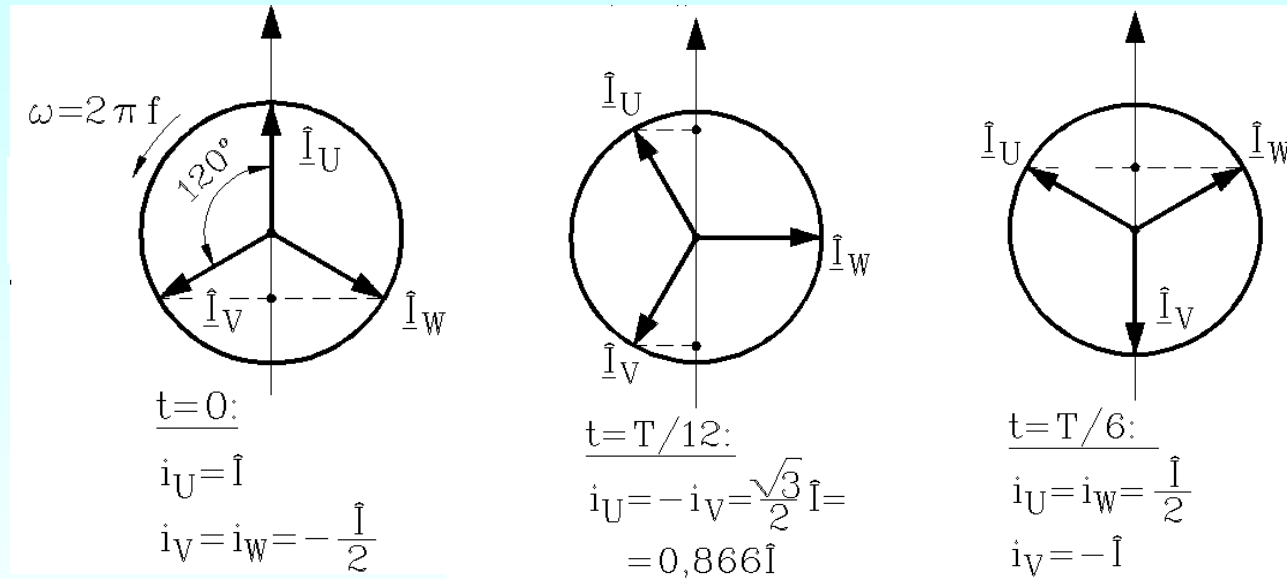
Abgewickelte Darstellung: Einschichtwicklung



Fortschritt der Zeit im Drehstromsystem



Darstellung im Zeitbereich



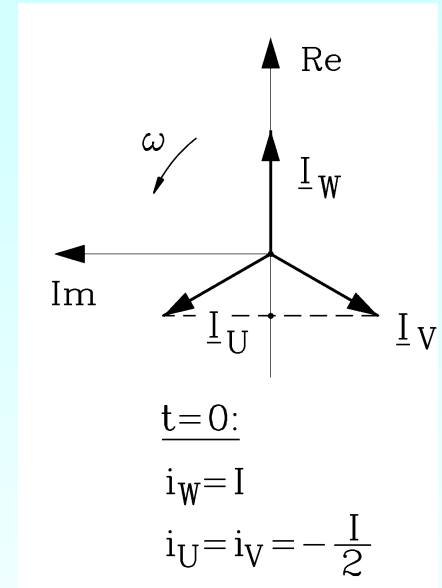
Darstellung in der komplexen Zahlenebene

Technische Erzeugung eines Drehfelds (1)

Überlagerung der Einzelfelder der drei Spulen zum resultierenden treppenförmigen Luftspaltfeld

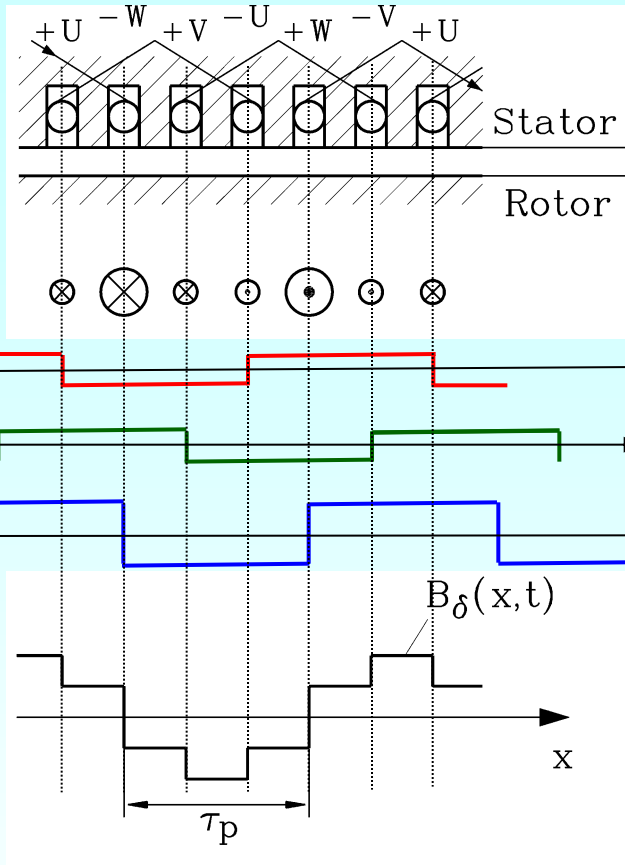
Beispiel:

Zeitpunkt $t = 0$:



Nuten je Polpaar: $Q_s/p = 6$

Stranganzahl: $m = 3$



Feld von Strang U

Feld von Strang V

Feld von Strang W

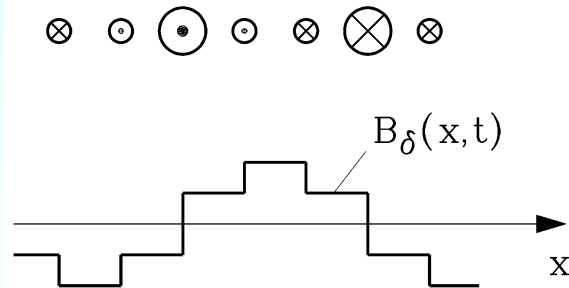
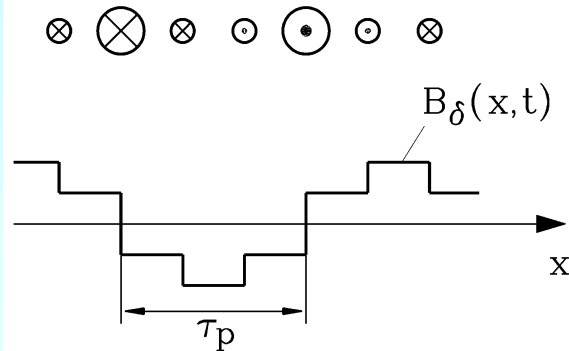
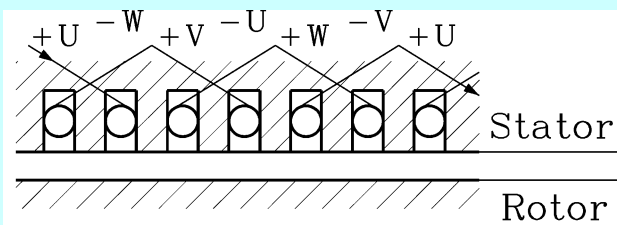
Resultierendes Luftspaltfeld
zum Zeitpunkt $t = 0$

+U: positiver Wicklungssinn (linke Spulenseite)

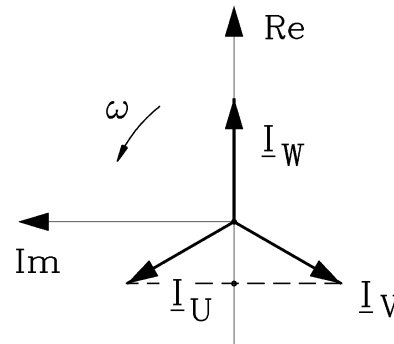
-U: negativer Wicklungssinn (rechte Spulenseite)

Ebenso: +V, -V, +W, -W

Technische Erzeugung eines Drehfelds (2)



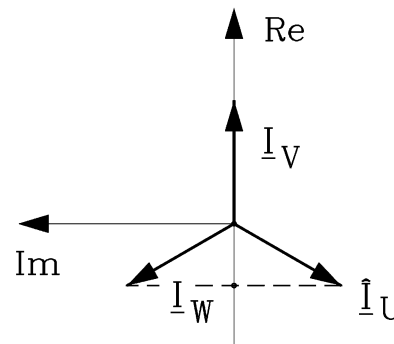
Welle wandert nach links



$t=0:$

$$i_W = I$$

$$i_U = i_V = -\frac{I}{2}$$



$t=T/3:$

$$i_V = I$$

$$i_U = i_W = -\frac{I}{2}$$

Nuten je Polpaar: $Q_s/p = 6$

Stranganzahl: $m = 3$



Zusammenfassung

Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

- Spulen in Nuten des Statorblechpakets bilden Wicklungsstrang
- Feldlinien müssen nur kleinen Luftspalt überbrücken, verlaufen sonst im Eisen
- Drei Wicklungsstränge: Jeder mit Wechselstrom erregt
- Jeder Strang = Einphasensystem: Nur Wechselfelderregung
- Summenwirkung der drei Stränge = Drehfeld:
Drei am Umfang um ein Drittel der Wellenlänge versetzte Wicklungsstränge mit drei um ein Drittel der Periode phasenverschobenen Wechselströmen gespeist
- Drehfeldkurve im Luftspalt treppenförmig, approximiert Sinusfunktion
- Bei idealer Sinusdrehwelle: zeitlich konstantes elektromagnetisches Drehmoment

4. Drehfeldmaschinen

4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.3 Drehfrequenz des Drehfelds

4.4 Asynchronmaschinen

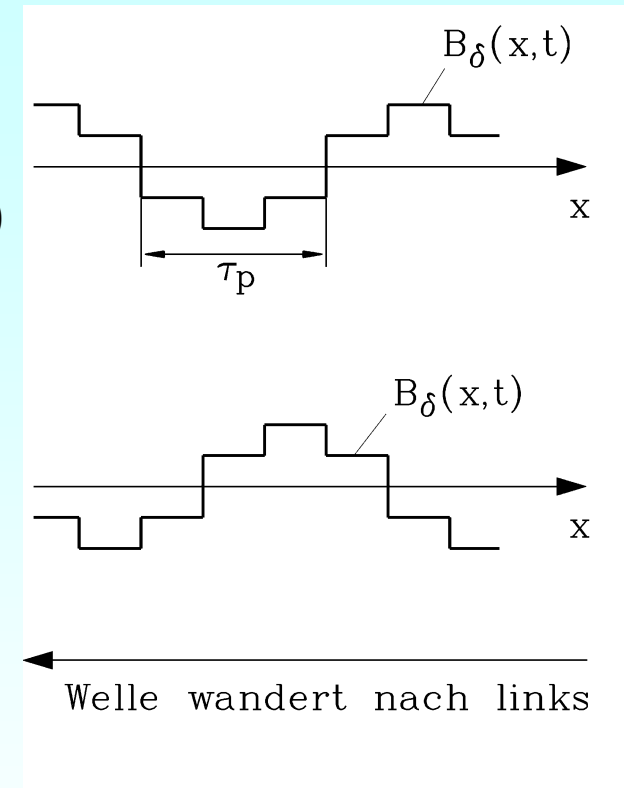
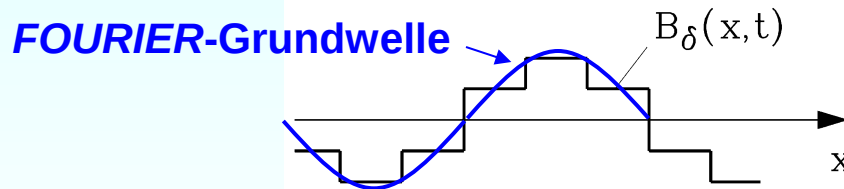
4.5 Synchronmaschinen

4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (kein Prüfungsstoff!)

Geschwindigkeit des Wanderfelds

- Das Bild des wandernden Luftspaltfelds zeigt:
 - Nach $t = T / 3$ ist das Feld um $2\tau_p / 3$ weiter gerückt.
 - Wandergeschwindigkeit: $v_{syn} = s / t = (2\tau_p / 3) / (T / 3)$
 - “Synchrongeschwindigkeit” $v_{syn} = 2 f \tau_p$ $T = 1 / f$

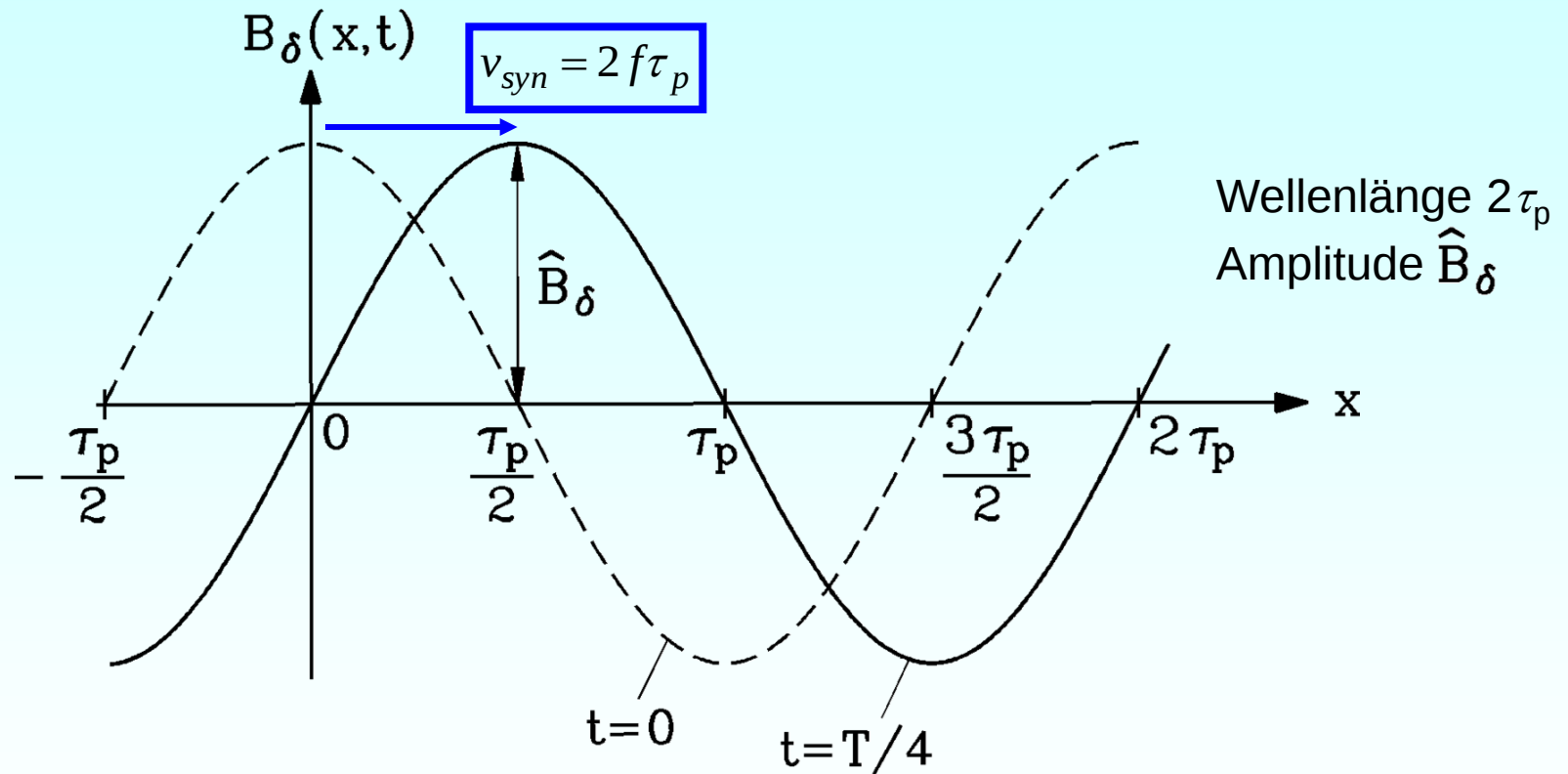
$$v_{syn} = \frac{2\tau_p}{T} = 2 f \tau_p$$



- Für die elektromechanische Energiewandlung wird nur die dominante **FOURIER-Grundwelle** der treppenförmigen Feldverteilung genutzt.
- Diese Grundwelle ändert ihre Wellenlänge und Amplitude beim Wandern NICHT!

FOURIER-Grundwelle

- **FOURIER-Grundwelle** ist Sinuswelle. Hier im Beispiel wandert sie nach rechts.



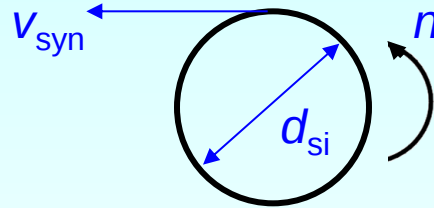
Magnetisches Wanderfeld und Drehfeld

Wanderfeld

- Wandergeschwindigkeit:

$$v_{syn} = \frac{2\tau_p}{T} = 2f\tau_p$$

Synchrone Geschwindigkeit



Drehfeld

Synchrondrehzahl n_{syn} , mit der das Drehfeld rotiert:

$$\omega_{syn} = 2\pi n_{syn} = \frac{v_{syn}}{d_{si}/2} = \frac{v_{syn}}{p\tau_p/\pi} = \frac{2\pi f}{p}$$

$$n_{syn} = \frac{f}{p}$$

Synchrondrehzahl

Drehfrequenz des Drehfelds

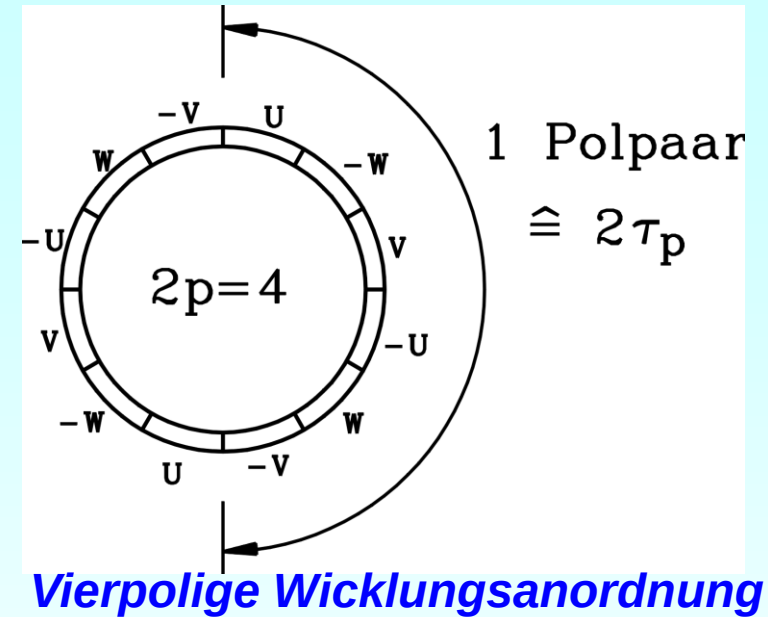
- **Beispiel:**

- **Zweipolig** $2p = 2$, 50 Hz:

$$n_{\text{syn}} = (50 / 1) \cdot 60 = \mathbf{3000} \text{ / min},$$

- **Vierpolig** $2p = 4$, 50 Hz:

$$n_{\text{syn}} = (50 / 2) \cdot 60 = \mathbf{1500} \text{ / min}$$

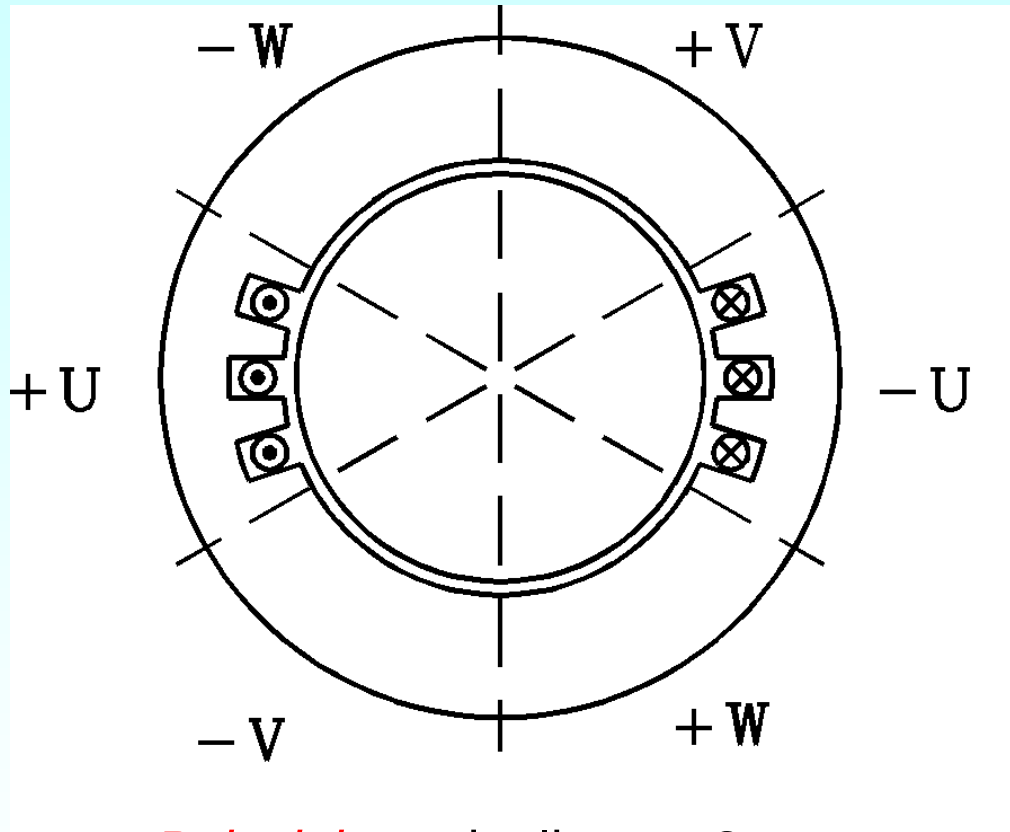


- Synchrondrehzahl folgt streng der Frequenz der Wicklungsströme:

z. B.: $2p = 4$, $f = 200 \text{ Hz}$: $n_{\text{syn}} = (200 / 2) 60 = \mathbf{6000} \text{ / min}$
statt 1500 / min bei 50 Hz.

- Bei **Tausch zweier Phasen** (z.B. Klemmen U und V) dreht sich das Drehfeld in die **andere** Richtung.

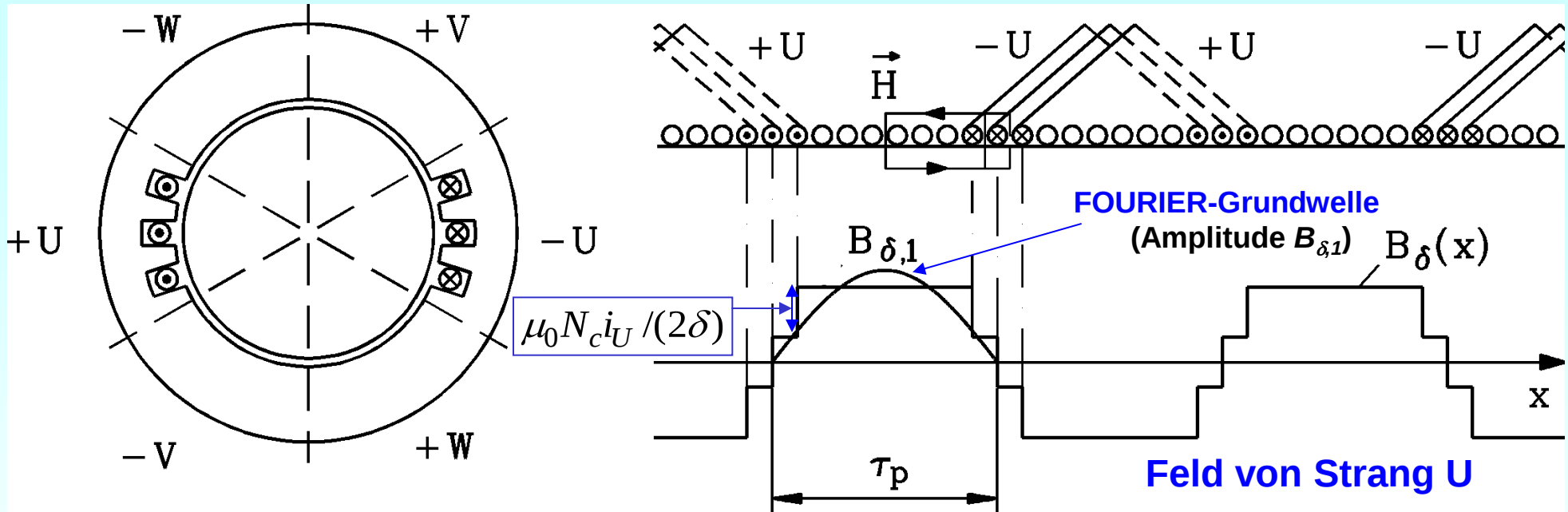
Aufspalten der Spule in eine Spulengruppe (hier: $q = 3$ Spulen je Gruppe in Serie)



Beispiel: zweipolig, $q = 3$

- Der Maschinenumfang wird in **6 Zonen** unterteilt für die **3 Stränge U, V, W** und deren Rückleiter $-U, -V, -W$.
- Je Zone werden **q Spulen in Serie** geschaltet
- Windungszahl je Spule N_c
- Je Spulengruppe: $q \cdot N_c$ Windungen
- Elektrisch „wirksam“: $k_{ws} \cdot (q \cdot N_c)$ wegen Serienschaltung der in q Nuten verteilten Spulen
- $k_{ws} \approx 0.95$; bei $q = 1$: $k_{ws} = 1$

Spulengruppe: Besseres Anpassen des Luftspaltfelds an die Sinusform



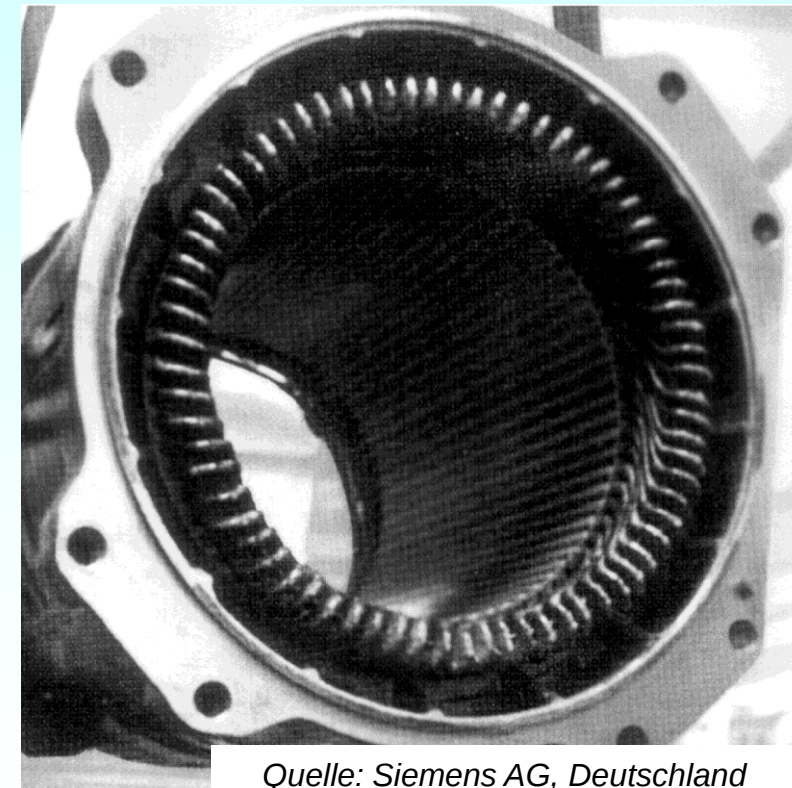
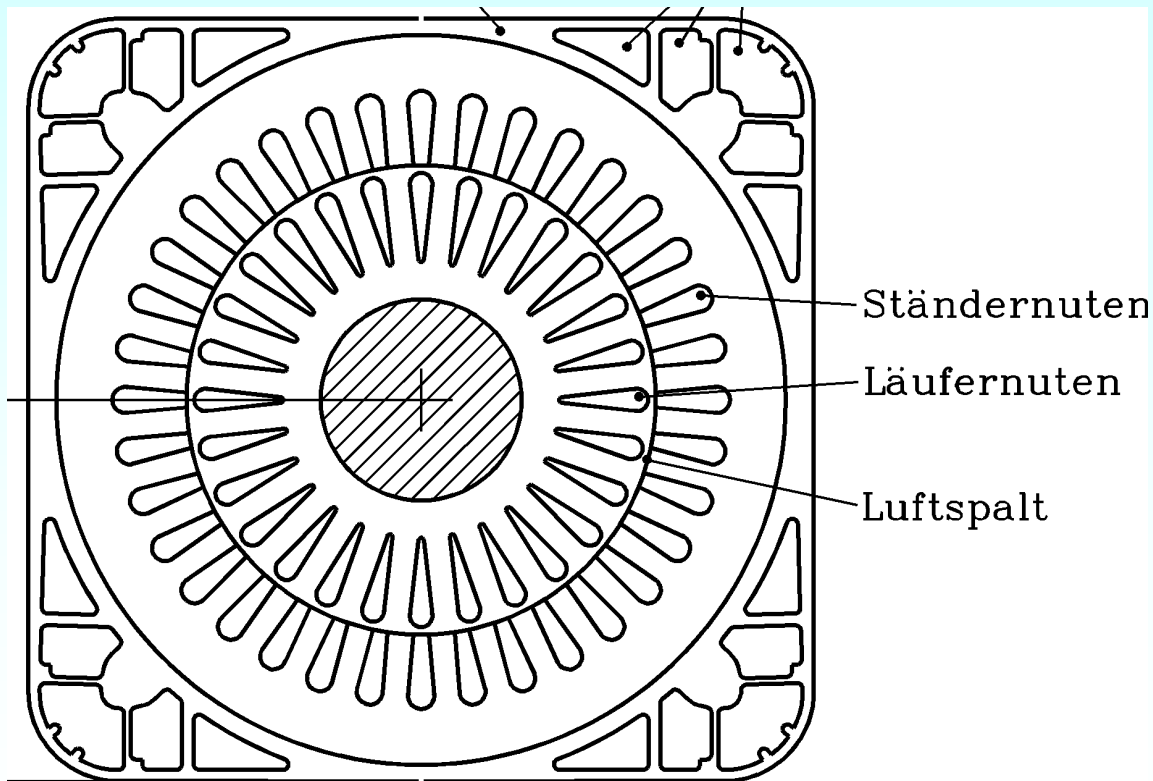
- Je Zone werden q Spulen in Serie geschaltet (z. B. $q = 3$). Das Luftspaltfeld $B_\delta(x)$ ist bei $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ die Überlagerung des Felds der q Einzelspulen je Strang. Es entsteht ein “treppenförmiges” Luftspaltfeld je Strang (“Stufenhöhe” je Nut proportional Θ in der Nut).
- Die FOURIER-Grundwelle dieses Feldes (Amplitude $B_{\delta,1} \sim k_{ws} \cdot q \cdot N_c$) zeigt bereits eine relativ gute Annäherung der “Feldtreppe” an die Sinusform.

Beispiel: Vollständige Statorwicklung

Beispiel: Asynchronmaschine: $2p = 4$ Pole,
 $q = 3$ Spulen je Spulengruppe, $m = 3$ Wicklungsstränge
Statornutenzahl: $Q_s = 2p \times q \times m = 4 \times 3 \times 3 = 36$,
Einschichtwicklung: 18 Spulen in 36 Nuten

Stator eines Asynchronmotors der Lokomotivreihe BR120:

1.6 MW, $2p = 4$, $m = 3$, $q = 6$
 $Q_s = 72$, Zweischichtwicklung



Quelle: Siemens AG, Deutschland

Zusammenfassung

Drehfrequenz des Drehfelds

- Grundwelle des Drehfelds rotiert mit „Synchrondrehzahl“
- „Synchrondrehzahl“ = Ständerfrequenz / Polpaarzahl
- Zugehörige Umfangsgeschwindigkeit = Synchrongeschwindigkeit
- Wicklungsstränge liegen in Nuten als Spulengruppen
- Je höher die Nutzahl pro Pol und Strang, desto bessere Annäherung der Luftspaltfeldverteilung an die Sinusform
- Feldsinusform erwünscht für zeitlich konstantes Drehmoment



4. Drehfeldmaschinen

4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

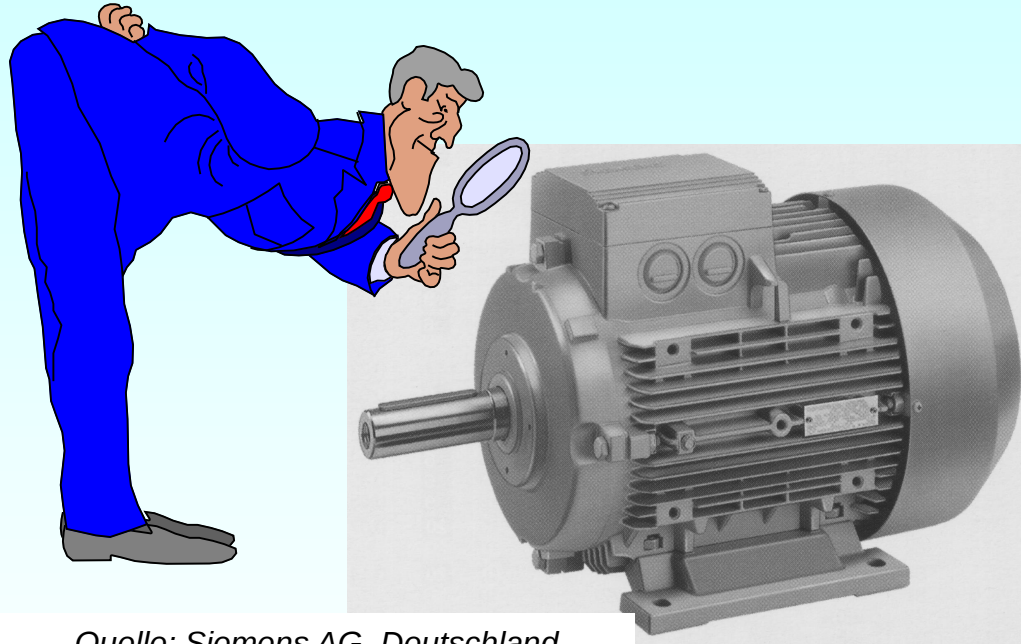
4.3 Drehfrequenz des Drehfelds

4.4 Asynchronmaschinen

4.5 Synchronmaschinen

4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (kein Prüfungsstoff!)

4.4 Asynchronmaschinen



Quelle: Siemens AG, Deutschland

4.4 Asynchronmaschinen

4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen

4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

Asynchronmaschine - Funktionsprinzip

- Der **Läufer** ist eine **kurzgeschlossene** Drehfeldwicklung, z.B. **vier**polig, oder ein “Kurzschluss-Käfig”.
- **Ständer**: hat eine Drehfeldwicklung, z. B. 4-polig.
- Der Läufer rotiert **langsamer** als das Drehfeld, daher Relativbewegung zwischen Läufer und Ständerdrehfeld. Dies führt zu einer **Spannungsinduktion** in der Läuferwicklung durch das Ständerdrehfeld, so dass Läuferströme fließen.
- **LORENTZ-Kraft** vom Drehfeld auf stromdurchflossene Leiter der Läuferwicklung: Es entsteht das elektromagnetische **Drehmoment** M_e , das den Läufer **ASYNCHRON** (“langsamer”) mit dem Drehfeld mitzieht.

Einsatzgebiete von Asynchronmaschinen

- Asynchronmaschinen direkt am Netz: konstante Statorfrequenz

Motor: Läufer dreht langsamer als Drehfeld

- Festdrehzahlantrieb, zumeist als robuster **“Normmotor”**,
- für Pumpen, Gebläse, Kompressoren,
- für Bearbeitungsmaschinen in sehr großer Stückzahl im Einsatz,

Generator: Läufer dreht schneller als Drehfeld, muss angetrieben werden

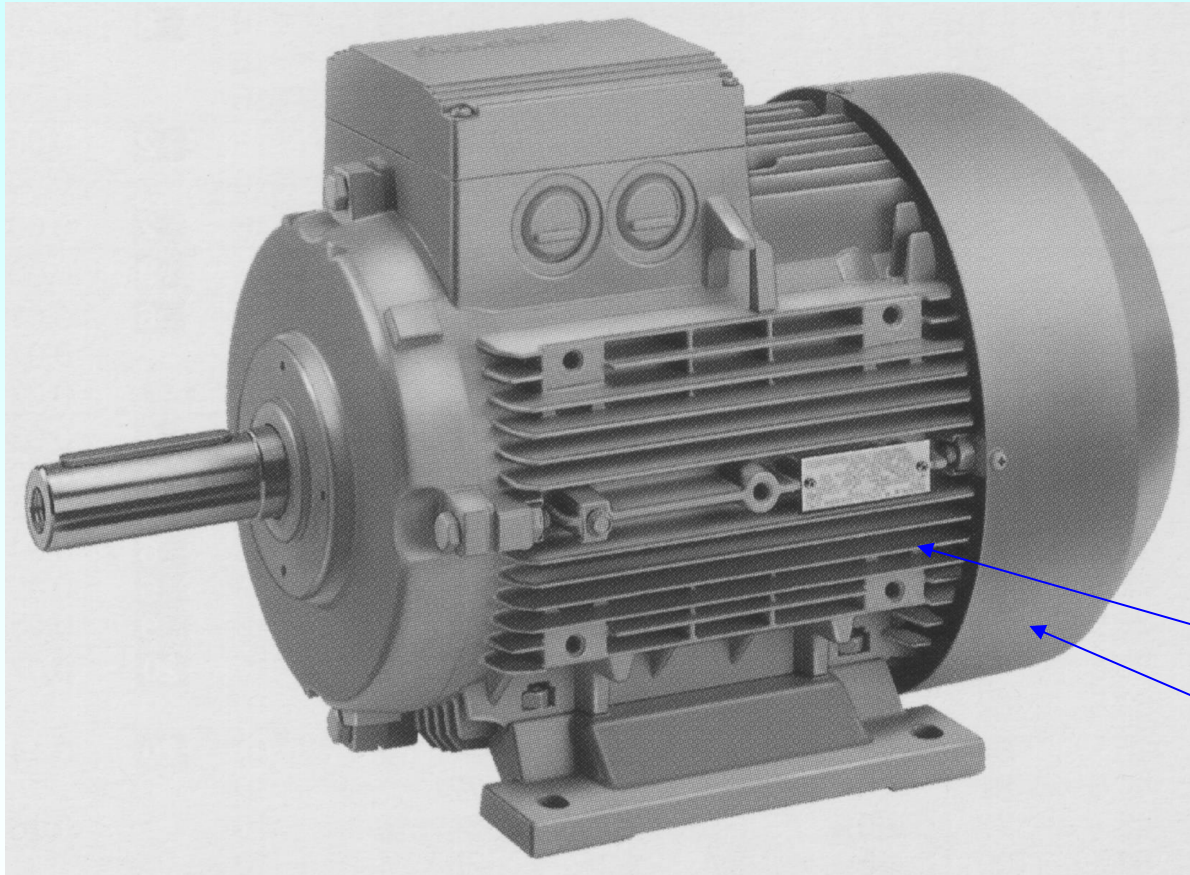
- Windgeneratoren, kleinere Wasserkraftwerke, ...

- Asynchronmaschinen mit Umrichterspeisung: veränderliche Statorfrequenz

- **Drehzahlvariabel**, oft geregelt,
- übernimmt viele Aufgaben der Gleichstrommaschine in der Industrie, Traktion,..., da er robust ist.



Norm-Asynchronmaschine



**Norm-
Asynchronmotor**

vierpolig

Oberflächenkühlung

Rippengehäuse

**Lüfter mit
Luftführung**

Quelle:

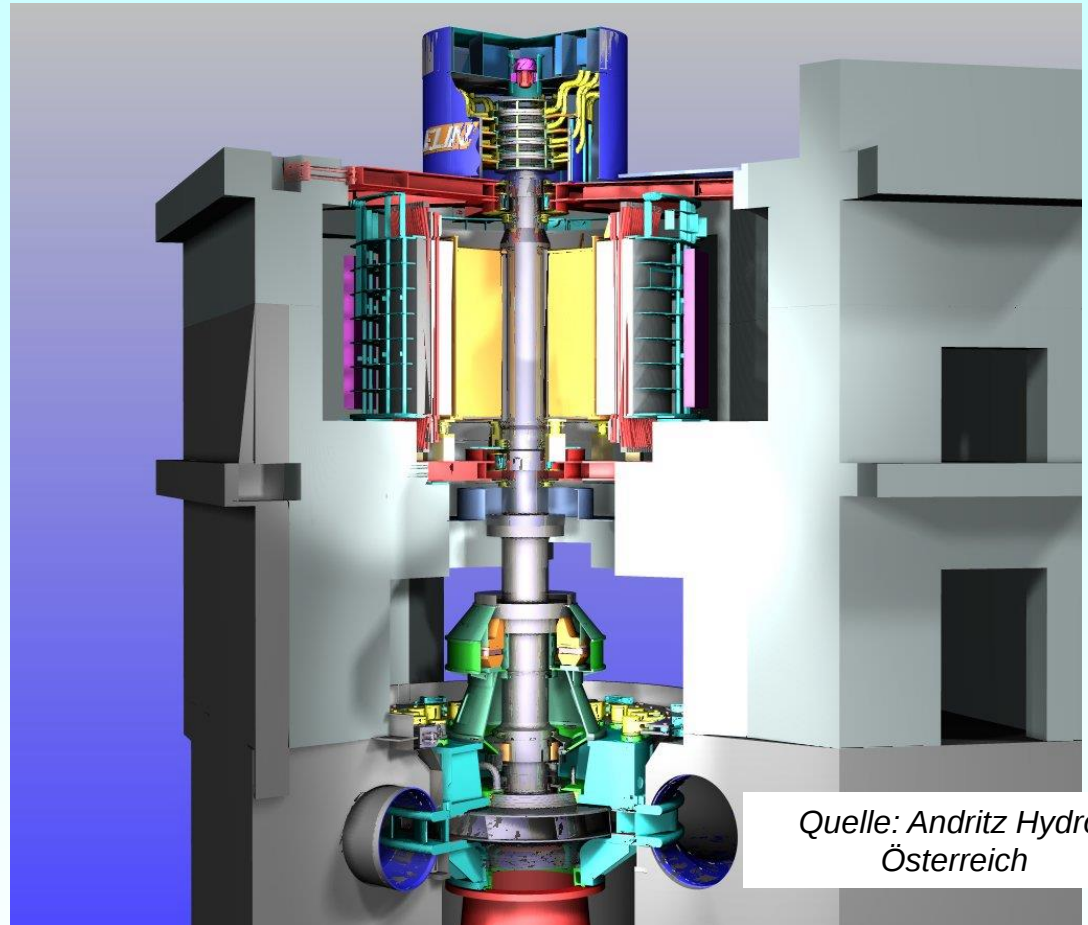
Siemens, Deutschland

Asynchrongeneratoren

Quelle:
Siemens AG, Deutschland



Windgeneratoren mit Getriebe
für direkten Netzbetrieb, ca.
600... 750kW



Quelle: Andritz Hydro,
Österreich

Motorgenerator für das Pumpspeicherwerk
Goldisthal/Thüringen, vertikale Welle
(unten: Pump-Turbine), 340 MVA



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/32

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Asynchronmotoren mit Umrichterspeisung



Quelle: ELIN EBG Motoren GmbH, Österreich

Wassermantelgekühlte 100 kW-**Fahrmotoren** für die U-Bahn (Alu-Käfig-Läufer)

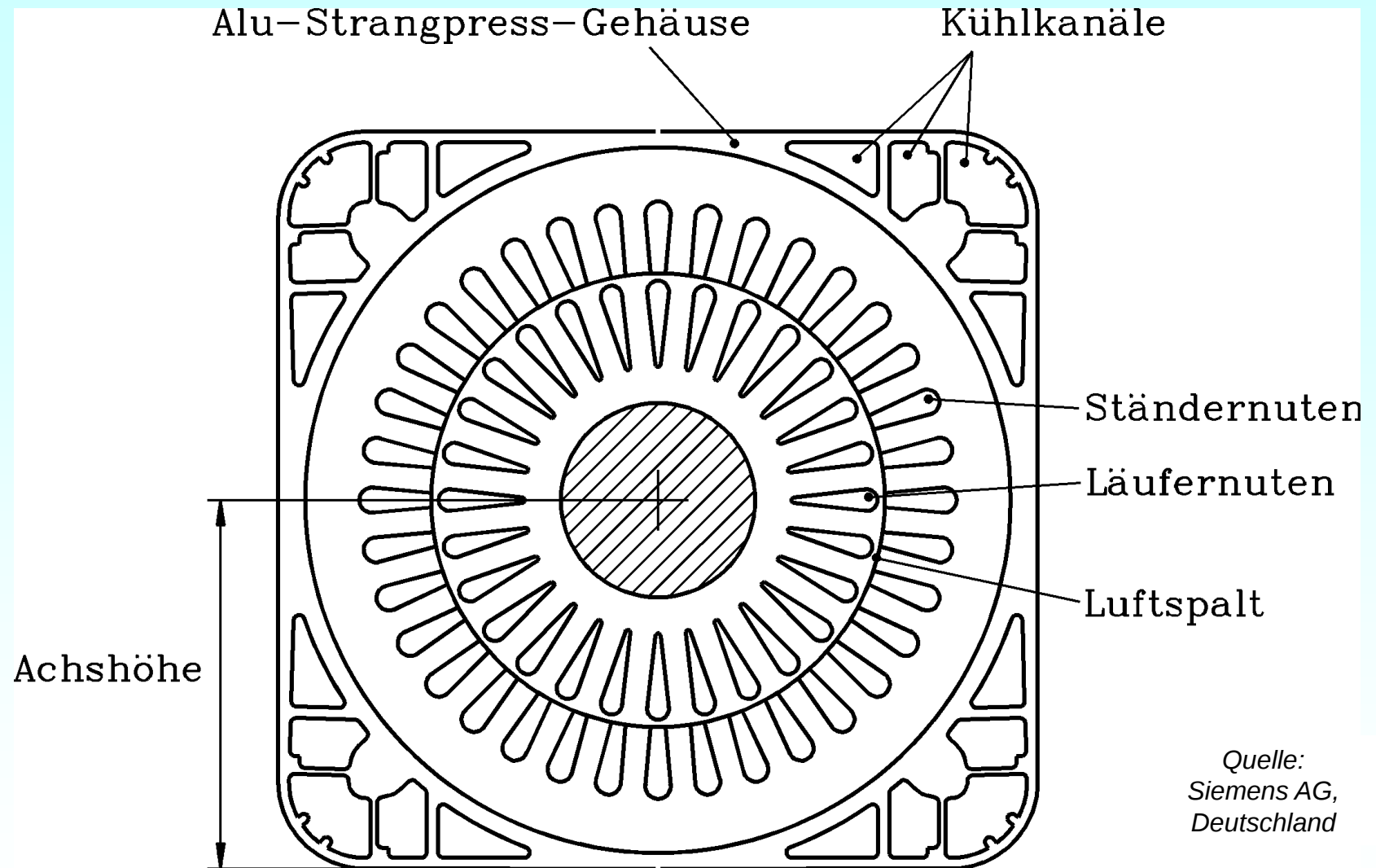


Quelle: Siemens AG, Deutschland

Umrichtergespeister **Industriemotor**, 1 MW, Kupferkäfig, aufgesetzter Luft-Luft-Kühler, dahinter: Umrichter



Querschnitt: Käfigläufer-Asynchronmotor



Zusammenfassung

Aufbau von Asynchronmaschinen

- Dreisträngige Ständer-Drehfeldwicklung am Sinus-Drehspannungssystem
- Ständerwicklung erzeugt Drehfeld mit ausgeprägter Grundwelle (rotiert mit „Synchronzahl“)
- Läufer: Kurzgeschlossene Mehrphasenwicklung oder Käfigwicklung
- Käfig: Jeder Stab ist ein „Wicklungsstrang“; kurzgeschlossen über zwei Ringe
- Käfig aus Kupfer oder Aluminium-Druckguss

Energietechnik

4.4 Asynchronmaschinen

4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen

4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine



Spannungsinduktion im Rotorkäfig der Asynchronmaschine

- Abgewickelte **Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer**:
 Ständerdrehfeld rotiert mit n_{syn} bzw. v_{syn} , Läufer mit v_m .
Relativgeschwindigkeit des Drehfelds zum Läufer: $v = v_{syn} - v_m$
Relativgeschwindigkeit des Läufers zum Drehfeld: $v_{rel} = -v$

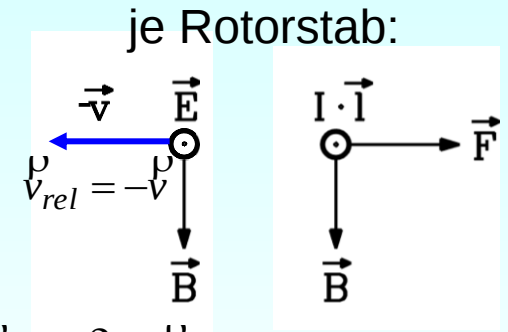
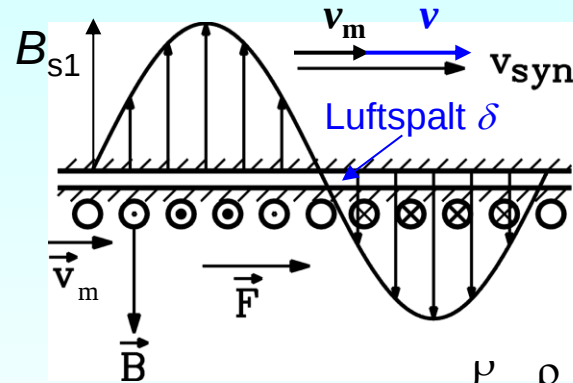
- Definition des **Schlupfs**:

$$s = \frac{v}{v_{syn}} = \frac{v_{syn} - v_m}{v_{syn}} = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}$$

- Bewegungsinduktion:

Je Rotorstab:
$$U_i = \int_0^l (\vec{v}_{rel} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} = v \cdot B \cdot l$$

$$\vec{E} = \vec{v}_{rel} \times \vec{B} = (-\vec{v}) \times \vec{B} \quad I = I_r: \text{Rotorstrom}$$



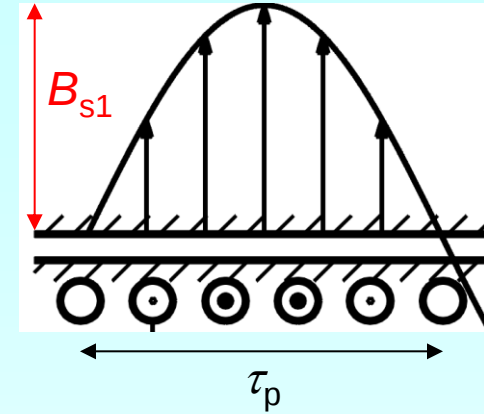
Zwei Rotorstäbe mit der Distanz τ_p haben gleiches U_i mit 180° Phasenverschiebung:

$$U_{i,r} = 2 \cdot U_i = 2 \cdot v \cdot B \cdot l \Rightarrow \hat{U}_{i,r} = 2 \cdot v \cdot B_{s1} \cdot l = 2 \cdot s \cdot v_{syn} \cdot B_{s1} \cdot l$$

$$\hat{U}_{i,r} = 2 \cdot s \cdot 2 f_s \tau_p \cdot B_{s1} \cdot l = s \cdot 2 \pi f_s \cdot \frac{2}{\pi} \tau_p \cdot B_{s1} \cdot l = s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sh}$$

Rotorfrequenz der Asynchronmaschine

- **Definition der Rotorfrequenz:** $f_r = s \cdot f_s$
Motorbetrieb: $0 < s \leq 1$



- Alternativ: Allgemeines Induktionsgesetz:
- **Flussverkettung** im Läufer:
 - Zwei Läuferstäbe im Abstand τ_p bilden eine “Spule”:

$$\Phi_{sh} = \int_A \vec{B}_\delta \cdot d\vec{A} = l \int_0^{\tau_p} B_{s1} \sin(x\pi / \tau_p) dx = \frac{2}{\pi} \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{s1}$$

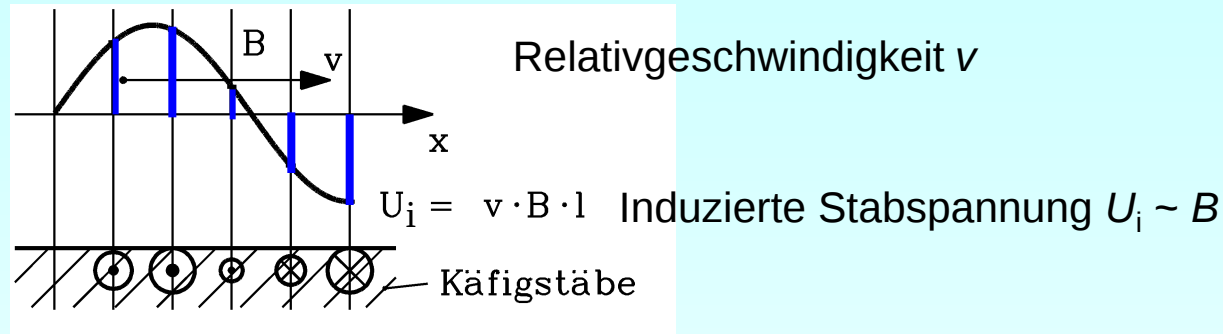
- **Frequenz** der Spannung im Läufer: $f_r = s f_s$
- **Induzierte Rotorspannung** in zwei Läuferstäbe im Abstand τ_p :

$$\hat{U}_{i,r} = \omega_r \cdot \Phi_{sh} = s \cdot 2\pi f_s \cdot \Phi_{sh}$$

- **Diese Spannung treibt Rotorstrom I_r im jeweiligen Rotorstab.**

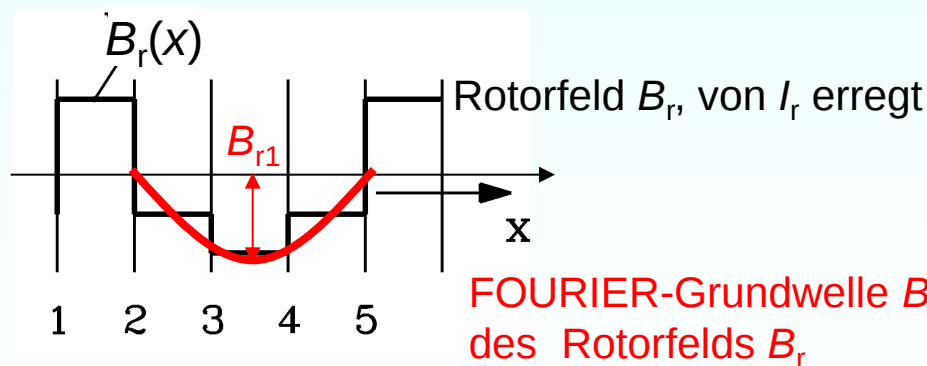
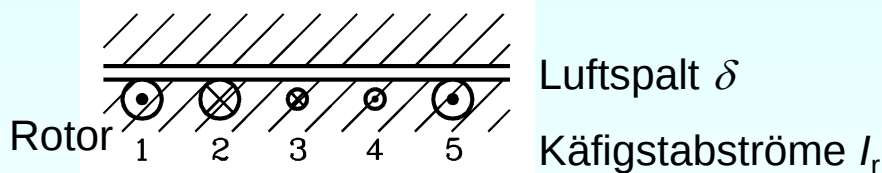
Induzierung des Rotorkäfigs – Erregung des Rotorfelds

Ständerfeldgrundwelle B_{s1}



**Induzierung des
Rotorkäfigs**

Stator



**Erregung des
Rotorfelds**

Überlagerung von Ständer- und Läuferfeld

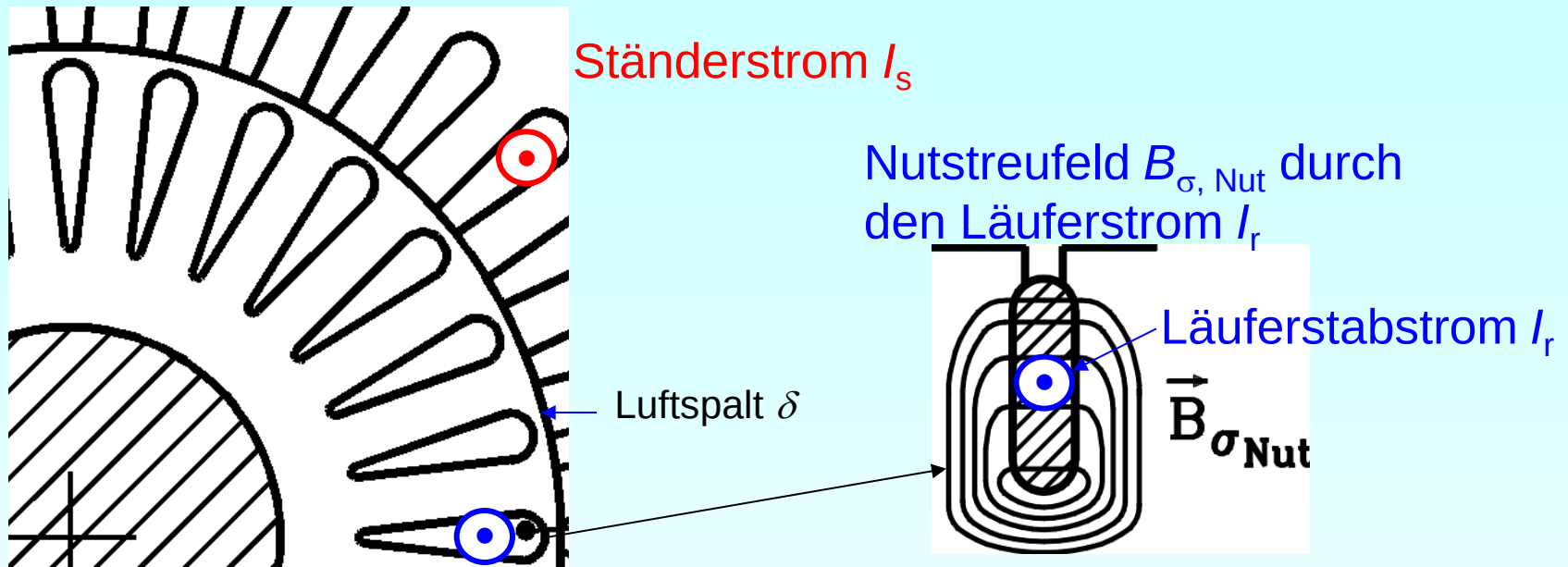
- Die Rotorströme (Frequenz $f_r = s f_s$) erregen ihrerseits eine **Rotorfelddrehwelle B_r** (mit einer FOURIER-Grundwelle B_{r1}),
die mit $v_r = 2 f_r \tau_p = s \cdot 2 f_s \tau_p = v$ bezüglich des Rotors dreht.
- Bezüglich des Stators dreht diese Welle mit $v_m + v_r = v_{syn}$! ($v = v_{syn} - v_m$)
$$v_m + v_r = (v_{syn} - v) + v_r = v_{syn} - v + v = v_{syn}$$
- **Fazit: Stator- und Rotordrehfeld drehen gleich schnell !**
- Summe ist **resultierendes Drehfeld** mit Amplitude B_1 der FOURIER-Grundwelle (= Überlagerung von B_{s1} , B_{r1}) und deren Fluss pro Pol

als **Hauptfluss**:

$$\Phi_h = \frac{2}{\pi} \tau_p B_1 l$$

erregt von I_s und I_r .

Streifelder in den Nuten z. B. Käfigläufer-Stäbe



Nutstreifend $B_{\sigma, \text{Nut}}$ in einer Läuferferrut („Ovalstab“):

- Das Feld schließt sich NICHT über den Luftspalt δ und die Ständerwicklung.
- Es ist daher NUR mit der Läuferwicklung verkettet = **Läufer-Nut-STREUFLUSS** $\Phi_{r\sigma, \text{Nut}}$
- Ebenso: Ständerstrom in Ständerferrut = Bildet **Ständer-Nut-STREUFLUSS** $\Phi_{s\sigma, \text{Nut}}$
- **Ständerstreifend**: $\Phi_{s\sigma}$ = Ständer-Nutstreifend UND Streifend der stirnseitigen Spulenverbindungen („Wickelkopf“)

Analogie zum Transformator

- Primär- und Sekundärkreis sind **galvanisch getrennt**.
- Die Windungszahlen von Primär- und Sekundärspulen (je Strang N_s bzw. N_r Windungen) sind i. A. unterschiedlich
- **Übersetzungsverhältnis** $\ddot{u} = N_s / N_r$ (genau: $\ddot{u} = \frac{k_{ws} N_s}{k_{wr} N_r} \approx \frac{N_s}{N_r}$) bei $q = 1$: $k_{ws} = 1$
- Umgerechneter Rotorstrom: $\underline{I}'_r = \underline{I}_r / \ddot{u}$ $\underline{U}'_r = \underline{U}_r \cdot \ddot{u}$
- Über den von Primär- und Sekundärstrom (= Ständer- und Läuferstrom $\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_r$) gemeinsam erregten **Hauptfluss** Φ_h sind **sie induktiv gekoppelt**:
Hauptinduktivität L_h : $\Phi_h \cdot N_s k_{ws} / \sqrt{2} = L_h \cdot I_m$
- Es existieren **Streu-Magnetflüsse** (z. B. in den Nuten), die an der Verkopplung nicht teilnehmen (als Streuinduktivitäten dargestellt): $L_{s\sigma}$ $L'_{r\sigma} = \ddot{u}^2 \cdot L_{r\sigma}$

Gegensatz zum Transformator

- Rotorfrequenz ist i. A. **NICHT** die Statorfrequenz, sondern $f_r = s f_s$
- Rotorwicklung ist **kurzgeschlossen**.
- Im Eisenkreis **verringert der Luftspalt δ** zwischen Stator und Rotor **die Hauptinduktivität** $L_h \sim 1/\delta$ deutlich gegenüber dem Transformator

- Induzierte Spannung ständerseitig:

$$\underline{U}_{sh} = j2\pi f_s \cdot N_s k_{ws} \cdot \underline{\Phi}_h / \sqrt{2} = j\omega_s L_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad X_h = \omega_s L_h$$

- Wegen δ ist der **Magnetisierungsstrom** $\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_r$ relativ **groß** !
(ca. 30% bis 50% vom Nennstrom).

Zusammenfassung

Funktionsweise von Asynchronmaschinen

- Ständer-Drehfeld-Grundwelle rotiert mit „Synchronzahl“
- Läufer-Käfigwicklung rotiert im Motorbetrieb langsamer, wird von Ständerfeld induziert
- Im Kurzschluss-Käfig fließen Läuferströme: Bilden mit Ständerfeld antreibendes Drehmoment
- Relative Differenzdrehzahl zwischen Ständerdrehfeld und Läufer = „Schlupf“
- Analogie zum Transformator, aber Läuferfrequenz ungleich Ständerfrequenz
- Läuferfrequenz = Schlupf x Ständerfrequenz

4.4 Asynchronmaschinen

4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen

4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

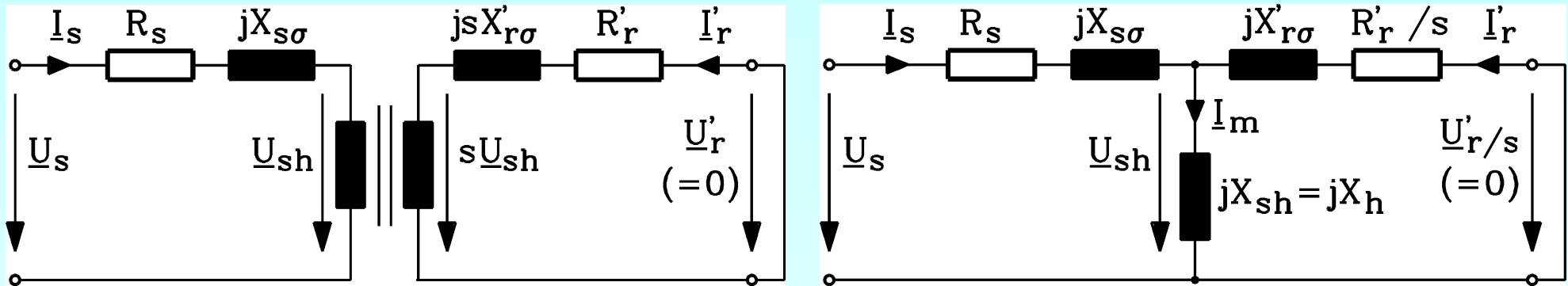
4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine



- **Spannungsgleichung eines Statorstrangs:** **Kreisfrequenz ω_s :**

$$\underline{U}_s = (R_s + j\omega_s L_{s\sigma}) \cdot \underline{I}_s + \underline{U}_{sh} = (R_s + j\omega_s L_{s\sigma}) \cdot \underline{I}_s + j\omega_s L_{sh} \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

$$\underline{U}_s = (R_s + jX_{s\sigma}) \cdot \underline{I}_s + jX_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

- **Spannungsgleichung eines Rotorstrangs oder Rotorstabs:**

Kreisfrequenz $\omega_r = s\omega_s$

$$\underline{U}'_r = (R'_r + js\omega_s L'_{r\sigma}) \cdot \underline{I}'_r + js\omega_s L_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) = 0$$

- Division durch **s** ermöglicht **T-Ersatzschaltbild:**

$$\underline{U}'_r / s = (R'_r / s + j\omega_s L'_{r\sigma}) \cdot \underline{I}'_r + j\omega_s L_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) = 0$$

$$0 = (R'_r / s + jX'_{r\sigma}) \cdot \underline{I}'_r + jX_h \cdot (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

Bedeutung des “Widerstands” R'_r / s

- Zugeführte elektrische Leistung im Stator: $P_{in} = P_{e,s} = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_s$
- **Stromwärmeverluste im Stator:** $P_{Cu,s} = 3 R_s I_s^2$
- Über den Luftspalt auf den Rotor übertragene Leistung (**“Luftspaltleistung”**):
$$P_\delta = P_{e,s} - P_{Cu,s} = 3 \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r'^2$$
- Diese Leistung muß gemäß Ersatzschaltbild im **“Widerstand” R'_r / s** umgesetzt werden.
- **Stromwärmeverluste im Rotor:** $P_{Cu,r} = 3 R'_r I_r'^2 = 3 \cdot (R_r \ddot{u}^2) \cdot (I_r / \ddot{u})^2 = 3 R_r I_r^2$
- **Abgegebene mechanische Leistung:**
$$P_m = P_\delta - P_{Cu,r} = 3 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \cdot R'_r I_r'^2 = \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \cdot P_{Cu,r}$$
- **Merkformeln:** $P_{Cu,r} = s \cdot P_\delta$ $P_m = (1 - s) \cdot P_\delta$

Beispiel: Schlupf s und Drehzahl n

$$\underline{\underline{P_{Cu,r} = s \cdot P_{\delta}}}$$

$$\underline{\underline{P_m = (1-s) \cdot P_{\delta}}}$$

$s = 0$: $n = n_{syn}$ $P_{Cu,r} = 0$ $P_m = P_{\delta}$, aber $P_{\delta} = 0$, weil $I_r = 0$

$s = 0.1$: $n = 0.9 \cdot n_{syn}$ $P_{Cu,r} = 0.1 \cdot P_{\delta}$ $P_m = 0.9 \cdot P_{\delta}$

$s = 1$: $n = 0$ $P_{Cu,r} = P_{\delta}$ $P_m = 0$, weil $n = 0$



Drehfeldleistung („Luftspaltleistung“)

- Merkformel:

$$\underline{\underline{P_{Cu,r} = s \cdot P_{\delta}}}$$

$$\underline{\underline{P_m = (1-s) \cdot P_{\delta}}}$$

- **Mechanische Leistungsbilanz:**

mit $\Omega_m = (1-s) \cdot \Omega_{syn}$

daher: $P_m = \Omega_m \cdot M_e = (1-s) \cdot \Omega_{syn} \cdot M_e = (1-s) \cdot P_{\delta}$

**Drehfeldleistung:
(Luftspaltleistung)**

$$\underline{\underline{P_{\delta} = \Omega_{syn} \cdot M_e}}$$

Drehmoment:

$$\underline{\underline{M_e = P_{\delta} / \Omega_{syn} = P_{Cu,r} / (s \cdot \Omega_{syn})}}$$

Zusammenfassung

Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

- Transformator-Ersatzschaltbild verwendbar, wenn Läuferwiderstand durch Schlupf geteilt wird
- Drehfeldleistung des Drehfelds = Luftspaltleistung
- Luftspaltleistung $\sim$ Drehmoment $\times$ Synchrondrehzahl
- Läuferverluste = Schlupf $\times$ Drehfeldleistung
- Ohne Läuferverluste KEIN Drehmoment

4.4 Asynchronmaschinen

4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen

4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

Stromaufnahme des Asynchronmotors bei Leerlauf

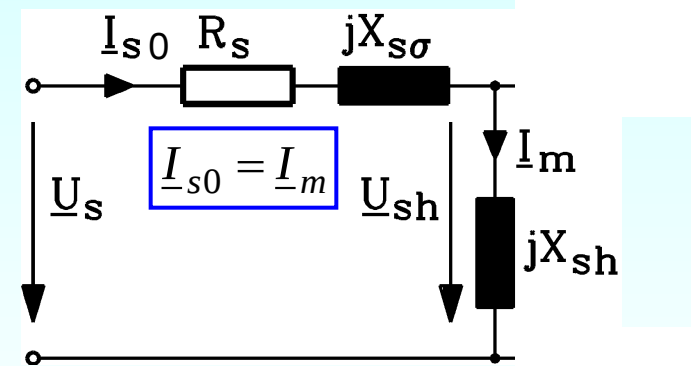
- **Leerlauf:** Schlupf $s = 0$, daher R'_r / s “unendlich” groß.
- folglich $I'_r = 0$. Daher LORENTZ-Kraft F und Drehmoment $M_e = 0$.

- **Spannungsgleichung eines Statorstrangs:** **Ersatzschaltbild bei Leerlauf ($s = 0$):**

$$\underline{U}_s = (R_s + jX_{s\sigma}) \cdot \underline{I}_{s0} + jX_h \cdot (\underline{I}_{s0} + 0)$$

- $I_{s0} = I_m$ **Leerlaufstrom I_{s0}** = ca. $(0.3 \dots 0.5) \cdot I_N$

$$\underline{I}_{s0} = \frac{\underline{U}_s}{R_s + j(X_{s\sigma} + X_h)}$$



Fazit: Relativ hoher **Leerlaufstrom** $I_{s0} = I_0$ zur Erzeugung des Magnetfelds, daher: **Luftspalt** zwischen Stator und Rotor **möglichst klein**, damit L_h groß und I_{s0} klein wird.

Berechnung des Rotorstroms des Asynchronmotors bei Belastung

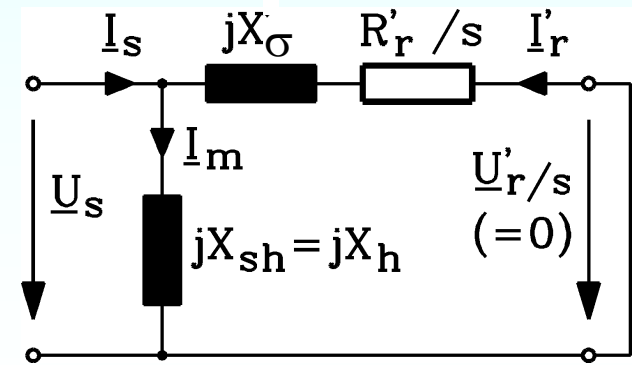
- **Belastung:** Schlupf $s > 0$:
Rotorstrom I'_r fließt und bildet mit Luftspaltfeld B_δ ein Drehmoment M_e .
- VEREINFACHENDE ANNAHMEN:
 - a) Gesamte Streuinduktivität $L_\sigma = L_{s\sigma} + L'_{r\sigma}$ auf der Sekundärseite $X_\sigma = X_{s\sigma} + X'_{r\sigma}$
 - b) $R_s = \text{ca. } 0$
 - c) $I_m = \underline{U}_s / (jX_h) = I_{s0} = \text{konst.}, I_s = I_m - I'_r$
- **Spannungsgleichungen:**

Stator: $\underline{U}_s = jX_h \cdot I_m$ **Rotor:** $\underline{U}_s = -(R'_r / s + j(X_{s\sigma} + X'_{r\sigma})) \cdot I'_r$
- **Rotorstrom** (auf Ständerseite umgerechnet):

$$I'_r = - \frac{\underline{U}_s}{R'_r / s + j \cdot X_\sigma}$$

Betrag des Rotorstroms

$$I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{(R'_r / s)^2 + X_\sigma^2}}$$



Statorstrom = Magnetisierungsstrom + Rotorstrom

Leerlaufstrom $\underline{I}_{s0} = \frac{\underline{U}_s}{R_s + j(X_{s\sigma} + X_h)} \approx \frac{\underline{U}_s}{j(X_{s\sigma} + X_h)} \approx \frac{\underline{U}_s}{jX_h}$

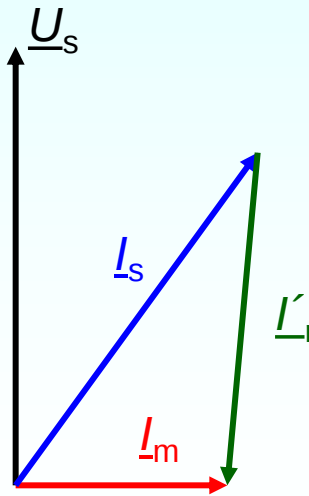
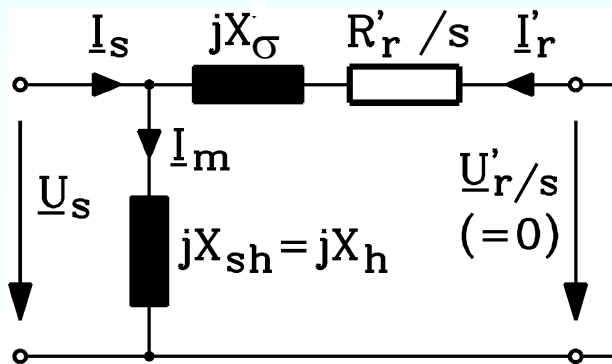
$$\underline{I}_{s0} \approx -j \cdot \frac{U_s}{X_h} = \underline{I}_m$$

Rotorstrom $\underline{I}'_r = -\frac{\underline{U}_s}{R'_r / s + jX_\sigma}$

Statorstrom bei Belastung: $s \neq 0$:

$$\underline{I}_s = \underline{I}_m - \underline{I}'_r = \frac{\underline{U}_s}{jX_h} + \frac{\underline{U}_s}{(R'_r / s) + jX_\sigma} \quad \longrightarrow \quad \underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{jX_h} \cdot \frac{R'_r + js(X_\sigma + X_h)}{R'_r + jsX_\sigma}$$

Vereinfachtes Ersatzschaltbild bei Belastung:



$$I_s(s) = |\underline{I}_s| = \frac{U_s}{X_h} \cdot \sqrt{\frac{R_r'^2 + s^2(X_\sigma + X_h)^2}{R_r'^2 + s^2 X_\sigma^2}}$$

Statorstrom in Abhängigkeit der Drehzahl

$$I_s(s) = |\underline{I}_s| = \frac{U_s}{X_h} \cdot \sqrt{\frac{R_r'^2 + s^2(X_\sigma + X_h)^2}{R_r'^2 + s^2 X_\sigma^2}} \quad R_s \approx 0, \quad X_\sigma = X_{s\sigma} + X_{r\sigma}'$$

Leerlauf: $n = n_{\text{syn}}, s = 0: I_s(0) = I_{s0} = \frac{U_s}{X_h}$

Unendlich hohe Drehzahl: $n \rightarrow \pm\infty, |s| = \infty: I_s(\infty) = \frac{U_s}{X_h} \cdot \frac{X_\sigma + X_h}{X_\sigma} \approx \frac{U_s}{X_\sigma} \quad (X_\sigma \ll X_h)$

Drehzahl Null: $n = 0, s = 1: I_s(1) = I_{s1} = \frac{U_s}{X_h} \cdot \sqrt{\frac{R_r'^2 + (X_\sigma + X_h)^2}{R_r'^2 + X_\sigma^2}} \approx \frac{U_s}{X_h} \cdot \frac{X_\sigma + X_h}{X_\sigma} = I_s(\infty)$
($R_r' \ll X_\sigma, X_h$)

Fazit:

Anfahrstrom I_{s1} (bei Schlupf 1 = Drehzahl Null!) viel größer als Leerlaufstrom:

$$I_{s1} \approx U_s / X_\sigma \gg U_s / X_h = I_{s0}$$

Statorstrom: steigt mit Schlupf an!

Statorstrom im motorischen Bemessungspunkt

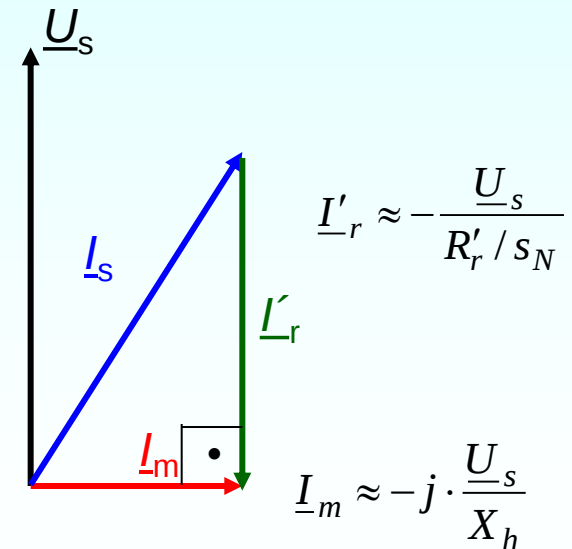
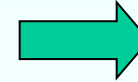
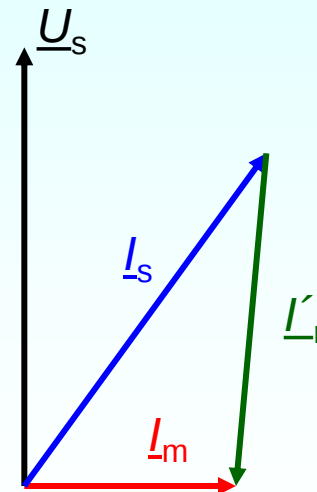
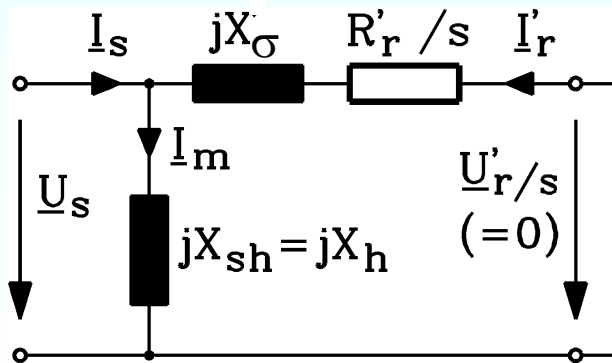
Statorstrom bei Nennschlupf: $s = s_N \ll 1$: Nennschlupf ist i. A. klein ca. 3% ... 10%

$$\underline{I}_s = \underline{I}_m - \underline{I}'_r = \frac{\underline{U}_s}{jX_h} + \frac{\underline{U}_s}{(R'_r / s_N) + jX_\sigma} \approx \frac{\underline{U}_s}{jX_h} + \frac{\underline{U}_s}{R'_r / s_N} = \underline{U}_s \cdot \left(\frac{s_N}{R'_r} - j \frac{1}{X_h} \right)$$

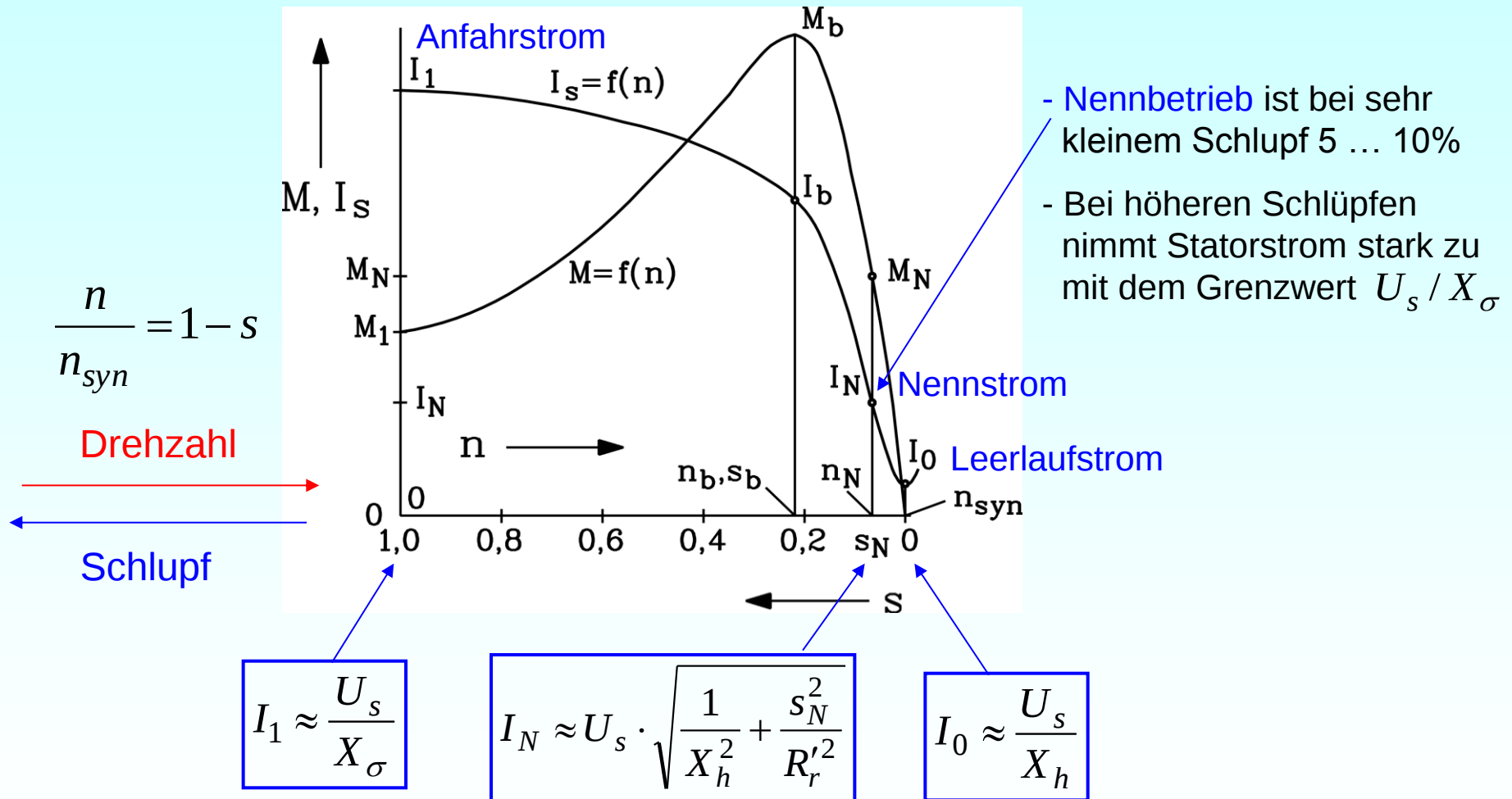
$$I_s(s_N) = I_{sN} \approx U_s \cdot \sqrt{\frac{1}{X_h^2} + \frac{s_N^2}{R_r'^2}}$$

bei kleinem Schlupf s_N

Vereinfachtes Ersatzschaltbild
bei Belastung:



Stator-Stromkennlinie $I_s = f(n)$ in Abhängigkeit der Drehzahl



Zusammenfassung

Stromaufnahme der Asynchronmaschine

- Bei Schlupf Null = Leerlauf: Minimaler Ständerstrom = Magnetisierungsstrom
- Läuferstrom ist Null bei Leerlauf = KEIN Drehmoment
- Mit steigendem Schlupf steigen Ständer- und Läuferstrom
- Nennschlupf ist klein, liegt nahe bei Leerlauf-Punkt
- Maximaler Ständer- und Läuferstrom bei unendlich hohem Schlupf; nur durch Ständerwiderstand und Gesamt-Streureaktanz begrenzt
- Beim Einschalten: Stillstand = Schlupf ist Eins („fast so wie unendlicher Schlupf“): Hoher Ständer- und Läufer-Anlaufstrom („Kurzschlussstrom“)

4.4 Asynchronmaschinen

4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen

4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

Beispiel: Leistungsbilanz der Asynchronmaschine im motorischen Bemessungspunkt: $s = s_N = 0.05$

Statorstromwärmeverluste: $P_{Cu,s} = 3R_s I_{sN}^2 = \text{ca. } 3\% \text{ von } P_{e,in}$

Stator-Ummagnetisierungsverluste: $P_{Fe,s} = \text{ca. } 3\% \text{ von } P_{e,in}$

Luftspaltleistung: $P_\delta = P_{e,in} - P_{Cu,s} - P_{Fe,s} = \text{ca. } 94\% \text{ von } P_{e,in}$

Rotorstromwärmeverluste: $P_{Cu,r} = s_N P_\delta = 0.05 \cdot P_\delta = \text{ca. } 4.7\% \text{ von } P_{e,in}$

Mechanische Leistung: $P_m = (1 - s_N) \cdot P_\delta = 0.95 \cdot P_\delta = \text{ca. } 89.3\% \text{ von } P_{e,in}$

Reibungs- und Zusatzverluste: $P_{R+Z} = \text{ca. } 1\% \text{ von } P_{e,in}$

Abgegebene Wellenleistung: $P_{m,out} = P_m - P_{R+Z} = \text{ca. } 88.3\% \text{ von } P_{e,in}$

Motor-Wirkungsgrad: $\eta_N = P_{m,out} / P_{e,in} = 88.3\%$

Drehmoment der Asynchronmaschine

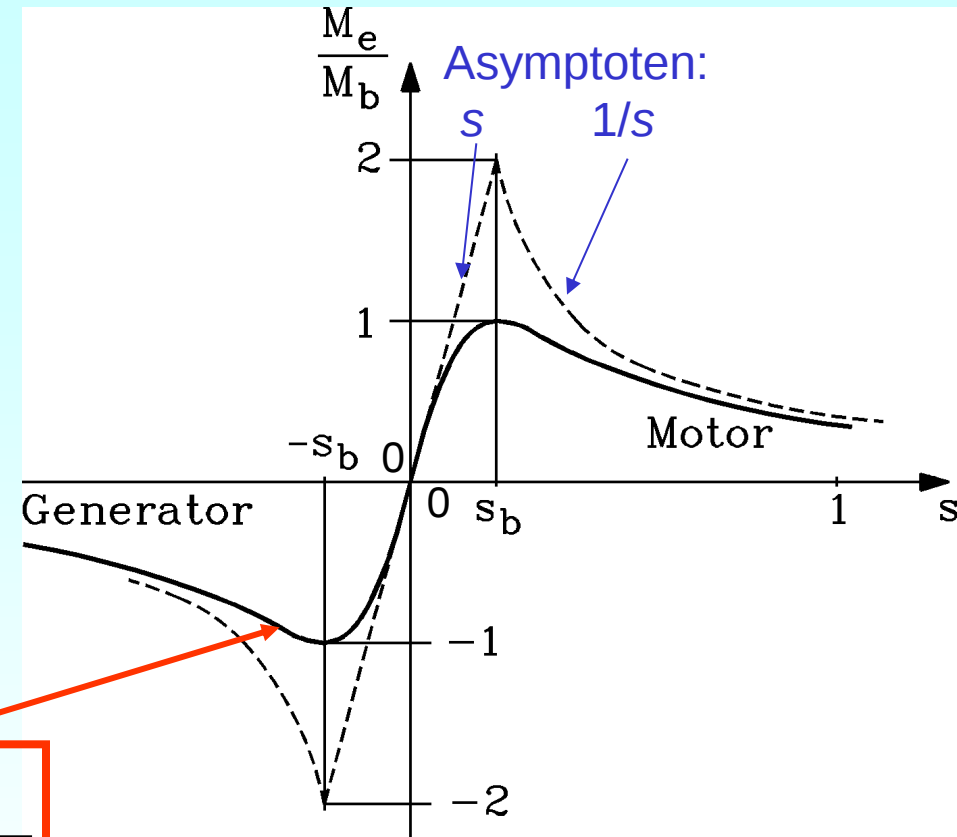
- Aus $M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{P_{Cu,r} / s}{\Omega_{syn}} = \frac{3R'_r I_r'^2 / s}{\Omega_{syn}}$

und bei $R_s = 0$: $I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{(R'_r / s)^2 + X_\sigma^2}}$

$$M_e = \frac{3U_s^2}{\Omega_{syn}} \cdot \frac{R'_r / s}{(R'_r / s)^2 + X_\sigma^2}$$

$$M_e = \underbrace{\frac{3U_s^2}{2\Omega_{syn} X_\sigma}}_{M_b} \cdot \frac{2}{\frac{R'_r}{sX_\sigma} + \frac{sX_\sigma}{R'_r}}$$

$$\frac{M_e}{M_b} = \frac{2}{\frac{s}{s_b} + \frac{s_b}{s}}$$



Bei $s = \pm s_b$ tritt das Maximalmoment $M_{e,max} = \pm M_b$ auf!

Bei kleinem Schlupf $s \ll 1$: $M_e \approx s \cdot \frac{2M_b}{s_b}$

KLOSS'sche Formel

Kippmoment:

$$M_b = \frac{3U_s^2}{2\Omega_{syn} X_\sigma}$$

Kippschlupf:

$$s_b = R'_r / X_\sigma$$



4.4 Asynchronmaschinen

4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen

4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

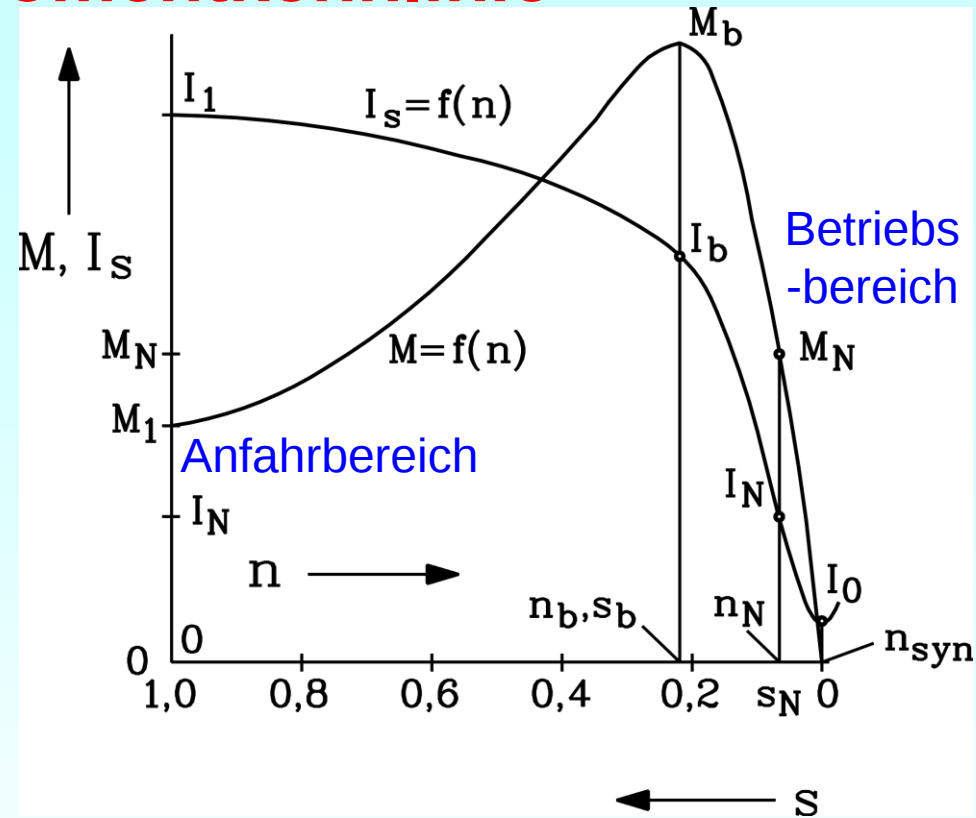
Strom- und Drehmomentkennlinie

- Sehr hoher **Anfahrstrom**: $I_{s1}=I_1 \approx U_s / X_\sigma$
aber relativ niedriges Anfahrmoment M_1

$$M_1 = M_e(s=1) = \frac{2M_b}{\frac{1}{s_b} + \frac{s_b}{1}} = \frac{2M_b s_b}{1 + s_b^2} \approx 2M_b s_b$$

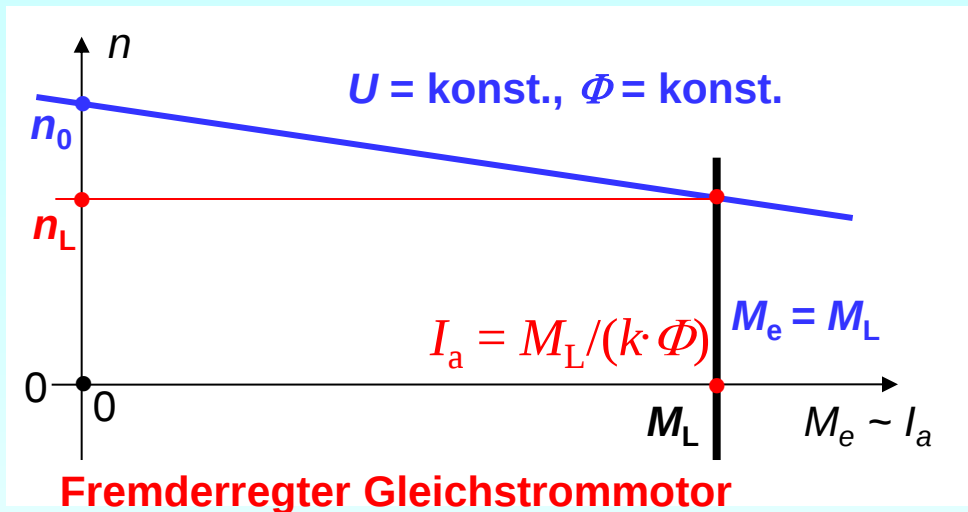
Abhilfe: "Stromverdrängungs"-Läufer

- Motor maximal bis zum **Kippmoment** belastbar



	n / n_{syn}	Schlupf	Ständerstrom	Moment
Leerlauf	1	$s = 0$	$I_0 = \text{ca. } 0.3I_N$	$M = 0$
Nennpunkt	0.92	$s = s_N = 8\%$	I_N	M_N
Kippen	0.78	$s = s_b = 22\%$	$I_b = \text{ca. } 2.5I_N$	$M_b = \text{ca. } 2M_N$
Anfahren	0	$s = 1 = 100\%$	$I_1 = \text{ca. } 4I_N$	$M_1 = \text{ca. } 0.8M_N$

Gleichstrommotor versus Asynchronmotor

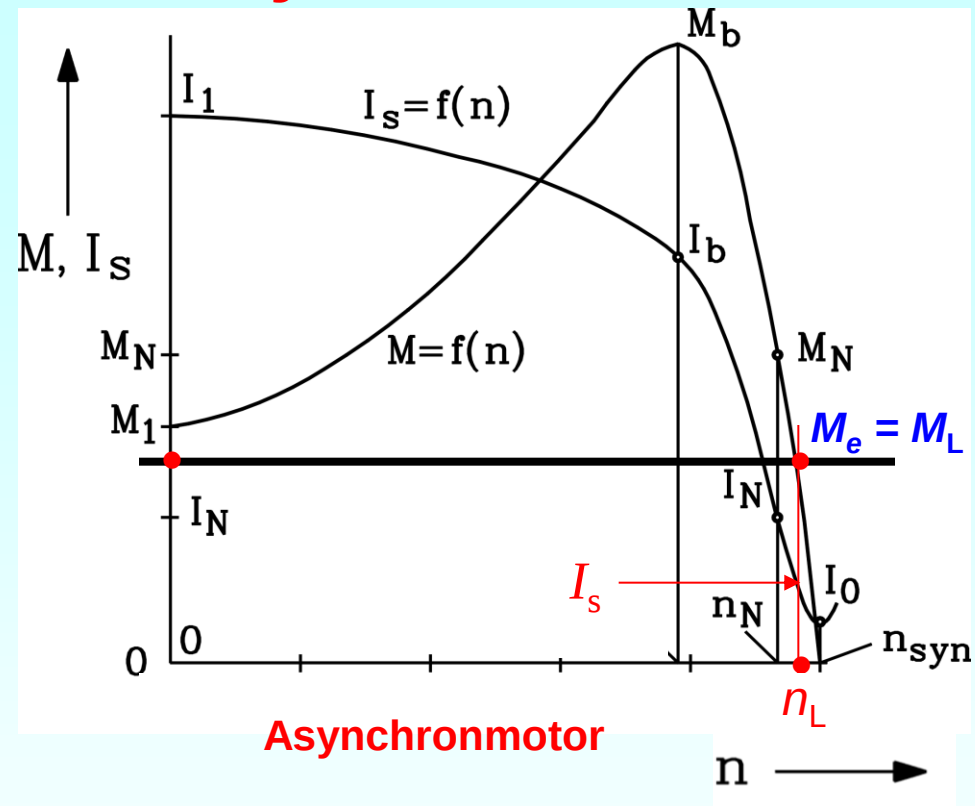
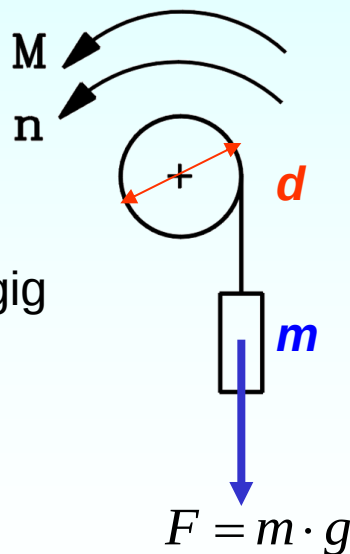


Beispiel:

Last heben

$$M_L = F \cdot d / 2$$

Lastmoment unabhängig
von der Drehzahl



Zusammenfassung

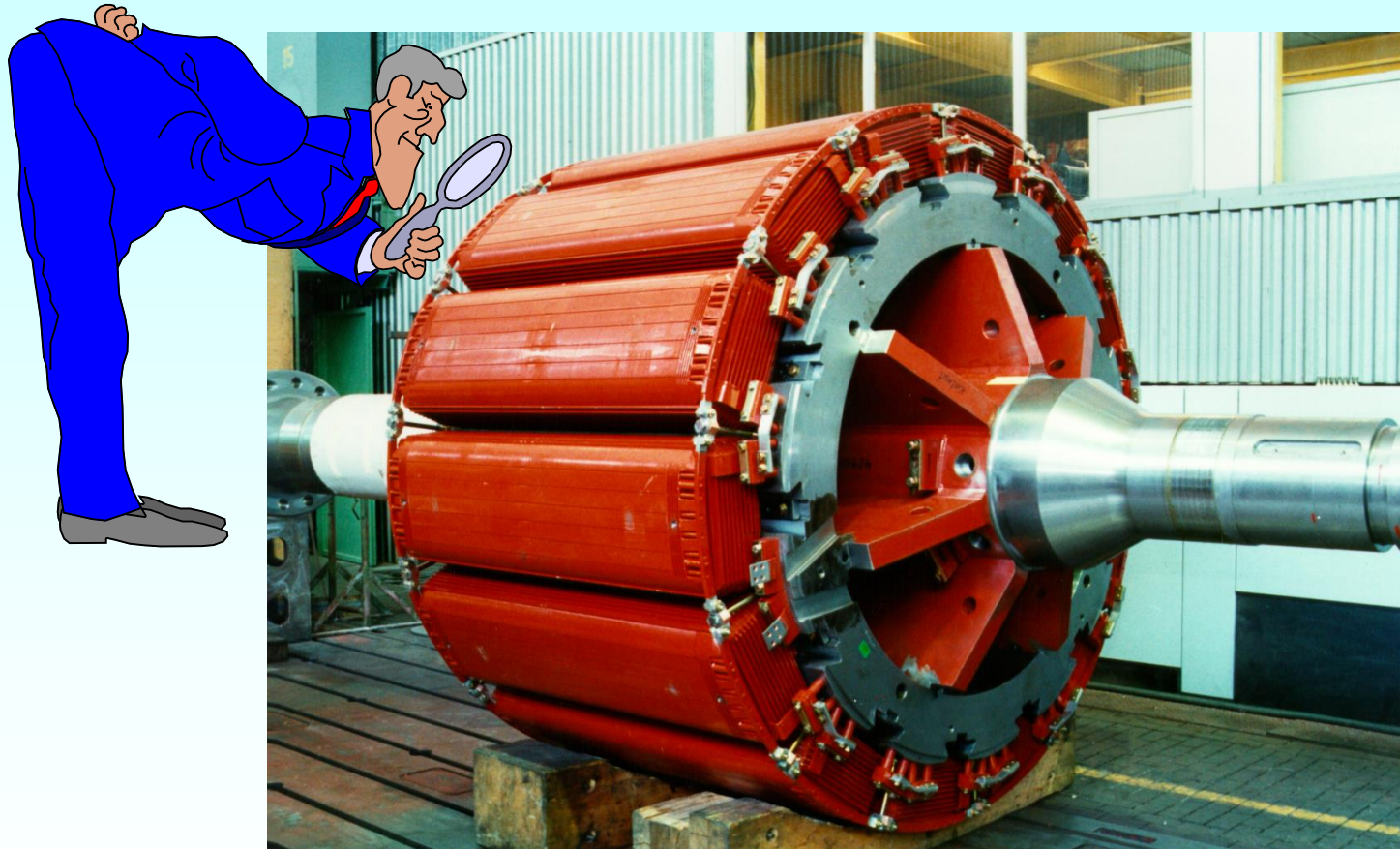
Leistungsbilanz und Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

- Ständer-Drehfeld induziert die Läuferwicklung nur, wenn Läufer „asynchron“ dreht, so dass Läuferströme fließen
- Läuferströme bilden mit Ständer-Drehfeld das Drehmoment
- Leerlaufstrom etwa 30% ... 50% des Nennstroms
- Anlaufstrom etwa fünffacher Nennstrom
- Drehmoment-Drehzahl-Kurve = KLOSS'sche Funktion
- Asynchronmaschine hat Maximalmoment (= Kippmoment) im Motor- UND Generatorbetrieb
- Schlupf positiv = Läufer dreht untersynchron = Motorbetrieb
- Schlupf negativ = Läufer wird übersynchron angetrieben = Generatorbetrieb

4. Drehfeldmaschinen

- 4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds
- 4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds
- 4.3 Drehfrequenz des Drehfelds
- 4.4 Asynchronmaschinen
- 4.5 Synchronmaschinen
- 4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (kein Prüfungsstoff!)

4.5 Synchronmaschinen



Quelle: Andritz Hydro,
Österreich



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/67

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



4.5 Synchronmaschinen

4.5.1 Aufbau und Funktionsweise von Synchronmaschinen

4.5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine

4.5.3 Generator- und Motorbetrieb - Bedeutung des Polradwinkels

4.5.4 Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine

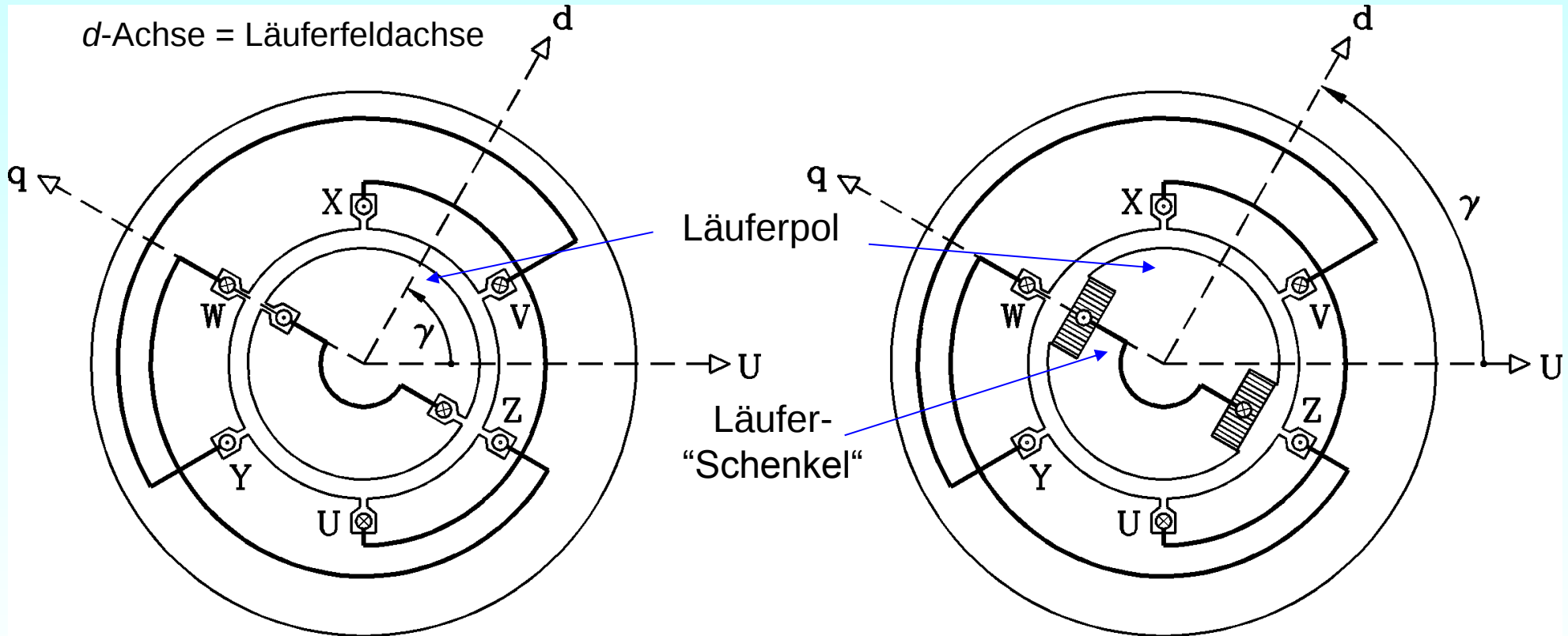
Synchronmaschine - Funktionsprinzip

- **Läufer** hat konstantes Magnetfeld mit z.B. **zwei** Polen (erregt über Permanentmagnete oder von Gleichstrom durchflossene Spulen)
- **Ständer** hat dreisträngige “Drehfeldwicklung”, die vom Drehstromnetz gespeist wird und ein z. B. **zweipoliges** Drehfeld erregt.
- Läuferpolzahl = Ständerpolzahl
- Tangentiale **LORENTZ-Kraft** vom Ständerfeld auf stromdurchflossene Leiter der Läuferwicklung: Es entsteht das elektromagnetische **Drehmoment** M_e , das den Läufer **SYNCHRON** (“gleich schnell”) mit dem Ständerdrehfeld mitzieht.

Synchronmaschine mit Vollpol- und Schenkelpol-Läufer

Beispiel: $2p = 2$, $m = 3$, $Q_s = 6$, $q = 1$

γ : Läuferdrehwinkel



VOLLPOL: Erregerwicklung in Läuferfalten; **SCHENKELPOL:** Konzentrische Wicklung;
Luftspalt konstant Luftspalt wegen Polücke nicht konstant

Einsatzgebiete der Synchronmaschine

- **Synchronmaschinen direkt am Netz:** konstante Statorfrequenz

Motor: Läuferfeldachse läuft hinter Drehfeldachse

- Absoluter **Festdrehzahl**antrieb („Synchronlauf“) – z. B. Uhrenantrieb

Generator: Läuferfeldachse läuft vor Drehfeldachse = muss angetrieben werden

- z. B. Großmaschinen Stromerzeuger bis ca. 2000 MVA
(2 GW: Kernkraftwerk *Olkiluoto/Finnland*).

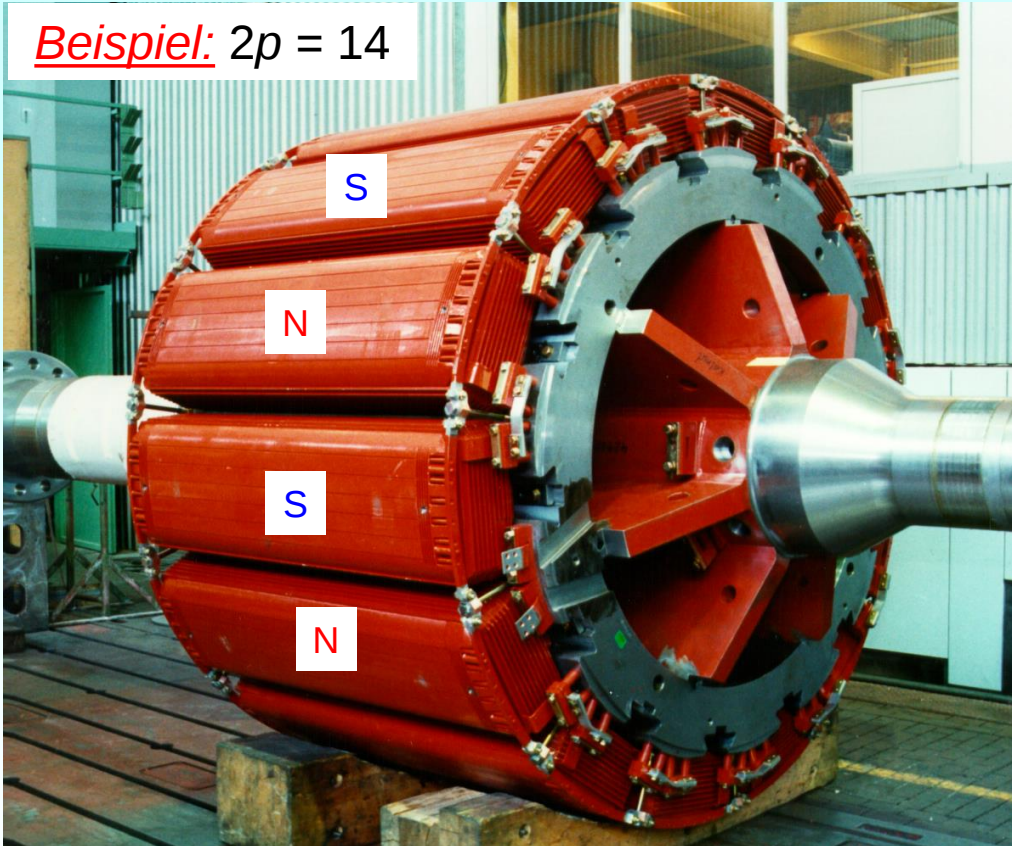
- **Synchronmaschinen mit Umrichterspeisung:** variable Statorfrequenz

- Drehzahlgeregelte Motoren für Werkzeugmaschinen, Verpackungsmaschinen,... $\Rightarrow$ kleine Leistung, **Permanentmagneterregung**
- Großantriebe bis 100 MW (z. B. Antrieb für Windkanal), Schiffsantriebe, ele. Traktion (z. B. *Frankreich*: TGV, 1. Generation),

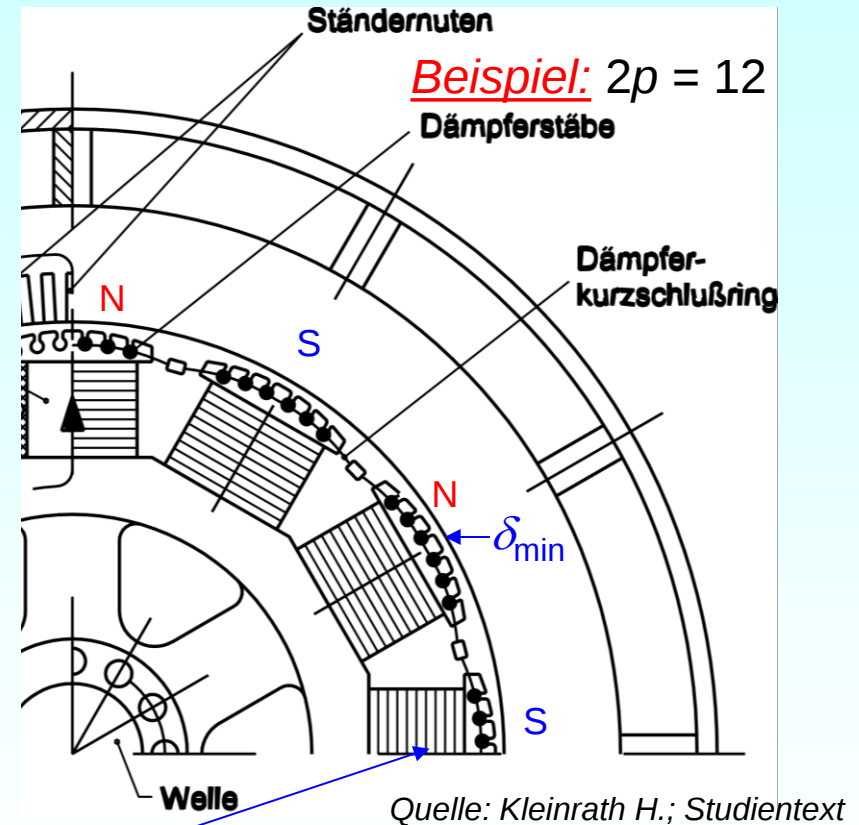
Schenkelpol-Synchronmaschine

- Ausgeprägte N- und S-Pole, Pollücken dazwischen, Luftspalt nicht konstant, Polspulen als Erregerwicklung, Luftspalt in Polmitte am kleinsten ($\delta_{\min}$)

Beispiel: $2p = 14$



Quelle: Andritz Hydro, Österreich



- **Läufer** (“**Polrad**”) über Schleifringe mit Gleichstrom (“**Feldstrom I_f** ”) erregt.

Synchronmaschinen

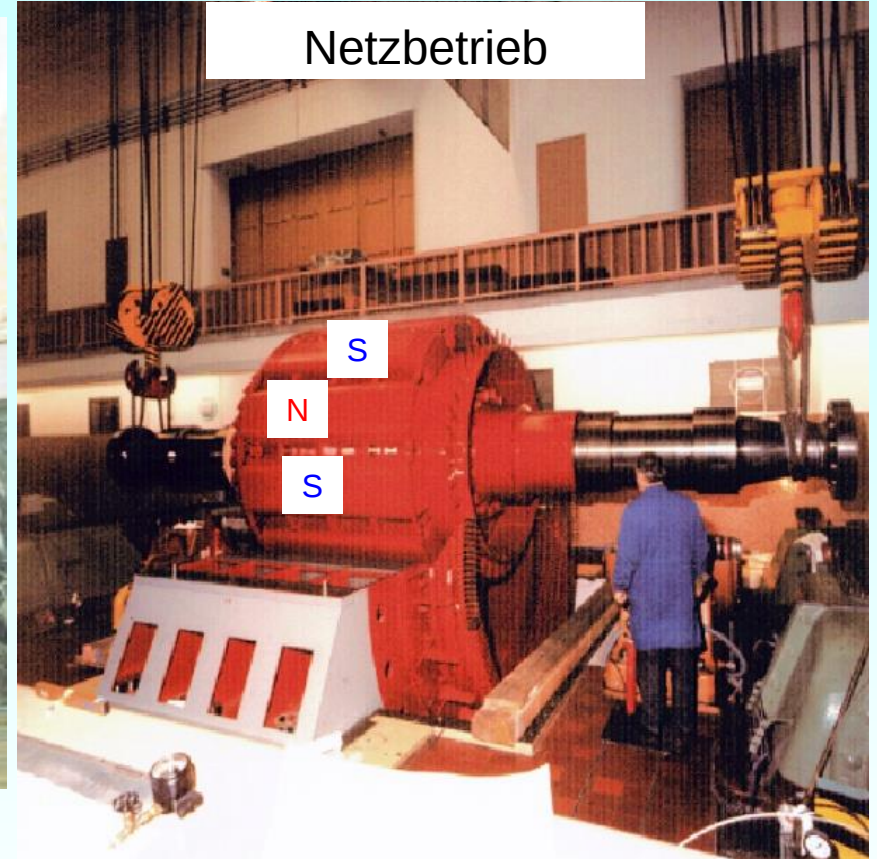
Umrichterspeisung



Elektrisch oder Permanentmagnet-erregte
Schiffspropellerantriebe:
z. B. Kreuzfahrtschiff “M/S Elation”:
2 x 14 MW, 0 ... 150 /min

Quelle: ABB Finnland

Netzbetrieb



Kraftwerks-“Upgrading” von 50 MVA auf
60 MVA: Einbau des 10-poligen **Generator-
/Motorläufers**, Pumpspeicher-Kraftwerk
Kaprun, Österreich

Quelle: Andritz Hydro, Österreich



Rotor einer Vollpol-Synchronmaschine, 8-polig

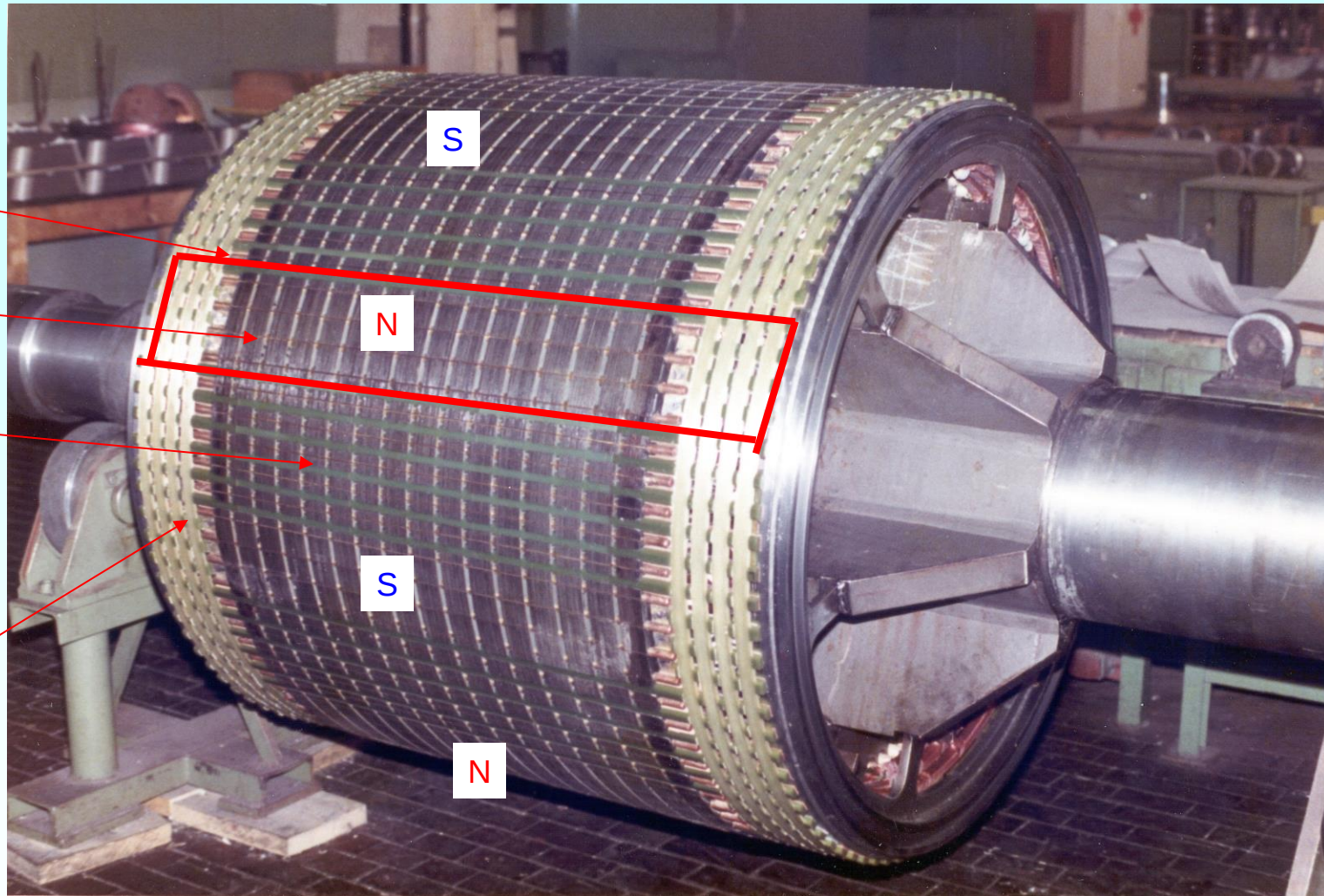
Drei Feldspulen
pro Pol: $q_r = 3$

Dämpferkäfig mit
9 Stäben pro Pol

Radiale
Lüftungsschlitze

Rotor aus Blechen
geschichtet

Glasfaser-
Bandage fixiert die
Feldwicklung im
Stirnbereich



Quelle: Andritz Hydro, Bhopal, India

Zweipoliger Läufer einer Vollpol-Synchronmaschine

**Einsatz als zweipoliger Turbogenerator
mit einer Dampfturbine**

Beispiel: $n = 3000/\text{min} = 50/\text{s}$:

Polzahl $2p = 2 \cdot (f/n) = 2(50/50) = \underline{2}$

- Umfangsgeschwindigkeit des Läufers = $v_{syn} = d_{si} \pi \cdot n_{syn}$

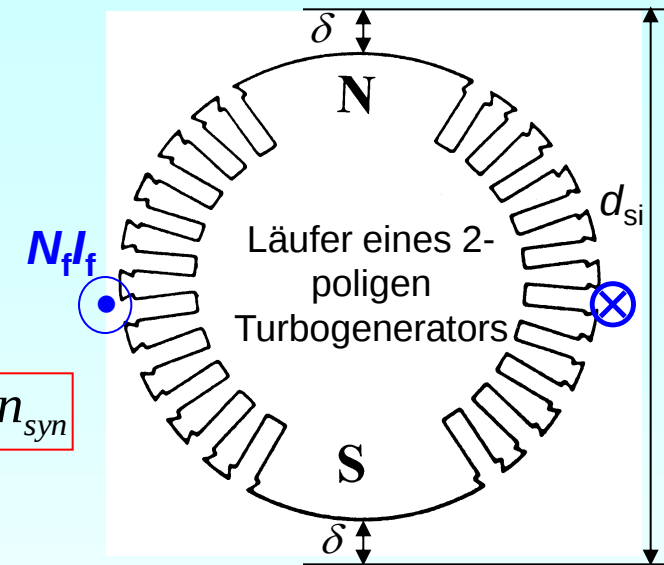
Umlauf-Geschwindigkeit des Drehfelds:

Beispiel:

$d_{si} = 1.1 \text{ m}$, $v_{syn} = 1.1 \pi (3000/60) = 173 \text{ m/s} = \underline{622 \text{ km/h}}$

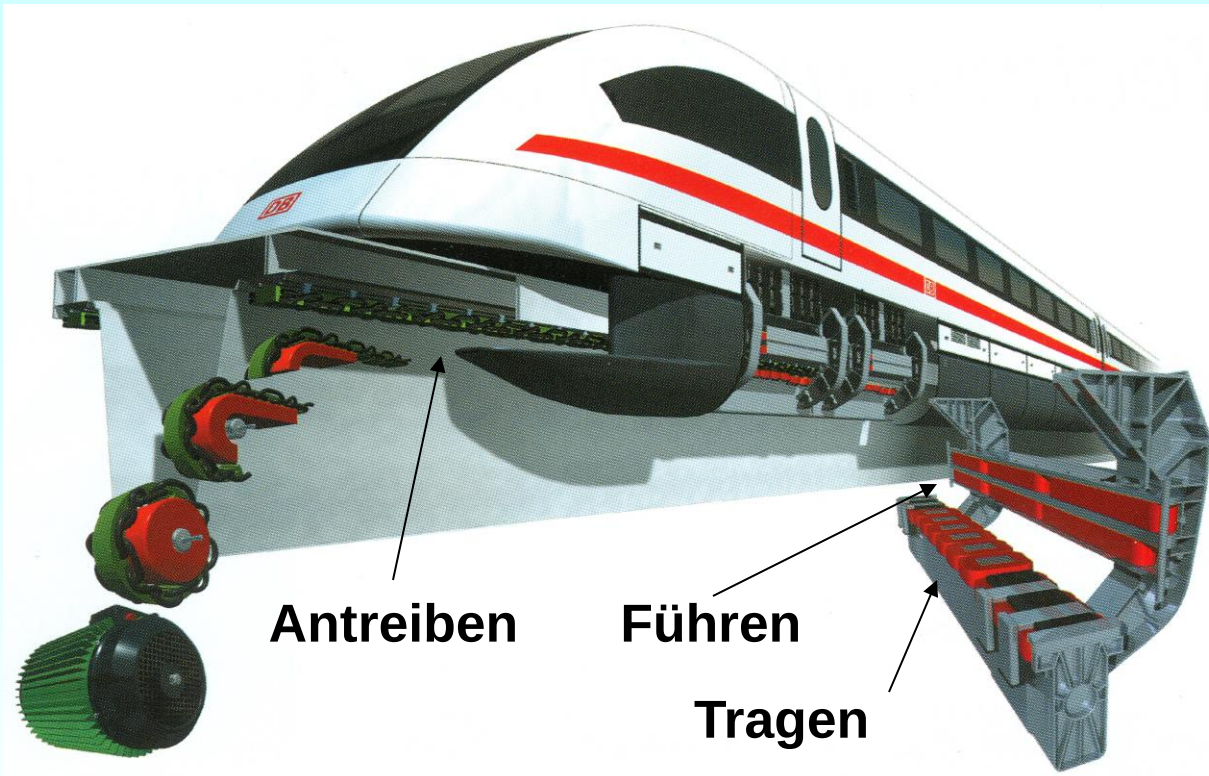
- **Sehr hohe Fliehkräfte:** Läufer muß aus massivem, hochfestem Stahl sein, Nuten für die Erregerwicklung werden gefräst.

5 Feldspulen pro Pol: $q_r = 5$

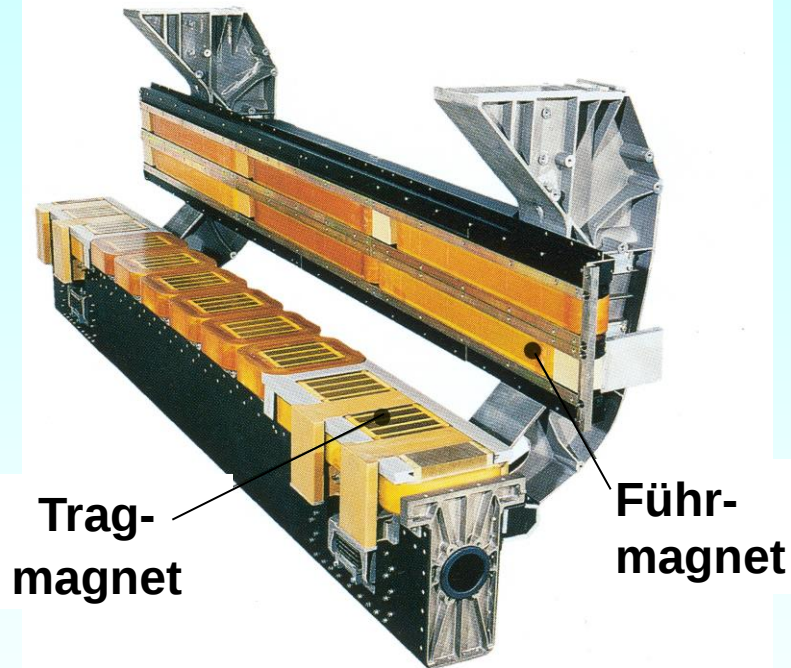


Quelle: Kleinrath H.; Studententext

Synchron-Linearmotor mit magnetischem Tragen und Führen beim *TRANSRAPID*



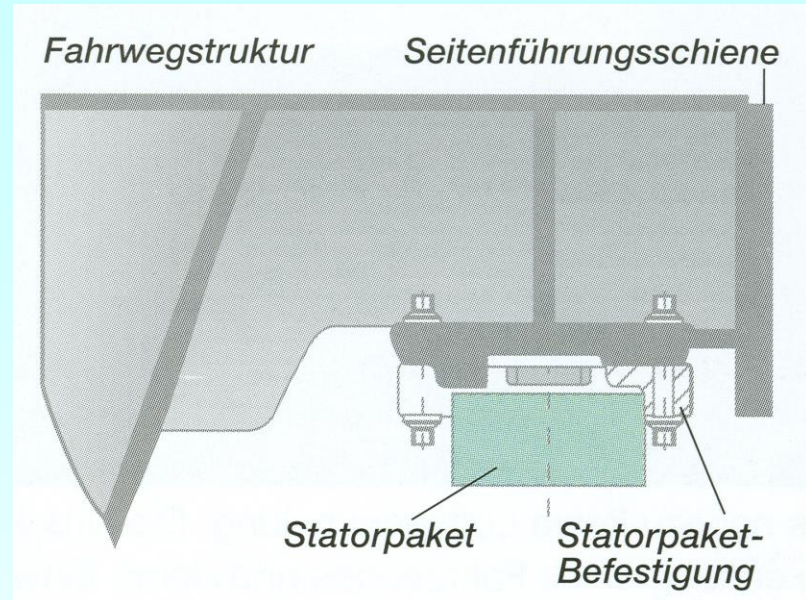
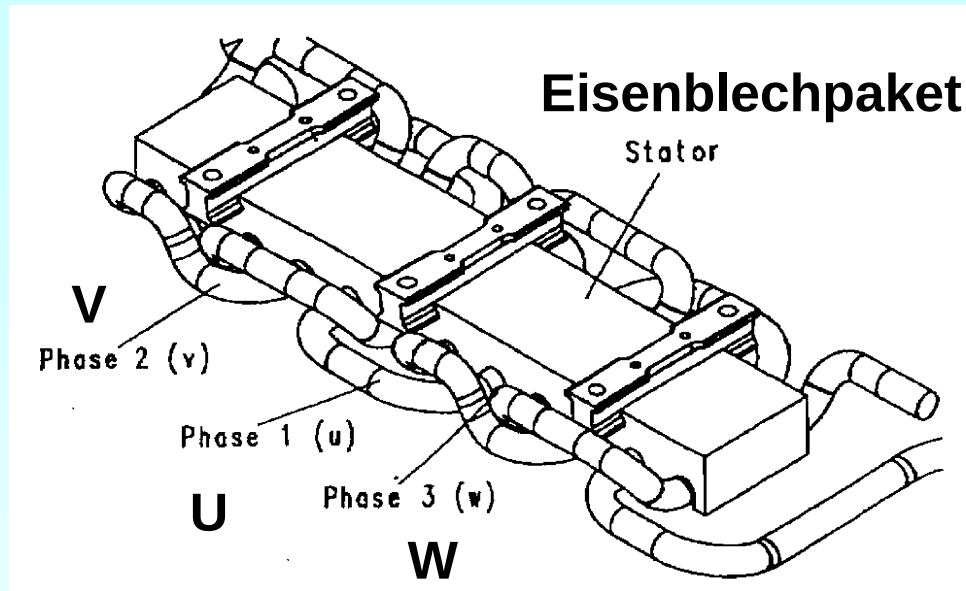
Trag- und Führmodul



Die Tragmagnete ziehen **von unten** bei einem **Luftspalt von ca. 10 ...13 mm** das Fahrzeug an den Stator des SYNCHRON-Linearmotors, der in der Trasse liegt. Dadurch erhält das Fahrzeug **OBERHALB** der Trasse eine **Bodenfreiheit von 150 mm**.

Quelle: Transrapid, Thyssen, Siemens

Dreiphasige Langstatorwicklung im Ständerblechpaket



Drei „Phasen“ (Wicklungsstränge) U, V, W: wellenartig verlegte Aluminium-Kabel ergeben Spulen mit einer Windung pro Polpaar und Strang.

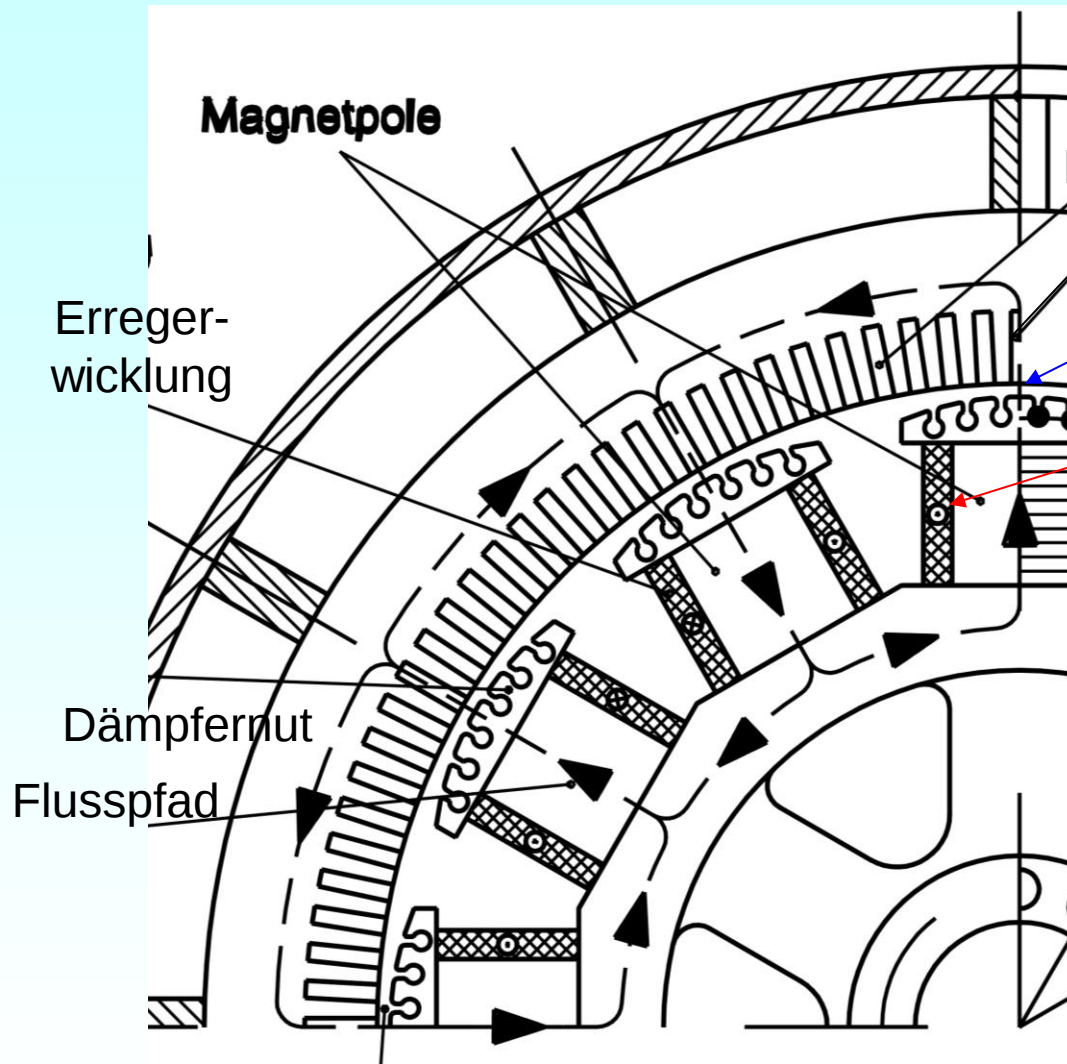
SYNCHRON-Linear-Langstator-Motor: Polteilung: 258 mm, 1 Einheit = 4 Pole = 1032 mm, 24 Einheiten = 1 Sektion = 24 768 m, Eisenbreite 185 mm, zwei Motorwicklungen je Fahrweg

Mehrere Sektionen ergeben einen Speiseabschnitt: Shanghai: 0.9 ... 5.0 km

Ca. 180 Pole passen unter ein Fahrzeug (= 46 m Länge)

Quelle: Transrapid, Thyssen, Siemens

Läuferfeld („Polradfeld“)



Feldlinie als geschlossene Kurve C für Durchflutungssatz:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} \approx 2H_\delta \delta_{\min} = 2 \cdot N_{f,Pol} I_f$$

Erregerdurchflutung pro Läuferpol:

$$N_{f,Pol} I_f$$

Flussdichte beim minimalen Luftspalt:

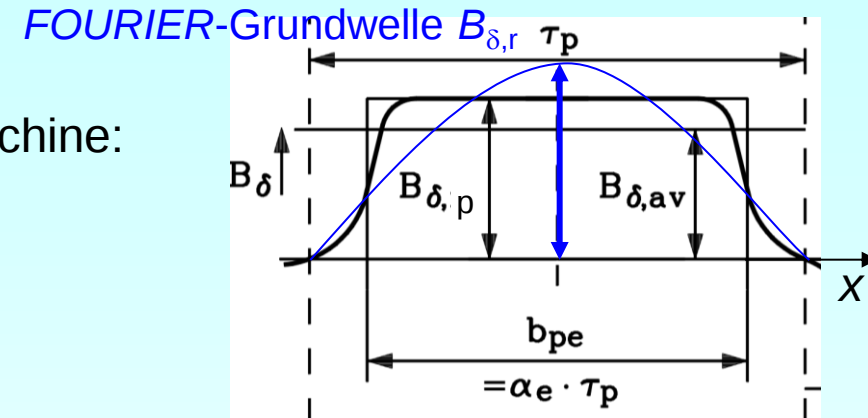
$$B_{\delta,p} = \mu_0 H_\delta \approx \mu_0 \cdot N_{f,Pol} I_f / \delta_{\min}$$

Leerlauf: $I_s = 0$: Induzierte Ständerspannung („Polradspannung“)

- Läuferfluss pro Pol:** analog zur Gleichstrommaschine:

$$\Phi_p = \frac{2}{\pi} \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{\delta,r} \approx \alpha_e \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{\delta,p}$$

Das Feld $B_{\delta,p}$ wird vom Läuferstrom I_f erregt.



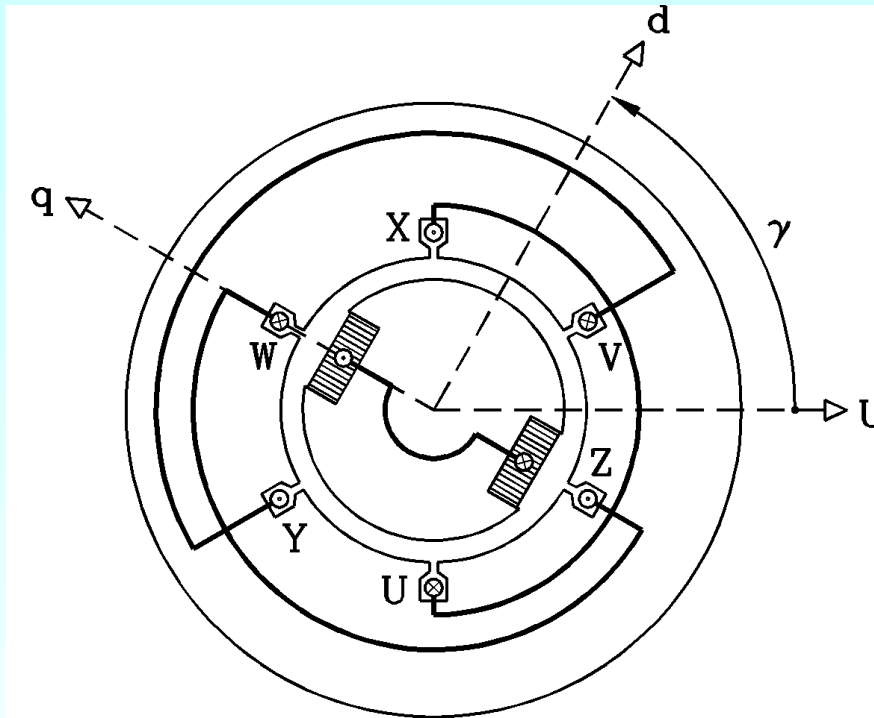
Der Fluss ist bezüglich des Läufers ein Gleichfluss, bezüglich dem Ständer wegen der Läuferrotation ein Wechselfluss $\Phi_p(t)$

- Rotierendes Polrad (Drehzahl n): $\Phi_p(t) = \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ Frequenz $f = n \cdot p$
- Induzierte Spannung** je Ständerwicklungsstrang (**Polradspannung**)

$$U_{i0} = U_p = \omega \cdot N_s k_{ws} \cdot \Phi_p / \sqrt{2} = \sqrt{2} \pi f \cdot N_s k_{ws} \Phi_p \quad (k_{ws} \approx 0.95)$$

- Bei Änderung des Feldstroms I_f in der Polradwicklung ändert sich die induzierte Spannung $U_p \sim I_f$.

Induzierte Ständerspannung („Polradspannung“)



Beispiel: $q = 1 \Rightarrow k_{ws} = 1$

Verkettung des Läuferflusses mit Spule U

$$\Phi_p(t) = \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$\Psi_{p,U}(t) = N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Verkettung des Läuferflusses mit Spule V und W:

$$\Psi_{p,V}(t) = N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 2\pi/3)$$

$$\Psi_{p,W}(t) = N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 4\pi/3)$$

Induzierte Spannung je Strang bei Leerlauf = Polradspannung:

$$u_{i,U}(t) = -d\Psi_{p,U}(t)/dt = -\omega \cdot N_s k_{ws} \cdot \Phi_p \cdot \cos(\omega \cdot t) = -\sqrt{2} \cdot U_p \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$U_{i0} = U_p = \sqrt{2} \pi f \cdot N_s k_{ws} \Phi_p$$

Zusammenfassung

Aufbau und Funktionsweise von Synchronmaschinen

- Dreisträngige Ständer-Drehfeldwicklung am Sinus-Drehspannungssystem
- Ständerwicklung erzeugt Drehfeld mit ausgeprägter Grundwelle (rotiert mit „Synchrondrehzahl“)
- Läufer („Polrad“) hat Spulen oder Permanentmagnete
- Läufer-Gleichfeld von Gleichstrom (Erregerstrom) oder von Permanentmagneten erregt
- Ständer-Drehfeld bildet mit Läufer-Magnetfeld Drehmoment.
- Läufer wird gleich schnell mit Ständer-Drehwelle („synchron“) mitgezogen (Motorbetrieb)
- Läuferfeld induziert in Ständer-Wicklung „Polradspannung“

4.5 Synchronmaschinen

4.5.1 Aufbau und Funktionsweise von Synchronmaschinen

4.5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine

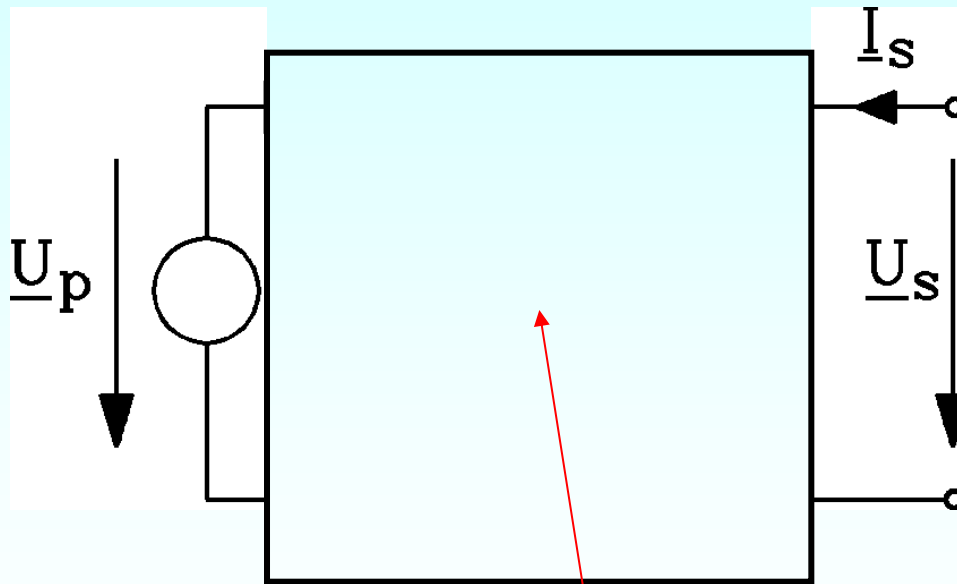
4.5.3 Generator- und Motorbetrieb - Bedeutung des Polradwinkels

4.5.4 Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine

Synchronmaschine bei Belastung: $I_s > 0$ (1)

- Die Ständerwicklung ist an das Drehspannungssystem $\underline{U}_s$ des Netzes angeschlossen.
Die Differenz $\underline{U}_s - \underline{U}_p$ treibt in der Ständerwicklung **Drehstrom** $\underline{I}_s$.

Spannungen je Strang in der Ständerwicklung:



$$u_{i0}(t) = -d\Psi_p(t)/dt \Big|_{i_s=0}$$

$$\underline{U}_{i0} = -j\omega \cdot \hat{\underline{\Psi}}_p / \sqrt{2} \Big|_{I_s=0}$$

$$\underline{U}_{i0} + \underline{U}_s = \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_s$$

$$-\underline{U}_{i0} + \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_s = \underline{U}_s$$

$$\underline{U}_p + \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_s = \underline{U}_s \quad (U_p = U_{i0})$$

Verbraucherzählpeilsystem für $\underline{U}_s$, $\underline{I}_s$

- *Ohm'scher* Spannungsfall durch $\underline{I}_s$ & Selbstinduktionsspannung durch das Ständerfeld, das von $\underline{I}_s$ erregt wird.

Synchronmaschine bei Belastung: $I_s > 0$ (2)

- Der Ständerstrom $\underline{I}_s$ erregt ein Drehfeld $B_{\delta,s}$ gleicher Polzahl $2p$, das gleich schnell wie das Läuferfeld $B_{\delta,r}$ rotiert. Beide überlagern sich zum **resultierenden $2p$ -Drehfeld B_δ** .
- Hauptfluss:** $\Phi_h = \frac{2}{\pi} \tau_p l_{Fe} B_\delta$
- Stator-Luftspalt-Drehfeld $B_{\delta,s}$ induziert die Ständerwicklung (Selbstinduktion, **Hauptinduktivität L_h**):

$$j\omega L_h \underline{I}_s = jX_h \underline{I}_s$$

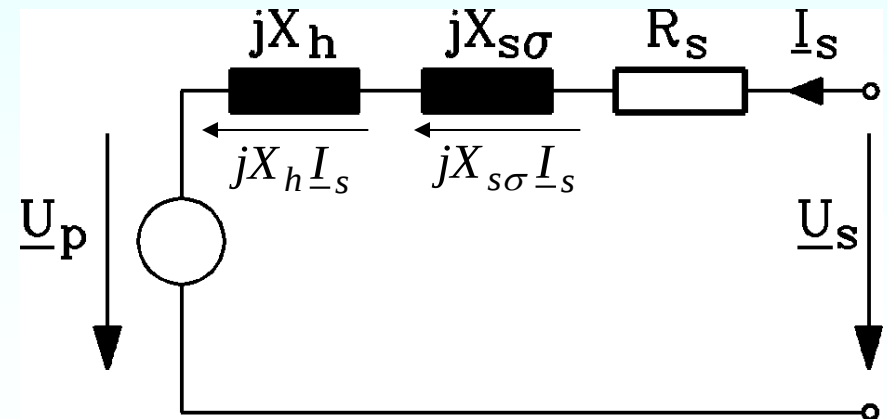
aber nicht die Läuferwicklung (Synchronlauf, **KEINE** Relativbewegung von $B_{\delta,s}$ zum Läufer!)

- Selbstinduktion im Ständer durch Streuflüsse z. B. in den Nuten (**Streuinduktivität $L_{s\sigma}$**):

$$j\omega L_{s\sigma} \underline{I}_s = jX_{s\sigma} \underline{I}_s$$

$$\underline{U}_s = (R_s + j\omega L_{s\sigma} + j\omega L_h) \cdot \underline{I}_s + \underline{U}_p$$

$$\underline{U}_s = (R_s + jX_{s\sigma} + jX_h) \cdot \underline{I}_s + \underline{U}_p$$



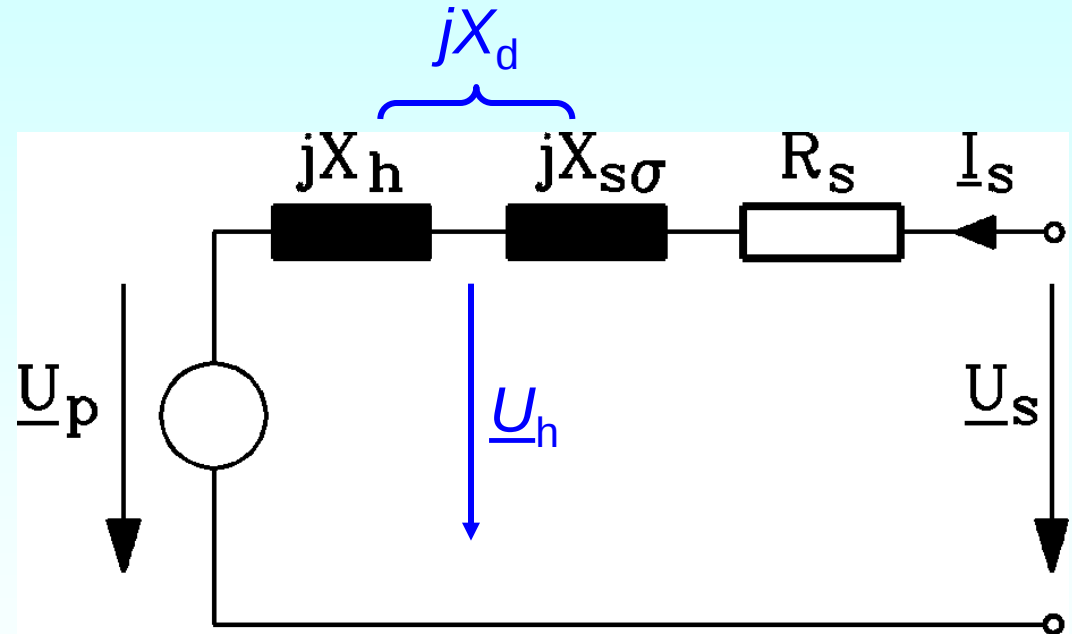
Ersatzschaltbild der Synchronmaschine

- Ständerspannungsgleichung je Strang

$$\underline{U}_S = (R_S + jX_{S\sigma} + jX_h) \cdot \underline{I}_S + \underline{U}_p$$

- “Quellenspannung”:
Polradspannung $\underline{U}_p$ (“steuerbar”
über Gleichstrom I_f)
- “Innen-Impedanz”:
Summe aus
 - Wicklungswiderstand R_S ,
 - Streureaktanz $X_{S\sigma} = \omega L_{S\sigma}$
 - Hauptreaktanz $X_h = \omega L_h$

$$X_d = X_{S\sigma} + X_h: \text{“Synchronreaktanz”}$$



$\underline{U}_h$: Hauptfeldspannung, wird vom resultierenden Luftspalt-Drehfeld Φ_h (Stator- + Rotorfeld) induziert.

Synchronmaschine: Zeigerdiagramm (1)

- Zeigerdiagramm gilt je Strang der Ständerwicklung !
- a) Ständer-Selbstinduktionsspannung des Luftspaltfelds

$$jX_h \underline{I}_s$$

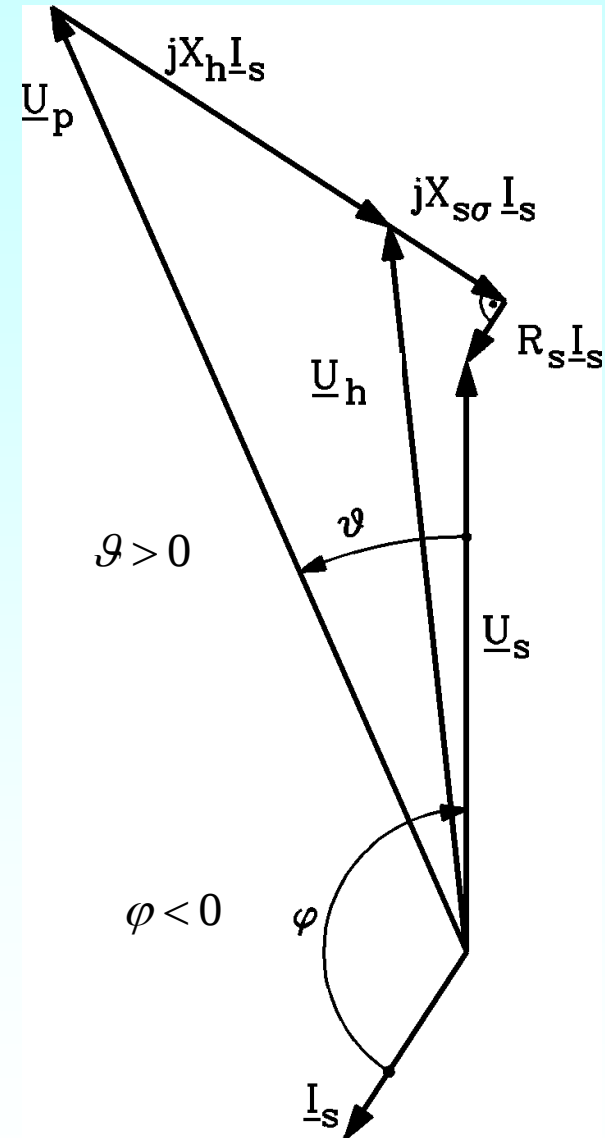
Spannung im rechten Winkel zu $\underline{I}_s$

- b) Polradspannung (Gegeninduktion vom rotierenden Läufer)

$$\underline{U}_p = j\omega \cdot N_s k_{ws} \underline{\Phi}_p / \sqrt{2}$$

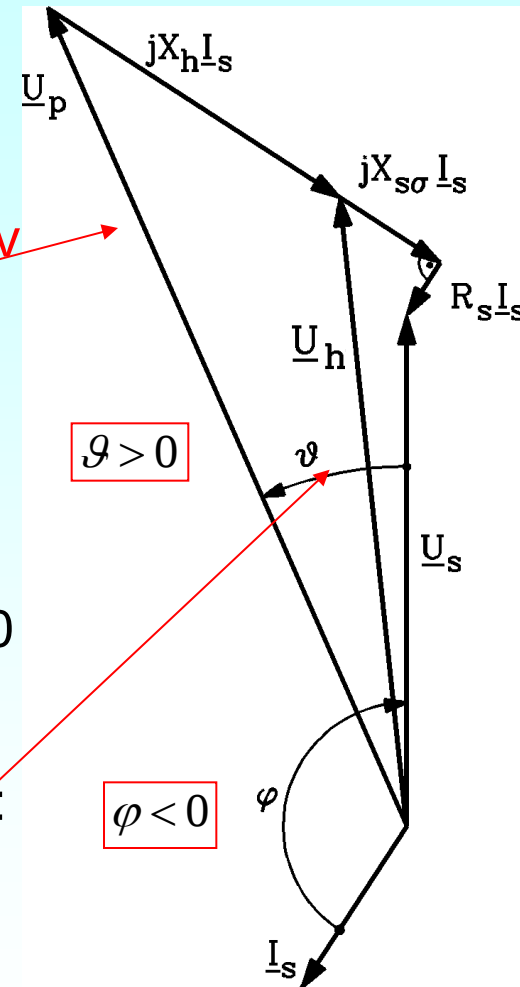
- Hauptfeldspannung (a) + b))

$$\underline{U}_h = j\omega \cdot N_s k_{ws} \underline{\Phi}_h / \sqrt{2}$$



Synchronmaschine: Zeigerdiagramm (2)

- Synchronmaschine ist über $U_p(I_f)$ **steuerbare Spannungsquelle**.
Sie kann daher sowohl **kapazitiv** als auch **induktiv** wirken.
- Beispiel: Im Bild:
 - U_p hoch (I_f hoch, “**übererregt**”):
Synchronmaschine **kapazitiv**: $Q = 3U_s I_s \sin \varphi < 0$
 - El. Leistung $P_e = 3U_s I_s \cos \varphi < 0$:
Synchronmaschine gibt elektrische Leistung ab:
GENERATORBETRIEB
“**Polradwinkel**” ϑ von U_s zu U_p ist **positiv**.



Zusammenfassung

Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine

- Polradspannung ist Wechselspannungsquelle
- Synchronreaktanzen bildet Selbstinduktionsspannung des Ständerdrehfelds in der Ständerwicklung ab
- Polradspannung kann über Läufer-Erregerstrom verändert werden = gesteuerte Spannungsquelle
- Winkel zwischen Polradspannung und Ständerstrangspannung = „Polradwinkel“
- Winkel zwischen Ständerstrangspannung und Strangstrom = „Phasenwinkel“
- Luftspaltleistung $\sim$ Polradspannung $\times$ Ständerstrom
- ACHTUNG: Läufergleichspannung U_f (Feldspannung) treibt I_f ; NICHT mit der Polradspannung $\underline{U}_p$ verwechseln (Wechselspannung in der Ständerwicklung!)

4.5 Synchronmaschinen

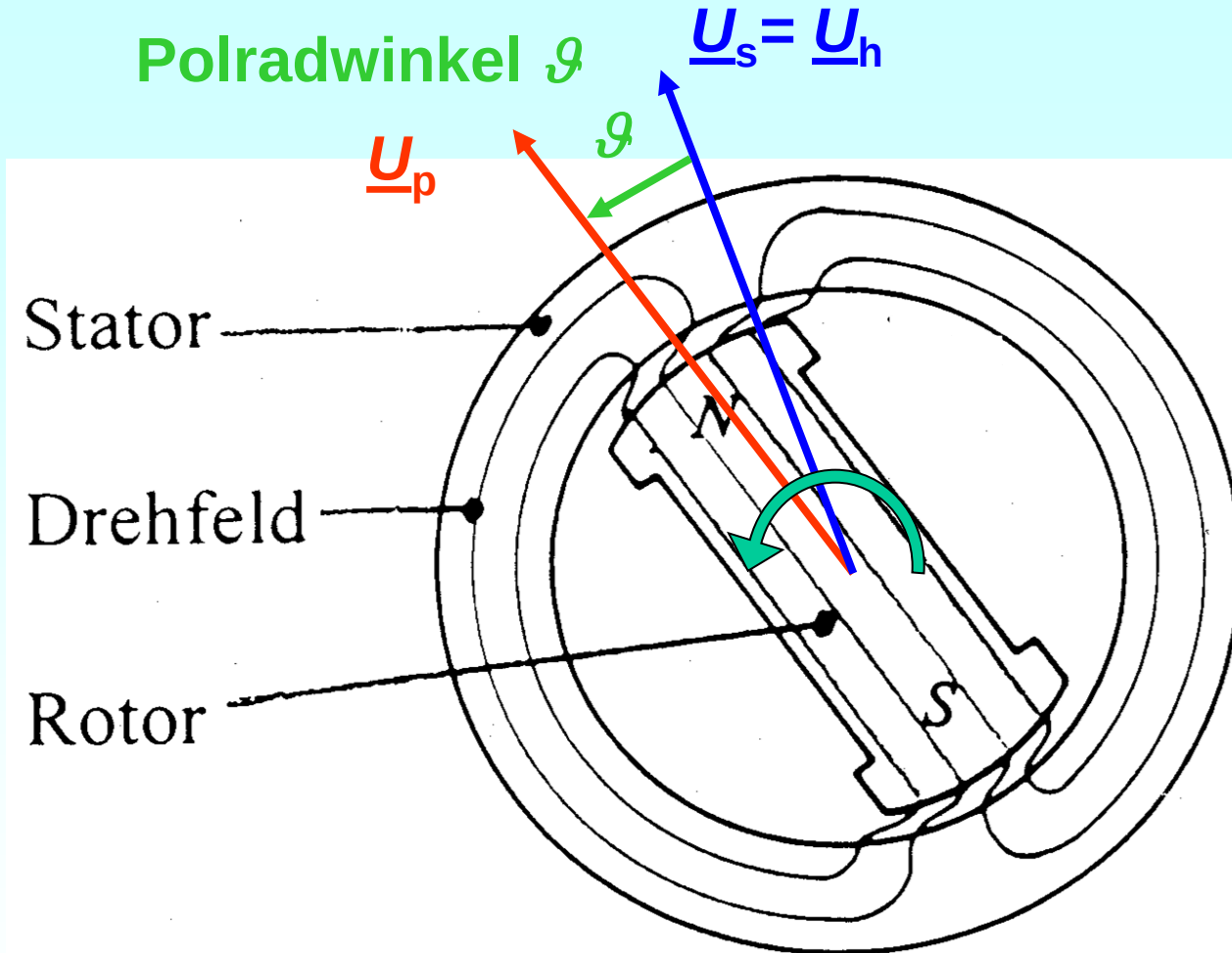
4.5.1 Aufbau und Funktionsweise von Synchronmaschinen

4.5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine

4.5.3 Generator- und Motorbetrieb - Bedeutung des Polradwinkels

4.5.4 Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine

Polradwinkel ϑ - Hauptfeldspannung $\underline{U}_h$



- Die Hauptfeldspannung wird vom resultierenden Luftspalt-Drehfeld (Stator- + Rotorfeld) induziert.

- $\underline{U}_s = \underline{U}_h$ gilt bei $R_s, X_{s\sigma} = 0$

- Dann ist der Polradwinkel ϑ der Winkel zwischen $\underline{U}_h$ und $\underline{U}_p$

Beispiel: Generatorbetrieb:

- Läufer durch Turbinenmoment angetrieben und durch Drehfeld gebremst.
- Zeiger $\underline{U}_s = \underline{U}_h$ folgt dem Zeiger $\underline{U}_p$.
- $\underline{U}_s$ ist zu $\underline{U}_p$ **nacheilend** phasenverschoben!

Polradwinkel ϑ ist räumlicher Winkel zwischen Läuferachse ($\underline{U}_p$) und Drehfeldachse ($\underline{U}_s$)

Zusammenfassung

Generator- und Motorbetrieb - Bedeutung des Polradwinkels

- Bei $R_s = 0$ gilt exakt: Bei Polradwinkel Null = kein Drehmoment = Leerlauf
- Polradwinkel positiv: Läufer-N-Pol läuft VOR Ständer-N-Pol = Läufer muss angetrieben werden = ele. Drehmoment bremst = Generatorbetrieb
- Generator: Wirkleistung negativ = Wirkleistungsfluss ins Netz
- Phasenwinkel zwischen Ständerstrangspannung und Strangstrom größer als 90°
- Polradwinkel negativ: Läufer-N-Pol läuft NACH Ständer-N-Pol = Läufer wird gezogen = ele. Drehmoment treibt = Motorbetrieb

4.5 Synchronmaschinen

4.5.1 Aufbau und Funktionsweise von Synchronmaschinen

4.5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine

4.5.3 Generator- und Motorbetrieb - Bedeutung des Polradwinkels

4.5.4 Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine

Leistung und Drehmoment

- Bei Annahme $R_s = 0$ sind die elektrische und mechanische Leistung gleich groß:

$$P_e = 3U_s I_s \cos \varphi, \quad P_m = \Omega_m M_e = \Omega_{syn} M_e$$

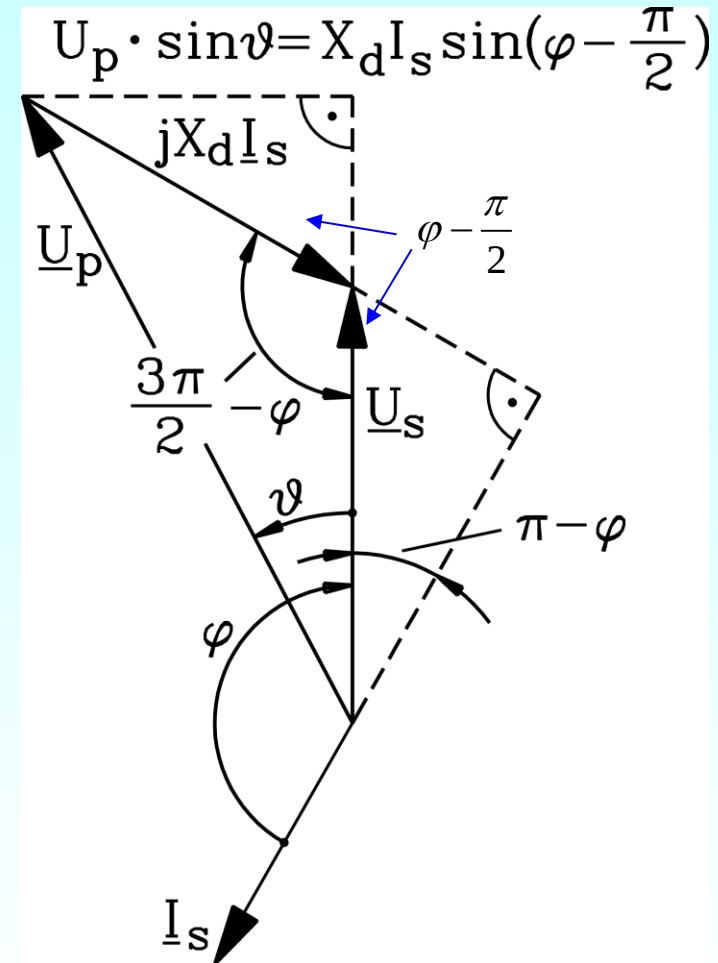
$$\underline{\underline{P_e = P_m = P_\delta : M_e = P_m / \Omega_m = P_\delta / \Omega_{syn}}}$$

- Zeigerdiagramm:**
geometrische Beziehung:

$$U_p \sin \vartheta = X_d I_s \sin(\varphi - \frac{\pi}{2}) = -X_d I_s \cos \varphi$$

$$\underline{\underline{P_e = 3U_s \cdot \frac{-U_p \sin \vartheta}{X_d} = -\frac{3U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta = \underline{\underline{P_m}} = \underline{\underline{P_\delta}}}}$$

$$\underline{\underline{M_e = -\frac{3U_s U_p}{\Omega_{syn} X_d} \sin \vartheta}}$$

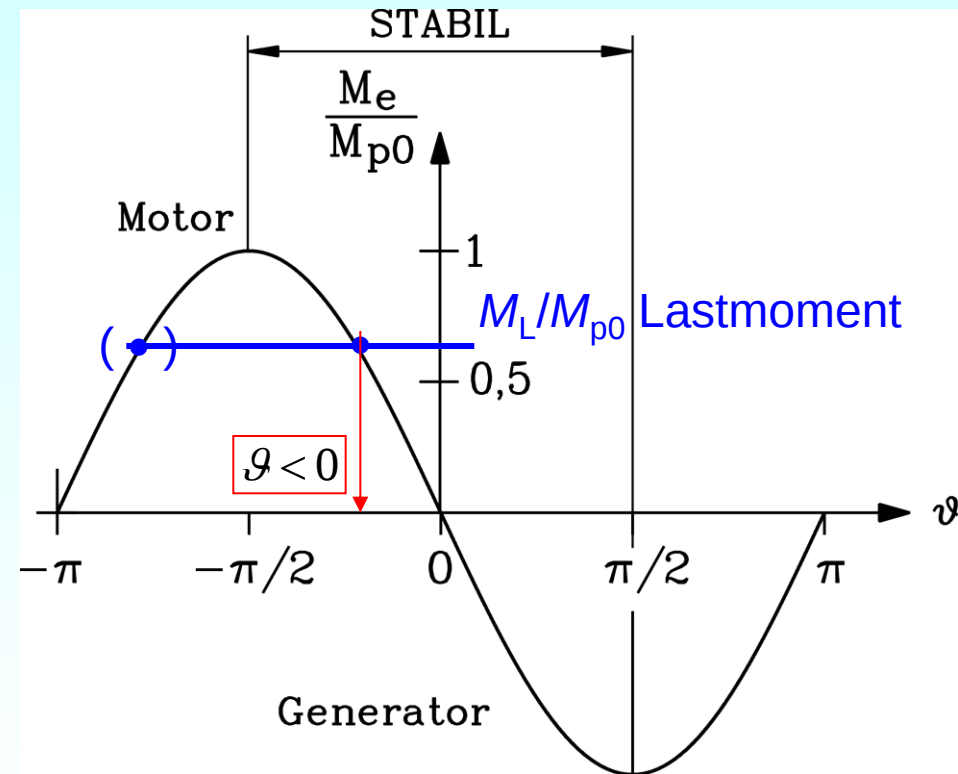


Elektromagnetisches Drehmoment M_e (für $R_s = 0$)

- Maschine erzeugt maximales Drehmoment M_{p0} bei Polrad-Kippwinkel $\pm 90^\circ$: “synchrones Kippmoment”

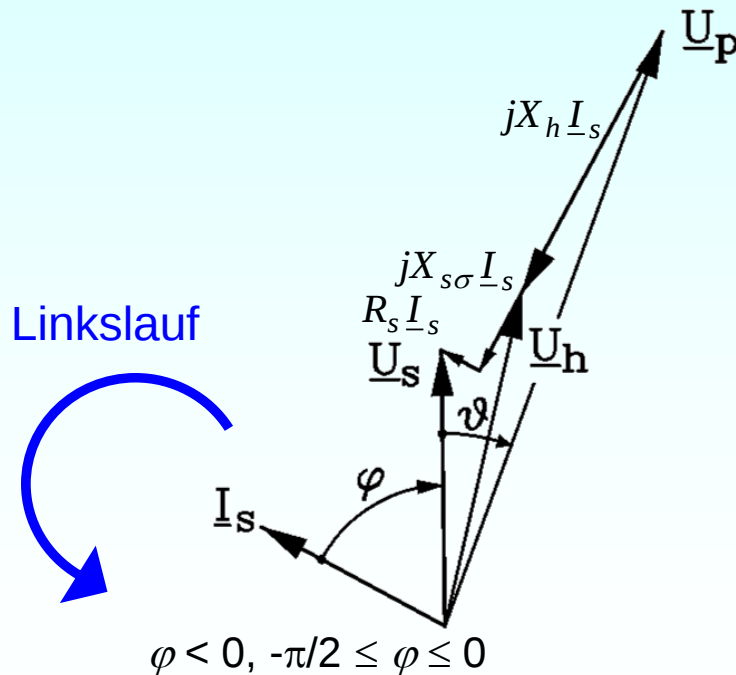
$$\underline{\underline{M_e = -M_{p0} \sin \vartheta}}, \quad M_{p0} = \frac{3U_s U_p}{\Omega_{syn} X_d}$$

- Durch Erhöhung des Erregerstroms I_f kann über Erhöhung von U_p das Kippmoment erhöht werden.
- Nur für $-90^\circ < \vartheta < 90^\circ$ ist **STABILER** synchroner Betrieb möglich. Bei größerer Belastung “kippt” das Polrad aus dem Synchronlauf und rotiert asynchron.



Strom-Spannungs-Zeigerdiagramm je Strang

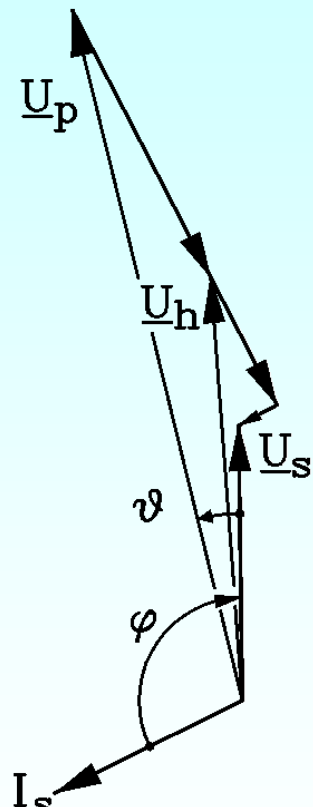
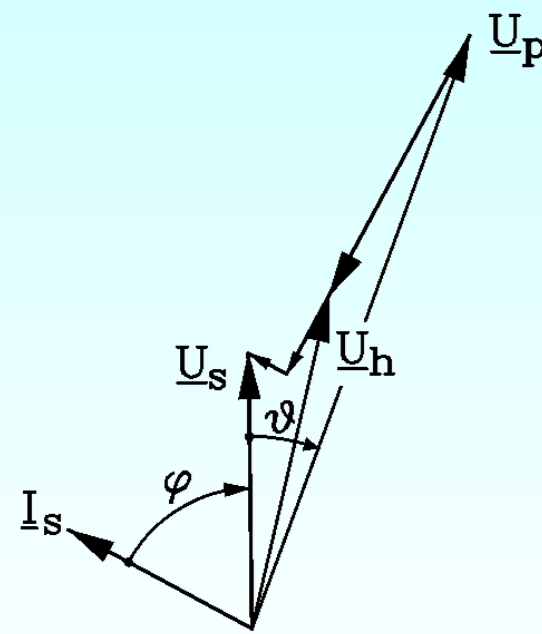
- Zeigerdiagramm zeigt zeitliche Phasenverschiebung zwischen $\underline{U}_s$, $\underline{U}_h$, $\underline{U}_p$
- Beispiel: Motorbetrieb: $\underline{U}_p$ ist zu $\underline{U}_s$ **nacheilend** phasenverschoben!
- Wird dies auf die räumliche Bewegung des Läufers sinnbildlich übertragen, so kann das Zeigerdiagramm verwendet werden, wenn räumliche Drehbewegung im Linkslauf (= mathematisch positiver Drehsinn) unterstellt wird.



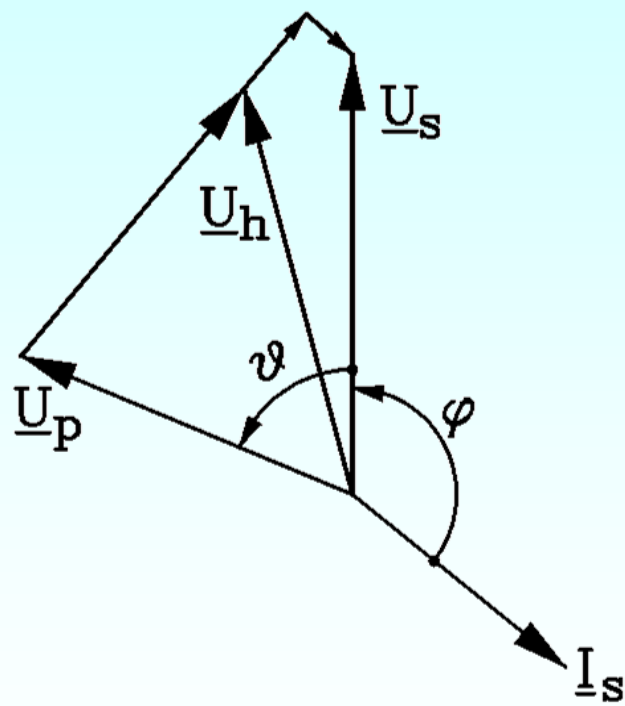
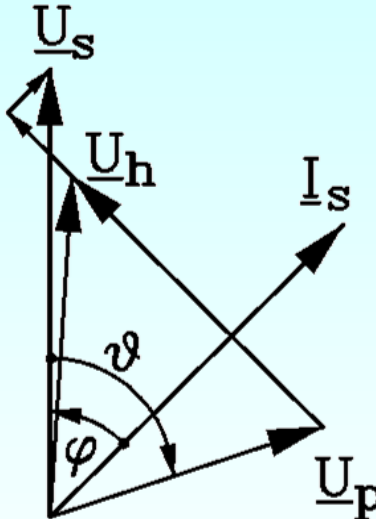
Beispiel: Motorbetrieb: $\vartheta < 0$, übererregt = kapazitiv

- Läufer im **Linkslauf** (= Gegen-Uhrzeigersinn)
- Drehfeld schleppt Läufer gegen das bremsende Lastmoment hinterher
- Zeiger $\underline{U}_p$ folgt Zeiger $\underline{U}_s$
- $\varphi < 0$: **Kapazitiver Betrieb**: $Q = 3U_s I_s \sin \varphi < 0$
- **Motorbetrieb**: $P_e = 3U_s I_s \cos \varphi > 0$
- **Polradwinkel** ϑ : NEGATIV

Kapazitiver Betrieb der Synchronmaschine

GENERATOR: Polrad eilt Drehfeld vor	MOTOR: Polrad läuft Drehfeld nach	
 $\vartheta > 0$ $\varphi < 0$	 $\vartheta < 0$ $\varphi < 0$	ÜBERERREGT Induktive Verbraucher können versorgt werden

Induktiver Betrieb der Synchronmaschine

GENERATOR: Polrad eilt Drehfeld vor	MOTOR: Polrad läuft Drehfeld nach	
 $\vartheta > 0$ $\varphi > 0$	 $\vartheta < 0$ $\varphi > 0$	UNTERERREGT Kapazitive Verbraucher können versorgt werden

Asynchronkäfig im Läufer der Synchronmaschine

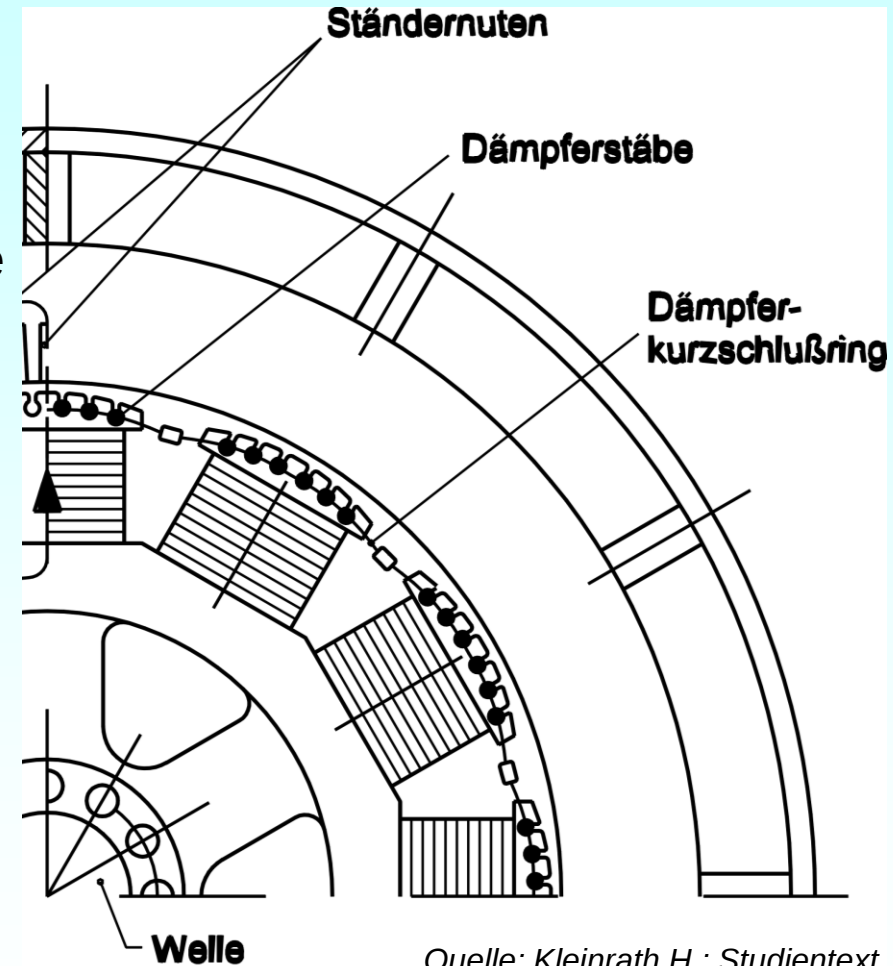
- a) **Anlaufkäfig:** Grosse Käfig-Stab-Querschnitte:
Asynchroner Anlauf der Synchronmaschine am Netz möglich
- b) **Dämpferkäfig:** Kleine Käfig-Stab-Querschnitte:
Kein asynchroner Anlauf der Synchronmaschine am Netz wegen der Gefahr thermischer Überhitzung möglich.

Aber:

Abdämpfung von mechanischen Läufer-schwingungen bei Belastungsänderungen!

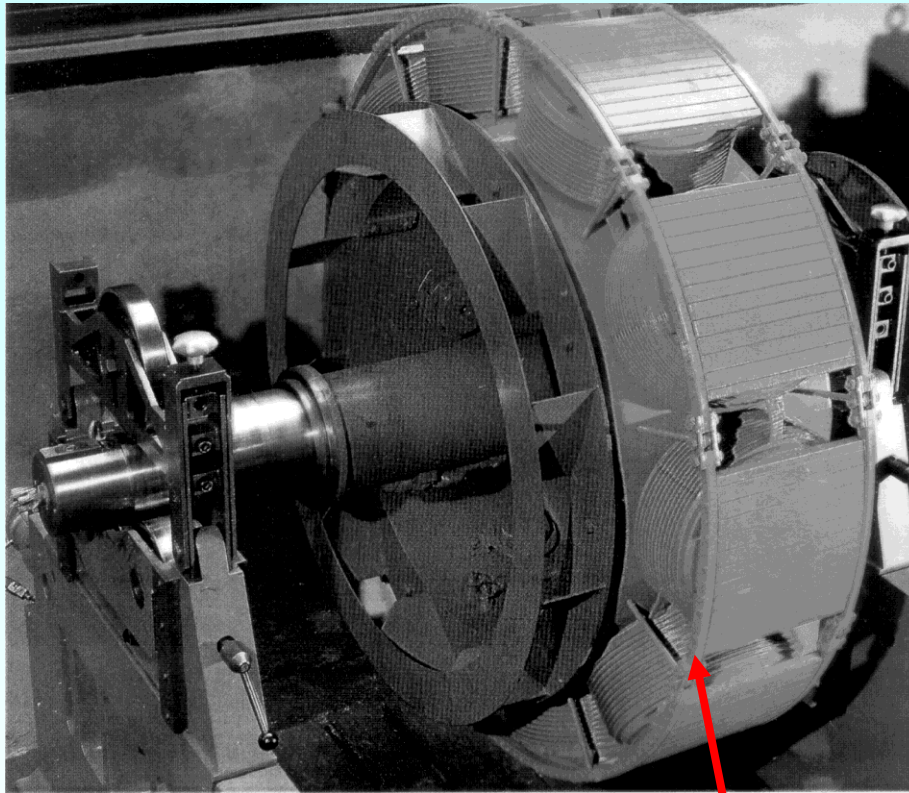
Denn:

Schwingen des Läufers (der Drehbewegung überlagert) bewirkt, dass das Drehfeld den Läuferkäfig induziert. Käfigströme bilden mit Drehfeld Bremsmoment, dass die Schwingbewegung rasch dämpft.



Quelle: Kleinrath H.; Studententext

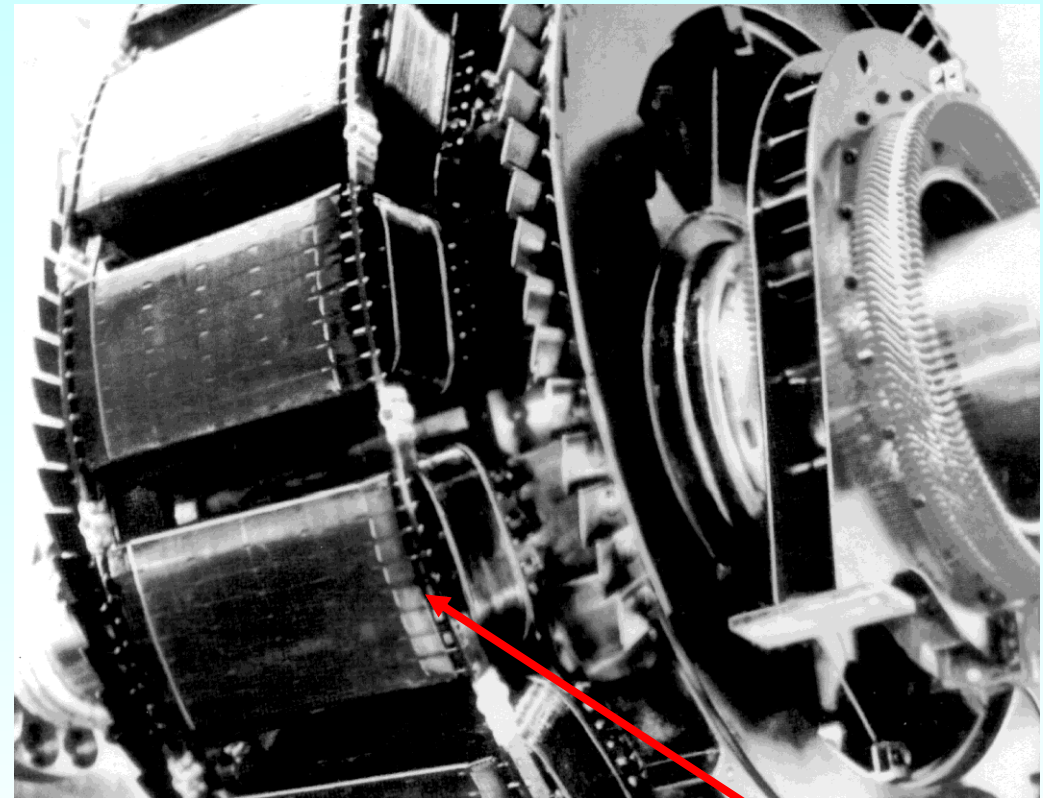
Dämpferkäfig in Rotoren von Schenkelpol-Synchronmaschinen



10-poliger **Motorläufer**,
durchgehende **Dämpferringe**,

Quelle:

Siemens AG, Deutschland



14-poliger **Generatorläufer**, **Dämpfer-**
stäbe in den Polschuhen

Quelle:

Lloyd Dynamowerk, Bremen

Rotor einer Vollpol-Synchronmaschine, 8-polig

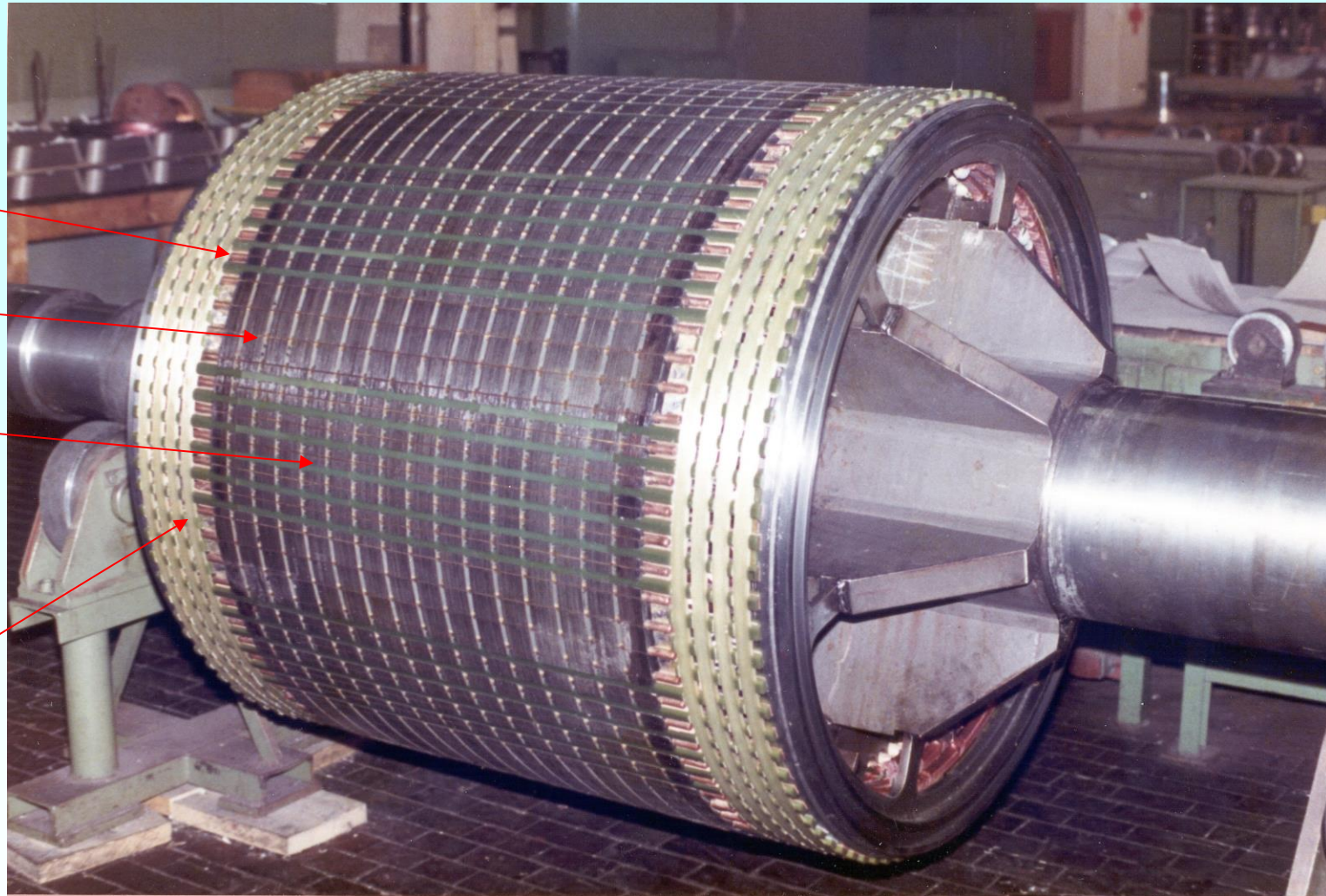
Drei Feldspulen
pro Pol: $q_r = 3$

**Dämpferkäfig mit
9 Stäben pro Pol**

Radiale
Lüftungsschlitze

Rotor aus Blechen
geschichtet

Glasfaser-
Bandage fixiert die
Feldwicklung im
Stirnbereich



Quelle: Andritz Hydro, Bhopal, India



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/100

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Vollpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Zusammenführen von Stator und Rotor zum kompletten Generator

Vierpoliger
Turbo-
Generator

Einführen des
Rotors mit
dem Kran

Dämpferkäfig

Wicklungs-
kappen



Quelle:
ALSTOM

*4-poliger Turbogenerator für ca. 1.6 GW - Einsatz in
Kernkraftwerken*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/101

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Zusammenfassung

Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine

- Läufer dreht synchron mit Ständer-Drehfeld
- Läufer- und Ständerfeld bilden zeitlich konstantes Drehmoment
- Synchronmaschine hat Maximalmoment = „synchrones Kippmoment“ (im Generator- und Motorbetrieb)
- Polradwinkel kennzeichnet Lastzustand: Stabiler Betrieb bei Polradwinkel $< 90^\circ$
- Synchronmaschine kann kapazitiv oder induktiv betrieben werden
- kapazitiv = übererregt = hoher Erregerstrom
- induktiv = untererregt = niedriger Erregerstrom
- Dämpferkäfig gegen Polradschwingungen, fallweise auch als Anlaufkäfig

4. Drehfeldmaschinen

4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

4.3 Drehfrequenz des Drehfelds

4.4 Asynchronmaschinen

4.5 Synchronmaschinen

4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (kein Prüfungsstoff!)

4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe

4.6.1 Wasserturbinen: KAPLAN-, FRANCIS- und PELTON-Turbine

4.6.2 Dampfturbinen

4.6.3 Gasturbinen

Wasserturbinen als Antrieb für **Synchrongeneratoren**

- **Wasserturbinen** drehen **langsam**:
 - **Flusskraftwerk**: niedriger Wasserdruck, hoher Volumenstrom:
KAPLAN- u. FRANCIS-Turbinen:
 n ca. 80/min bis ca. 400/min
 - **Speicherkraftwerke**: hoher Wasserdruck, kleiner Volumenstrom:
PELTON-Turbinen:
 n ca. 500/min bis 1000/min
- **Beispiel**: Einsatz hochpoliger Schenkelpol-Synchron-Generatoren:
 $f = 50 \text{ Hz} = n \cdot p$
 $n = 300/\text{min} = 5/\text{s}$
Polzahl $2p = 2 \cdot (f/n) = 2(50/5) = \underline{\underline{20}}$

Hochdruck-, Mitteldruck-, Niederdruckwasserkraftwerke

- Speicherseen: HD: Hohes Gefälle, hoher Druck, niedriger Volumenstrom
- Talsperren: MD: Mittleres Gefälle & Druck, mittlerer Volumenstrom
- Flusskraftwerke: ND: Niedriges Gefälle & Druck, hoher Volumenstrom

ND	MD	HD
Durchfluss hoch	Durchfluss mittel	Durchfluss niedrig
Flusskraftwerk	Talsperre	Gebirgsspeichersee
Wallsee/Österreich	3 Schluchten/ China	Bieudron/Schweiz
Donau	Yangtsekiang	Tal Grand Dixence
$H = 9.1 \text{ m}$	$H = 183 \text{ m}$	$H = 1883 \text{ m}^{**})$
$\dot{V} = 2880 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 12295 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 86 \text{ m}^3/\text{s}$
$P_e = 210 \text{ MW}$	$P_e = 18000 \text{ MW}^*)$	$P_e = 1295 \text{ MW}$
Kaplan-Turbinen	Francis-Turbinen	Pelton-Turbinen
6 Generatoren je 35 MW	26 Generatoren je 692 MW	3 Generatoren je 432 MW

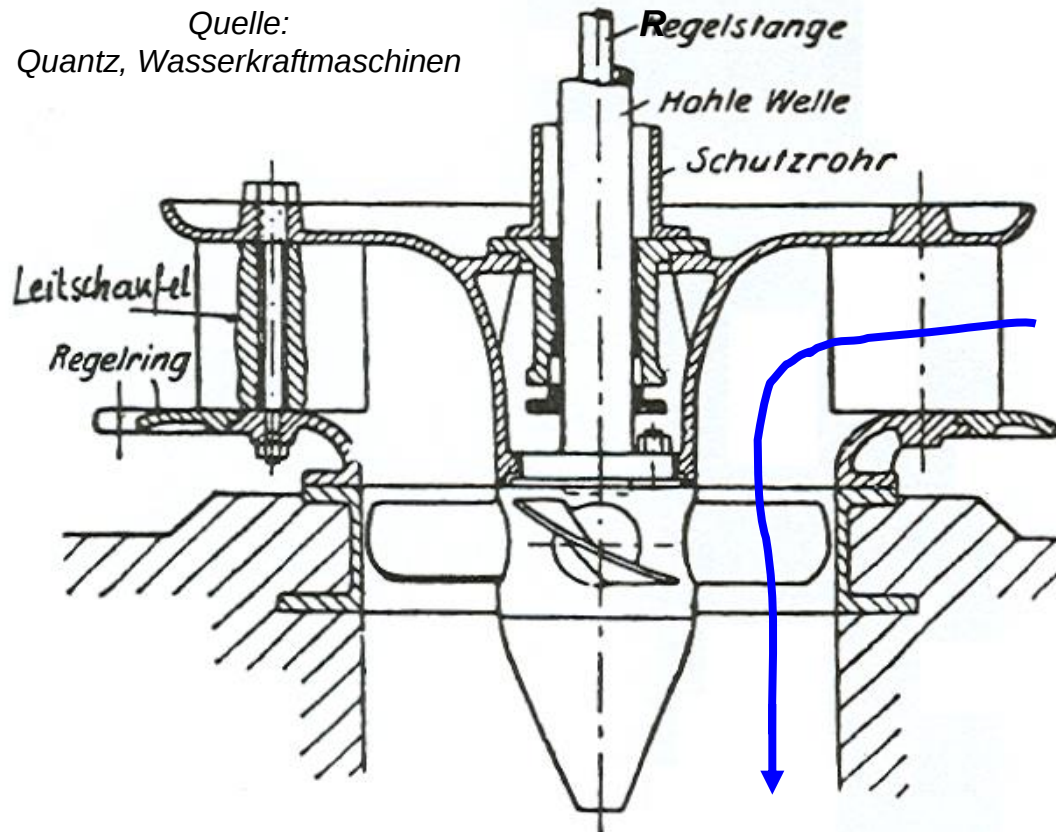
*) weltgrößtes Wasserkraftwerk **) Weltrekord



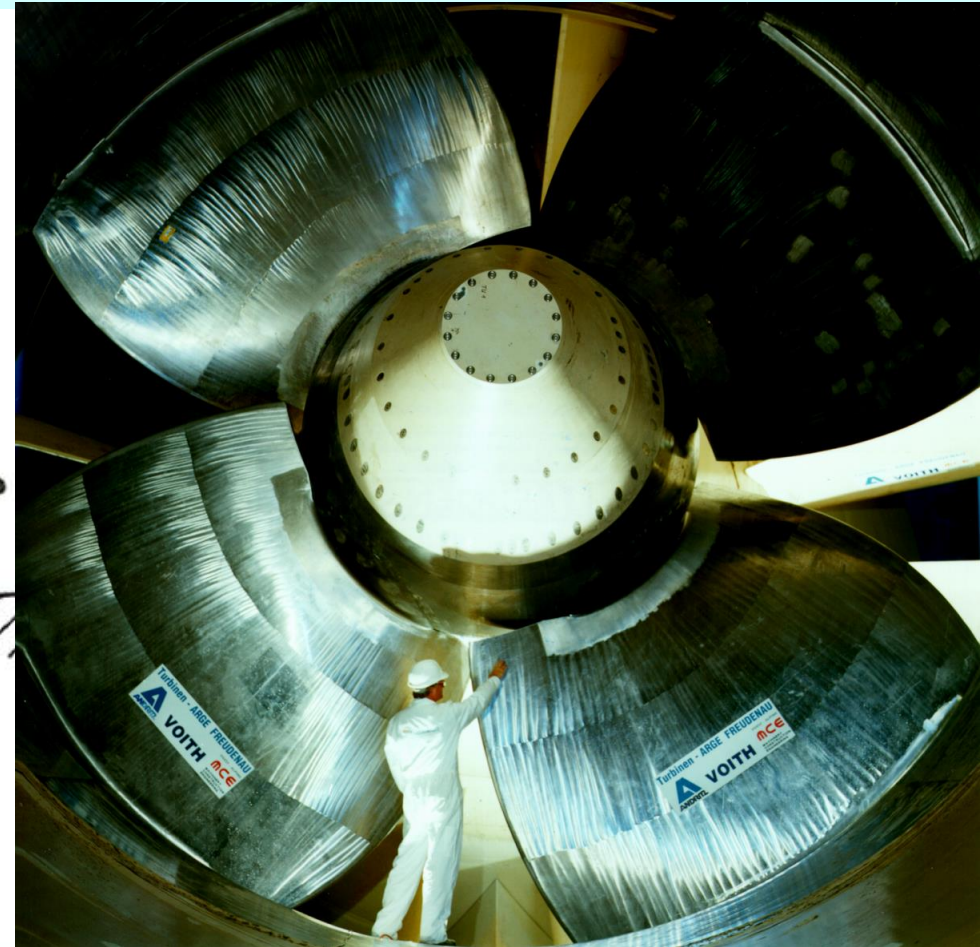
Wasserturbinen – Kaplan-Turbine

- **Flusskraftwerk:** niedriger Wasserdruck, hoher Volumenstrom:
KAPLAN-Turbinen: n ca. 80/min bis ca. 150/min, Wirkungsgrad ca. 90%

Quelle:
Quantz, Wasserkraftmaschinen

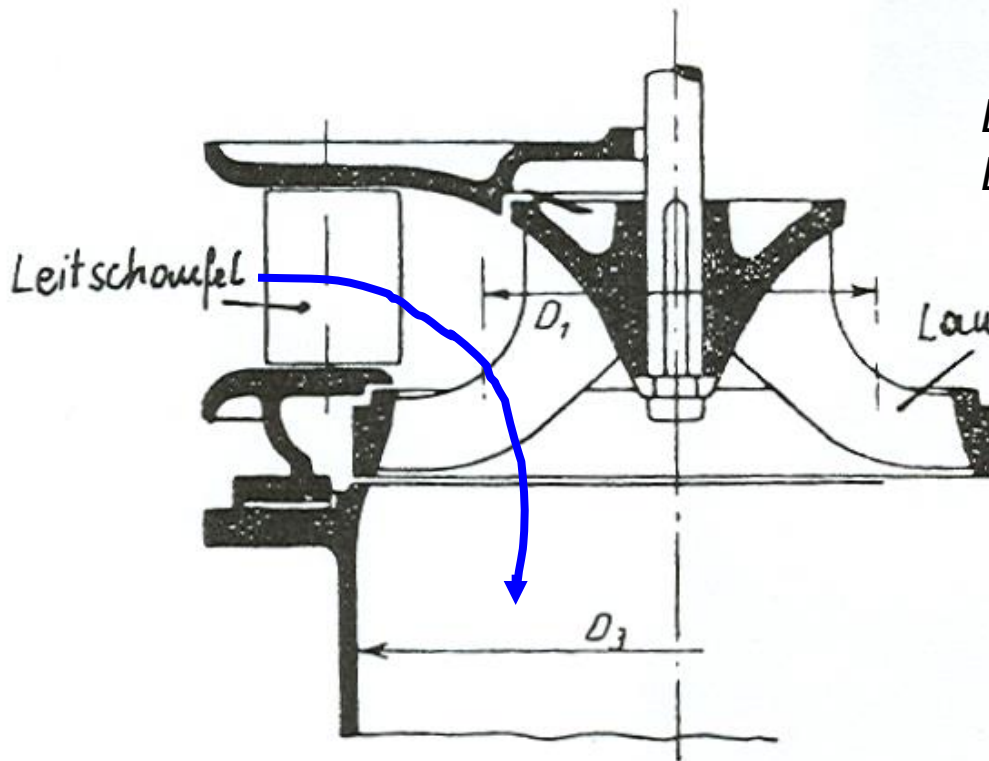


Quelle: Andritz Hydro, Österreich



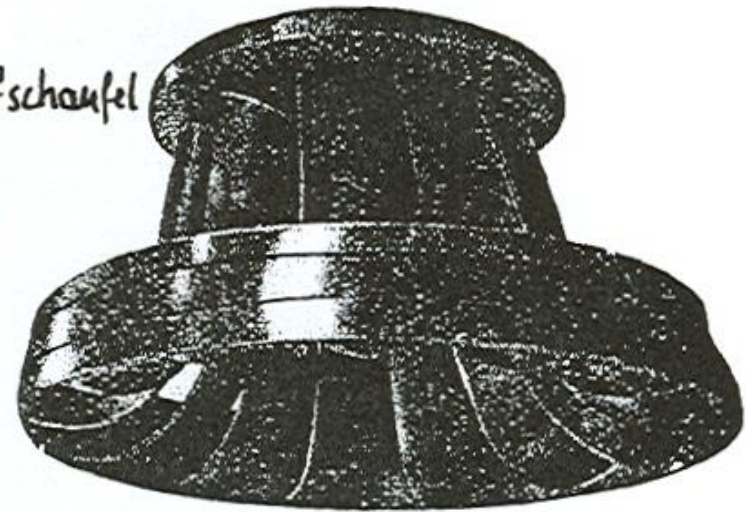
Wasserturbinen – Francis-Turbine (1)

- **Mitteldruckkraftwerke:** mittlerer Wasserdruck, mittlerer Volumenstrom:
FRANCIS-Turbinen: n ca. 200/min bis 500/min
Leistungen bis c. 800 MW, Wirkungsgrad ca. 90 %



Quelle:
Quantz, Wasserkraftmaschinen

D_1 : mittlerer Laufraddurchmesser
 D_3 : Saugrohrdurchmesser

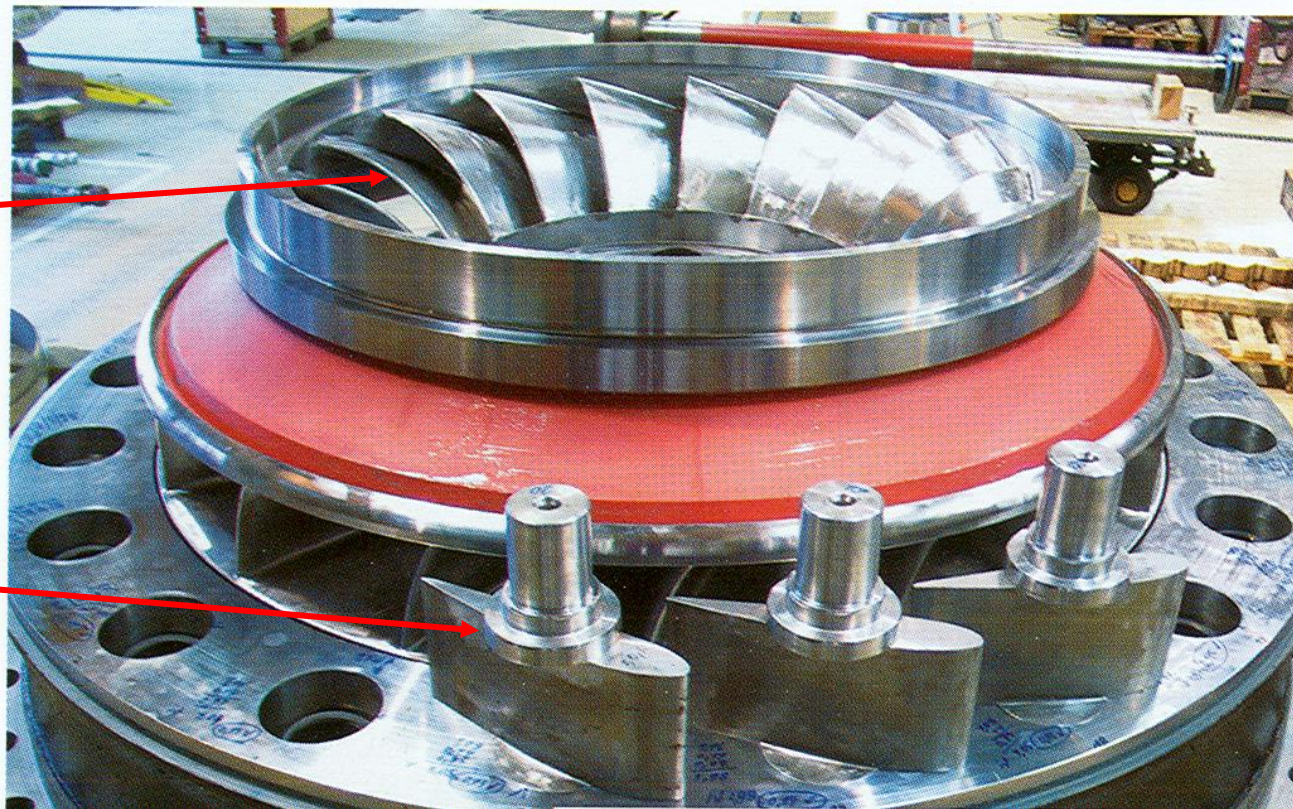


Wasserturbinen – *Francis-Turbine* (2)

- Vertikal gelagerte **FRANCIS-Turbine**:
- Laufschaufeln sind gegossen und nicht verstellbar
- Anströmwinkel wird durch die verstellbaren Leitschaufeln bei unterschiedlichem Wasserstrom optimal eingestellt.

Lauf-
rad
(auf den Kopf
gestellt)

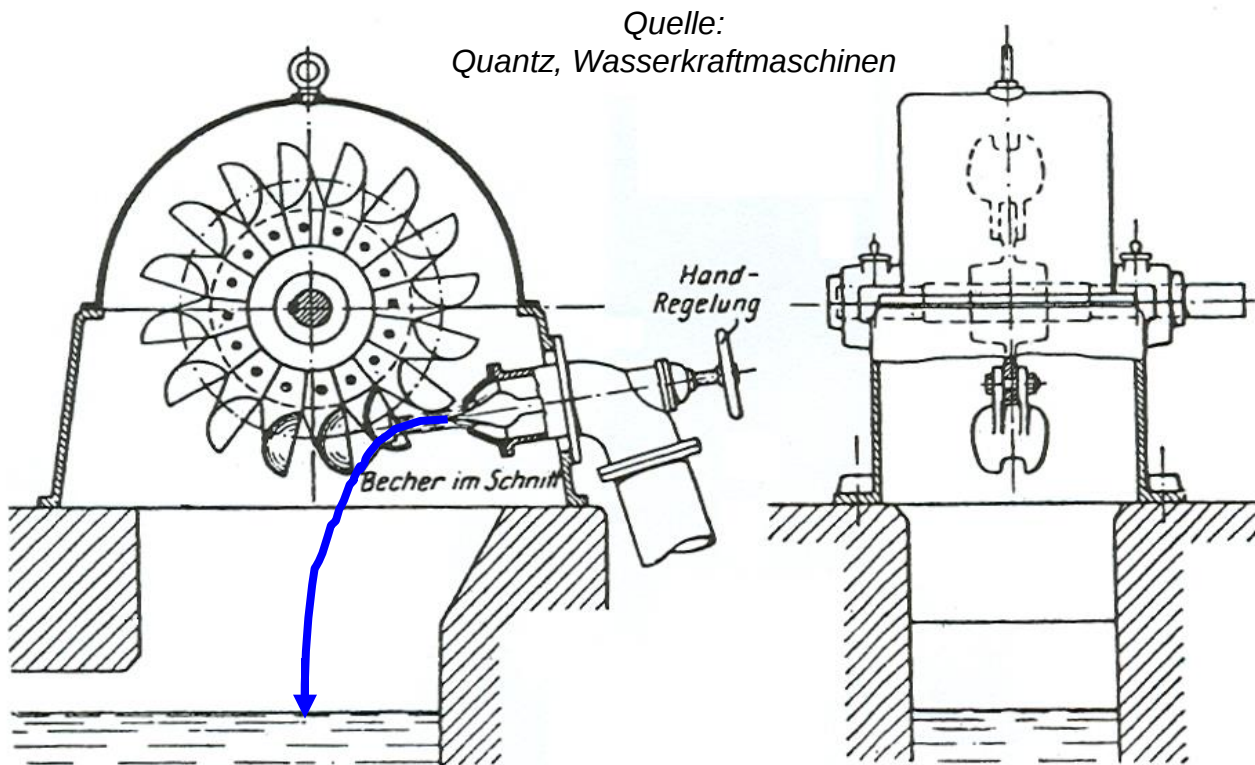
Leitschaufeln
(Montage-
vorgang)



Quelle: Andritz
Hydro, Österreich

Wasserturbinen – Pelton-Turbine

- **Speicherkraftwerke:** hoher Wasserdruck, kleiner Volumenstrom:
PELTON-Turbinen: n ca. 500/min bis 1000/min
Leistungen bis ca. 450 MW, Wirkungsgrad ca. 90 %



Wirkungsgrad von Wasserkraftwerken

Wirkungsgradkette: ca-Werte !

Hydraulischer Wirkungsgrad der Rohrleitungen etc.:	0.95
Wasserturbinenwirkungsgrad:	0.9
Generatorwirkungsgrad:	0.98
Kraftwerkseigenbedarf:	0.97

GESAMTWIRKUNGSGRAD: $0.95 \times 0.9 \times 0.98 \times 0.97 =$ 0.81



Beispiel:

Einbau von zwei *Kaplan*-Turbinen mit waagrechter Welle in ein Flusskraftwerk als „Rohrturbinen“

Leistung ca. 2 x 4 MW

Quelle: Andritz Hydro, Austria

Sonderfall: Pumpspeicherwerk

- Wasserbewegung zwischen Ober- und Unterbecken
- Speicherung von potentieller Energie des Wassers im Oberbecken $W_{pot} = m \cdot g \cdot H$
- Motorbetrieb mit Pumpe od. Pumpturbine
- Generatorbetrieb mit Turbine
- Speichern überschüssiger Energie aus dem el. Netz
- Abgabe von Engpass-Leistung zur Stabilisierung des Netzes
- Ist daher wichtig für die Netzregelung!

SPEICHER-WIRKUNGSGRAD: Motor- & Generatorbetrieb $0.85 \times 0.85 = 0.72$



Beispiel:

Pumpspeicher-Kraftwerk
Geesthacht

Francis-Pump-Turbinen

Quelle: BWK, VDI

4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe

4.6.1 Wasserturbinen: KAPLAN-, FRANCIS- und PELTON-Turbine

4.6.2 Dampfturbinen

4.6.3 Gasturbinen

Synchrongeneratoren für Dampf- und Gasturbinen

- Dampf- und Gasturbinen drehen **schnell**:

$$n = 3000/\text{min},$$

$$\text{bei } P > 1000 \text{ MW: } n = 1500/\text{min}$$

Einsatz von zwei- und vierpoligen Turbogeneratoren

Beispiel: $n = 3000/\text{min} = 50/\text{s}$:

$$\text{Polzahl } 2p = 2 \cdot (f/n) = 2(50/50) = \underline{2}$$

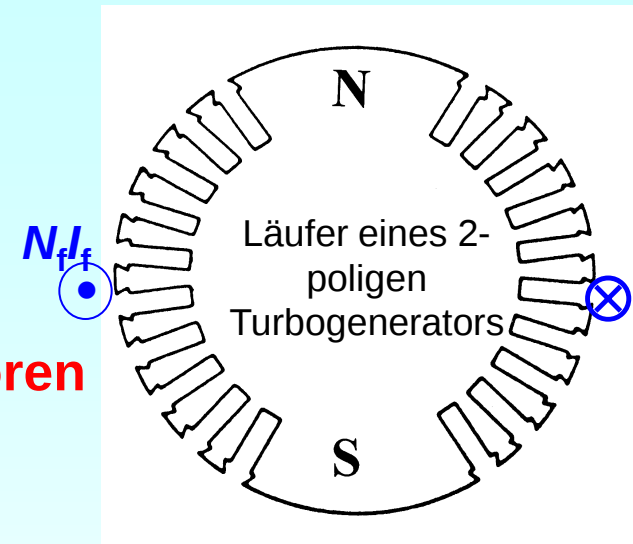
- Umfangsgeschwindigkeit des Läufers =

Umlauf-Geschwindigkeit des Drehfelds:
$$v_{syn} = d_{si} \pi \cdot n_{syn}$$

Beispiel:

$$d_{si} = 1.1 \text{ m}, v_{syn} = 1.1 \pi (3000/60) = 173 \text{ m/s} = \underline{622 \text{ km/h}}$$

- **Sehr hohe Fliehkräfte:** Läufer muß aus massivem, hochfestem Stahl sein, Nuten für die Erregerwicklung werden gefräst.



Quelle: Kleinrath H.; Studententext

Kalorische Kraftwerke: Grundlage ist *Carnot-Wirkungsgrad*

Kalorische (thermische) Kraftwerke: Strom aus thermischer Energie

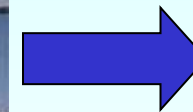
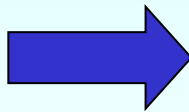
- Stein-/Braunkohleverbrennung → Wasserdampf → el. Strom
- Kernspaltungsenergie → Wasserdampf → el. Strom
- Erdgasverbrennung → Rauchgas → el. Strom

Zugeführte therm.

Leistung P_{zu}

Heissdampf-

Temperatur T_{zu}

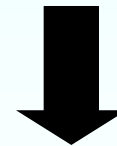


Abgeführte el.

Leistung P_{ab}

Kondensat-

Temperatur T_{ab}



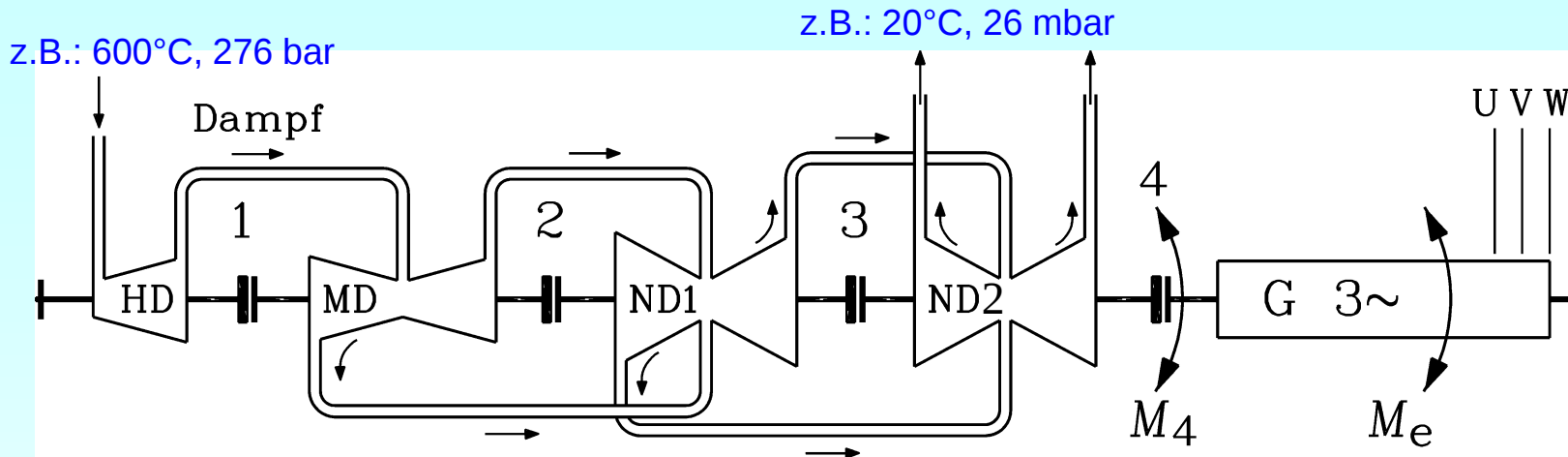
Abwärmeleistung im
Kühlmittel P_d

Bestmöglicher Wirkungsgrad wäre bei
idealem *Carnot*-Kreisprozess:

$$\eta_{Carnot} = P_{ab} / P_{zu} = 1 - T_{ab} / T_{zu}$$

Quelle: BWK, VDI

Kalorisches Kraftwerk – Dampfturbine mit Generator



HD: Hochdruckturbine

MD: Mitteldruckturbine: hier zweiflutig

ND1, ND2: Zwei in Serie nachgeschaltete zweiflutige Niederdruck-Turbinen

G: Generator

- In jeder Turbine werden der **Dampfdruck** und die **Dampftemperatur** verringert und dabei in **Strömungsenergie** infolge Dampfexpansion umgewandelt.
- Die Strömungsenergie versetzt die Turbinenrotoren in Drehung.
- Das **Dampfvolumen** nimmt wegen der **Expansion** zu, so dass die ND-Turbinen viel größer als die HD-Turbine sein müssen, damit dieselbe Dampfmasse in gleicher Zeit durchströmen kann.

Dampfturbine und Vollpol-Synchrongenerator

Beispiel: Braunkohle-Dampfkraftwerk „Schwarze Pumpe“, Deutschland, 2 x 800 MW



800 MW-
Dampfturbosatz
3000/min, 50 Hz
2546 kNm
Drehmoment

Quelle:

Siemens AG,
Mülheim/Ruhr,
Germany

HD-Teil

MD-Teil

Zwei ND-Turbinen

zweipoliger Turbogenerator



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/117

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Fertigung des Niederdruckteils der Dampfturbine



Untere **Gehäusehälfte** mit den
Leitschaufeln zur Dampfumlenkung



Zweiflutiger **Turbinenrotor** aus
Rotorscheiben (Masse 260 Tonnen),
Flügelspitzen der Endreihen: Überschall

Quelle: Siemens AG, Mülheim/Ruhr, Germany

Moderne Stein- und Braunkohle-Kraftwerke

- **Steinkohle-Kraftwerk Moorburg (Vattenfall):**

2 x 820 MW elektrisch, Wirkungsgrad: 46.5%

Wasserdampf: Eintritt: 600°C, 276 bar Überdruck

Ausgang: 26 mbar Unterdruck (Dampf bei ca. 20°C)

Wirkungsgrade im Mittel z. Zt.

in Deutschland: 38%
weltweit: 30%

CO₂-Reduktion durch Wirkungsgradsteigerung:

Von 850 auf 700 Gramm/kWh el. Leistung

- **Braunkohle-Kraftwerk Boxberg R (Vattenfall):**

675 MW elektrisch, Wirkungsgrad: 43.3%

Wasserdampf: Eintritt: 600°C, 286 bar Überdruck

Ausgang: 39 mbar

CO₂-Reduktion von 1200 auf 900 Gramm/kWh el. Leistung



Braunkohlekraftwerk *Neurath*



- Bestehend: Kraftwerks-Blöcke A – E
- Neu:
Doppelblock BoA 2/3: $2 \times 1100 \text{ MW} = 2200 \text{ MW}$ Stromerzeugung
- Betrieb mit überkritischem Dampf, daher erhöhte Eingangstemperatur und damit verbesserter thermischer Wirkungsgrad $> 43\%$ (Weltspitze !)

Quelle:

BWK 63/ 2011, no. 4



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

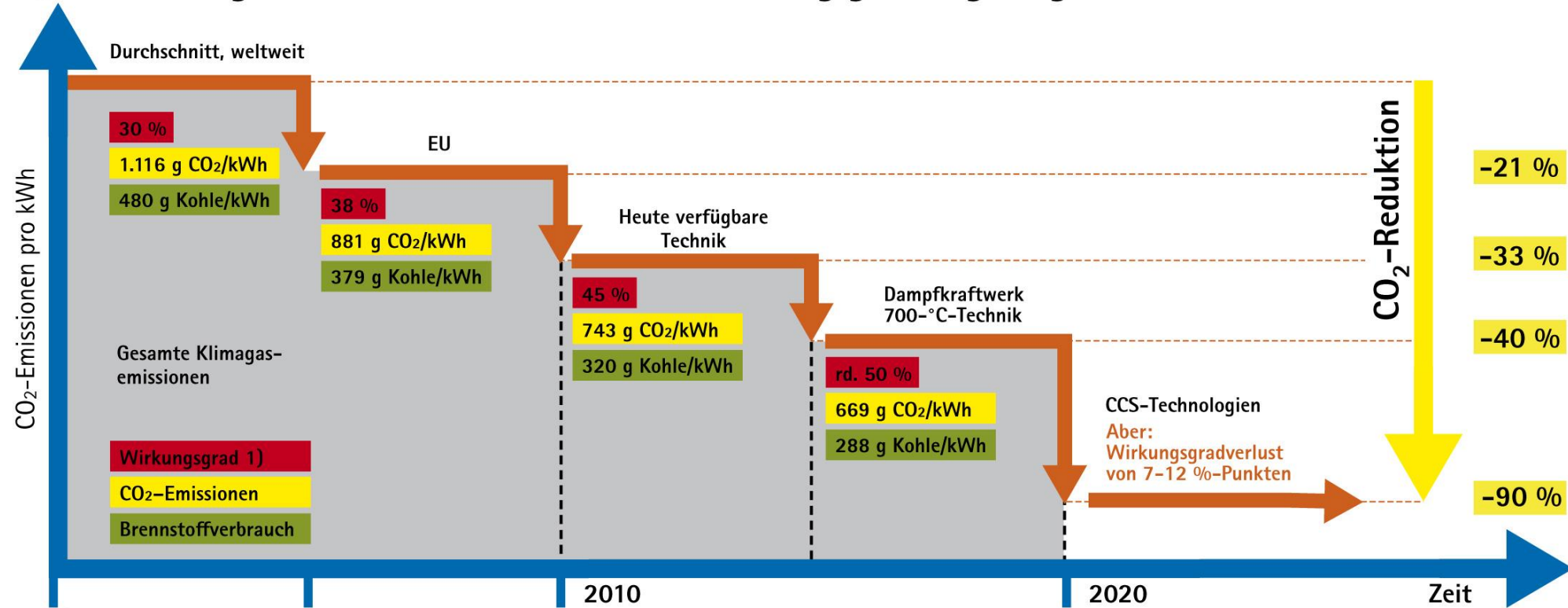
Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/120

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



CO₂-Reduzierung durch Wirkungsgradsteigerung

CO₂-Reduzierung von Kohlekraftwerken¹⁾ durch Wirkungsgradsteigerung



1) Durchschnittliche Daten für mit Steinkohle befeuerte Kraftwerke

Quelle: VGB Powertech, 2010



4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe

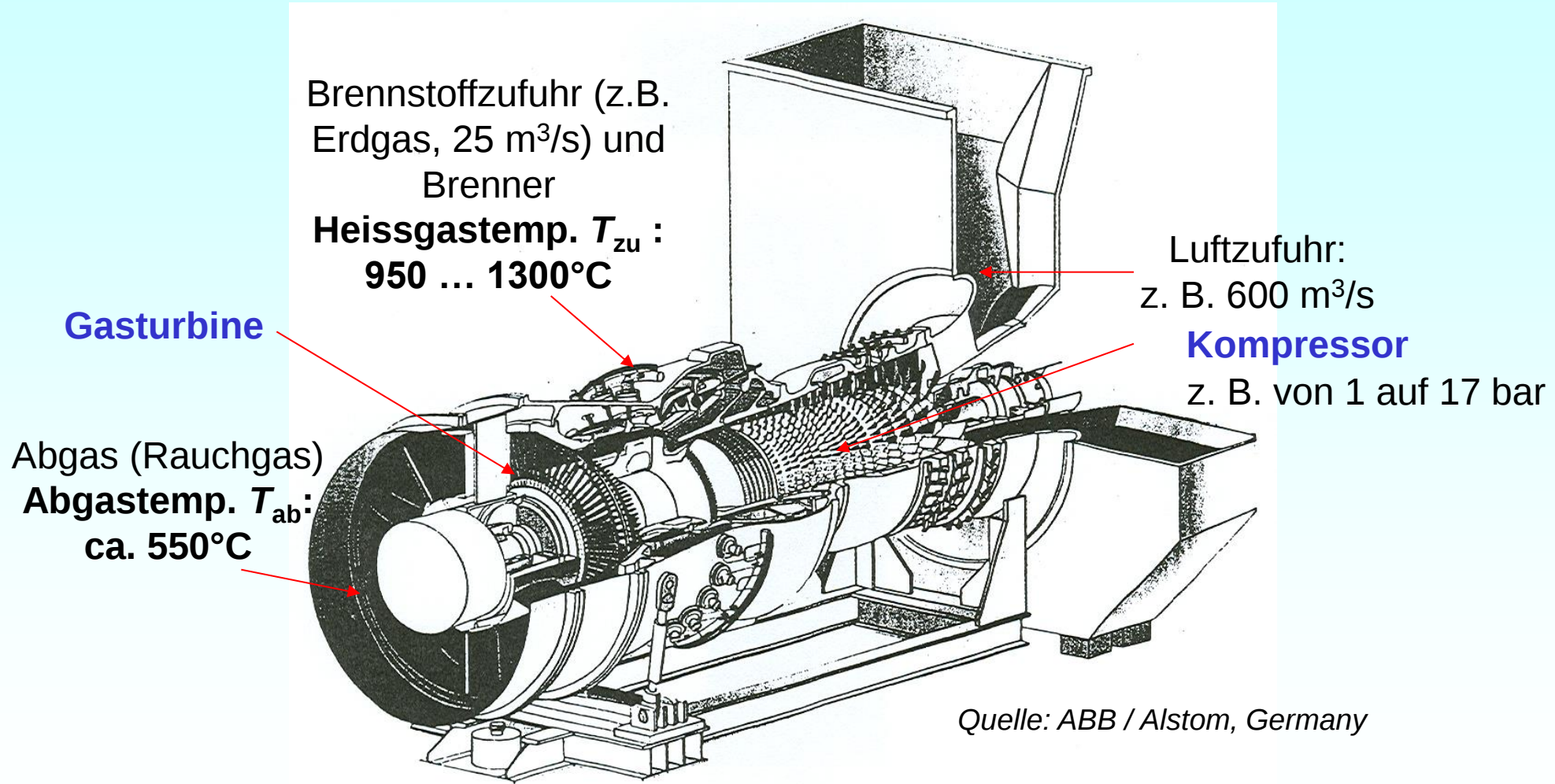
4.6.1 Wasserturbinen: KAPLAN-, FRANCIS- und PELTON-Turbine

4.6.2 Dampfturbinen

4.6.3 Gasturbinen

Gasturbine

Gasturbinen: Maximalleistung ca. 350 MW elektrisch (Beispiel: Kraftwerk *Irsching*, D)
Wirkungsgrad typisch ca. 35% ... 40% (Grenze: zu hohe Eintrittstemperatur!)

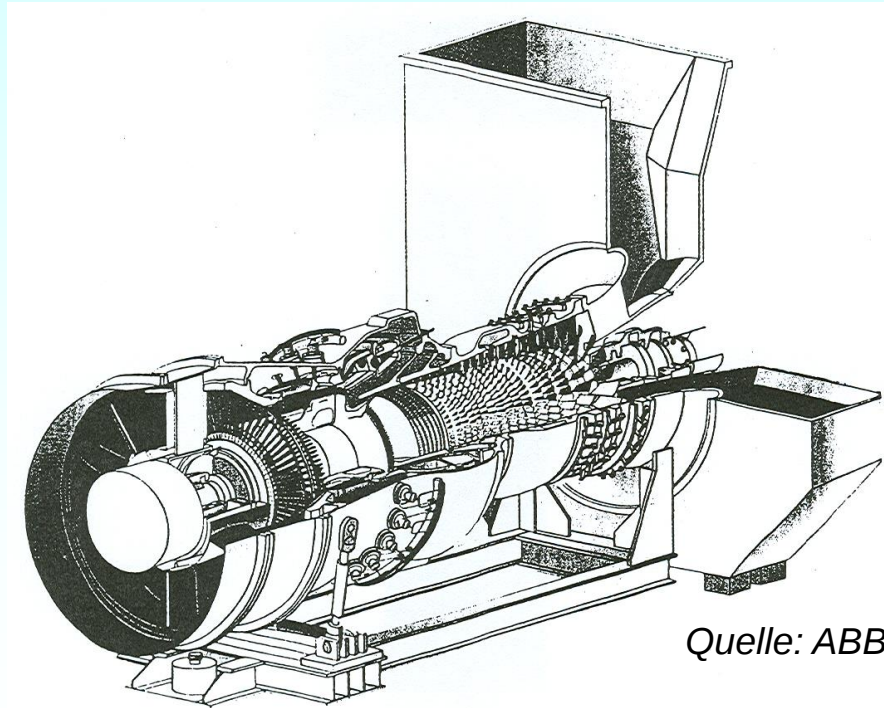


Gasturbinenwirkungsgrad

Beispiel: Gasturbine: $P_{ab} = 340$ MW elektrische Leistung

Eintritts-/Austrittstemperatur Rauchgas 1100 °C / 550 °C
(0° C ... 273 K) 1373 K / 823 K

$$\eta_{GP} = 1 - T_{ab}/T_{zu} = 1 - 823 / 1373 = 0.4 = \mathbf{40\% \dots 340 \text{ MW el. Leistung}}$$

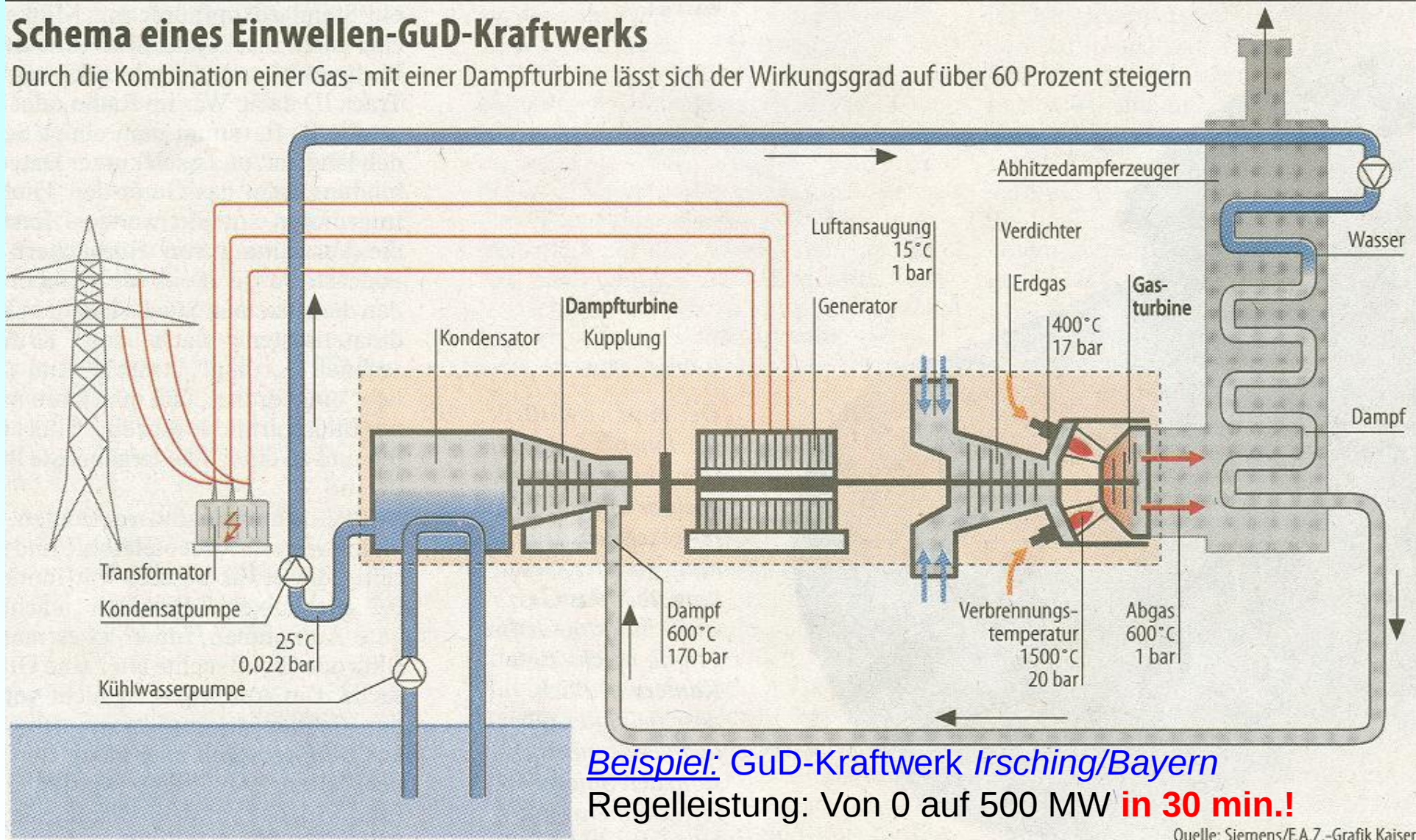


Quelle: ABB / Alstom, Germany

Kombiniertes Gas- und Dampfkraftwerk (GuD)

Schema eines Einwellen-GuD-Kraftwerks

Durch die Kombination einer Gas- mit einer Dampfturbine lässt sich der Wirkungsgrad auf über 60 Prozent steigern



GuD: Nutzung der Abgaswärme zur Dampferzeugung

Beispiel: GuD-Kraftwerk *Irsching/Bayern* (2011) – Richtwerte / Abschätzung!

a) Gasturbine 375 MW mit 40% Wirkungsgrad: 60% (= 565 MW) Abwärme !

Erforderliche therm. Leistung (Gasbrennwert): $375 + 565 = 940$ MW

b) Wärmetauscher Rauchgasein-/austrittstemperatur: $550\text{ °C} / 80\text{ °C}$
+273 K: $823\text{ K} / 353\text{ K}$

$$\eta_{WT} = 1 - T_{ab} / T_{zu} = 1 - 353 / 823 = 57.1\%$$

c) Dampfturbine: Wasserdampf: Ein-/Austritt: $520\text{ °C} / 20\text{ °C}$
+273 K: $793\text{ K} / 293\text{ K}$

$$\eta_{DP} = 1 - T_{ab} / T_{zu} = 1 - 293 / 793 = 63\%$$

$$375 \cdot 0.571 \cdot 0.63 = 142.5\text{ MW el. Leistung}$$

Weltrekord

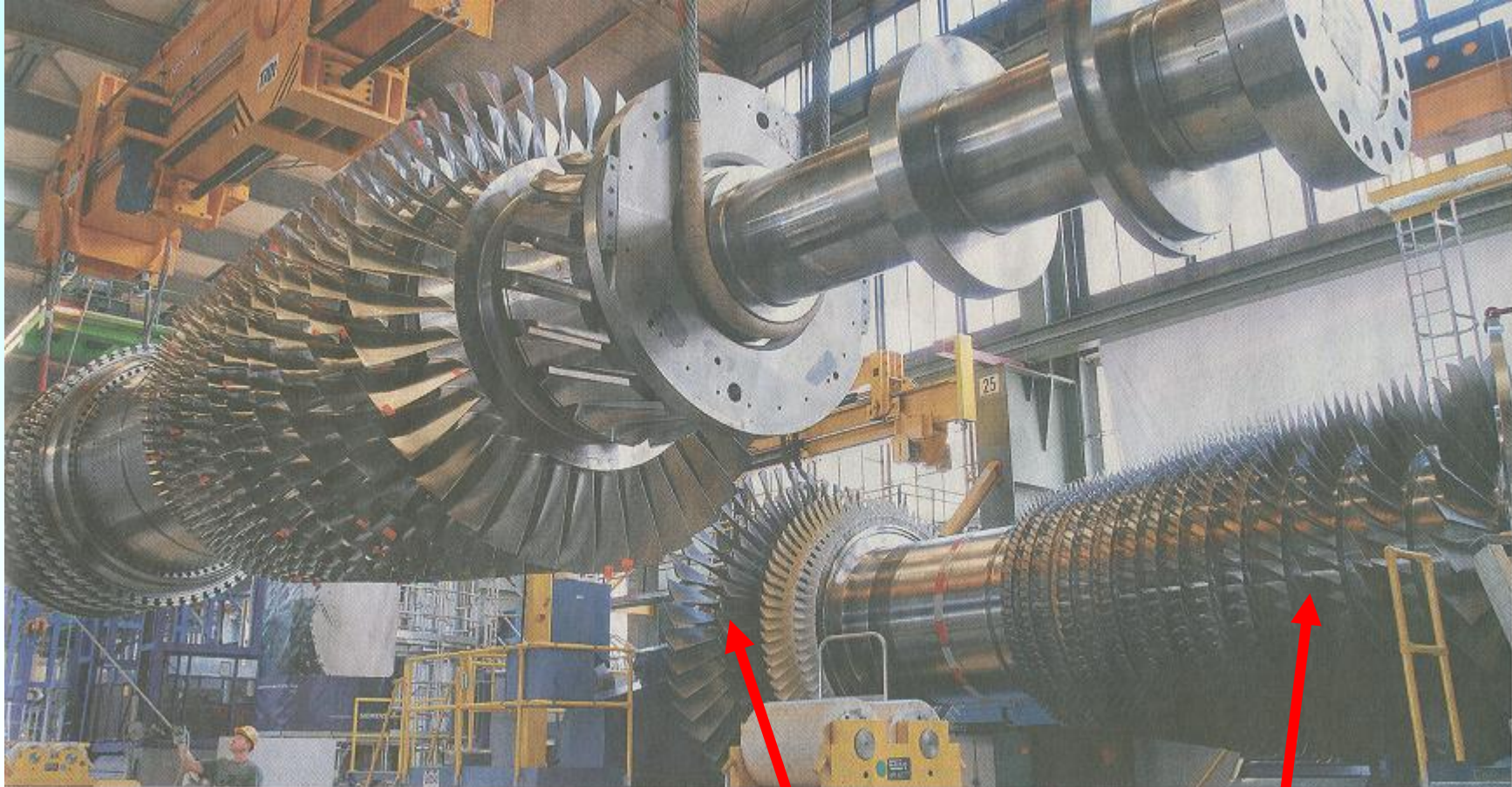
Elektrische Gesamtleistung: $375 + 142.5 = 517.5$ MW

Elektrischer Wirkungsgrad: $517.5 / 940 = 55.0\%$ (gemessen: 60.75 %)



Gasturbinenrotoren: *Irsching*/Bayern: 375 MW

Fertigung der Z. Zt. weltgrößten Gasturbine für das GuD-Kraftwerk *Irsching*



Quelle:
Siemens
Mülheim/Ruhr

Länge 13 m, Außendurchmesser: 5 m

Turbine

Luftkompressor



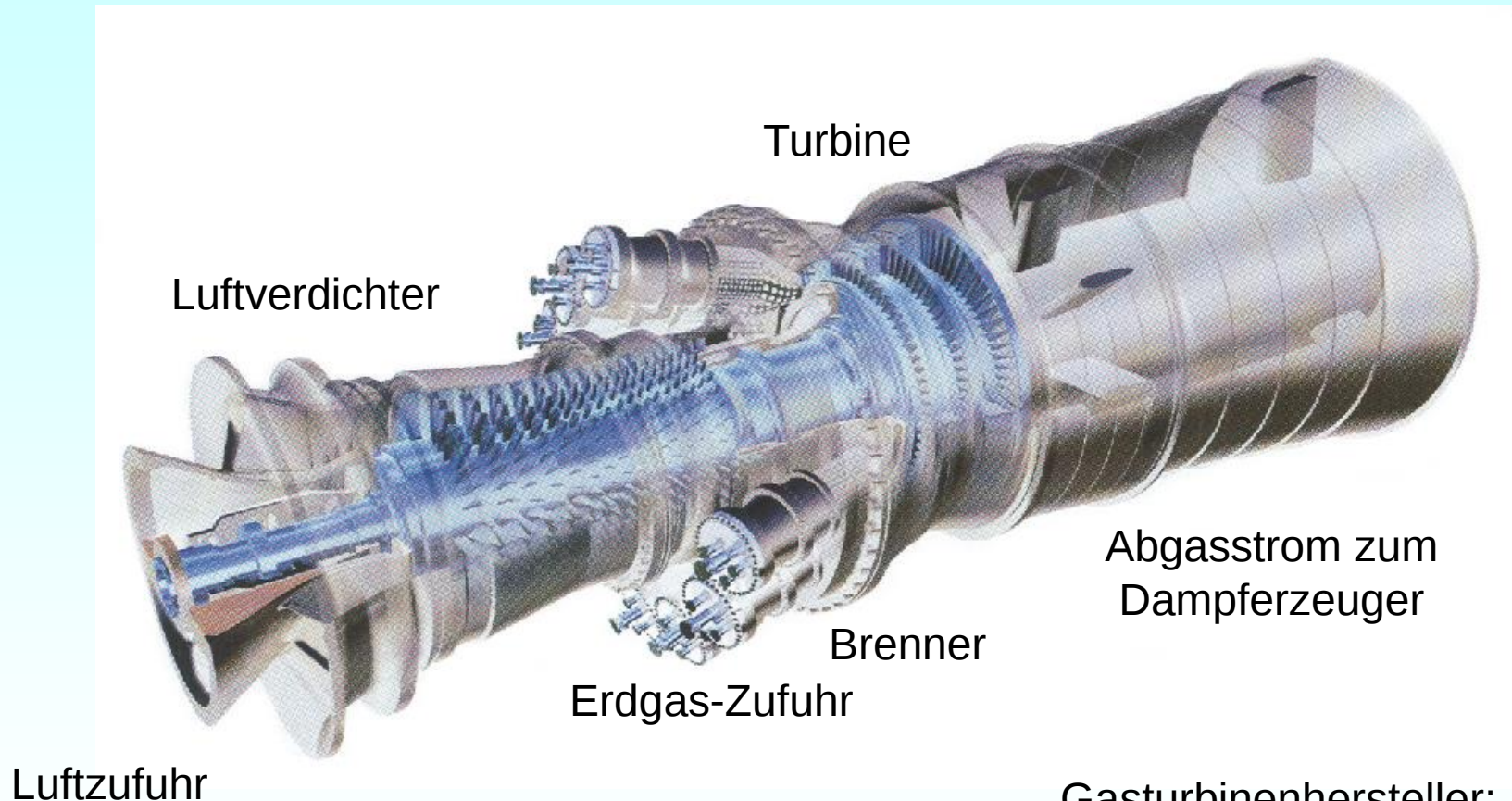
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
4/127

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Gasturbine für das neue GUD-Kraftwerk *Mittelsbüren* 445 MW, Wirkungsgrad 59%

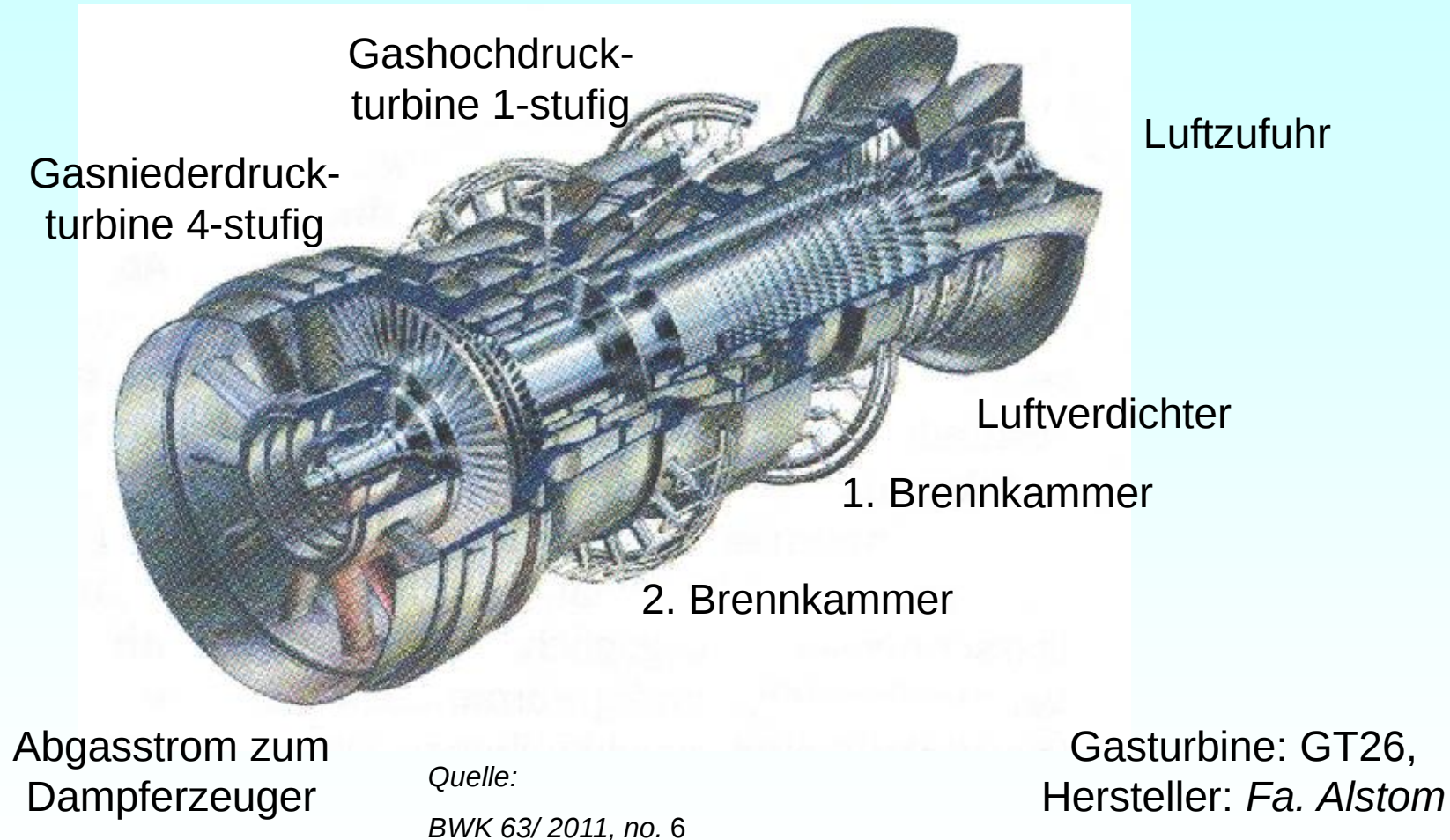


Quelle:

BWK 63/ 2011, no. 6

Gasturbinenhersteller:
General Electric

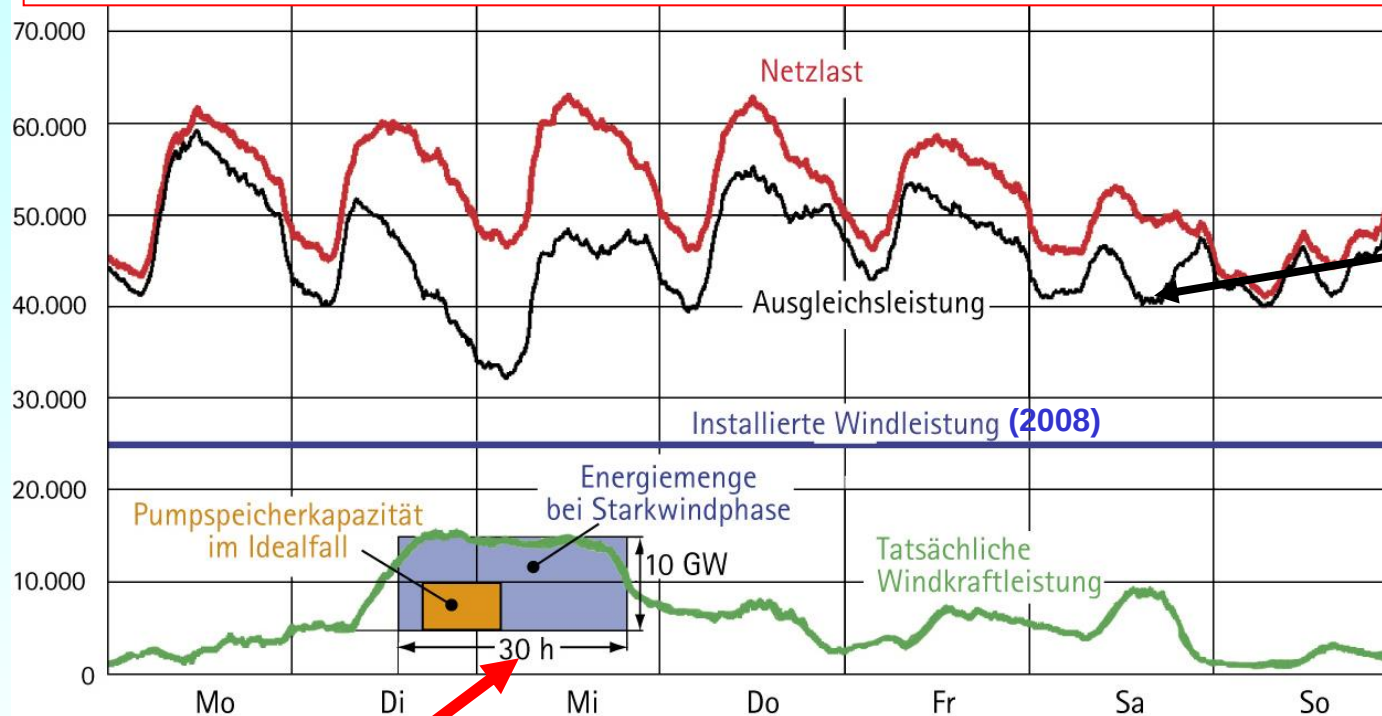
Gasturbine mit Doppelbrennkammer für GuD-Kraftwerke



Herausforderung: Integration der fluktuierenden Windenergie

Leistung in MW

Leistungsverlauf im deutschen Hochspannungsnetz für eine Woche im Jahr 2008



Beispiel: Starkwindphase für 30 h mit 10 GW = 300 000 MWh Überschussenergie: Muss lt. EEG eingespeist werden: Pumpspeicherung in Deutschland schafft nur max. 50 000 MWh.

Fazit: Thermische Kraftwerke müssen abgeregelt werden, fahren in Teillast mit schlechtem Teillastwirkungsgrad !

Bei **Schwachwindphase:** Reserveenergie muss bereit gestellt werden: Import, falls möglich !



Zusammenfassung

Turbinen als Synchrongeneratorantriebe

- Wasserkraft: *Kaplan*-, *Francis*-, *Pelton*-Turbinen
- Laufkraftwerke: Langsamdrehende *Kaplan*-Turbinen
- Mitteldruckkraftwerke: Mittelschnell drehende *Francis*-Turbinen
- Speicherkraftwerke: Schnelldrehende *Pelton*-Turbinen
- Thermische Kraftwerke: Dampf- und Gasturbinen
- Rasch expandierender Wasserdampf treibt Dampfturbinen schnell (bis 3600/min)
- Rasch expandierendes Rauchgas treibt Gasturbinen schnell (bis 3600/min)
- Mehrstufige Dampfturbinen für größte Leistungen/Einheit bis 2 GW
- Kombiniertes Gas-Dampfturbinen-Prozess für bis zu 60% elektrischen Wirkungsgrad