

## 4. Drehfeldmaschinen

Bei den **Drehfeldmaschinen** (Asynchron- und Synchronmaschinen) rotiert das Magnetfeld von Ständer und Läufer mit der konstanten **Synchrondrehzahl**  $n_{syn}$  („**Drehfeld**“).

- **Asynchronmaschine:** Der Läufer dreht asynchron zum Ständerdrehfeld, nämlich langsamer (*Motorbetrieb*) oder schneller (*Generatorbetrieb*) als das Drehfeld.
- **Synchronmaschine:** Der Läufer („**Polrad**“) dreht gleich schnell (synchron) mit dem Drehfeld. Im *Generatorbetrieb* läuft das Drehfeld um einen gewissen Winkel (**Polradwinkel**) räumlich dem Polrad nach, im *Motorbetrieb* eilt das Drehfeld um diesen Winkel vor und zieht das Polrad nach.

### 4.1 Prinzipielle Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

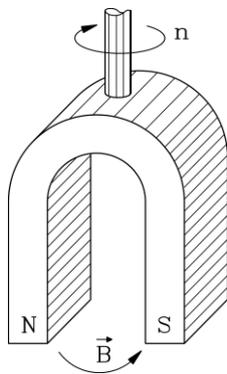


Bild 4.1: Ein rotierender Hufeisenmagnet erzeugt ein zweipoliges Drehfeld

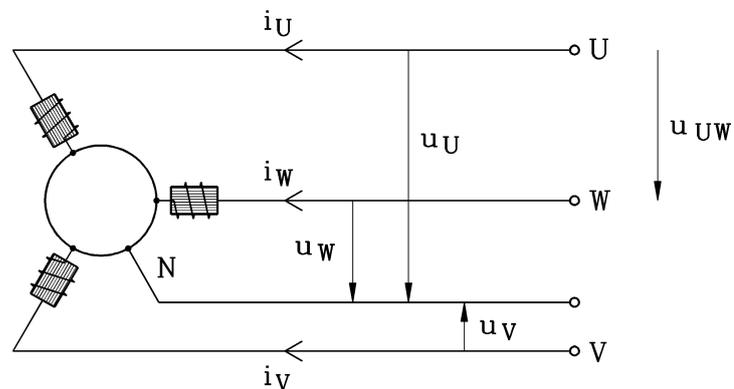


Bild 4.2: Drehfelderzeugung mit ruhenden Wicklungen: Drei räumlich um  $120^\circ$  versetzte Magnetspulen werden von drei zeitlich um  $120^\circ$  phasenverschobenen Strömen gespeist.

Ein rotierender Hufeisenmagnet (Bild 4.1) erzeugt ein magnetisches Drehfeld. In Drehfeldmaschinen wird jedoch das magnetische Drehfeld **ohne** mechanisch rotierende Magnete erzeugt. Im Prinzip werden drei **räumlich** um  $120^\circ$  versetzte Spulen auf Eisenkernen von drei **zeitlich** um  $120^\circ$  zueinander phasenverschobenen Sinuswechselspannungen gespeist (**Drehspannungssystem**), die drei um  $120^\circ$  phasenverschobene Ströme (4.1) treiben (**Drehstromsystem**) (Bild 4.2). Dabei ist  $\varphi$  der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom.

$$\begin{aligned} i_U(t) &= \hat{I} \cdot \cos(\omega t - \varphi) & , & & \omega &= 2\pi f, & f &= 1/T \quad (\omega T = 2\pi) \\ i_V(t) &= \hat{I} \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3 - \varphi) \\ i_W(t) &= \hat{I} \cdot \cos(\omega t + 4\pi/3 - \varphi) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Beispiel 4.1-1: (Bild 4.3)

*Lage des Drehfelds für zwei feste Zeitpunkte:* (Phasenwinkel willkürlich  $\varphi = 4\pi/3$  gesetzt):

$$\text{Zeitpunkt } t=0: \quad i_W = \hat{I}, \quad i_U = i_V = -i_W/2 = -\hat{I}/2 \quad (4.2)$$

$$\text{Zeitpunkt } t=T/3: \quad i_V = \hat{I}, \quad i_W = i_U = -i_V/2 = -\hat{I}/2 \quad (4.3)$$

Zeitpunkt  $t=0$ : Es ist  $i_W$  maximal und doppelt so groß wie  $i_U$  und  $i_V$ , die entgegengesetzte Polarität aufweisen. Daher ist das von Spule W erregte Magnetfeld doppelt so groß wie jenes der Spulen U und V und von entgegengesetzter Polarität. In der vereinfachten Felddarstellung

Bild 4.3a treten daher 4 Feldlinien aus Spule W aus, wovon je 2 in Spule U und V münden. Natürlich sind die  $B$ -Feldlinien geschlossene Kurven, was in Bild 4.3a nicht dargestellt ist. Das Feld ist **zweipolig**. Der N-Pol wird von Spule W und der S-Pol gemeinsam von Spule U und V gebildet.

Zeitpunkt  $t = T/3$ : Das Magnetfeld hat sich um räumlich  $120^\circ$  weiter gedreht (Bild 4.3b).

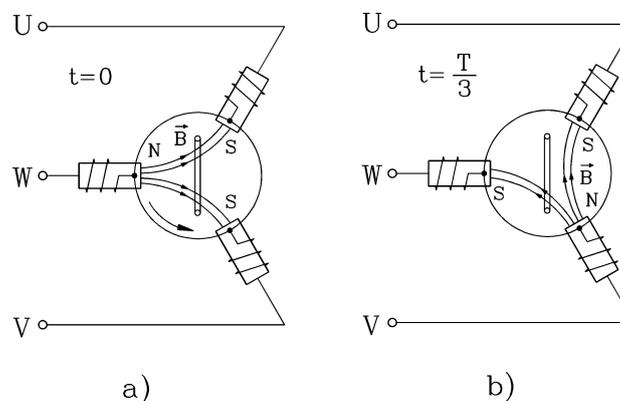
Wird diese Bewegung fortgesetzt, dann hat sich nach der Zeit  $T$  das Drehfeld um  $360^\circ$  weiter gedreht, was bei einem zweipoligen Feld ( $2p = 2$ ) einer Drehzahl

$$2p = 2: \quad n_{syn} = 1/T = f \quad (4.4)$$

entspricht.

### Fazit:

Es sind bei  $2p = 2$  die elektrische Frequenz  $f$  und die Drehfrequenz  $n = n_{syn}$  des Drehfelds gleich groß.



**Bild 4.3:** Das Magnetfeld  $B$  dreht sich während der Zeit  $T/3$  um räumlich  $120^\circ$ , wenn die Spulen U, V, W mit Drehstrom (Frequenz  $f = 1/T$ ) gespeist werden. Es induziert daher eine kurz geschlossene (drehbare, aber z. B. ruhende) Läuferwicklung, so dass dort Strom fließt, der mit dem Drehfeld ein Drehmoment bildet.

## 4.2 Technische Erzeugung eines magnetischen Drehfelds

### a) Feld eines Wicklungsstrangs:

In der Praxis werden die Magnetspulen so ausgeführt, dass in einem aus einzelnen Eisenblechen geschichteten zylindrischen **Ständerblechpaket** Nuten gestanzt sind, in die die Spulenseiten der Spulen U, V, W gelegt sind (Bild 4.4a: Spule U). Die Bleche sind isoliert, um die Wirbelströme zu unterbrechen. Das Blechpaket hat eine zylindrische Ausstanzung („**Ständerbohrung**“, Innendurchmesser  $d_{si}$ ), in der der Läufer dreht. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass die geschlossenen  $B$ -Feldlinien den größten Teil des Wegs im Eisen zurücklegen (Bild 4.5a). Der Läufer in Bild 4.5 ist vereinfacht als zylindrische Walze dargestellt. Nur der Luftspalt  $\delta$  hat einen nennenswerten Magnetisierungsbedarf ( $H_\delta \neq 0$ ), während das Eisen – wenn es ungesättigt ist – eine sehr große Permeabilität hat (hier: Annahme  $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ , daher  $H_{Fe} = 0$ ). Der Durchflutungssatz längs der geschlossenen Kurve  $C$  liefert für  $H_\delta$ :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = H_{Fe} s_{Fe} + H_\delta 2\delta = 2H_\delta \delta = N_c i = \Theta \quad (4.5)$$

Die Luftspaltflussdichte  $B_{\delta}(x)$  ist längs der Umfangskoordinate  $x$  rechteckförmig verteilt (Bild 4.5b), wenn die Nutbreiten unendlich schmal angenommen werden ( $b \rightarrow 0$ ), und hat die Amplitude

$$B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} = \mu_0 \frac{N_c i}{2\delta} \quad (4.6)$$

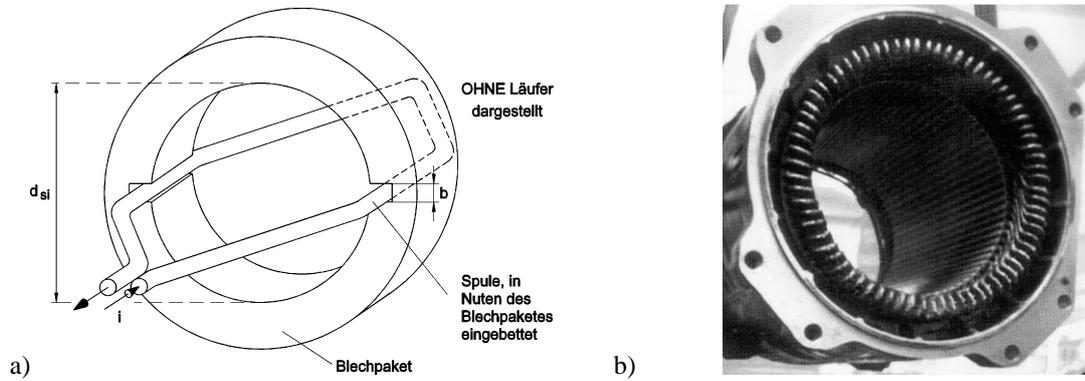


Bild 4.4: a) Spule U in zwei Nuten des Ständerblechpaketes ( $N_c = 1$ ), b) Komplette Drehstromwicklung

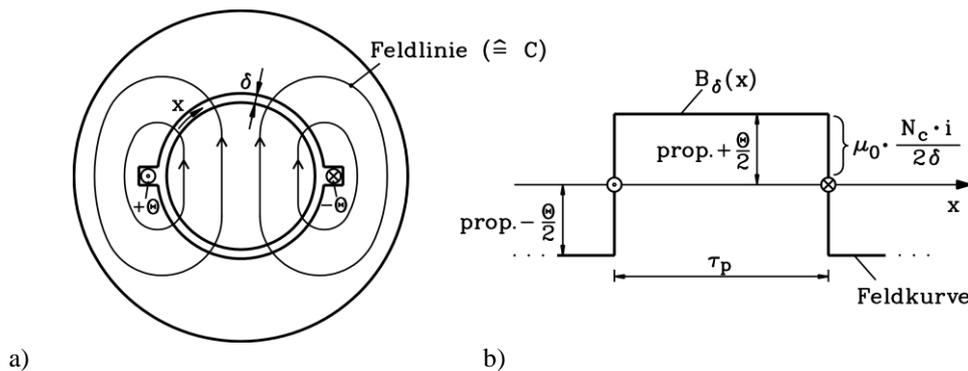


Bild 4.5:  $B$ -Feld einer Ständerspule: a) Axialer Schnitt, b) Feldverteilung längs des Umfangs  $x$  in der „Ständerbohrung“ in abgewickelter Darstellung

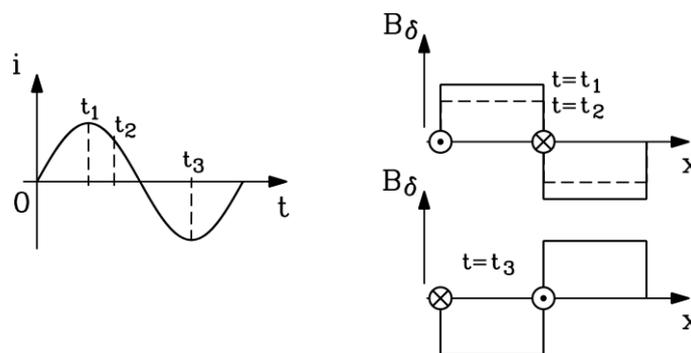


Bild 4.6: Pulsierendes  $B_{\delta}$ -Feld einer Ständerspule bei Speisung mit Sinuswechselstrom  $i$

Am Ort  $x$  der Nut mit der Nutdurchflutung  $\pm \theta$  „springt“ die Luftspaltflussdichte um den Wert  $\pm \mu_0 \theta / \delta$ . Dieses Spulenfeld pulsiert zeitlich sinusförmig, wenn der Spulenstrom  $i$  ein Sinuswechselstrom (4.7) ist, behält aber seine räumliche Rechteckverteilung bei (Bild 4.6). Die Symbole  $\bullet$ ,  $\otimes$  in Bild 4.6 bedeuten, dass der Momentanstrom  $i$  aus der Blattebene heraus ( $\bullet$ ) bzw. in die Blattebene hinein fließt ( $\otimes$ ), je nach dem ob er gerade positive oder negative Polarität hat.

$$i(t) = \hat{I} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t): \text{ Amplitude pulsiert: } B_{\delta}(t) = \mu_0 \frac{N_c \hat{I}}{2\delta} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (4.7)$$

Die räumliche Verteilung des  $B$ -Felds soll möglichst sinusförmig sein, um Parasitäreffekte wie z. B. magnetisch angeregte Geräusche zu vermeiden. Durch Verwendung von drei anstatt einer U-Spule, die elektrisch in Serie geschaltet sind (**Spulengruppe** mit  $q = 3$  Spulen,  $q$ : „Lochzahl“ = Nuten pro Pol und Strang) entsteht eine Magnetfeldverteilung  $B_{\delta}(x)$  im Luftspalt, die treppenförmig aussieht („Stufenhöhe“  $\pm \mu_0 \mathcal{O} / \delta$ ). Diese „Treppe“ entsteht dadurch, dass die Rechteckverteilungen der drei Einzelspulen, jeweils um einen Nutabstand (**Nutteilung**  $\tau_Q$ , Bild 4.7) verschoben, addiert werden. Dabei steht den Hin- und Rückleitern der drei Spulen insgesamt ein Drittel des Umfangs zur Verfügung. Die restlichen zwei Drittel sind für die Spulengruppen V und W reserviert. Diese „Feldtreppe“ nähert sich besser an die gewünschte Sinusform ( $B_{\delta,1}$ ) an als das Rechteckfeld einer einzigen Spule, wie Bild 4.7 zeigt.

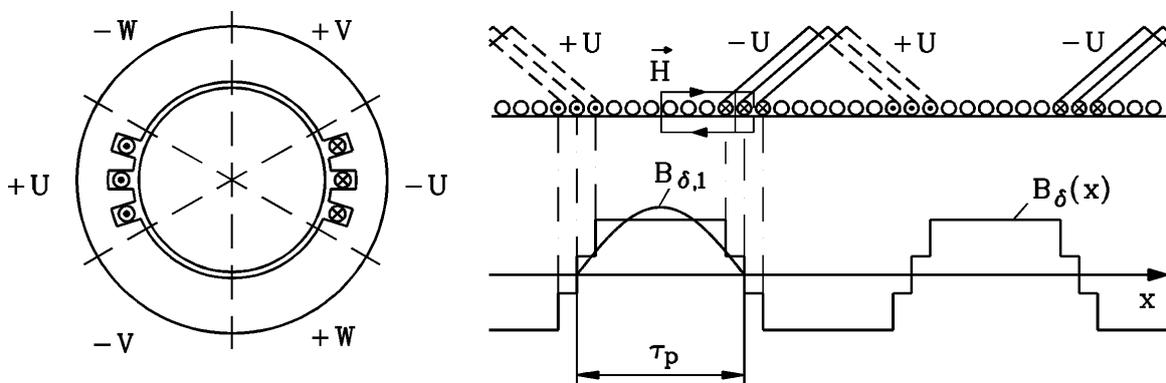


Bild 4.7: Spulengruppe U mit  $q = 3$  Spulen: Entstehung einer treppenartigen  $B$ -Feldverteilung  $B_{\delta}(x)$  im Luftspalt, deren FOURIER-Grundwelle die Amplitude  $B_{\delta,1}$  hat.

**b) Summenwirkung aller drei Wicklungsstränge = Drehfelderzeugung:**

Die Summenwirkung der drei „Wicklungsstränge“ U, V, W (in Bild 4.8a je eine Spule je Strang U, V, W als einfachste Drehfeldwicklung), die mit einem Drehstromsystem gespeist sind, erzeugt ein Drehfeld, wie im Folgenden gezeigt wird.

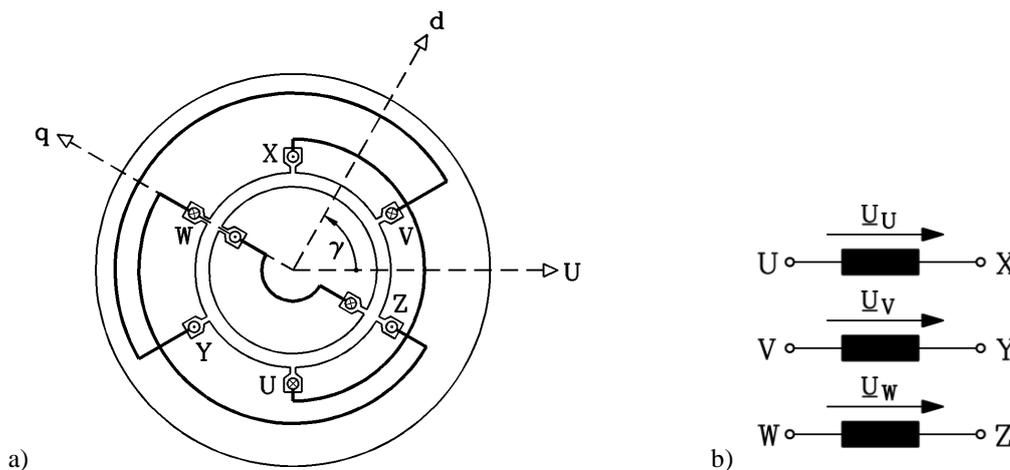


Bild 4.8: Eisenständer, mit einem Synchronmaschinen-Läufer dargestellt: Je eine Ständerspule für U, V, W, um  $120^\circ$  räumlich versetzt angeordnet, mit den Spulenanschlüssen U-X, V-Y, W-Z als Drehfeldwicklung; 1 Spule je Polpaar und je Strang. Zwei Nuten je Polpaar und Strang, zwei Pole (N und S), 6 Nuten, 3 Stränge. „Lochzahl“  $q = 1$ : Nuten je Pol und Strang Ständer-Nutzahl:  $Q_s = 6$ , Polzahl:  $2p = 2$ , Strangzahl:  $m = 3$   $q = Q_s / (2p \cdot m) = 6 / (2 \cdot 3) = 1$ , b) Klemmenbezeichnung und Strangspannungen

Das Ständerfeld dieser Drehstromwicklung (Bild 4.8b) wird im Luftspalt betrachtet für eine konstante Luftspaltweite  $\delta$ , unendlich hohe Eisenpermeabilität und eine speisendes Drehstromsystem (Bild 4.9).

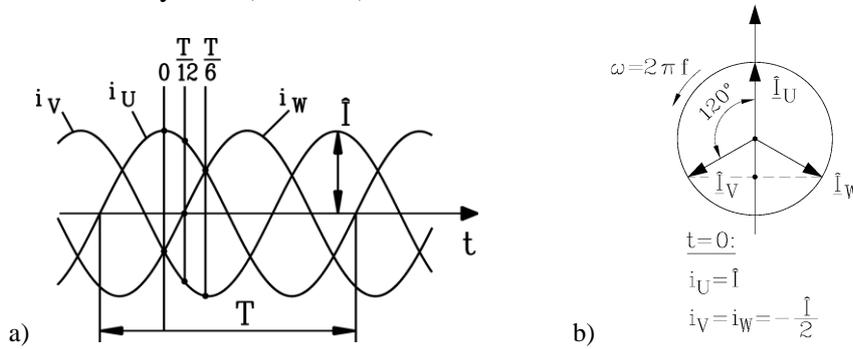


Bild 4.9: Drehstromsystem: a) im Zeitbereich, b) als komplexe Zeiger im Frequenzbereich

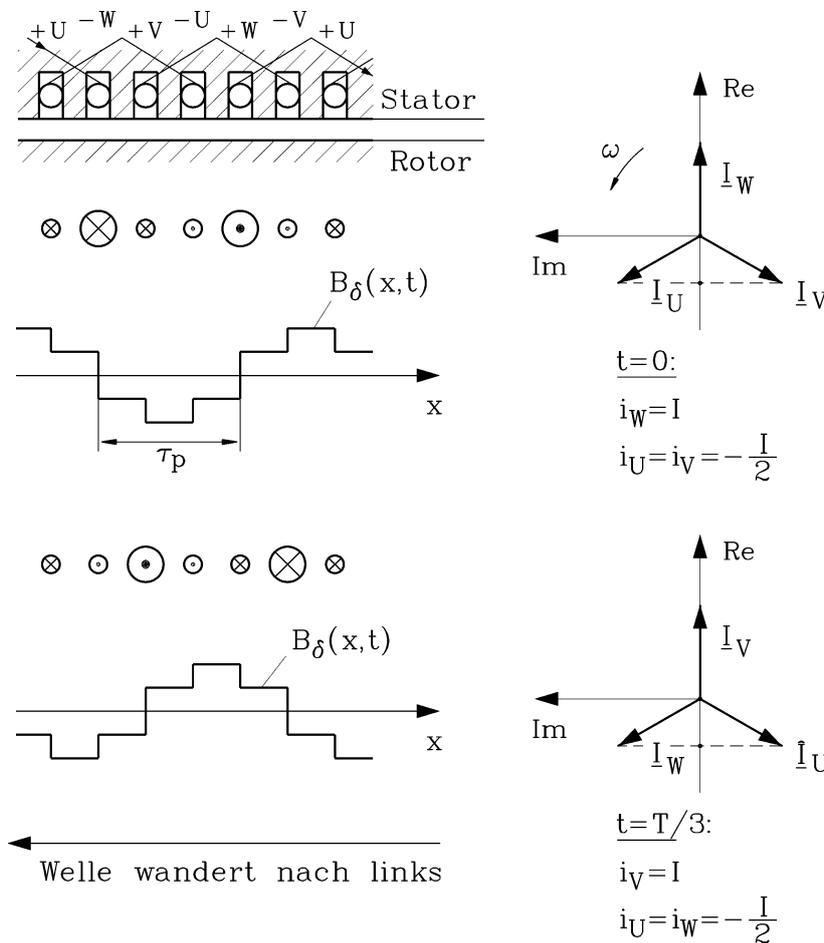


Bild 4.10: Ermittlung des Luftspaltfelds der Wicklung von Bild 4.8 ( $q = 1, m = 3$ ) mit der Methode von Bild 4.5, - 4.7 für ein Drehstromsystem für die Zeitpunkte  $t = 0$  und  $t = T/3$ . Es entsteht ein stufenförmiges Wanderfeld.

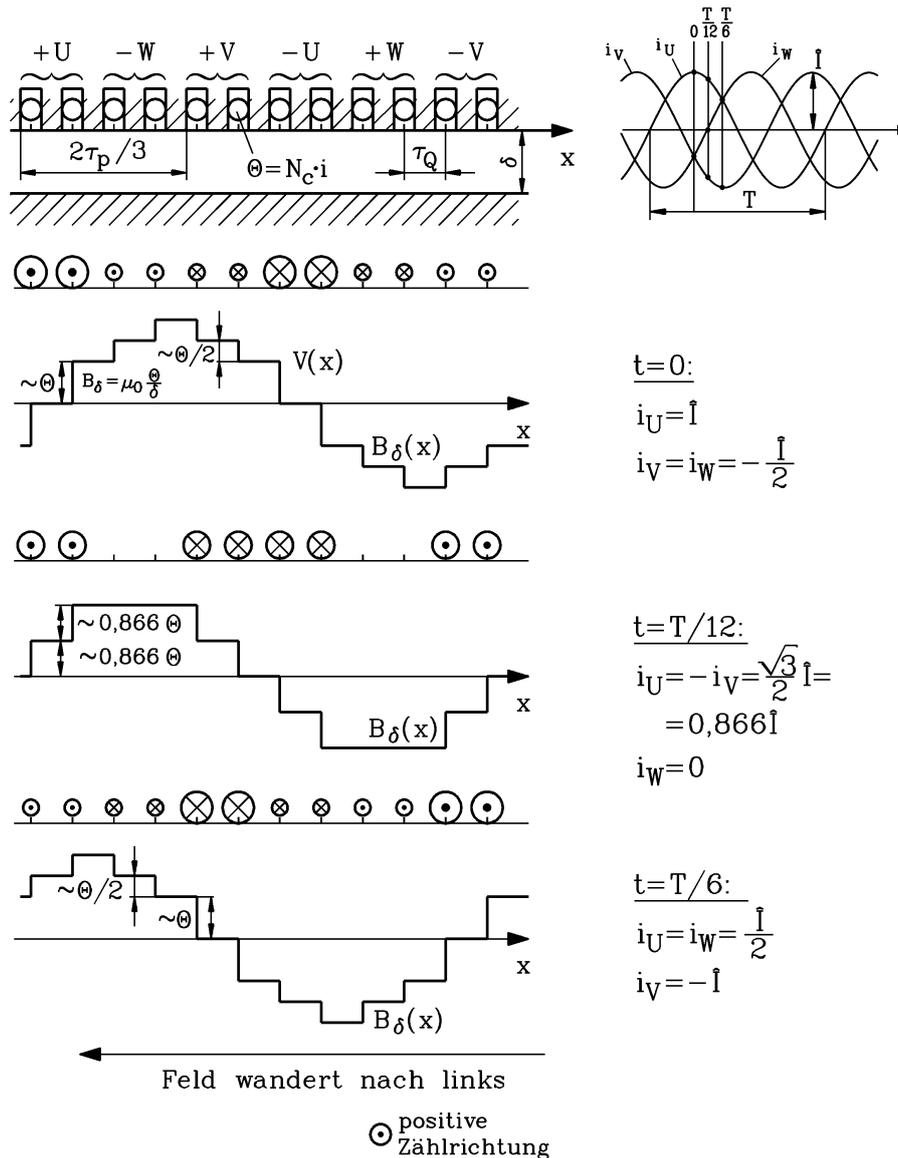
Beispiel 4.2-1:

*Zweipolige Drehfeldwicklung:*  $2p = 2$ , je eine Spule je Strang (Bild 4.8),  $q = 1$ . Es sind  $m \cdot q = 3 \cdot 1 = 3$  Spulen mit Hin- und Rückleiter (= 6 Nuten) vorhanden. Drei Nutteilungen  $\tau_Q$  ergeben daher eine Polteilung  $\tau_p$ .

(i) Zeitpunkt  $t = 0$ :  $i_W = \hat{I}, \quad i_U = i_V = -i_W / 2 = -\hat{I} / 2$  (4.8)

Am Ort jeder Nut springt das Magnetfeld um den Wert  $\pm\mu_0\Theta/\delta$  (Bild 4.10). Je nach Zugehörigkeit zu Strang U, V, W hat die Nutdurchflutung  $\Theta$  gemäß (4.8) folgende Werte:  $\Theta_U = N_c i_U = -N_c \hat{I}/2 = \Theta_V$ ,  $\Theta_W = N_c i_W = N_c \hat{I}$ . So entsteht die Feldtreppe zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Die Flächen unter der „Feldtreppe“  $B_\delta(x)$  sind proportional dem jeweiligen Fluss. Die positiven und negativen Flächen, also N- und S-Polfluss, sind gleich groß.

(ii) Zeitpunkt  $T/3$ : Die Feldtreppe ist um  $2\tau_p/3$  nach links gewandert, was man an der neuen Lage der „neutralen Zone“ ( $B_\delta = 0$ ) erkennt.



**Bild 4.11:** Ermittlung des Luftspaltfelds für eine Wicklung mit  $q = 2$ ,  $m = 3$  analog zu Bild 4.10 für ein Drehstromsystem für die Zeitpunkte  $t = 0$ ,  $t = T/6$  und  $t = T/3$ . Es entsteht ein stufenförmiges Wanderfeld, das gegenüber Bild 4.10 ( $q = 1$ ) sich besser an die erwünschte Sinusform annähert.

**Beispiel 4.2-2:**

**Zweipolige Drehfeldwicklung:**  $2p = 2$ , Spulengruppen mit  $q = 2$  Spulen: Es sind  $m \cdot q = 3 \cdot 2 = 6$  Spulen mit Hin- und Rückleiter (= 12 Nuten) vorhanden. Sechs Nutteilungen  $\tau_Q$  ergeben daher eine Polteilung  $\tau_p$ .

$$(i) \text{ Zeitpunkt } t=0: i_U = \hat{I}, i_V = i_W = -i_U / 2 = -\hat{I} / 2 \quad (4.9)$$

Am Ort jeder Nut springt das Magnetfeld um den Wert  $\pm \mu_0 \Theta / \delta$  (Bild 4.11). Je nach Zugehörigkeit zu Strang U, V, W hat die Nutdurchflutung  $\Theta$  gemäß (4.9) folgende Werte:  $\Theta_U = N_c i_U = N_c \hat{I}$ ,  $\Theta_V = N_c i_V = -N_c \hat{I} / 2 = \Theta_W$  und erregt die Feldtreppe zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Die Flächen unter der „Feldtreppe“  $B_\delta(x)$  sind proportional zum jeweiligen Fluss pro Pol. Die positiven und negativen Flächen, also N- und S-Polfluss, sind gleich groß.

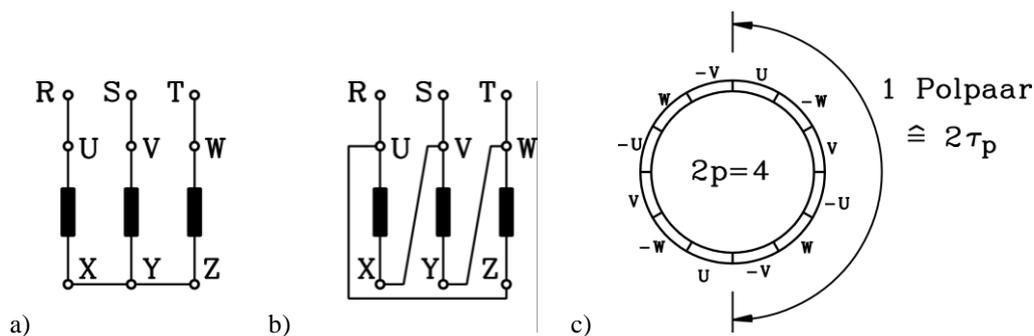
(ii) Zeitpunkt  $T/12$ : Die Feldtreppe ist um  $2\tau_p/12$  nach links gewandert, was man an der neuen Lage der „neutralen Zone“ ( $B_\delta = 0$ ) erkennt, und hat ihre Form etwas geändert.

(iii) Zeitpunkt  $T/6$ : Die Feldtreppe ist um  $2\tau_p/6$  nach links gewandert und hat wieder ihre ursprüngliche Form.

Wesentlich ist, dass sowohl in Bild 4.10 als auch 4.11 die zugehörige **FOURIER-Grundwelle** der Feldtreppe analog zu Bild 4.7 ihre Amplitude  $B_{\delta 1}$  zeitlich NICHT ändert (Bild 4.13, Beweis: siehe Vorlesung „Elektrische Maschine und Antriebe“), so dass eine gleichmäßig wandernde oder sich drehende Feld-Grundwelle erhalten wird, deren Wandergeschwindigkeit bzw. Drehfrequenz in Abschnitt 4.3 ermittelt wird.

$$B_\delta(x, t) = B_{\delta 1} \cdot \cos(x \cdot \pi / \tau_p - \omega t) \quad (4.10)$$

Dieses Grundwellenfeld (Bild 4.14) wird zur Energiewandlung, nämlich für ein zeitlich konstantes elektromagnetisches Drehmoment  $M_e$ , genutzt. **Im Folgenden wird nur diese Sinus-Grundwelle der treppenförmigen Feldverteilung weiter betrachtet.** In Bild 4.11 ist die Stromfolge  $i_U, i_W, i_V$ , so dass das Feldmaximum in Richtung von +V zu +U wandert. Ein **Phasentausch** (z. B. V gegen W) führt zur Stromfolge  $i_U, i_V, i_W$  und bewirkt eine **Bewegungsumkehr** des Felds. Weiter können die drei Wicklungsstränge U, V, W – je nach Betriebserfordernis – in **Stern** oder in **Dreieck** geschaltet werden (Bild 4.12a, b), wobei die Strangströme bei Dreieckschaltung  $1/\sqrt{3}$  der Außenleiterströme sind.



**Bild 4.12:** Anschluss der Drehfeldwicklung an das Drehstromnetz mit a) Sternschaltung, b) Dreieckschaltung, c) Sechszonen-Anordnung pro Polpaar für die Spulengruppen einer vierpoligen Drehfeldmaschine N-S-N-S

### 4.3 Drehfrequenz des Drehfelds

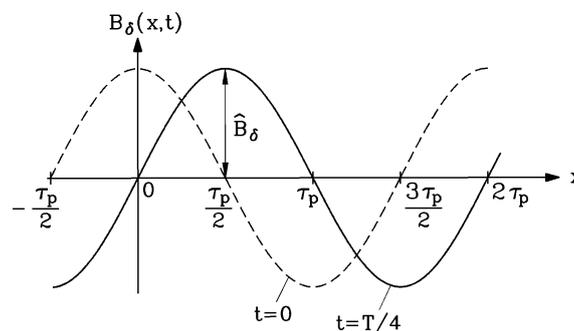
Während der Zeit  $T/6$  ist das Feld in Bild 4.11 um  $2\tau_p/6$  weiter gewandert bzw. in Bild 4.10 während  $T/3$  um  $2\tau_p/3$ . Die Wandergeschwindigkeit  $v_{syn}$  ist folglich in beiden Fällen gleich.

$$v_{syn} = \frac{s}{t} = \frac{2\tau_p/6}{T/6} = \frac{2\tau_p/3}{T/3} = 2f\tau_p \quad (4.11)$$

Die zugehörige Drehfrequenz ist mit  $s = d_{si}\pi$  und  $t = 1/n$  die **Synchrondrehzahl**  $n = n_{syn}$ .

$$n_{syn} = \frac{v_{syn}}{d_{si}\pi} = \frac{v_{syn}}{2p\tau_p} = \frac{f}{p} \quad (4.12)$$

In Bild 4.12c ist gegenüber Bild 4.8 die Wicklungsanordnung verdoppelt, so dass ein **vierpoliges** Drehfeld entsteht. Nach der Zeit  $T$  ist das Drehfeld um  $2\tau_p$  (= **halber** Umfang) weiter gewandert. Bei Verdopplung der Polzahl dreht das Drehfeld also nur **halb** so schnell und bestätigt mit  $p = 2$  die Formel (4.12).



**Bild 4.13:** Feld-Grundwelle der Feldverteilung aus Bild 4.10 bzw. 4.11 als Wanderwelle für zwei Zeitpunkte, die um ein Viertel der Schwingungsperiode  $T$  des Drehstromsystems versetzt sind

#### Beispiel 4.3-1:

*Drehfrequenz eines Drehfelds:*

a) Vierpolige Wicklungsanordnung (Bild 4.13c):  $2p = 4$ , elektrische Frequenz  $f = 200$  Hz:

Synchrondrehzahl:  $n_{syn} = (200/2) = 100/s = \underline{6000/min}$

b) wie a), jedoch Frequenz 50 Hz:  $n_{syn} = (50/2) = 25/s = \underline{1500/min}$

c) wie b), jedoch zweipolig:  $n_{syn} = (50/1) = 50/s = \underline{3000/min}$

Da die Minimalpolzahl  $2p = 2$  ist, kann bei Netzfrequenz 50 Hz (*Europa, ...*) oder 60 Hz (*USA, Japan, ...*) das Drehfeld einer Drehfeldmaschine nicht rascher als mit 3000/min bzw. 3600/min drehen. Höhere Synchrondrehzahlen können nur durch künstliche Erhöhung der Frequenz z. B. über einen **Umrichter** erreicht werden.

#### Beispiel 4.3-2:

*Geschwindigkeit eines Wanderfelds:*

Bei ebener Wicklungsanordnung entsteht ein Wanderfeld, das einen beweglichen Magneten mitziehen kann, z. B. **Linear-Synchronmotor der TRANSRAPID-Magnetschwebbahn:**

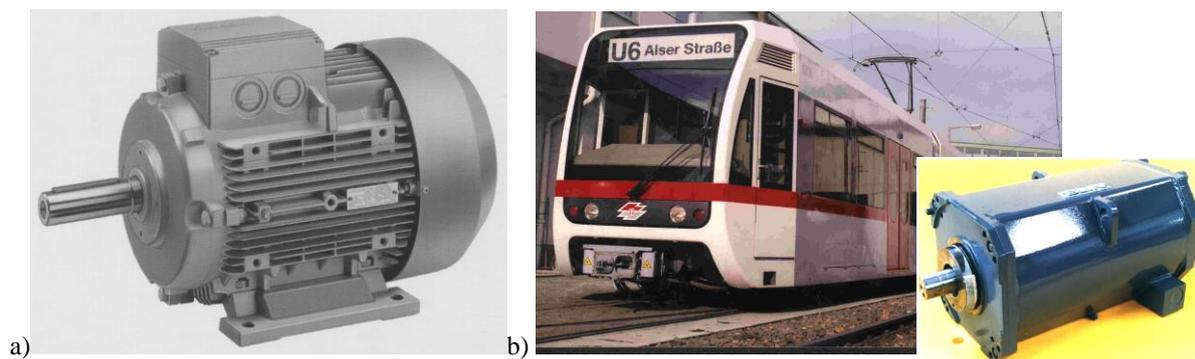
$f_{max} = 270$  Hz, Polteilung  $\tau_p = 258$  mm:  $v_{syn,max} = 2 \cdot 270 \cdot 0.258 = 139.3$  m/s = 500 km/h

## 4.4 Asynchronmaschinen

### **Einsatzgebiete von Asynchronmaschinen:**

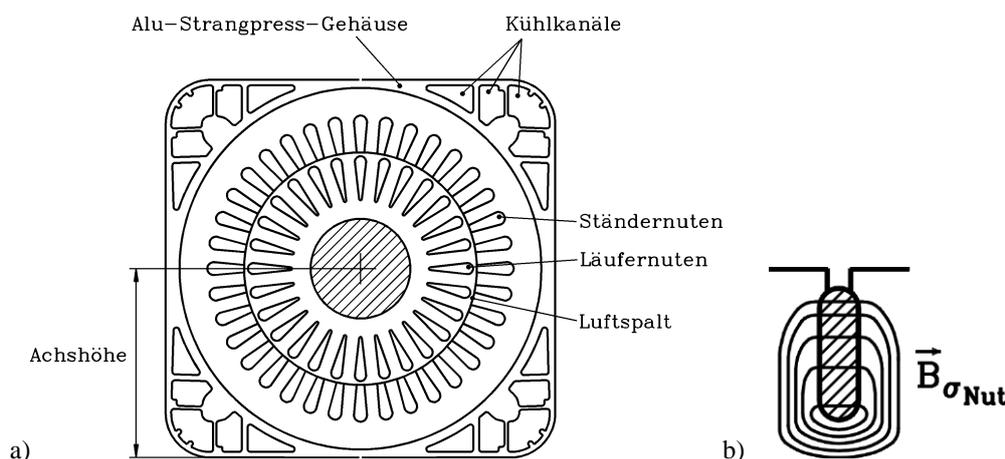
Asynchronmaschinen werden häufig direkt am Netz mit konstanter Statorfrequenz und Spannungsamplitude betrieben. Im Motor- / Generatorbetrieb dreht der Läufer langsamer /

schneller („asynchron“ = nicht gleich schnell) wie das Drehfeld. Er dreht dabei mit nahezu konstanter Drehzahl nahe der Synchrondrehzahl („Festdrehzahlantrieb“), z. B. als Motor für Pumpen, Gebläse, Kompressoren, ... und ist in sehr großer Stückzahl im Einsatz, zumeist in der Bauweise des robuster „Normmotors“ mit genormten Wellen- und Fußmaßen und Oberflächenkühlung mit Kühlrippen (Bild 4.14a). Im Generatorbetrieb muss der Läufer von einer Turbine schneller als das Drehfeld angetrieben werden und wird z. B. als Windgenerator verwendet. Asynchronmaschinen mit Umrichterspeisung erhalten vom Umrichter ein Stator-Drehspannungssystem mit veränderlicher Frequenz und Amplitude und sind dann drehzahlveränderbar. Solche Motoren übernehmen viele Aufgaben in der Industrie (z. B. Drahtziehmaschinen, ...), als Aufzugsantriebe, in der Traktion,... (Bahn- und Straßenbahn, Bild 4.14b), da sie robust sind.



**Bild 4.14:** a) Oberflächengekühlte Kurzschlussläufer-Asynchronmotor als „Normmotor“ mit Wellenlüfter unter der Lüfterhaube (rechts im Bild, Siemens AG), b) Wassermantelgekühlte 100 kW-Käfigläufer-Fahrmotoren für die U-Bahn (Elin EBG Motoren GmbH, Österreich)

#### 4.4.1 Aufbau von Asynchronmaschinen



**Bild 4.15:** a) Querschnitt eines vierpoligen, oberflächengekühlten Kurzschlussläufer-Asynchronmotors mit Aluminium-Druckguss-Käfig, Achshöhe 112 mm, für Betrieb am Frequenzumrichter bis 500 Hz,  $n_{\text{max}} = 15000/\text{min}$ , geschlossene Läuferfalten, Verwendung als Hauptspindeltrieb in Werkzeugmaschinen (Siemens AG), b) Läuferovalstab in der Läuferfalte (Querschnitt) mit vom Stabstrom erregten magnetischen Läufer-Nutstrefeld  $B_{\sigma, \text{Nut}}$

Der zylindrische Läufer trägt in Nuten eine dreisträngige Drehfeldwicklung, die an den Klemmen kurzgeschlossen ist, oder einen **Kurzschlusskäfig**, was die häufigste Ausführung ist. Dieser besteht aus in Nuten befindlichen Kupfer- oder Aluminiumstäben, die an den

Stirnseiten durch leitfähige Ringe miteinander verbunden (kurzgeschlossen) sind. Der Ständer trägt in Nuten eine dreisträngige Drehfeldwicklung gemäß Abschnitt 4.2.

#### Beispiel 4.4.1-1:

Querschnitt einer vierpoligen Asynchronmaschine mit Käfigläufer (Bild 4.15a):

$Q_s = 36$  Ständernuten,  $Q_r = 28$  Läufernuten, Polzahl  $2p = 4$ ,

Ständer: Strangzahl:  $m = 3$ , Lochzahl:  $q = 3$ , Ständer-Nutzzahl:  $Q_s = 2p \cdot m \cdot q = 36$ .

Sternschaltung der drei Wicklungsstränge: U, V, W: Netz-Anschlussklemmen, X, Y, Z bilden den Sternpunkt.

Ständerfrequenz  $f = 500$  Hz: Synchrondrehzahl  $n_{syn} = f / p = 500 / 2 = 250 / s = \underline{15000/min}$

### 4.4.2 Funktionsweise von Asynchronmaschinen

#### Motorbetrieb:

Wird an die Klemmen der Ständerwicklung U, V, W der still stehenden Asynchronmaschine ein Drehspannungssystem mit einer elektrischen Ständerfrequenz (z. B.  $\omega_s / (2\pi) = f_s = 50$  Hz) angelegt, so erregt das sich einstellende Drehstromsystem ein magnetisches Drehfeld. Dessen Flussdichte im Luftspalt ist – bei ausschließlicher Betrachtung der Grundwelle – sinusförmig verteilt mit der Amplitude  $B_{s1}$ . Dieses Drehfeld rotiert mit synchroner Drehzahl  $n_{syn}$  (bei z. B. vierpoliger Wicklung und 50 Hz: 1500/min) und induziert in die stillstehende Läuferwicklung wegen der dort stattfindenden Flussänderung eine Rotorspannung  $U_i = U_{i,r}$  (Bild 4.16a).

#### Fazit:

Der Läufer muss im **Motorbetrieb** langsamer als das Drehfeld drehen ( $n < n_{syn}$ ), (er „*schlüpft*“), damit eine Änderung der Läufer-Flussverkeftung stattfindet und eine Rotorspannung induziert wird ("**Asynchronprinzip**").

Definition des **Schlupfs**: 
$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad (4.13)$$

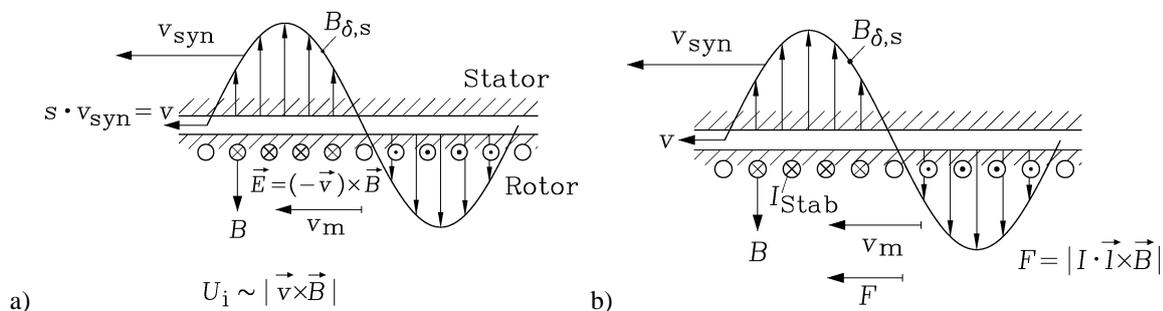
#### Beispiel 4.4.2-1:

Schlupf:

a) Läufer steht still:  $n = 0$ :  $\underline{s = 1}$

b) Läufer rotiert halb so schnell wie das Drehfeld:  $n = n_{syn}/2$ :  $\underline{s = 0.5}$

c) Läufer rotiert genau so schnell wie das Drehfeld:  $n = n_{syn}$ :  $\underline{s = 0}$



**Bild 4.16:** a) Zwei im Abstand einer halben Wellenlänge (= Polteilung) liegende Läuferstäbe bilden eine Masche, in die das Ständerluftspaltfeld eine Spannung induziert, b) Die von der induzierten Spannung getriebenen Läuferstabströme bilden mit dem Ständerfeld über die *Lorentz-Kräfte*  $F$  das Drehmoment  $M_e$ .

Das Ständerdrehfeld ist sinusförmig verteilt (4.10):  $B_{\delta,s}(x,t) = B_{s1} \cdot \cos(x \cdot \pi / \tau_p - \omega \cdot t)$ . Zwei um eine Polteilung  $\tau_p$  distanzierte Läuferstäbe bilden eine Masche, die den Hauptfluss  $\Phi_{sh}$  umfasst. Bezüglich des Rotors ist die Kreisfrequenz auf Grund der Relativbewegung des Ständerfelds zum Läufer  $\omega = s \cdot \omega_s = \omega_r$  bzw.  $f_r = s \cdot f_s$

$$\Phi_{sh}(t) = \int_A \overset{\rho}{B}_{\delta} \cdot d\overset{\rho}{A} = l \int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} B_{s1} \cos(x\pi/\tau_p - \omega t) \cdot dx = \frac{2}{\pi} \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{s1} \cdot \cos(\omega t) = \Phi_{sh} \cos(\omega_r t) \quad (4.14)$$

und induziert die Rotorspannung (= Rotorhauptfeldspannung) in eine Läufermasche ( $\omega_s = 2\pi f_s$ , Bild 4.16a):  $u_{i,r}(t) = -d\Phi_{sh}(t)/dt = -\omega_r \Phi_{sh} \sin(\omega_r t)$ .

$$\boxed{\hat{U}_{i,r} = s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sh}} \quad (4.15)$$

Gl. (4.15) wird nun nochmals mit der Bewegungsinduktion ermittelt: Das Stator-Magnetfeld bewegt sich mit der Tangentialgeschwindigkeit  $\overset{v}{v}_{syn}$ , der Rotor und damit die Läuferstäbe mit der Oberflächengeschwindigkeit  $\overset{v}{v}_m$ , folglich das Stator-Magnetfeld relativ zu den Stäben mit  $\overset{v}{v} = \overset{v}{v}_{syn} - \overset{v}{v}_m$ ,  $\overset{v}{v} = s \cdot \overset{v}{v}_{syn}$  (Bild 4.16a). Die Stabgeschwindigkeit relativ zum Statorfeld ist daher  $\overset{v}{v}_{rel} = -\overset{v}{v}$ . Die in den Stäben induzierte Bewegungsfeldstärke  $\overset{E}{E} = \overset{v}{v}_{rel} \times \overset{B}{B}_{\delta} = -\overset{v}{v} \times \overset{B}{B}_{\delta}$  ist in Richtung der Stabachse orientiert und treibt in den über stirnseitige Ringe kurzgeschlossenen Stäben Rotorstabströme  $I_{stab} = I_r$ , die mit dem Ständerdrehfeld tangentiale LORENTZ-Kräfte  $F$  je Stab bilden, die den Rotor in Richtung  $\overset{v}{v}_m$  antreiben (Bild 4.16b). Die LORENTZ-Kräfte bilden mit dem halben Läuferdurchmesser als Hebelarm das elektromagnetische Drehmoment  $M_e$ . Die induzierte Stabspannung ist  $U_i = \int_0^l \overset{E}{E} \cdot d\overset{\rho}{s} = v \cdot B_{\delta} l$ .

Das Statorfeld ist am Ort zweier Rotorstäbe im Abstand  $\tau_p$  (Bild 4.16a) entgegengesetzt gleich groß  $B_{\delta}$ ,  $-B_{\delta}$ , so dass die Maschenspannung als Differenz der zwei Stabspannungen  $u_{i,r} = v \cdot B_{\delta} l - v \cdot (-B_{\delta}) l = 2s v_{syn} \cdot B_{\delta} l$  mit der Amplitude  $\hat{U}_{i,r} = 2s v_{syn} \cdot B_{s1} l$  und der Frequenz  $f_r = s \cdot f_s$  ist. Mit (4.11) und (4.14) folgt daraus unmittelbar (4.15).

#### 4.4.3 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Die Rotor-Stabströme  $I_r$  mit der Frequenz  $f_r$  erregen ihrerseits ein Läuferdrehfeld mit der gleichen Polzahl  $2p$  wie das Ständerfeld, das relativ zum Läufer mit der synchronen Drehzahl

$$n_{syn,r} = f_r / p \quad (4.16)$$

dreht. Relativ zum Ständer dreht es aber mit der Synchrondrehzahl  $n_{syn}$ , da sich die Läuferdrehzahl  $n$  zu  $n_{syn,r}$  addiert (4.17). Damit drehen Ständer- und Läuferdrehfeld gleich schnell und überlagern sich zum resultierenden, sinusförmig verteilten Luftspaltfeld mit der Amplitude  $B_l$ , dessen Fluss pro Pol den resultierenden Hauptfluss (4.18) bildet.

$$n_{syn,r} + n = s \cdot n_{syn} + (1-s) \cdot n_{syn} = n_{syn} \quad (4.17)$$

$$\Phi_h = \frac{2}{\pi} \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_l \quad (4.18)$$

Damit tritt eine augenfällige **Analogie zum Transformator** (Kapitel 2) auf:

- Primär- und Sekundärwicklung (= Ständer- und Läuferwicklung) sind elektrisch getrennt, erregen aber einen gemeinsamen Hauptfluss  $\Phi_h$ , der beide Wicklungen induktiv koppelt.
- Es existieren Streuflüsse in den Ständer- und Läufernuten (Bild 4.15b), aber auch um die Spulenden, die an der Kopplung zwischen den beiden Wicklungen NICHT teilnehmen. Wie beim Transformator wirken sie als **Streuinduktivitäten**  $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ .
- Es existiert je Strang eine **Hauptinduktivität**  $L_h$  durch magnetische Kopplung von Ständer- und Läuferwicklung sowie eine **Selbstinduktivität** durch die Selbstinduktion des Ständer-Haupt- und Streuflusses in der Ständerwicklung  $L_s$  (analog im Läufer:  $L_r$ ).
- Die Windungszahlen von Primär- und Sekundärwicklungssträngen sind i. A. unterschiedlich, nämlich im Stator  $N_s$  Windungen je Strang und im Rotor  $N_r = 1/2$  (halbe Masche = 1 Stab), so dass ein Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u} = N_s/N_r$  definiert werden kann.

Beispiel 4.4.3-1:

Windungszahlen einer vierpoligen Asynchronmaschine  $2p = 4$ :

Ständerwicklung:

Windungen je Spule  $N_c = 5$ , Spulen pro Pol und Strang  $q = 3$ ,

Windungszahl je Strang:  $N_s = p \cdot q \cdot N_c = 2 \cdot 3 \cdot 5 = \underline{\underline{30}}$ .

Käfigläuferwicklung: Ein Stab ist eine „halbe“ Windung:  $N_r = 1/2$ ;  $\ddot{u} = 60$ .

Trotzdem existieren einige wesentliche **Unterschiede zum Transformator**:

- Die Sekundärfrequenz (**Rotorfrequenz**)  $f_r$  ist i. A. nicht gleich groß wie die Primärfrequenz (Ständerfrequenz)  $f_s$ .
- Die Rotorwicklung ist **kurzgeschlossen**.
- Im Flusspfad des Hauptflusses  $\Phi_h$  liegt der mechanische Luftspalt  $\delta$ , der die Hauptinduktivität  $L_h$  gegenüber jener des Transformators deutlich **verringert**.

Der „**Magnetisierungsstrom**“ ist analog zum Transformator definiert:

$$\boxed{\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_r = \underline{I}_s + \underline{I}_r / \ddot{u}} \quad (4.19)$$

Er magnetisiert den Hauptfluss (4.18) im Luftspalt, dessen Verkettung  $\Psi_h$  in Bild 4.18 durch die Hauptinduktivität  $L_h$  wiedergegeben wird.

$$\underline{\Psi}_h = N_s \underline{\Phi}_h = L_h \cdot \underline{I}_m \cdot \sqrt{2} \quad (4.20)$$

Gegenüber dem Transformator ist  $L_h$  wegen des Luftspalts (magnetischer Widerstand!) kleiner und daher  $I_m$  **relativ groß**, typisch 30% bis 50% vom Nennstrom  $I_{sN}$ . Aus (4.15) folgt für die induzierte Hauptfeldspannung des resultierenden Hauptflusses im Stator und im Rotor:

$$\underline{U}_{sh} = j\omega_s \cdot N_s \underline{\Phi}_h / \sqrt{2} = j\omega_s L_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (4.21)$$

$$\underline{U}_{rh} = j\omega_r \cdot N_r \underline{\Phi}_h / \sqrt{2} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \cdot \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{sh} \quad \Leftrightarrow \quad \underline{U}'_{rh} = \ddot{u} \cdot \underline{U}_{rh} = s \cdot \underline{U}_{sh} \quad (4.22)$$

Dabei ist  $U_{th}$  die halbe Maschenspannung (= Stabspannung). Die Spannungsgleichungen je Strang im Stator und Rotor mit Berücksichtigung der OHM'schen Widerstände  $R_s, R_r$  je Strang und der Selbstinduktionswirkung der Streufelder sind wie beim Transformator (Bild 4.17):

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

$$\text{Rotor: } \underline{U}'_r = 0 = (R'_r + j\omega_r L'_{r\sigma})\underline{I}'_r + \underline{U}'_{rh} = (R'_r + js\omega_s L'_{r\sigma})\underline{I}'_r + js\omega_s L_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

Mit  $X$  statt  $\omega L$  als Reaktanz und Division der Rotorspannungsgleichung durch  $s$  folgt:

$$\underline{U}_s = (R_s + jX_{s\sigma})\underline{I}_s + jX_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (4.23)$$

$$0 = (R'_r / s + jX'_{r\sigma})\underline{I}'_r + jX_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (4.24)$$

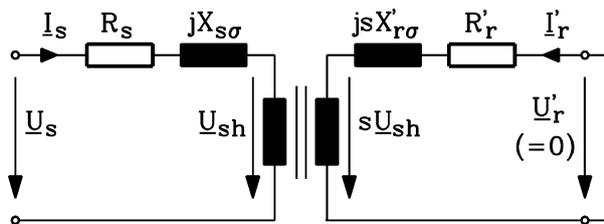


Bild 4.17: Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine Strang (ohne Ummagnetisierungsverluste)

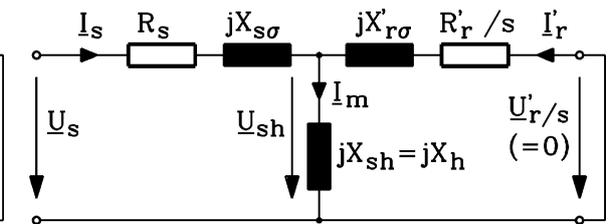


Bild 4.18: wie Bild 4.17, jedoch mit Division durch  $s$ , so dass das T-Ersatzschaltbild entsteht

$R_s, R'_r$ : OHM'sche Widerstände von Ständer-, Läuferwicklung; (Index s, r: Stator, Rotor)

$X_{s\sigma}, X'_{r\sigma}$ : Streureaktanzen;  $X_h$ : Hauptfeldreaktanz;  $\underline{U}_s$ : primäre Strangspannung,

$\underline{I}_s, \underline{I}'_r$ : primärer und sekundärer, auf die Primärseite umgerechneter Strangstrom

Den Gleichungen (4.23), (4.24) entspricht das **T-Ersatzschaltbild** je Strang (Bild 4.18). Im Unterschied zum Ersatzschaltbild des Transformators ist die Sekundärspannung durch den Kurzschluss in der Läuferwicklung kurzgeschlossen. Wie beim Transformator stellt sich der Läuferstrom annähernd gegenphasig zum Ständerstrom ein („Durchflutungsausgleich“).

#### 4.4.4 Stromaufnahme der Asynchronmaschine

Aus dem Ersatzschaltbild Bild 4.18 werden Ständerstrom  $I_s$  und Drehmoment  $M_e$  bei vorgegebener Ständerspannung  $U_s$  und Ständerfrequenz  $f_s$  für jede Drehzahl  $n$ , also jeden Schlupf  $s$  berechnet.

##### a) Leerlauf: $n = n_{syn}$ :

Unbelastete Asynchronmaschine (Schlupf  $s = 0$ ):  $R'_r/s$  ist unendlich groß; es kann kein Läuferstrom fließen. Daher ist das Drehmoment Null (**Leerlauf**).

##### Leerlaufstrom $I_{s0}$ :

$$\underline{U}_s = (R_s + jX_{s\sigma})\underline{I}_s + jX_h(\underline{I}_s + 0) \rightarrow \underline{I}_{s0} = \frac{\underline{U}_s}{R_s + j(X_{s\sigma} + X_h)} \quad (4.25)$$

##### b) Motorbetrieb: $n < n_{syn}$ :

Bei **Belastung** mit einem Lastdrehmoment  $M_s$  sinkt die Drehzahl  $n$ , der Schlupf  $s$  steigt:  $s > 0$ . Nun ist  $R'_r/s$  endlich groß; es fließt ein Läuferstrom  $I'_r$ .

Mit den Vereinfachungen

(i)  $R_s \cong 0$  und

(ii)  $L_{s\sigma} = 0, L'_{r\sigma} \rightarrow L'_{s\sigma} + L'_{r\sigma} = L_\sigma$ , gleichbedeutend mit einer Berücksichtigung des gesamten Streuflusses auf der Läuferseite), folgt:

$$\begin{aligned} \underline{U}_s &= jX_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r), \quad 0 = jX_h(\underline{I}_s + \underline{I}'_r) + (R'_r/s + jX_\sigma) \cdot \underline{I}'_r, \\ \underline{I}_m &= \underline{I}_s + \underline{I}'_r = \underline{U}_s / (jX_h), \quad \underline{I}'_r = -\frac{\underline{U}_s}{R'_r/s + jX_\sigma}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Der Betrag des **Läuferstroms je Strang** (mit der Abkürzung  $X_\sigma = X_{s\sigma} + X'_{r\sigma}$  für die gesamte Streureaktanz) ist

$$\boxed{I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{(R'_r/s)^2 + X_\sigma^2}}} \quad (4.27)$$

Gemäß  $\underline{I}_s = \underline{I}_m - \underline{I}'_r$  wird der Ständerstrom je Strang bestimmt. Wegen  $\underline{I}_m \approx \underline{I}_{s0}$  folgt aus (4.26), dass bei kleinem Schlupf die Zeiger  $\underline{I}_m, \underline{I}'_r$  näherungsweise aufeinander normal stehen. Somit erhalten wir für den Betrag des Ständerstroms nach *Pythagoras* die **Stromaufnahme  $I_s(s)$  der Asynchronmaschine** (Bild 4.20).

$$\boxed{I_s \approx \sqrt{I_{s0}^2 + (I'_r)^2}} \quad (4.28)$$

#### **Fazit:**

*Ausgehend vom Leerlaufstrom bei  $s = 0$  nehmen mit steigendem Schlupf Ständer- und Läuferstrom rapide zu, um bei großen Schlupfen einem maximalen, nur durch die Streureaktanzen begrenzten Maximalwert zuzustreben.*

#### Beispiel 4.4.4-1:

*Strom in Abhängigkeit der Drehzahl einer Asynchronmaschine: Bild 4.20*

Der **Leerlaufstrom** zum Magnetisieren des Drehfelds ist mit 30% vom Nennstrom relativ hoch und belastet das Netz induktiv. Der **Anfahrstrom** ( $s = 1$ ) ist mit fast 4-fachem Nennstrom sehr hoch und stellt bei großen Motoren eine hohe Netzbelastung dar.

### 4.4.5 Leistungsbilanz und Drehmoment der Asynchronmaschine

Die der Ständerwicklung zugeführte Leistung  $P_{in}$  der Asynchronmaschine im Motorbetrieb ist mit den Stranggrößen  $U_s, I_s$  und dem Phasenwinkel  $\varphi_s$  zwischen Strom und Spannung

$$P_{in} = P_e = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_s \quad (4.29)$$

Bei Vernachlässigung der Ummagnetisierungsverluste  $P_{Fe}$  im Ständerblechpaket treten statorseitig nur die Stromwärmeverluste  $P_{Cu,s}$  in der Statorwicklung auf.

$$P_{Cu,s} = 3R_s I_s^2 \quad (4.30)$$

Die über das Drehfeld auf den Läufer übertragene Leistung  $P_\delta$  heißt „**Luftspaltleistung**“ („**Drehfeldleistung**“) und ist gemäß dem Ersatzschaltbild Bild 4.18 gleich der im Widerstand  $R'_r/s$  umgesetzten Wirkleistung.

$$P_\delta = P_e - P_{Cu,s} = 3 \cdot (R'_r/s) \cdot I_r'^2 \quad (4.31)$$

Die mechanische Leistung  $P_m$ , die der Motor an der Welle an die Arbeitsmaschine abgibt, ist die Luftspaltleistung  $P_\delta$  abzüglich der Stromwärmeverluste  $P_{Cu,r}$  in der Läuferwicklung (4.32). Reibungsverluste und Ummagnetisierungsverluste im Läufer werden vernachlässigt. Damit ergeben sich **Merkformeln** für die Läufer-Stromwärmeverluste  $P_{Cu,r}$  und die mechanische Leistung  $P_m$  (4.33).

$$P_m = P_\delta - P_{Cu,r} = P_\delta - 3R'_r I_r'^2 = 3 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1\right) \cdot R'_r I_r'^2 = \left(\frac{1}{s} - 1\right) \cdot P_{Cu,r} \quad (4.32)$$

$$\boxed{P_{Cu,r} = s \cdot P_\delta} \quad \boxed{P_m = (1-s) \cdot P_\delta} \quad (4.33)$$

Mit der mechanischen Kreisfrequenz  $\Omega_m$  (4.34) erhalten wir **das elektromagnetische Drehmoment**  $M_e$  aus der mechanischen Leistung  $P_m$ , ohne die *Lorentz*-Kraftberechnung verwenden zu müssen.

$$\Omega_m = 2\pi \cdot n = (1-s) \cdot \Omega_{syn} \quad (4.34)$$

$$P_m = \Omega_m M_e = (1-s) \cdot \Omega_{syn} M_e \quad (4.35)$$

Durch Vergleich von (4.33) und (4.35) folgt für die Drehfeldleistung:

$$\boxed{P_\delta = \Omega_{syn} M_e} \quad (4.36)$$

#### **Fazit:**

Das mit synchroner Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_{syn}$  rotierende Drehfeld überträgt das elektromagnetische Drehmoment  $M_e$  und damit die Luftspaltleistung  $P_\delta$  auf den Läufer.

#### **4.4.6 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine**

Aus der Luftspaltleistung (4.36) folgt für das Drehmoment  $M_e$  in Abhängigkeit von Klemmenspannung  $U_s$  und Schlupf  $s$  im Rahmen der oben gemachten Näherung mit Verwendung von (4.27), (4.33), (4.36):

$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{P_{Cu,r}/s}{\Omega_{syn}} = \frac{3R'_r I_r'^2/s}{\Omega_{syn}} = \frac{3U_s^2}{\Omega_{syn}} \cdot \frac{R'_r/s}{(R'_r/s)^2 + X_\sigma^2} = \frac{3U_s^2}{2\Omega_{syn} X_\sigma} \cdot \frac{2}{\frac{R'_r}{sX_\sigma} + \frac{sX_\sigma}{R'_r}} \quad (4.37)$$

Mit den Abkürzungen „**Kippmoment**“  $M_b$  und „**Kippschlupf**“  $s_b$  gemäß (4.38) entsteht aus (4.37) die KLOSS'sche **Drehmoment-Merkformel** (4.39) in Abhängigkeit vom Schlupf bzw. über  $n = n_{syn} \cdot (1-s)$  in Abhängigkeit von der Drehzahl.

$$\text{Kippmoment: } M_b = \frac{3U_s^2}{2\Omega_{syn} X_\sigma}, \quad \text{Kippschlupf: } s_b = \frac{R'_r}{X_\sigma} \quad (4.38)$$

$$\boxed{M_e = M_b \cdot \frac{2}{\frac{s_b}{s} + \frac{s}{s_b}}} \quad \text{(KLOSS'sche Formel)} \quad (4.39)$$

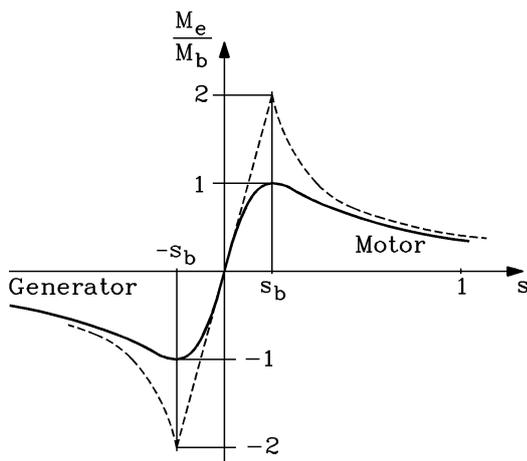


Bild 4.19: Drehmomentverlauf  $M_e(s)$  (KLOSS'sche Formel), strichliert: asymptotischer Verlauf für kleines und großes  $s$ .

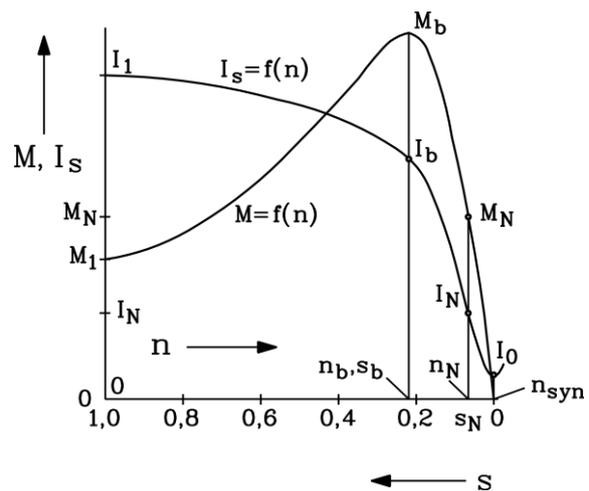


Bild 4.20: Strom- und Momentenkennlinie einer realen Asynchronmaschine im Motorbetrieb in Abhängigkeit von der Drehzahl:  $I_s(n/n_{syn}) = I_s(1-s)$  und  $M(n/n_{syn}) = M(1-s)$ .

Gemäß (4.38) steigt das Drehmoment quadratisch mit der Spannung. Beim Absinken der Netzspannung um z. B. 15% sinkt das Drehmoment auf 70%!

**Motorbetrieb:**

Das Drehmoment ist bei Schlupf Null ebenfalls Null, steigt mit steigendem Schlupf bis zu einem Maximalwert (Kippmoment) an und sinkt dann wieder ab, um bei sehr großen Schlüpfen wieder Null zu werden (Bild 4.19). Das Wellenmoment  $M$  ist im Motorbetrieb um das Reibungsmoment kleiner als  $M_e$ .

**Generatorbetrieb:**

Wird der Läufer rascher als das Drehfeld angetrieben ( $n > n_{syn}$ ,  $s < 0$ ), so wird der Schlupf negativ. Das elektromagnetische Drehmoment wird negativ und bremst. Dem Läufer mechanische Energie zugeführt:  $P_\delta < 0$ ,  $P_m < 0$ . Der Leistungsfluss erfolgt nun vom Läufer zum Ständer und von dort in das Netz. Wenn die Ständerwicklung an der Netzspannung angeschlossen ist, so kann sie aus dem Netz Strom zum Erzeugen des Ständerdrehfelds aufnehmen (induktiver Blindstrom  $I_{s0}$ ) und gleichzeitig Wirkstrom als Generator ins Netz liefern. Ohne das Netz als Blindstromquelle ist dieser Betrieb nicht möglich.

Beispiel 4.4.6-1:

*Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines typischen Asynchronmotors (Bild 4.20):*

Betriebspunkt	Schlupf	Ständerstrom	Drehmoment
Leerlauf	0	Leerlaufstrom $I_0$ (ca. $0.3I_N$ )	Null
Nennpunkt	$s_N$ , ca. 8%	Nennstrom $I_N$	Nennmoment $M_N$
Kipp-Punkt	$s_b$ , ca. 22%	Kippstrom $I_b$ (ca. $2.5I_N$ )	Kippmoment $M_b$ (ca. $2M_N$ )
Anfahren	1	Anfahrstrom $I_1$ (ca. $4I_N$ )	Anfahrmoment $M_1$ (ca. $0.8M_N$ )

Tabelle 4.1: Ausgezeichnete Betriebspunkte des Asynchronmotors

**Fazit:**

Der Betriebsbereich der Asynchronmaschine zwischen Leerlauf und Nennpunkt umfasst den sehr engen Drehzahlbereich zwischen ca. 95% und 100% der Synchrodrehzahl. Die netzgespeiste Asynchronmaschine ist daher als "Festdrehzahlantrieb" zu bezeichnen.

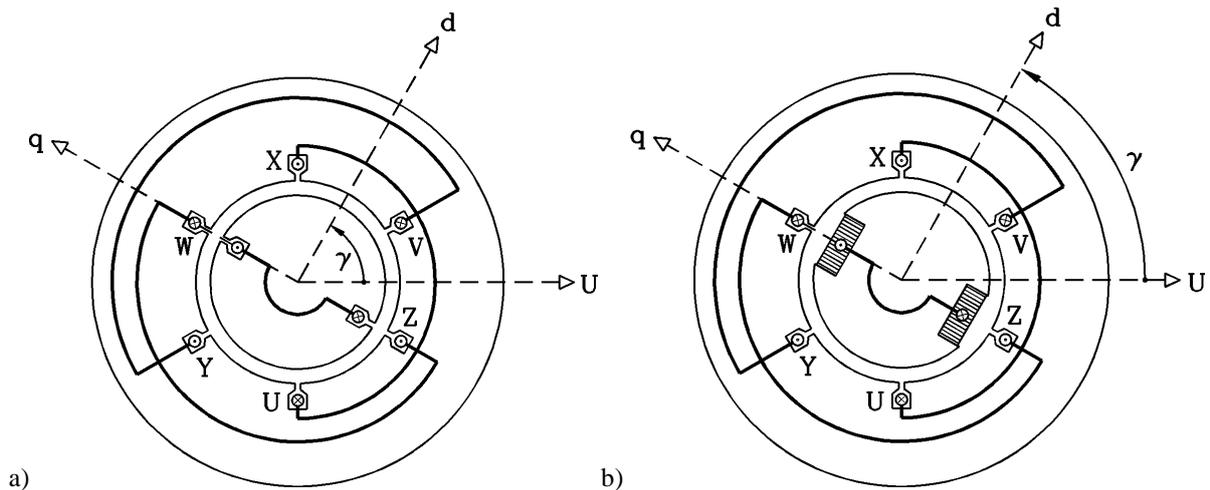
## 4.5 Synchronmaschinen

### 4.5.1 Funktionsweise und Aufbau von Synchronmaschinen

Der Läufer hat ein konstantes Magnetfeld mit z. B. zwei Polen, das über Permanentmagnete („Permanenterregung“) oder Gleichstrom-Spulen („elektrische Erregung“) erzeugt wird (Bild 4.21). Bei der elektrischen Erregung erregt der Feldstrom  $I_f$  (Gleichstrom) dieses Läufer-Gleichfeld, das relativ zum Läufer ruht. Der Ständer hat wie die Asynchronmaschine eine i. A. dreisträngige „Drehfeldwicklung“, die in Ständernuten liegt (Bild 4.22) und vom Drehstromnetz gespeist wird. Der dort fließende (dreiphasige) Ständerstrom  $I_s$  (Effektivwert, Wechselstrom) erregt das zum Läuferfeld in der Polzahl passende z. B. zweipolige Drehfeld. Es muss für eine Drehmomentbildung wie bei der Asynchronmaschine Läuferpolzahl und Ständerpolzahl gleich groß sein. Während sich bei der Asynchronmaschine mit Kurzschlusskäfig im Läufer automatisch die Polzahl des induzierenden Ständerfelds einstellt, muss bei der Synchronmaschine konstruktiv für die gleiche Polzahl gesorgt werden. Die tangentialen *LORENTZ*-Kräfte des Läufermagnetfelds auf stromdurchflossenen Leiter der Ständerwicklung bewirken das elektromagnetische Drehmoment  $M_e$ , das im Motorbetrieb den Läufer SYNCHRON („gleich schnell“) mit dem Ständerdrehfeld mitzieht. Dabei läuft die Läuferfeldachse um einen konstanten Winkel („Polradwinkel“) der Drehfeldachse des rotierenden Summenfelds aus Läufer- und Ständerfeld nach. Der Läufer kann nun sein Drehmoment auf eine Lastmaschine (z. B. Pumpe) übertragen. Im Generatorbetrieb muss die Läuferfeldachse vor der Drehfeldachse um den entsprechenden lastabhängigen Polradwinkel vorlaufen. Dazu muss der Läufer mechanisch durch eine Turbine angetrieben werden. Das nachlaufende Drehfeld übt auf den Läufer daher ein bremsendes elektromagnetisches Drehmoment aus. In den genuteten Polschuhen der Läuferpole ist häufig ein Kurzschluss-Käfig (**Dämpferkäfig**) angeordnet (Bild 4.22), der im Synchronlauf stromlos ist (Schlupf  $s = 0$ ). Dieser Dämpferkäfig soll Drehzahlschwankungen des Läufers, die nach jeder Laständerung transient auftreten, dämpfen. Wenn dieser Käfig große Stabquerschnitte hat, kann er auch als Anlaufkäfig dazu benutzt werden, dass die Synchronmaschine asynchron von Null auf Synchrondrehzahl hoch laufen kann, ähnlich wie eine Asynchronmaschine (Bild 4.31).

#### **Einsatzgebiete von Synchronmaschinen:**

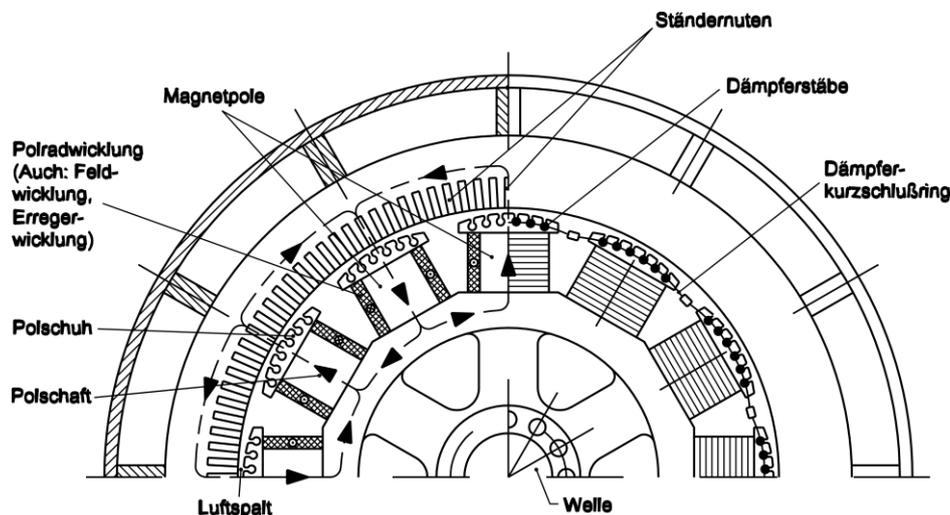
Synchronmaschinen werden sehr häufig als Kraftwerks-Generatoren direkt am Netz mit konstanter Statorfrequenz betrieben. Sie sind DER Standard-Stromerzeuger bis hin zu größten Einheitsleistungen von ca. 2000 MVA (z. B. im Kernkraftwerk *Olkiluoto/Finnland*), da sie sowohl kapazitiv als auch induktiv betrieben werden können. Als kapazitiv wirksame Betriebsmittel können sie die im Netz überwiegend induktive Blindleistung (z. B. durch Asynchronmotoren, Transformatoren, ...) kompensieren. Beachten Sie, dass Asynchronmaschinen am Netz nur als induktiv wirkende Betriebsmittel einsetzbar sind („Magnetisierungsstrom“ bewirkt, dass der Ständerstrom der Ständerspannung nacheilt). Wegen ihres Synchronlaufs sind Synchronmotoren bei Netzbetrieb absolute Festdrehzahlantriebe und können z. B. als Kleinmotoren als Uhrenantriebe verwendet werden. Häufig werden sie als Motoren aus Umrichtern mit Drehspannungssystemen veränderlicher Amplitude und Frequenz versorgt und sind dann drehzahlveränderbar. Als drehzahlgeregelte Motoren kleinerer Leistung im kW-Bereich mit Permanentmagnet-Läuferfelderregung werden sie in Werkzeugmaschinen, Verpackungsmaschinen, als Roboterantriebe etc. eingesetzt. Als umrichter gespeiste Großantriebe werden sie fallweise bei elektrischen Bahnen als Traktionsantriebe verwendet (z. B. TGV, „1. Generation“), aber auch als Sonderantriebe bis 100 MW (z. B. als Antrieb für große Windkanalgebläse) oder als Schiffsantriebe (z. B. für Kreuzfahrtschiffe, Bild 4.24a).



**Bild 4.21:** Bauarten von Synchronmaschinen (hier dargestellt für die einfachste Konfiguration:  $2p = 2$ ,  $m_s = 3$ ,  $q_s = 1$ ,  $m_r = 1$ ,  $q_r = 1$ ): a) Vollpolmaschine (Läufer-Drehwinkel  $\gamma$ , Läuferfeldachse  $d$  (Längsachse), Läuferpollückenachse  $q$  (Querachse), b) Schenkelpolmaschine

### Aufbau von Synchronmaschinen:

Der **Ständer (Stator)** der Synchronmaschine trägt in Nuten eine verteilte Drehstromwicklung wie bei der Asynchronmaschine. Der **Läufer (Rotor, Polrad)** trägt entweder Permanentmagnete (i. A. bei kleinen Maschinen) oder eine gleichstromgespeiste Erregerwicklung (Läuferwicklung, Polradwicklung) (i. A. bei größeren Maschinen). Die Speisung dieser Wicklung erfolgt mit einer Gleichspannung (Erregerspannung  $U_f$ ) z. B. aus Gleichrichtern und prägt über zwei Schleifringe mit Kohlebürsten als Gleitkontakten den Feldstrom  $I_f$  in die Läuferwicklung ein. Man unterscheidet bei der elektrisch erregten Läuferwicklung **zwei Läuferbauarten**, den *Vollpolläufer* und den *Schenkelpolläufer* (Bild 4.21). Dementsprechend unterscheiden wir Vollpol- und Schenkelpol-Synchronmaschinen.



**Bild 4.22:** Axialschnitt der oberen Hälfte einer 12-poligen Schenkelpol-Synchronmaschine mit den bezeichneten Maschinenteilen. Die Feldlinien des Hauptflusses sind gestrichelt dargestellt.

#### a) Vollpolmaschine:

Der Vollpolläufer besteht aus einem zylindrischen Blechkörper oder massivem Eisenzylinder mit eingestanzten Nuten, in denen die Gleichstrom-Erregerwicklungs-Spulen liegen (Bild 4.21a: einfachster Fall: eine Erregerspule in zwei Nuten: Läufernutzahl  $Q_r = 2p \cdot q_r = 2$ ). Im Allgemeinen besteht die Erregerwicklung aus mehreren konzentrisch angeordneten Spulen

pro Pol, die in mehreren Nuten als Spulengruppe verteilt ist (Bild 4.23a). Es ergibt sich dadurch ein konstanter Luftspalt. Wegen der guten Fixierung der Wicklung in den Läufernuten über Nutverschlusskeile wird die Vollpol-Bauart überwiegend für niedrigpolige Synchronmaschinen (meist  $2p = 2$  und  $4$ ) bevorzugt verwendet, da bei diesen die Drehzahl  $n = n_{\text{syn}} = f/p$  am höchsten ist (z. B.  $f = 50$  Hz:  $n = 3000/\text{min}$  bzw.  $1500/\text{min}$ ), so dass die Fliehkräfte auf die Läuferwicklung am höchsten sind. Bei Kraftwerksgeneratoren mit hohen Leistungen sind die Läuferdurchmesser so groß, dass die Fliehkräfte die Läuferzähne abreißen würden. Daher wird in diesen Fällen der Läufer aus massivem Stahl geschmiedet; die Nuten werden ausgefräst. Diese **Turbogeneratoren** sind Vollpol-Synchronmaschinen, die von thermischen Turbomaschinen (Gas- oder Dampfturbinen) angetrieben werden.

#### Beispiel 4.5.1-1:

*Zweipoliger Turbogenerator:*

$n = 3000/\text{min} = 50/\text{s}$ , Polzahl  $2p = 2(f_s/n) = 2(50/50) = 2$ . Mechanisch maximal zulässiger Läuferdurchmesser für  $3000/\text{min}$  bei Verwendung hochfesten Stahls ca.  $d_{ra} = 1.1$  m. Die Umfangsgeschwindigkeit des Läufers ist dann mit  $n = n_{\text{syn}}$ :  $v_{\text{syn}} = d_{ra}\pi n = 1.1 \cdot \pi \cdot 50 = 173$  m/s = 622 km/h.

#### *b) Schenkelpolmaschine:*

Der Läufer („Polrad“) von Schenkelpol-Synchronmaschinen besitzt ausgeprägte Pole (Bild 4.21b), die von der Polradwicklung mit Gleichstrom erregt werden. Diese Bauart wird überwiegend für hochpolige Synchronmaschinen ( $2p \geq 4$ ) verwendet (Bild 4.22 u. 4.23b), da dann die Drehzahlen und Fliehkräfte niedriger sind und die mechanisch aufwändige Einzelpolbefestigung und Wicklungsfixierung einfacher und kostengünstiger zu realisieren sind. Die Luftspaltweite ist nicht konstant, sondern weitet sich wie bei Gleichstrommaschinen in der Polücke stark auf.

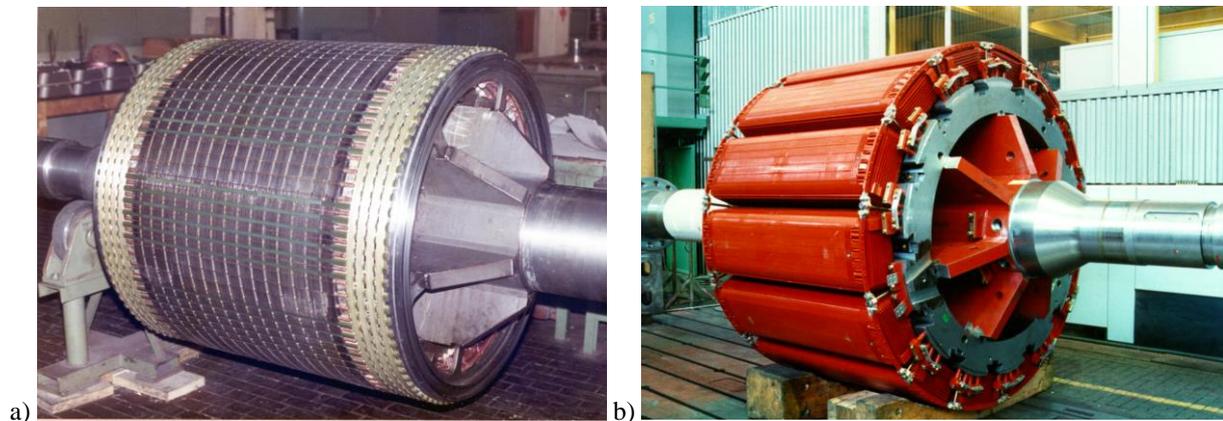


Bild 4.23: a) 8-poliger Vollpolläufer mit  $q_r = 3$  Spulen pro Pol für ca. 10 MW, b) 14-poliger Schenkelpolläufer für ca. 50 MW (Andritz Hydro, Österreich)

#### Beispiel 4.5.1-2:

*Flusskraftwerks-Generator als Schenkelpolmaschine:*

Im **Flusskraftwerk** sind nur geringe Stauhöhen möglich. Daher ist der Wasserdruck in der Turbine niedrig, die Wasserturbinen drehen langsam, der Volumenstrom durch die Turbine ist wegen der Breite des Flusses i. A. aber hoch. Zum Einsatz kommen langsam drehende KAPLAN- und FRANCIS-Wasserturbinen mit Drehzahlen zwischen typisch  $80/\text{min}$  bis  $400/\text{min}$ . Um bei dieser niedrigen Drehzahl Spannungen mit  $50$  Hz in der Ständerwicklung der Kraftwerksgeneratoren zu induzieren, müssen diese hochpolig sein, z. B.:  $f_s = 50$  Hz,  $n = 300/\text{min} = 5/\text{s}$ , Polzahl  $2p = 2(f_s/n) = 2(50/5) = \underline{20}$ .

Beispiel 4.5.1-3:*Synchron-Generator im Speicherkraftwerk:*

In **Speicherkraftwerken** herrscht auf Grund der großen Stauhöhe des Wassers ein hoher Gefälledruck in der Turbine, so dass diese rasch dreht. Dafür ist der Volumenstrom in der Turbine eher klein. Zum Einsatz kommen schnell drehende PELTON-Wasserturbinen mit Drehzahlen zwischen typisch 500/min bis 1000/min. Dazu passende Schenkelpol-Generatoren sind eher niederpolig (Bild 4.24 b), z. B. für  $f_s = 60$  Hz (USA, Japan, ...),  $n = 900/\text{min} = 15/\text{s}$ , Polzahl  $2p = 2 \cdot f_s / n = 2 \cdot 60 / 15 = 8$ .

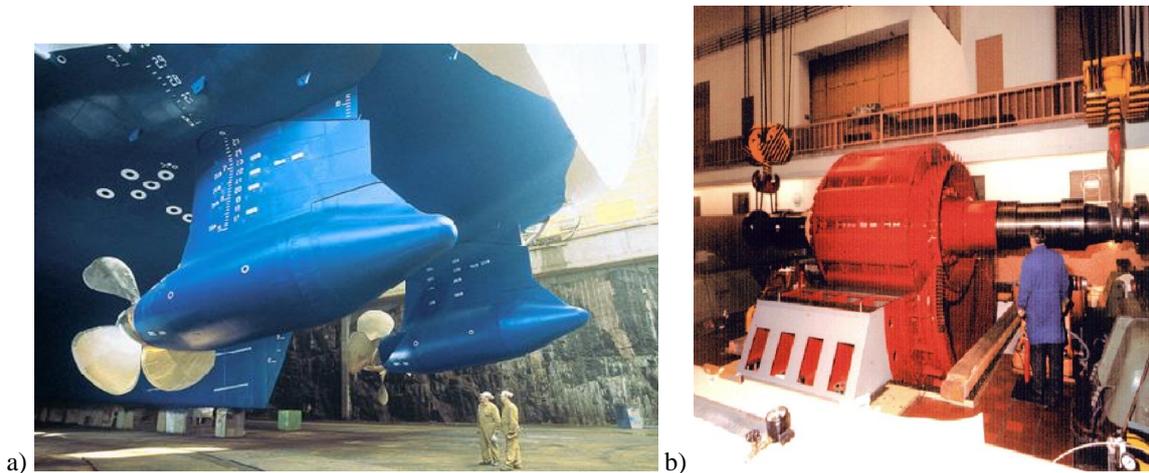


Bild 4.24: a) Schenkelpol-Synchronmaschinen als umrichtergespeiste Propeller-Direktantriebe für das Kreuzfahrtschiff „MS Elation“, 2x14 MW, 0 ... 150/min (ABB Finland), b) Einbau des 10-poligen 60 MVA-Schenkelpolläufers im Speicherkraftwerk Kaprun, Österreich (Andritz Hydro)

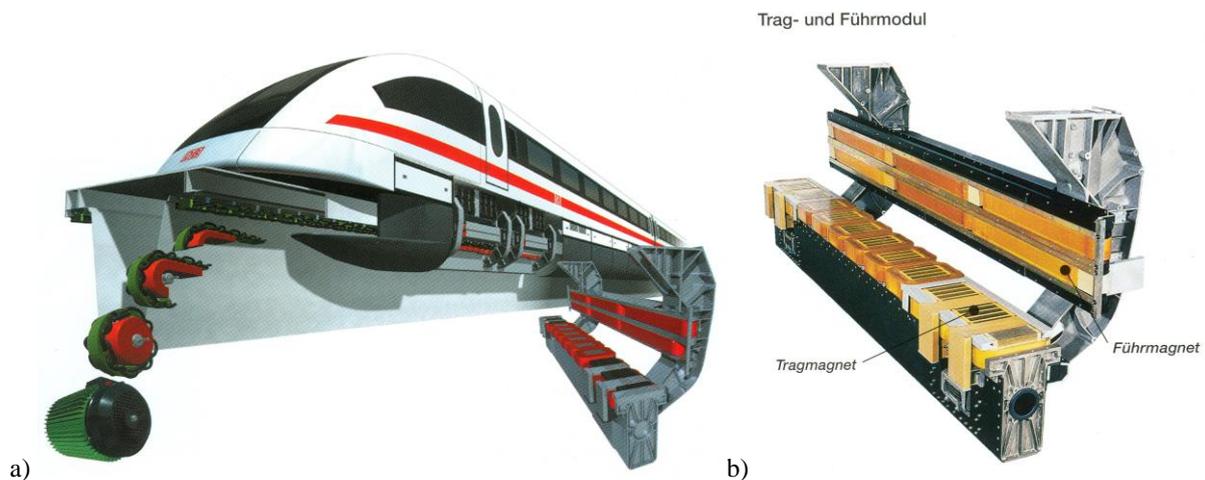


Bild 4.25: Umrichtergespeiste Schenkelpol-Synchrolinearmaschine als Antrieb der Magnetschwebbahn *TRANSRAPID*: a) Prinzipdarstellung des Linearantriebsmotors als gedankliche Abwicklung der Drehfeldwicklung einer rotierenden Maschine als Primärteil, das fest in die Fahrbahn integriert ist. Das Sekundärteil (Gleichstrompole) ist ausgeschwenkt dargestellt. b) Sekundärteil: Die Gleichstrompole des Linearmotors sind gleichzeitig die Tragmagnete für das magnetische Schweben. Zusätzlich werden seitliche Führungsmagnete für die Spurhaltung benötigt (*Thyssen Krupp, Deutschland*)

Beispiel 4.5.1-4:*Umrichtergespeister Synchron-Linearmotor mit Langstator als Wanderfeldwicklung in der Fahrbahn für Magnetschwebbahn Transrapid (Bild 4.25):*

Die drei Wicklungsstränge U, V, W der Wanderfeldwicklung sind als Aluminium-Kabel mit einer Windung pro Polpaar und Strang in die Fahrbahn zu beiden Seiten des Fahrzeugs in

Blechpaketen (Eisenbreite 185 mm) mit offenen Nuten verlegt. Dieser Linear-SYNCHRON-Motor hat eine Polteilung von 258 mm. Etwa 180 Pole passen unter ein Fahrzeug von 46 m Länge. Eine Baueinheit umfasst vier Pole mit einer Gesamtlänge von  $4 \times 258 = 1032$  mm. Zur halbautomatisierten Verlegung der Wicklung entlang der Strecke sind 24 Einheiten zu einer Sektion mit 24 768 m zusammengefasst. Mehrere Sektionen ergeben einen Speiseabschnitt für den Umrichter, welche bei der Schwebebahn in *Shanghai, China* Längen zwischen 0.9 ... 5.0 km aufweisen. Die Tragmagnete (Bild 4.25b) ziehen von unten bei einem Luftspalt von ca. 10 ... 13 mm (geregelt über  $I_f$ ) 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.

#### 4.5.2 Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Synchronmaschine

Wird in Bild 4.22 eine geschlossene  $B$ -Feldlinie als Kurve  $C$  für die Anwendung des Durchflutungssatzes verwendet, die die Erregerdurchflutung  $2N_{f,pol}I_f$  zweier benachbarter Pole umschlingt, so ergibt dies bei Vernachlässigung der geringen magnetischen Feldstärke im Eisen  $H_{Fe} \approx 0$  und Berücksichtigung des minimalen Luftspalts in Polmitte  $\delta_{min}$  die maximale Luftspaltfeldstärke und Luftspaltflussdichte in Polmitte  $H_{\delta,p}$  und  $B_{\delta,p}$ .

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} \approx 2H_{\delta,p}\delta_{min} = 2 \cdot N_{f,pol}I_f \Rightarrow B_{\delta,p} = \mu_0 N_{f,pol}I_f / \delta_{min} \quad (4.40)$$

Der Läuferfluss pro Pol  $\Phi_p$  wird analog zur Gleichstrommaschine aus der Flussdichteverteilung pro Pol im Luftspalt  $B_{\delta,p}(x)$  gemäß (4.41) berechnet. Da die Schenkelpole sehr ähnlich geformt sind wie die Gleichstrommaschinen-Erregerpole, ist auch die Luftspaltflussdichteverteilung  $B_{\delta,p}(x)$  sehr ähnlich (vgl. Bild 3.2), so dass analog zu (3.2) eine ideelle Polbedeckung  $\alpha_e$  definiert werden kann. Mit der Polteilung  $\tau_p$ , der axiale Maschinenlänge  $l$  und der maximale Läuferfeld-Flussdichte  $B_{\delta,p}$  in Polmitte erhalten wir

$$\Phi_p = l \int_0^{\tau_p} B_{\delta,p}(x) dx = \alpha_e \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{\delta,p} \quad (4.41)$$

Das Läuferfeld wird gemäß  $B_{\delta,p}(I_f)$  vom Läufer-Gleichstrom  $I_f$  erregt und ist mit den Spulen der Ständerwicklung verkettet:  $\Psi_p = N_s \Phi_p$ . Das mit der Drehzahl  $n_{syn}$  rotierende Polrad bewirkt eine annähernd sinusförmige zeitliche Änderung dieser Flussverkettung  $\Psi_p(t) = N_s \Phi_p(t) = N_s \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$  mit der Frequenz  $f_s = n_{syn} \cdot p = \omega_s / (2\pi)$ . Es wird daher in der Ständerwicklung je Strang die Spannung („**Polradspannung**“)  $U_p$  mit dieser Frequenz induziert. Bei Änderung des Feldstroms  $I_f$  ändert sich auch diese **Polradspannung**  $U_p$ .

$$\underline{U}_p = j\omega_s \cdot N_s \underline{\Phi}_p / \sqrt{2} \quad (4.42)$$

##### Beispiel 4.5.2-1:

*Spannungsinduktion je Strang bei der Ständerwicklung von Bild 4.21:*

$q_s = 1$ : Windungszahl je Strang  $N_s =$  Spulenwindungszahl  $N_c$ , da nur eine Spule je Strang vorhanden ist.

Verkettung des Läuferflusses mit Spule U:  $\Psi_{p,U}(t) = N_s \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$ . Die Verkettungen mit Strang V und W sind wegen der räumlich versetzten Anordnung um  $2\tau_p/3$  und  $4\tau_p/3$  um  $120^\circ$  bzw.  $240^\circ$  phasenverschoben:

$$\Psi_{p,V}(t) = N_s \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t - 2\pi/3), \quad \Psi_{p,W}(t) = N_s \cdot \Phi_p \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t - 4\pi/3).$$

Die induzierte Spannung je Strang bei offener Ständerwicklung und rotierendem Läufer (Leerlauf) ist die Polradspannung; z. B. im Strang U:

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

### Fazit:

Das rotierende magnetisierte Polrad induziert in der Ständerwicklung das Drehspannungssystem der Polradspannung mit den jeweils um  $120^\circ$  phasenversetzten Polrad-Strangspannungen mit dem Effektivwert  $U_p = \omega_s \cdot N_s \Phi_p / \sqrt{2}$ .

Die Ständerwicklung wird entweder in Stern oder Dreieck geschaltet, wobei bei Generatoren die Sternschaltung bevorzugt wird, denn es kann dann kein Nullstromsystem fließen. Die Ständerwicklung wird an das Drehstromsystem des Netzes mit der Netzspannung  $U_s$  je Strang (bei  $f_s = f_{\text{Netz}}$ ) angeschlossen. Die Differenz  $\underline{U}_p - \underline{U}_s$  treibt in der Ständerwicklung den Ständerstrom je Strang  $\underline{I}_s$ . Dieses Ständer-Drehstromsystem erregt (wie in der Asynchronmaschine) seinerseits ein Drehfeld  $B_{\delta,s}$ , das wegen  $f_s = p \cdot n_{\text{syn}}$  gleich schnell wie  $B_{\delta,p}$  rotiert. Beide Drehfelder überlagern sich zum resultierenden Drehfeld  $B_\delta$  mit der Amplitude  $B_{\delta,1}$  (Index 1: FOURIER-Grundwelle der Feldverteilung). Das Drehfeld  $B_{\delta,s}$  induziert den Läufer nicht, da dieser synchron mit dem Drehfeld dreht und daher keine Flussänderung erfährt. Es induziert aber in die Ständerwicklung durch Selbstinduktion über die Hauptinduktivität  $L_h$  wie bei der Asynchronmaschine die Spannung  $j\omega_s L_h \underline{I}_s$ . Die unvermeidlichen Streuflüsse z. B. in den Ständernuten (vgl. Bild 4.15b) tragen über die Streuinduktivität  $L_{s\sigma}$  ebenfalls zur Selbstinduktionsspannung bei. Damit ergibt sich mit Berücksichtigung des OHM'schen Spannungsfalls die **Spannungsgleichung je Ständerstrang (4.43)**.

$$\underline{U}_s = (R_s + j\omega_s L_{s\sigma} + j\omega_s L_h) \cdot \underline{I}_s + \underline{U}_p \quad (4.43)$$

Die Polradspannung  $\underline{U}_p$  kann als über  $I_f$  steuerbare Quellenspannung aufgefasst werden. Die resultierende Reaktanz je Strang (4.44) heißt „**synchrone Reaktanz**“  $X_d$  und kann gemeinsam mit  $R_s$  als „Innenwiderstand“ des als Spannungsquelle wirkenden Synchrongenerators angesehen werden. Das **Ersatzschaltbild** je Strang ist in Bild 4.26 mit positiven Richtungspfeilen für das Verbraucher-Zählpfeilsystem dargestellt.

$$\underline{X}_d = X_h + X_{s\sigma} = \omega_s L_h + \omega_s L_{s\sigma} \quad (4.44)$$

Das zugehörige **Zeigerdiagramm** in Bild 4.27 hat zu einem gegebenem Zeigerpaar  $\underline{I}_s$  und  $\underline{U}_s$  (mit dem dazwischen liegenden Phasenwinkel  $\varphi$ ) im rechten Winkel zu  $\underline{I}_s$  den Spannungsfall an der Streureaktanz  $jX_{s\sigma}\underline{I}_s$  und parallel zu  $\underline{I}_s$  den OHM'schen Spannungsfall. Die Summe aus  $\underline{U}_p$  und  $jX_h \underline{I}_s$  stellt die induzierende Wirkung des resultierenden Luftspalt-Drehfelds  $B_\delta$  in der Ständerwicklung dar (Gegeninduktion von  $B_{\delta,p}$  und Selbstinduktion von  $B_{\delta,s}$ ) und ist folglich – analog zur Asynchronmaschine – die **Hauptfeldspannung**  $\underline{U}_h$ .

$$\underline{U}_h = j\omega_s \cdot N_s \Phi_h / \sqrt{2}, \quad \Phi_h = \alpha_e \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{\delta,1} \quad \alpha_e = 2/\pi \quad (4.45)$$

Aus dem Zeigerdiagramm ist ersichtlich, dass über die Größe und Lage von  $\underline{U}_p$  (über verändertes  $I_f$ ) bei konstanter Spannung  $\underline{U}_s$  die Lage von  $jX_h I_s$  und damit von  $\underline{I}_s$  verändert werden kann. Im Bild 4.27 ist  $\underline{I}_s$  zur Spannung  $\underline{U}_s$  voreilend; die Maschine verhält sich demnach kapazitiv, obwohl nirgends Kapazitäten vorhanden sind („übererregter Betrieb“). Dabei ist  $\underline{U}_p$  deutlich größer als  $\underline{U}_s$ , was einen hohen Erregerstrom  $I_f$  bedingt.

### Fazit:

Die Synchronmaschine wirkt im übererregten Zustand als kapazitiver Verbraucher, obwohl sie nur aus OHM'sch-induktiven Komponenten besteht.

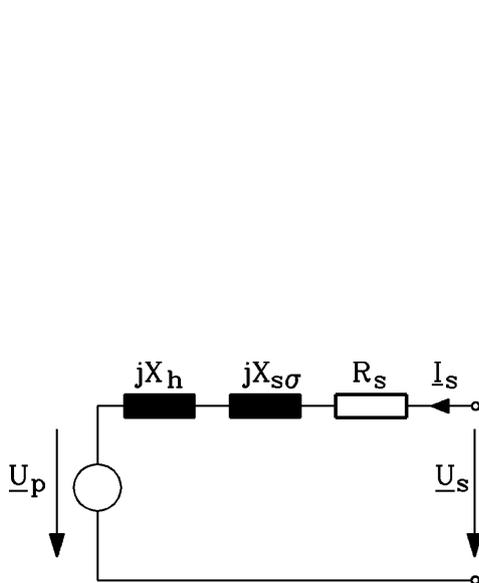


Bild 4.26: Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine je Strang

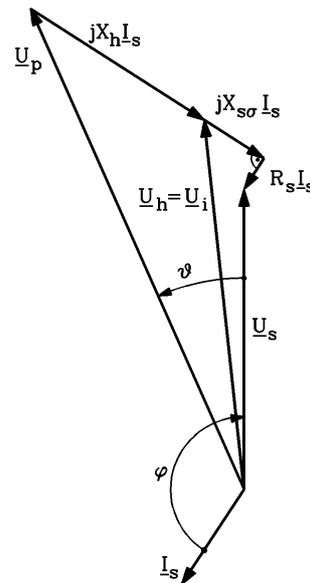


Bild 4.27: Zeigerdiagramm je Strang der Synchron-Vollpolmaschine im Verbraucher-Zählpfeilsystem: Übererregt (kapazitiv), Generatorbetrieb

### 4.5.3 Generator- und Motorbetrieb – Bedeutung des Polradwinkels

Der Winkel zwischen  $\underline{U}_p$  und  $\underline{U}_s$  heißt **Polradwinkel**  $\vartheta$  und wird im mathematisch positiven Sinn von  $\underline{U}_s$  nach  $\underline{U}_p$  positiv gezählt. Er ist in Bild 4.27 positiv; das ist **Generatorbetrieb**. Der Winkel  $\varphi$  ist negativ, aber dem Betrag nach größer als  $90^\circ$ . Dies ergibt gemäß (4.46) eine negative elektrische Wirkleistung  $P_e$ , somit im Verbraucher-Zählpfeilsystem eine **erzeugte** Leistung, was den Generatorbetrieb bestätigt.

$$P_e = 3 \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi < 0, \text{ wenn } |\varphi| > 90^\circ \quad (4.46)$$

**Generatorbetrieb:** Der im **Generatorbetrieb** positive Winkel  $\vartheta$  entsteht, indem das Polrad mit dem Polradfluss  $\Phi_p$  durch Antreiben räumlich dem resultierenden Drehfeld mit dem Hauptfluss  $\Phi_h$  voreilt. Es induziert die Ständerwicklung mit einer voreilenden Phasenlage. Das negative elektro-magnetische Drehmoment  $M_e$  versucht, das Polrad abzubremsen und damit  $\vartheta$  zu verkleinern. Bei vernachlässigtem Widerstand  $R_s \approx 0$  tritt bei  $\vartheta = 0$  kein Drehmoment auf:  $M_e = 0$ .

**Motorbetrieb:** Im **Motorbetrieb** eilt  $\underline{U}_p$  der Spannung  $\underline{U}_s$  um den Winkel  $\vartheta$  nach (Bild 4.30). Der Polradwinkel ist negativ. Das Drehfeld, erregt durch die aus dem Netz gespeisten

Ständerströme, zieht das Polrad mit sich und treibt so den Läufer an. Das elektromagnetische Drehmoment  $M_e$  ist positiv und kann eine gekuppelte Arbeitsmaschine antreiben.

#### 4.5.4 Drehmoment, Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine

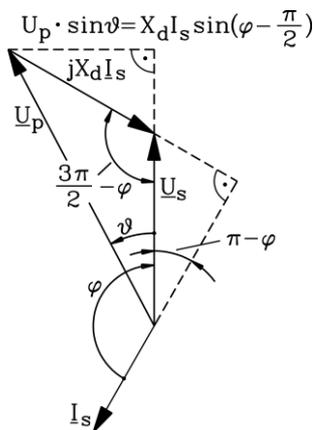
Aus dem Zeigerdiagramm Bild 4.27 wird bei Vernachlässigung von  $R_s$  das Diagramm in Bild 4.28, aus dem die Leistung der Synchronmaschine berechnet wird, ohne magnetische Kräfte betrachten zu müssen. Gemäß Bild 4.28 ergibt sich über die geometrische Beziehung (4.47) die elektrische **Wirkleistung**  $P$  in Abhängigkeit von  $\vartheta$  (4.48).

$$U_p \sin \vartheta = X_d I_s \sin(\varphi - \frac{\pi}{2}) = -X_d I_s \cos \varphi \quad (4.47)$$

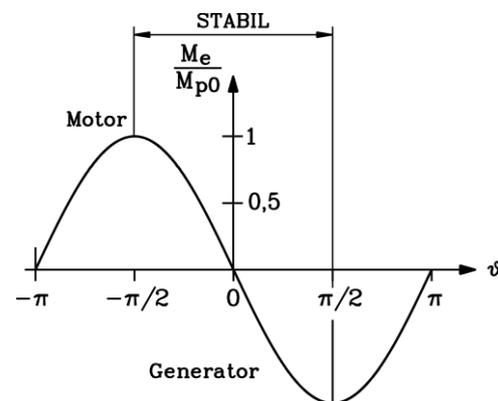
$$P_e = 3U_s I_s \cos \varphi = 3U_s \cdot \frac{-U_p \sin \vartheta}{X_d} = -3 \frac{U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta \quad (4.48)$$

Da die Maschine verlustlos betrachtet wurde ( $R_s = 0$ ), müssen elektrische und mechanische Leistung gleich groß sein:  $P_e = P_m$ .

$$P_e = 3U_s I_s \cos \varphi = P_m = \Omega_{syn} M_e = -3 \frac{U_s U_p}{X_d} \sin \vartheta \rightarrow \boxed{M_e = -3 \frac{U_s U_p}{\Omega_{syn} X_d} \sin \vartheta} \quad (4.49)$$



**Bild 4.28:** Zeigerdiagramm der Synchron-Vollpolmaschine bei vernachlässigtem Ständerwiderstand ( $R_s = 0$ ) für generatorischen Betrieb



**Bild 4.29:** Elektromagnetisches Drehmoment der Synchronmaschine gemäß (4.49) bei Betrieb am „starr“en Netz ( $U_s = \text{konst.}$ ) und konstanter Erregung ( $U_p = \text{konst.}$ ) in Abhängigkeit der Belastung (= des Polradwinkels  $\vartheta$ )

Die **Merkformel** (4.49) für das elektromagnetische Drehmoment der Vollpolmaschine, dargestellt in Bild 4.29, zeigt, dass bei einem Polradwinkel von  $\pm 90^\circ$  das Drehmoment maximal wird und dann wieder abnimmt. Stabil arbeitet die Maschine nur innerhalb des Winkelbereichs  $-90^\circ < \vartheta < 90^\circ$ . Wird das „synchrone Kippmoment“  $M_{p0}$  (4.50) überschritten, „kippt“ der Läufer aus dem Synchronlauf und rotiert asynchron. Das Kippmoment kann durch Erhöhung der Polradspannung (= Erhöhung des Feldstroms) erhöht werden.

$$\boxed{M_{p0} = 3 \frac{U_s U_p}{\Omega_{syn} X_d}} \quad (4.50)$$

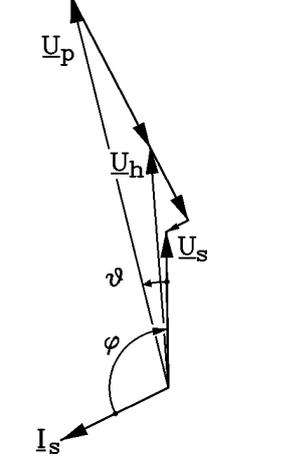
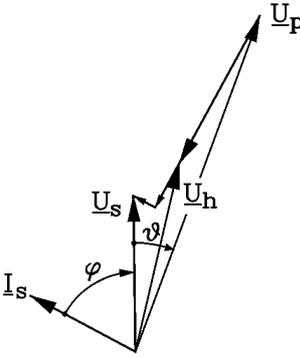
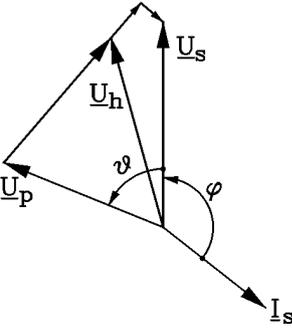
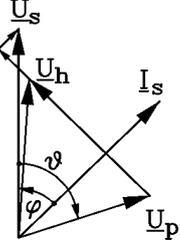
GENERATOR: Polrad eilt Drehfeld vor	MOTOR: Polrad läuft Drehfeld nach	
 <p style="text-align: center;"><math>\psi &gt; 0</math>      <math>\varphi &lt; 0</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>\psi &lt; 0</math>      <math>\varphi &lt; 0</math></p>	<b>ÜBERERREGT</b> Induktive Verbraucher können versorgt werden
 <p style="text-align: center;"><math>\psi &gt; 0</math>      <math>\varphi &gt; 0</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>\psi &lt; 0</math>      <math>\varphi &gt; 0</math></p>	<b>UNTERERREGT</b> Kapazitive Verbraucher können versorgt werden

Bild 4.30: Betriebszustände der Vollpolsynchronmaschine im VZS

- **Generator bzw. Motor:** Wirkleistung negativ bzw. positiv
- **Maschine übererregt:** Maschine ist kapazitiver Verbraucher und kann damit andere induktive Verbraucher mit Blindleistung „versorgen“.
- **Maschine untererregt:** Maschine ist induktiver Verbraucher und kann damit andere kapazitive Verbraucher mit Blindleistung „versorgen“.

### Über- und untererregter Betrieb:

Die **Blindleistung**  $Q$  (4.51) ist in Bild 4.27 negativ, die Maschine mithin ein **kapazitiver** Verbraucher. So werden viele Generatoren übererregt betrieben, weil viele Netzverbraucher induktiv sind (z.B. Drosseln, Asynchronmotoren, ...) und daher für den ausgeglichenen Blindleistungshaushalt des Netzes kapazitive Verbraucher zur Kompensation der induktiven Blindleistung benötigt werden. Der **übererregte Betrieb** ist durch eine **große Polradspannung** und damit einen **hohen Erregerstrombedarf**  $I_f$  gekennzeichnet.

Bei Verringerung von  $U_p$  wird der Leistungsfaktor positiv, der Strom  $I_s$  eilt  $U_s$  nach (Bild 4.30), und die Maschine wird ein induktiver **Verbraucher (untererregter Betrieb, niedriger Erregerstrom**  $I_f$ ). In Bild 4.30 und Tabelle 4.2 sind die vier wesentlichen Betriebszustände „Generator/Motor“, „über-/untererregt“ im Verbraucher-Zählpfeil-System dargestellt.

$$Q = 3U_s I_s \sin \varphi \quad (4.51)$$

**Fazit:**

Die Synchronmaschine hat den großen Vorteil, dass über die Erregung  $I_f$  die Blindleistung  $Q$  induktiv oder kapazitiv eingestellt werden kann, was sie zum idealen Kraftwerksgenerator macht, der den jeweiligen Netzerfordernissen gemäß betrieben werden kann.

<b>Blindleistung:</b>			
INDUKTIV	KAPAZITIV	KAPAZITIV	INDUKTIV
Erregerstrom $I_f$ klein	Erregerstrom $I_f$ groß	Erregerstrom $I_f$ groß	Erregerstrom $I_f$ klein
Polradspannung $U_p$ klein	Polradspannung $U_p$ groß	Polradspannung $U_p$ groß	Polradspannung $U_p$ klein
<i>Untererregung</i>	<i>Übererregung</i>	<i>Übererregung</i>	<i>Untererregung</i>
$\underline{I}_s$ eilt $\underline{U}_s$ nach	$\underline{I}_s$ eilt $\underline{U}_s$ vor	$\underline{I}_s$ eilt $\underline{U}_s$ vor	$\underline{I}_s$ eilt $\underline{U}_s$ nach
Phasenwinkel $\varphi > 0$	Phasenwinkel $\varphi < 0$	Phasenwinkel $\varphi < 0$	Phasenwinkel $\varphi > 0$
<b>Wirkleistung:</b>			
GENERATOR	GENERATOR	MOTOR	MOTOR
Polradwinkel $\vartheta > 0$	Polradwinkel $\vartheta > 0$	Polradwinkel $\vartheta < 0$	Polradwinkel $\vartheta < 0$
$\underline{U}_p$ eilt $\underline{U}_s$ vor	$\underline{U}_p$ eilt $\underline{U}_s$ vor	$\underline{U}_p$ eilt $\underline{U}_s$ nach	$\underline{U}_p$ eilt $\underline{U}_s$ nach
Phasenwinkel $ \varphi  > \pi/2$	Phasenwinkel $ \varphi  > \pi/2$	Phasenwinkel $ \varphi  \leq \pi/2$	Phasenwinkel $ \varphi  \leq \pi/2$

Tabelle 4.2: Die vier wesentlichen Betriebszustände der Synchronmaschine

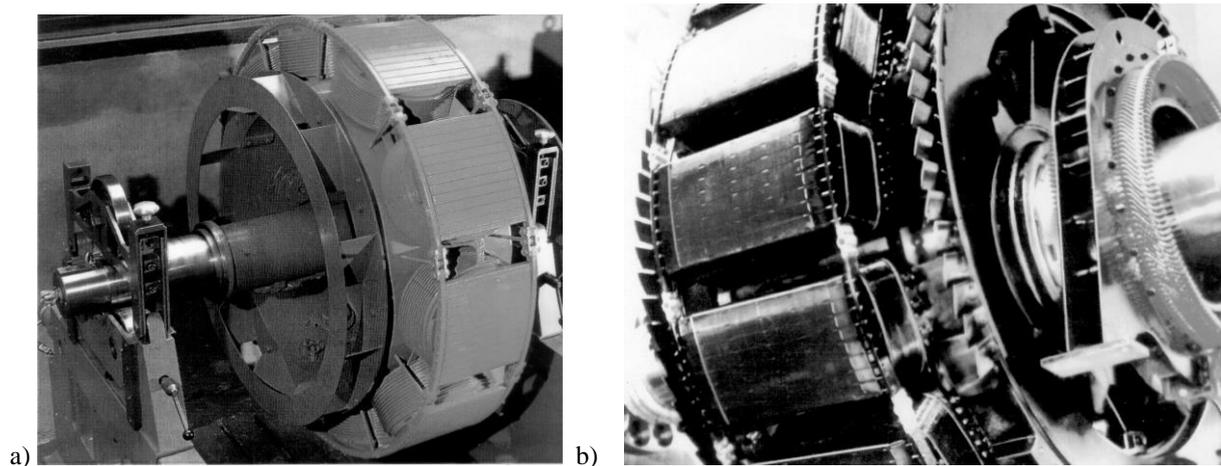


Bild 4.31: Schenkelpol-Synchronmaschinen-Rotoren: a) 10-poliger Motorläufer, durchgehende Dämpferringe, b) 14-poliger Generatorläufer, Dämpferstäbe in den Polschuhen erkennbar

#### 4.6 Turbinen als Synchrongeneratorantriebe (Übersicht) (kein Prüfungsstoff!)

Folgende typische Großgenerator-Einsatzfälle lassen sich klassifizieren:

- **Wasserkraftgeneratoren,**
- **Dampf- und Gasturbinen-betriebene Turbogeneratoren.**

##### 4.6.1 Turbinen für Wasserkraftgeneratoren

Wasserturbinen drehen im Vergleich zu thermischen Turbomaschinen relativ langsam.

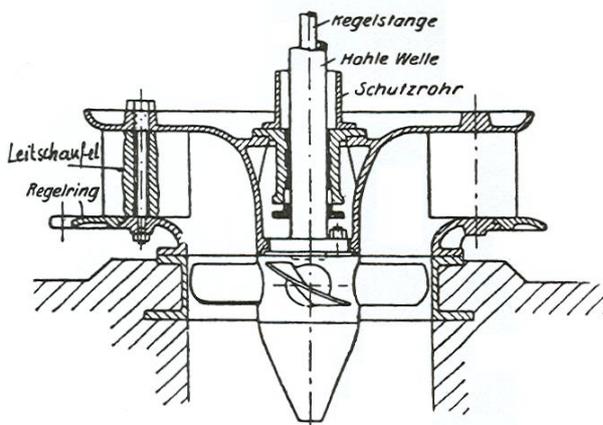
- a) Im Flusskraftwerk herrscht niedriger Wasserdruck und hoher Volumenstrom: Dafür werden KAPLAN- u. FRANCIS-Turbinen mit Drehzahlen  $n$  ca. 80/min bis ca. 400/min eingesetzt.
- b) In Speicherkraftwerken herrscht hoher Wasserdruck bei kleinem Volumenstrom: Dafür werden PELTON-Turbinen mit Drehzahlen  $n$  ca. 500/min bis 1000/min eingesetzt.

Genauer wird zwischen Hochdruck-, Mitteldruck-, und Niederdruckwasserkraftwerken unterschieden. Hochdruckkraftwerke umfassen Speicherseen mit hohem Gefälle  $H$ , daher hohem Wasserdruck, aber niedrigem Wasser-Volumenstrom  $\dot{V}$ , Mitteldruckkraftwerke sind typisch Talsperren bei mittlerem Gefälle & Druck und mittlerem Volumenstrom, Niederdruckkraftwerke sind Flusskraftwerke mit niedrigem Gefälle & Druck, aber hohem Volumenstrom, wie die Beispiele von Tabelle 4.3 zeigen.

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

Tabelle 4.3: Ausgeführte Hoch-, Mittel- und Niederdruck-Wasserkraftwerke: \*) weltgrößtes Wasserkraftwerk, \*\*) Weltrekord

#### a) Kaplan-Turbine:



a)



b)

Bild 4.32: a) Vertikal gelagerte **KAPLAN-Turbine** mit vier Laufschaufeln („Propellerflügel“): Da die Turbine bei unterschiedlicher Wasser-Durchflussmenge stets mit konstanter Drehzahl drehen soll, werden über die Regelstange die Laufschaufeln verdreht und über den Regelring die Schaufeln des Leitapparats (Wasserzustrom) verstellt, damit stets optimale Anströmwinkel und damit optimaler Wirkungsgrad gegeben sind (*Quantz, Wasserkraftmaschinen*). b) Horizontal gelagerte Kaplan-Turbine im Rohrturbinen-Kraftwerk *Greifenstein, Donau, Österreich* (*Andritz Hydro*)

**Laufkraftwerke** an großen Flüssen mit einer hohen Wasser-Durchflussmenge und einem niedrigen Druckgefälle (= niedrige Stauhöhe von wenigen Metern) bedürfen einer speziellen Wasserturbine, der **KAPLAN-Turbine**, einer Propellerturbine mit verstellbaren Laufschaufeln (typisch 4 Stück je Turbine) und einem verstellbaren Leitapparat für die Wasseranströmung, um auch bei unterschiedlicher Durchflussmenge (Winter: zumeist wenig Wasser, nach der Schneeschmelze: viel Wasser) jeweils maximalen Turbinenwirkungsgrad von ca. 90% zu gewährleisten (Bild 4.32). Die Drehzahl ist daher niedrig ( $n$  ca. 80/min bis ca. 150/min) und

der direkt gekuppelte Synchrongenerator muss folglich eine hohe Polzahl haben, um trotz der niedrigen Drehzahl (z.B. 50/min) 50 Hz Wechselspannung zu induzieren. Diese als "Schirmgeneratoren" in Vertikalbauweise oder als *Rohrturbinengeneratoren* in Horizontalbauweise ausgeführten Schenkelpolmaschinen weisen Leistungen von typisch 20 MVA bis 40 MVA je Maschine auf.

Beispiel 4.6.1-1:

Polzahl eines langsam laufenden Schirmgenerators mit vertikaler Welle:  $n = 50/\text{min}$ ,  $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$ :  $2p = 2f_{\text{Netz}}/n = 2 \cdot 50/(50/60) = \underline{120}$  Pole: 60 Nord – und 60 Südpole!

**b) Francis-Turbine:**

Bei **Mitteldruckkraftwerken** mit Stauhöhen bis ca. 30 m ist die **FRANCIS-Turbine** mit ihren dreidimensional gekrümmten, nicht verstellbaren Laufschaufeln in großer Zahl im Einsatz ( $n$  ca. 200/min bis 500/min, max. Wirkungsgrad ca. 90 %, Bild 4.33). Es überwiegt die Vertikalbauweise (Bild 4.35a) mit direkt gekoppeltem Synchron-Schenkelpolgenerator. Bei Großkraftwerken wie *ITAIPU* am *Parana-Fluss* (Grenzfluss *Brasilien/Paraguay*) werden Einheitsleistungen bis ca. 800 MVA je Turbine und Generator (Weltrekord!) erreicht.

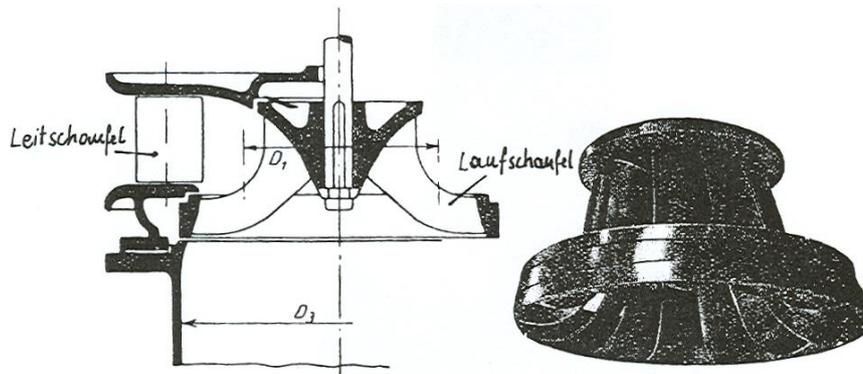


Bild 4.33: Vertikal gelagerte **FRANCIS-Turbine**: Die Laufschaufeln sind gegossen und nicht verstellbar ( $D_1$ : mittlerer Laufraddurchmesser  $D_3$ : Saugrohrdurchmesser). Der Anströmwinkel wird durch die verstellbaren Leitschaufeln, über die die Wasseranströmung erfolgt, bei unterschiedlichem Wasserstrom stets optimal eingestellt (*Quantz, Wasserkraftmaschinen*).

**c) Pelton-Turbine:**

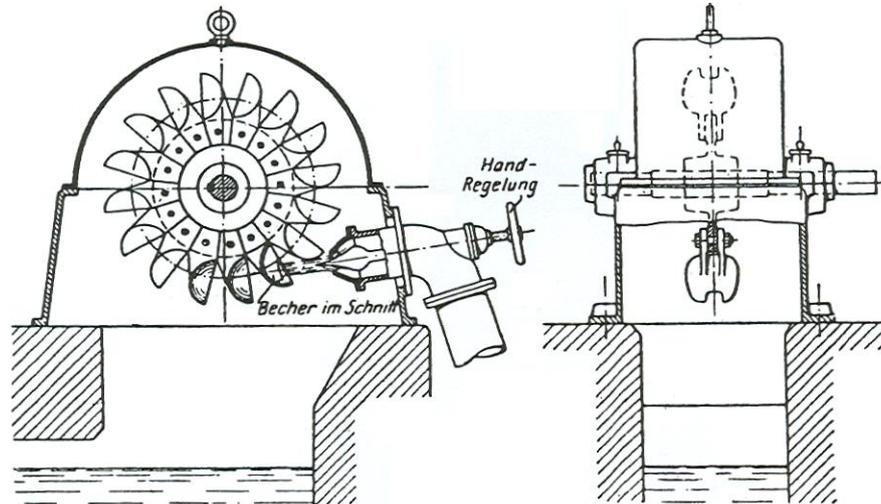
Bei den **(Pump)Speicher-Kraftwerken** kehren sich die Verhältnisse um: Geringe Durchflussmenge und hoher Wasserdruck, erzeugt durch enorme Gefällehöhen von bis zu 1500 m zwischen Wasseroberfläche des Stausees und dem Wassereinlauf im Krafthaus, das sich auf der Talsohle befindet, erfordern den Einsatz der **PELTON-Turbine** (Bild 4.34). Diese hat becherförmige Schaufeln (Bild 4.35b) und wird aus mehreren am Umfang angeordneten "Nadeldüsen" tangential mit einem gebündelten Wasserstrahl beaufschlagt. Eine Umkehr der Strömungsrichtung ist somit nicht sinnvoll möglich. Die Turbine rotiert auf Grund der hohen Strahlgeschwindigkeit rasch (z. B. 500/min, 750/min, 1000/min), so dass niederpolige, relativ hochdrehende **Synchronschenkelpolmaschinen** zum Einsatz kommen, die wegen ihrer tw. hohen Leistung und Drehzahl (mehrere 100 MVA) als "*Grenzleistungsmaschinen*" anzusprechen sind. Ihre mechanische und elektrisch-thermische Bauteilbeanspruchung liegt an der Grenze des technisch Machbaren. Manchmal ist sogar direkte Leiterkühlung (deionisiertes Wasser im hohlgebohrten Kupferleiter) erforderlich. Oft ist die elektrische Maschine als Motor-Generator ausgeführt. In Zeiten geringen Energiebedarfs treibt sie als Motor eine Pumpe an, um Wasser in den Speicher des Stausees hoch zu pumpen, um so die überschüssige elektrische Energie der im Grundlastbetrieb fahrenden thermischen Kraftwerke zu speichern. Zu diesem Zweck ist entweder eine

mehrstufige radial wirkende Pumpe an das zweite Maschinenwellenende gekuppelt, oder die Turbine ist so konzipiert, dass sie auch als Pumpe wirken kann. Das funktioniert jedoch nur bei *FRANCIS*-Turbinen, nicht aber bei *PELTON*-Rädern mit ihren becherförmigen Schaufeln.

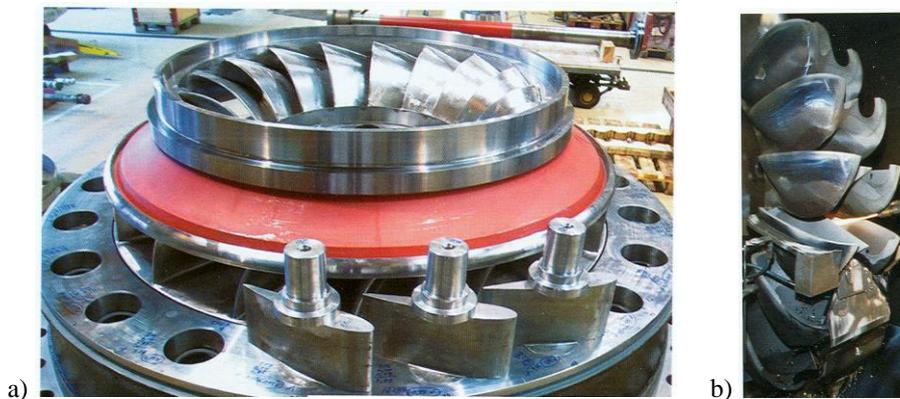
Beispiel 4.6.1-3:

Polzahl eines schnell laufenden Generators:  $n = 1000/\text{min}$ ,  $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$ :

$$2p = 2f_{\text{Netz}}/n = 2 \cdot 50/(1000/60) = \underline{6} \text{ Pole: } 3 \text{ Nord} - \text{ und } 3 \text{ Südpole!}$$



**Bild 4.34:** Horizontal gelagerte *PELTON*-Turbine: Die becherförmigen Schaufeln werden aus Wasserdüsen, über die die Strahlstärke eingestellt werden kann (im Bild: Handrad für Nadelventil, eine Düse dargestellt) mit hohem Wasserdruck, aber geringer Wasserdurchflussmenge beaufschlagt (*Quantz, Wasserkraftmaschinen*).



**Bild 4.35:** a) Vertikal gelagerte *FRANCIS*-Turbine: Die gegossenen Laufschaufeln sind nicht verstellbar. Der Wasser-Anströmwinkel wird durch die verstellbaren Leitschaufeln bei unterschiedlichem Wasserstrom optimal eingestellt. b) Oberflächenbeschichtung der becherförmigen Schaufeln eines *PELTON*-Turbinen-Laufrads (*Andritz Hydro, Österreich*)

Die **Wirkungsgradkette** in Wasserkraftwerken stellt sich etwa wie folgt dar:

Hydraulischer Wirkungsgrad der Rohrleitungen etc.:	0.95
Wasserturbinenwirkungsgrad:	0.9
Generatorwirkungsgrad:	0.98
<u>Kraftwerkseigenbedarf:</u>	<u>0.97</u>

Der Gesamtwirkungsgrad des Wasserkraftwerks ist daher ca.  $0.95 \times 0.9 \times 0.98 \times 0.97 = 0.81$ .

Im Fall des **Pumpspeicher-Kraftwerks** erfolgt die Wasserbewegung zwischen Ober- und Unterbecken zur Speicherung von potentieller Energie des Wassers im Oberbecken bei Motorbetrieb mit Pumpe od. Pumpturbine. Der Generatorbetrieb erfolgt mit der Turbine oder Pumpturbine. Dadurch gelingt das Speichern überschüssiger Energie aus dem elektrischen

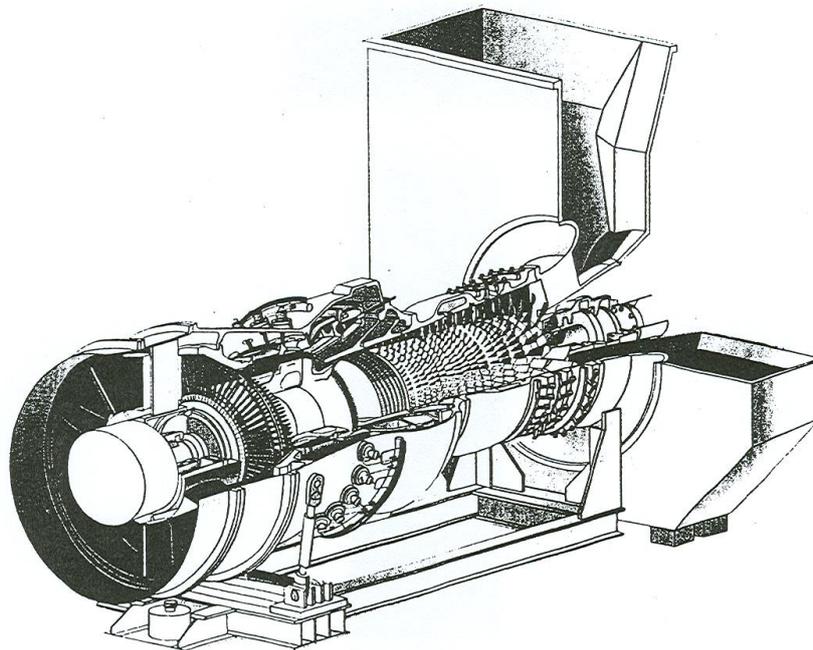
Netz, aber auch die Abgabe von Engpass-Leistung zur Stabilisierung des Netzes. Pumpspeicher-Kraftwerke sind daher wichtig für die Netzregelung! Der Speicher-Wirkungsgrad ist das Produkt aus Motor- & Generatorbetrieb:  $0.85 \times 0.85 = 0.72$ .

#### 4.6.2 Turbinen in thermischen Kraftwerken

In thermischen Kraftwerken werden **Dampf- und Gasturbinen** zur Erzeugung mechanischer Energie aus Wärmeenergie eingesetzt. Sie drehen sehr rasch mit 1500/min bzw. 1800/min (50 Hz bzw. 60 Hz) oder 3000/min bzw. 3600/min. Erstere erfordern 4-polige, letztere erfordern 2-polige Generatoren, um 50 Hz bzw. 60 Hz Nennfrequenz zu erzeugen. Die Leistungen betragen bei **Gasturbinen** (Bild 4.36) maximal ca. 350 MW, und reichen bei **Dampfturbinen** bis ca. 1000 MW in „*volltouriger*“ (3000/min bzw. 3600/min) und bis ca. 1600 MW in „*halbtouriger*“ (1500/min bzw. 1800/min) Ausführung. Die von diesen thermischen Turbomaschinen angetriebenen Generatoren heißen **Turbogeneratoren** und haben die größten Leistungen überhaupt unter den elektrischen Maschinen. Sie sind wegen der hohen Umfangsgeschwindigkeiten mechanisch hoch beansprucht und haben daher massive, freiformgeschmiedete und mit dem Fräser bearbeitete Läufer aus vergütetem Edelstahl. Die wegen der enormen Fliehkräfte hohen mechanischen Spannungen lassen nur begrenzte Läuferdurchmesser von maximal 1.2 m bis 1.3 m zu.

##### Beispiel 4.6.2-1:

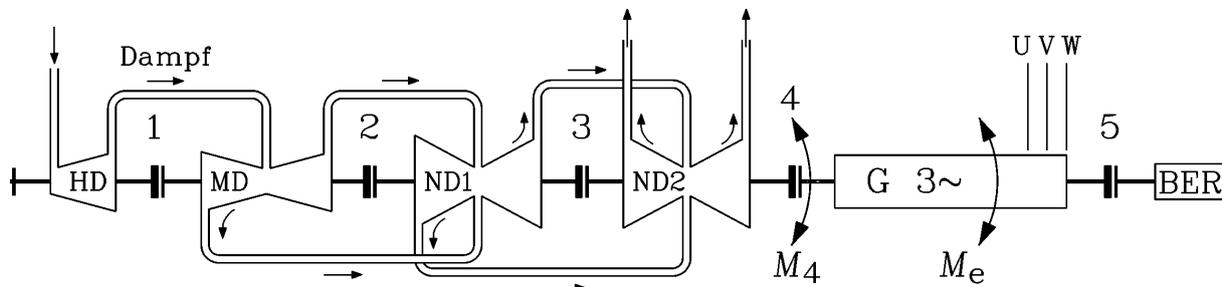
Läuferumfangsgeschwindigkeit: Rotordurchmesser  $d_r = 1.2$  m, Drehzahl  $n = 3600$  /min:  
 $v = d_r \cdot \pi \cdot n = 1.2 \cdot \pi \cdot (3600/60) = \underline{226}$  m/s (= 814 km/h !); = 70% der Schallgeschwindigkeit.



**Bild 4.36: Gasturbine:** Rechts Lufteintritt und Kompressor (Luftverdichter, Verdichtungsgrad ca. 1:30), danach Brennstoffzufuhr (z.B. Heizöl schwer) und Verbrennung in zwei Ringbrennkammern. Das heiße Verbrennungsgas (bis zu 1300°C) expandiert im anschließenden Turbinenteil links. Daher nimmt das Gasvolumen zu; die Schaufeln werden von Stufe zu Stufe länger. Vorne tritt das heiße Gas mit einer Abgastemperatur von ca. 600°C aus (Quelle: ABB / Alstom).

Im Gegensatz zum Turbogenerator, bei dem die gesamte Leistung in **einer** Maschine umgesetzt wird, muss der Leistungsumsatz in der Dampfturbine in **drei** Maschinen, dem **Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckteil** erfolgen (Bild 4.37 und 4.38a). Da

gegenüber dem Hochdruckteil der Dampf im Niederdruckteil bereits stark expandiert ist, benötigt er ein großes Volumen und damit große Strömungsquerschnitte. Daher sind die Schaufeln der Turbine im Niederdruckteil lang (z. B. 1 m, Bild 4.38b) und weisen einen großen Außendurchmesser  $D$  auf (z.B. 4 m). Wegen der hohen Fliehkräfte müssen sie mechanisch hochwertig ausgeführt sein, z. B. aus geschmiedetem martensitisch-ferritischem Stahl mit 12% Chromgehalt.



**Bild 4.37:** Mehrstufige Dampfturbine: HD: Hochdruckturbinen, MD: Mitteldruckturbinen: hier zweiflutig; ND1, ND2: Zwei in Serie nachgeschaltete zweiflutige Niederdruck-Turbinen, G: Synchron-Generator, BER: bürstenlose Synchron-Erregermaschine. 1 ... 4: Wellenkupplungen,  $M_4$  Kupplungsmoment. In jeder Turbinenstufe 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.

#### Beispiel 4.6.2-2:

Braunkohlekraftwerk *Lippendorf, Deutschland*: 930 MW Turbinenleistung pro Generator

Hochdruckteil: Frischdampfdruck 250 bar bei 550°C; Niederdruckteil: Dampf expandiert von 0,5 bar auf Kondensatordruck 0,038 bar, also nahe "Vakuum".

Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks: bei Volllast: 42,4% (davon Generator: 99%)

#### Beispiel 4.6.2-3:

Mechanische Beanspruchung der Turbine bei max. Drehzahl  $n_{\max} = 1,2n_N$ ,  $n_N = 3000/\text{min}$ :

Umfangsgeschwindigkeit der Schaufelspitzen:

$$v_{\max} = D\pi \cdot 1,2n_N = 4\pi \cdot 1,2 \cdot 50 = 753 \text{ m/s} = 2710 \text{ km/h (!)}. \text{ Es tritt in der Dampfströmung}$$

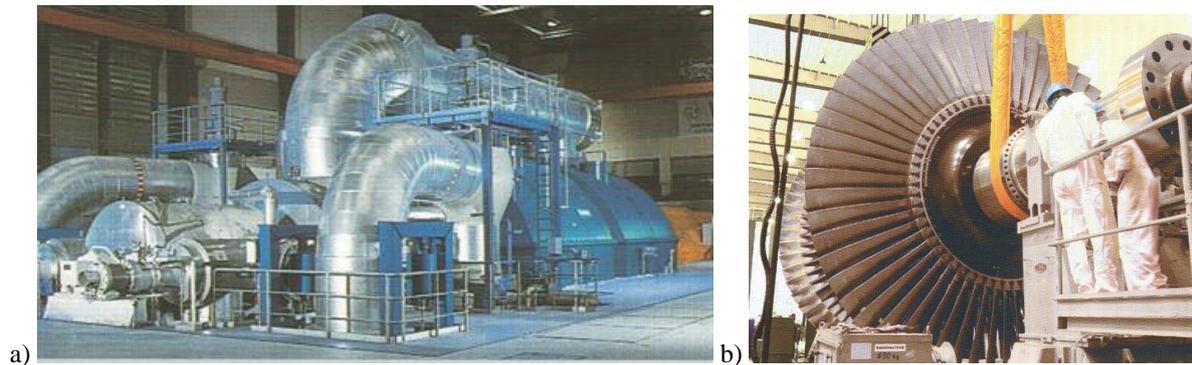
**Überschall** auf. Die Fliehkraft pro Schaufel bei einer Schaufellänge 1 m, einer Schaufelmasse  $m = 10 \text{ kg}$  und einem Schwerpunktsabstand  $r$  von der Drehachse 1,2 m beträgt

$$F_{\text{Schaufel}} = m \cdot r \cdot (2\pi \cdot 1,2n_N)^2 = 1700 \text{ kN} \cong 170 \text{ Tonnen!}$$

Das entspricht der schweren Masse zweier Hochleistungs-Elektroloks (z.B. ÖBB-Lok *Taurus* 1016: 6,4 MW, 84 Tonnen).

Damit die gesamte Dampfturbinen-Leistung elektrisch in einem Generator umsetzbar ist, ist in den vergangenen Jahrzehnten stetig die Leistung pro Generator („Einheitsleistung“) erhöht worden. Eine **Leistungserhöhung** durch Erhöhung des Durchmessers ist ab 1,2 m nicht mehr möglich. Eine Verlängerung der Maschine über 7 m Blechpaketlänge ist wegen des dann sehr schlanken und damit biegeweichen Läufers ( $l_F/d_r = 7/1,2 = 5,8!$ ) auch nicht möglich. Es verbleibt nur eine erhöhte *Ausnützung* der Maschine („mehr Leistung aus dem gleichen Volumen“), also eine Erhöhung des Leiterstroms und/oder des Magnetfelds. Die Eisen-sättigung verbietet eine Erhöhung der magnetischen Luftspaltflussdichte über 1,2 T. Die Leistung kann nur über den Strom und die Stromdichte gesteigert werden, was zu erhöhten Stromwärmeverlusten führt. Daher muss die **Kühlung** intensiviert werden. So ist bis ca. 300 MVA noch **Luftkühlung** möglich, darüber jedoch **direkte Leiterkühlung** mit Wasser-

stoffgas oder deionisiertem (= nicht elektrisch leitfähigem) Wasser in den hohlgebohrten Kupferleitern erforderlich.



**Bild 4.38:** a) Dampfturbine und Generator (rechts hinten) im Braunkohle-Dampfkraftwerk „Schwarze Pumpe“, Deutschland, 2 x 800 MW, 3000/min, 50 Hz, 2546 kNm Drehmoment. Links vorne: Hochdruckturbine, danach Mitteldruckturbine, rechts zwei Niederdruck-Turbinen, b) Zweiflutiger Turbinenrotor einer Niederdruckturbine aus Rotorscheiben (Masse 260 Tonnen) (Quelle: Siemens AG)

Leistungsparameter moderner Dampfkraftwerke in Deutschland:

a) Steinkohle-Kraftwerk *Moorburg (Vattenfall)*: 2 x 820 MW elektrisch,  
Wirkungsgrad: 46.5%

Wasserdampf: Eintritt: 600°C, 276 bar Überdruck  
Austritt: 26 mbar Unterdruck (Dampf bei ca. 20°C)

b) Braunkohle-Kraftwerk *Boxberg R (Vattenfall)*: 675 MW elektrisch, Wirkungsgrad: 43.3%

Wasserdampf: Eintritt: 600°C, 286 bar Überdruck  
Austritt: 39 mbar Unterdruck

Auf Grund des geringeren Heizwerts je kg Kohle haben Braun- gegenüber Steinkohlekraftwerken etwas schlechtere Wirkungsgrade. Die Turbinen- und Generortechnologie ist jedoch dieselbe.

Durch die Kombination einer Gasturbinen mit einer nachgeschalteten kleineren Dampfturbine entsteht das GuD- oder Kombi-Kraftwerk. Das heiße Abgas der Gasturbine verdampft im nachgeschalteten Dampfprozess Wasser. Dieser Dampf treibt eine Dampfturbine an (*GuD-Kraftwerk: Gas und Dampf bzw. Combined Cycle*). Dadurch wird der Gesamtwirkungsgrad erhöht, wie folgendes Beispiel mit Schätzwerten zeigt.

**Beispiel 4.6.2-4:** GuD-Kraftwerk von der Größe des Kraftwerks *Irsching/Bayern*:

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

**Erforderliche thermische Leistung (Gasbrennwert): 375 + 565 = 940 MW**

b) Die Abwärme wird im Wärmetauscher zur Dampferzeugung genutzt:

Rauchgasein-/austrittstemperatur am Wärmetauscher: 550 °C / 80 °C bzw. 823 K / 353 K.

Abschätzung des thermischen Wirkungsgrads am Wärmetauscher:

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

c) Dampfturbine:

Wasserdampftemperaturen am Ein-/Austritt: 520 °C / 20 °C bzw. 793 K / 293 K

Abschätzung des thermischen Wirkungsgrads des Dampfprozesses an der Dampfturbine:

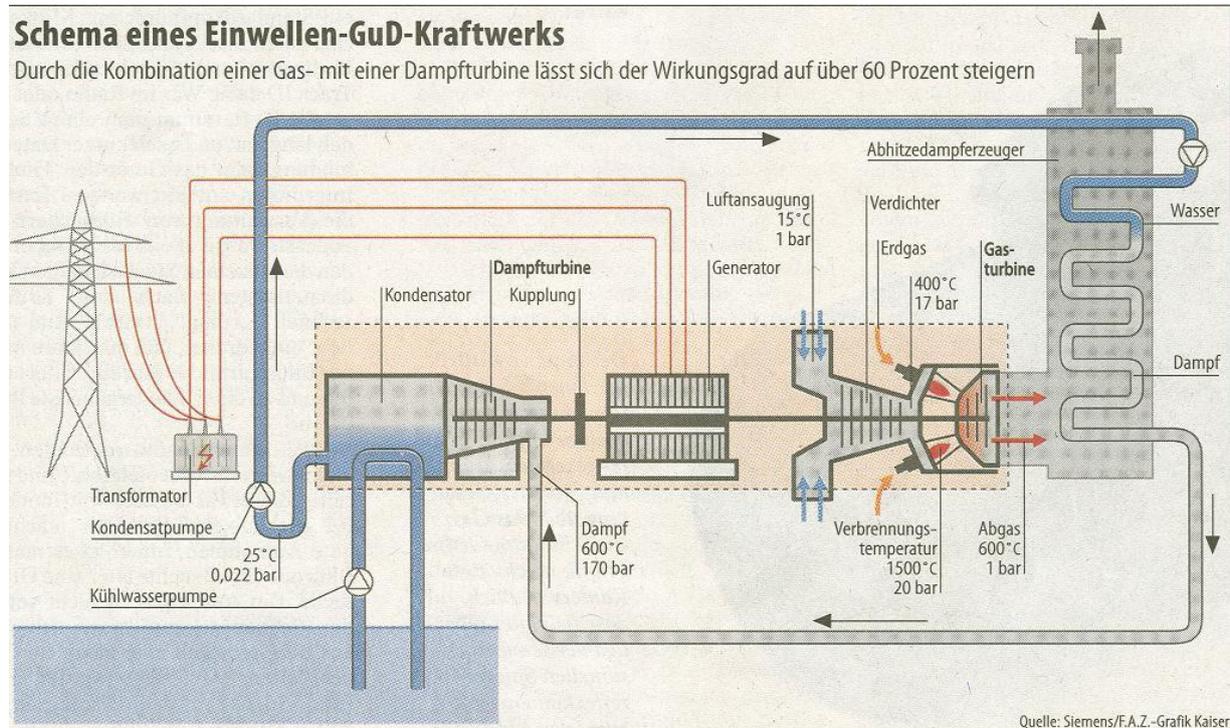
$$\eta_{DP} = 1 - T_{ab}/T_{zu} = 1 - 293 / 793 = 63\%$$

Damit ergibt sich b) und c) eine mechanische Leistung an der Dampfturbinenwelle:

$565 \cdot 0.571 \cdot 0.63 = 203$  MW, die nahezu vollständig im Generator in el. Leistung umgewandelt wird. Daher beträgt die elektrische Gesamtleistung aus a) und c):  $375 + 203 = 578$  MW. Der elektrische Wirkungsgrad des GuD-Prozesses ist  $578 / 940 = 61.5\%$  (gemessen wurden in

*Irsching*: 60.75 %). Wird alternativ zur die in den Kühltürmen abgeführte Restwärme diese als Fernwärme in benachbarte Wohn- oder Industrieanlagen zu z. B. Heizungszwecken ausgekoppelt, steigt der thermische Anlagenwirkungsgrad auf bis zu 90%.

Weitere Details zu Kraftwerken und eine entsprechende Systematik sind im dritten Teil dieser Ringvorlesung (Teil: Elektrische Energieversorgung, *Fr. Prof. Hanson*) enthalten.



**Bild 4.39:** Schema eines Ein-Wellen-GuD-Kraftwerks, bei dem Gas- und Dampfturbine mit dem Generator auf einer Welle angeordnet sind (Quelle: *Siemens AG*). Auf Grund der rasch einsatzbereiten Gasturbine lässt sich im GuD-Kraftwerk *Irsching/Bayern* die Regelleistung von 0 auf 500 MW in 30 min. steigern!