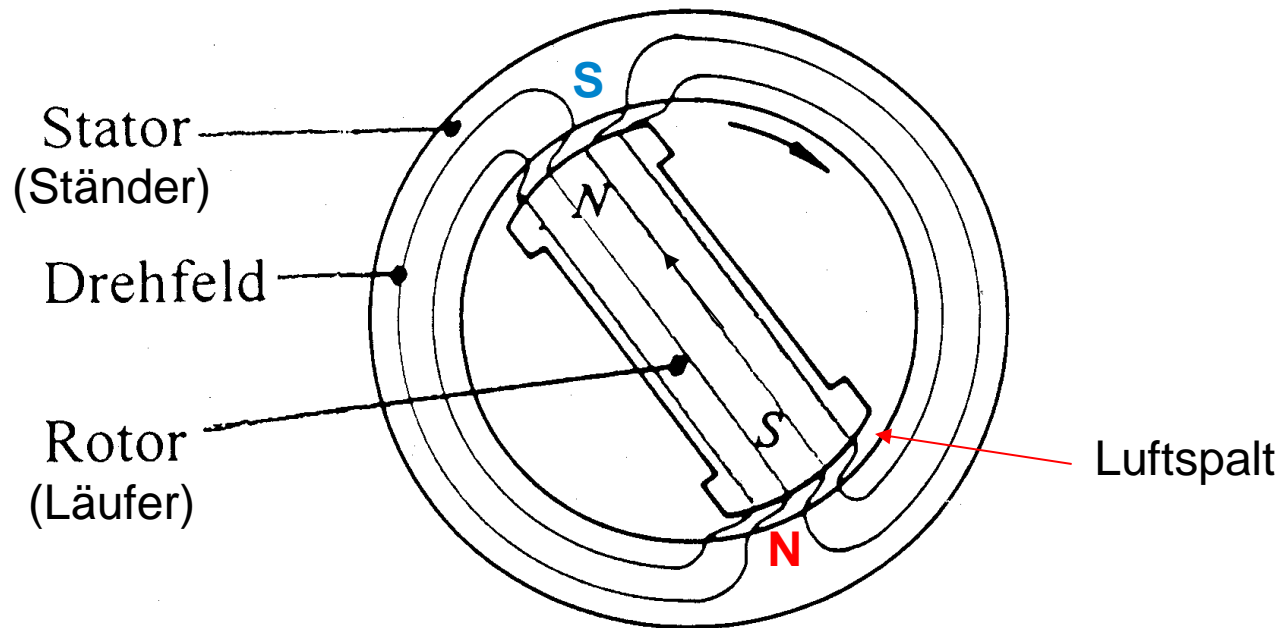


## Vorlesungsinhalt

1. Einleitung
2. Drehfelder in elektrischen Maschinen
3. Mathematische Analyse von Luftspaltfeldern
4. Spannungsinduktion in Drehstrommaschinen
5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine
6. Die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine
7. Antriebstechnik mit der Asynchronmaschine
8. Die Synchronmaschine
9. Erregereinrichtungen und Kennlinien
10. Gleichstromantriebe

# 2. Drehfelder in elektrischen Maschinen

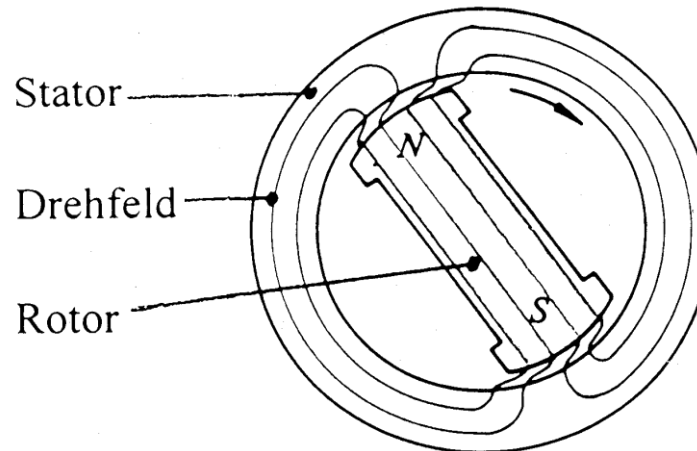


Quelle: H. Kleinrath, *Elektrische Maschinen*,  
*Uni-Text*, Akad. Verlagsgesellschaft, 1975



# Drehfeld-Maschinen: Prinzip

- Drehfeldmaschinen: Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen
- **Beispiel:** Synchron-Schenkelpolmaschine: Prinzip



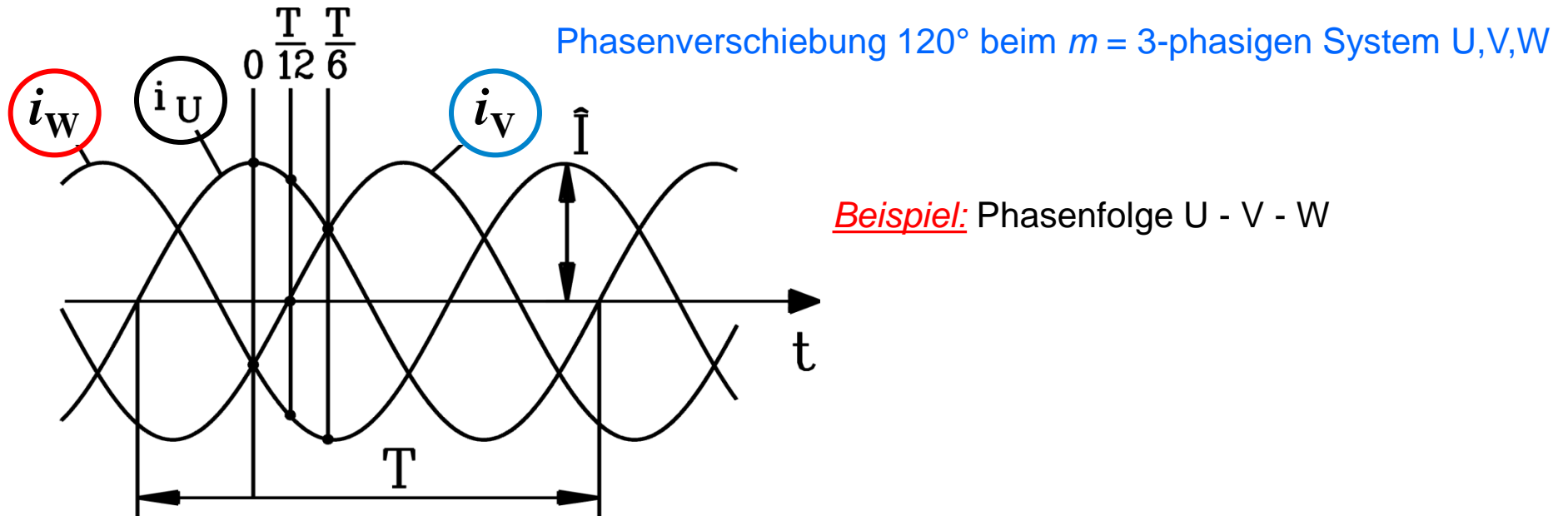
Stator: Index  $s$   
Feld: Index  $f$

Quelle:  
Kleinrath. H.: Ele. Maschinen, Uni-text, 1971

- Drehstromsystem  $I_s$  in Ständerwicklung erzeugt Drehfeld (hier 2 Pole:  $2p = 2$ )).
  - Erregerspule im Läufer ("Polrad") über Schleifringe mit Gleichstrom ("Feldstrom  $I_f$ ") erregt.
  - Es entsteht ein 2-poliges Läuferfeld. Alternativ: Läuferfeld durch Dauermagnet erregt.
- Das Ständer-Drehfeld zieht den magnetisierten Läufer **SYNCHRON** mit.

# Benötigte theoretische Hilfsmittel

- Für das quantitative Verständnis von **Drehfeldmaschinen** ist die Berechnung des Drehfelds und seiner Wirkung  
Spannungsinduktion,  
Drehmomentbildung  
erforderlich.
- Dazu wird benötigt:  
Durchflutungssatz,  
Induktionsgesetz,  
Wicklungssystematik,  
*FOURIER*-Reihen.

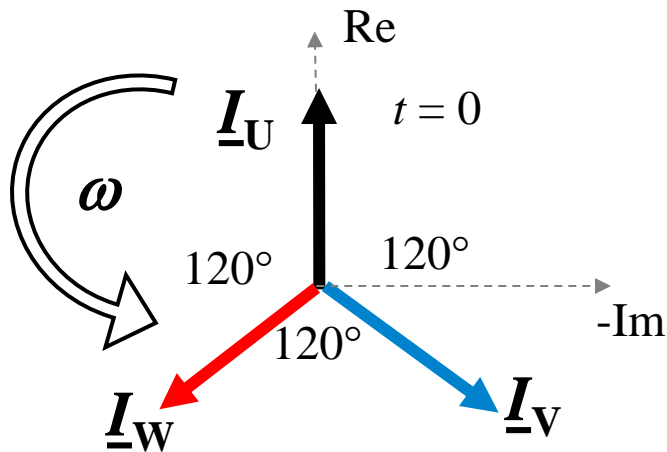


$$i_U(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t + 0^\circ) = \operatorname{Re}\{\hat{I} \cdot e^{j\omega t}\}$$

$$i_V(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) = \operatorname{Re}\{\hat{I} \cdot e^{-j120^\circ} \cdot e^{j\omega t}\}$$

$$i_W(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t - 240^\circ) = \operatorname{Re}\{\hat{I} \cdot e^{-j240^\circ} \cdot e^{j\omega t}\}$$





- Amplitude  $\hat{I}$  , Effektivwert  $I = \hat{I} / \sqrt{2}$
- Frequenz  $f = 1/T$  ( $\omega = 2\pi \cdot f$ )
- Phasenfolge U - V - W oder U - W - V

**Beispiel:** Phasenfolge U - V - W:

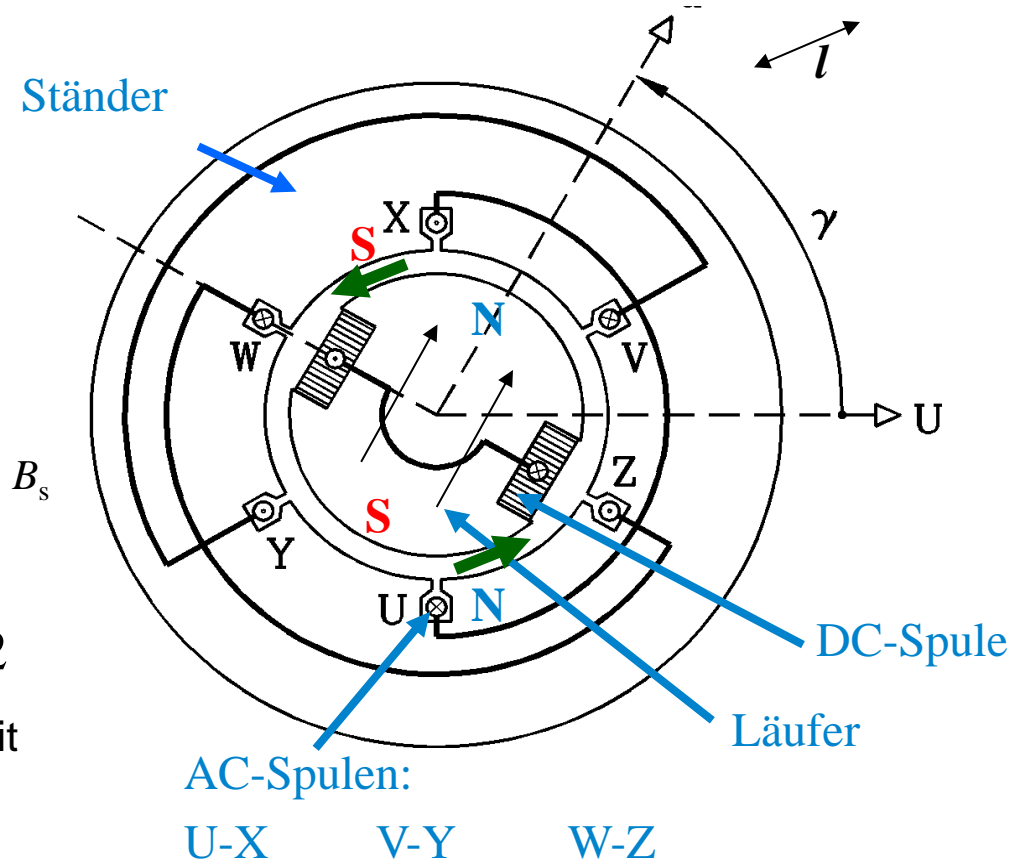
$$\underline{I}_U = I$$

$$\underline{I}_V = I \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$\underline{I}_W = I \cdot e^{-j240^\circ}$$

- **Läufer** (Durchmesser  $d$ ):  
Zeitlich konstantes Magnetfeld  $B_f$   
a) Permanentmagnete oder  
b) Spulen („elektrisch erregt“: Gleichstrom  $I_f$ )  
(Zwei Schleifringe + Bürsten)
- **Ständer**: „Drehfeldwicklung“ mit Wechselströmen  $I_s$ : Erregen Drehfeld  $B_s$
- **LORENTZ-Kraft**  $F_e$  vom Ständer-Magnetfeld  $B_s$  auf  $z_f$  Strom-Leiter der Läuferwicklung:  
Tangentialkraft  $F_e \Rightarrow$  **Drehmoment**  $M_e$   
$$\vec{F}_e = I_f \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_s) \Rightarrow M_e = z_f \cdot F_e \cdot d / 2$$
- Läufer rotiert **SYNCHRON** (gleich schnell) mit dem Ständerdrehfeld

**Drehzahl**  $n_{\text{syn}} = f / p$

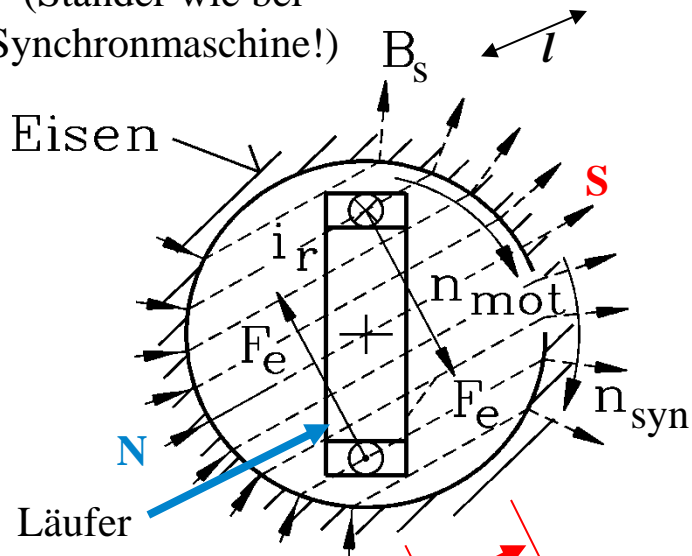


**Beispiel:**

Zweipolige ( $2p = 2$ ) elektrisch erregte Synchronmaschine, Drehzahl  $n_{\text{syn}} = f$

# Asynchronmaschinen

(Ständer wie bei  
Synchronmaschine!)



- Ständer hat „Drehfeldwicklung“, erregt Ständer-Drehfeld  $B_s$ , das mit  $n_{syn}$  rotiert.
- Läufer trägt **Kurzschlusswindung**.
- Läufer dreht langsamer (**ASYNCHRON**) als Ständer-Drehfeld  $B_s$ , erfährt **Feldänderung**  $dB_s/dt$ :  $n_{mot} < n_{syn}$
- **FARADAY**'sches Induktionsgesetz: **Wechselspannung**  $u_i \sim dB_s/dt$  in Kurzschlusswindung induziert (Frequenz  $f_r = \omega_r / (2\pi)$ ).

$$\vec{F}_e = I_r \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_s) \quad \Delta \quad M_e = 2 \cdot F_e \cdot \frac{\Delta}{2}$$

- Wechselspannung  $u_i$  treibt **Kurzschlussstrom als Wechselstrom**:  $i_r(t) = \sqrt{2} \cdot I_r \cdot \cos \omega_r t$
- Strom  $i_r$  bildet mit  $B_s$  eine **LORENTZ-Kraft**  $F_e$ , die den Läufer antreibt:  $M_e = 2 \cdot F_e \cdot \Delta / 2$
- Kurzschlusswindung = Zwei Rotorleiter ( $z_r = 2$ ): Bei Eisenrotor tangentielle Kräfte  $F_e$ , daher statt  $\Delta$  Läuferdurchmesser  $d \Rightarrow$  Drehmoment:  $M_e = z_r \cdot F_e \cdot (d/2)$



# Drehmoment $M_e$ bestimmt die Baugröße



$$M_e = z \cdot F_e \cdot (d/2) \sim I_c \cdot B$$

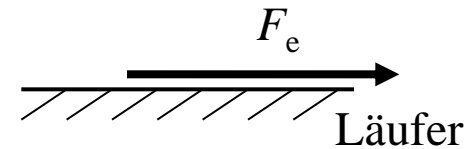
$$P = 2\pi \cdot n \cdot M_e = 2\pi \cdot n \cdot \overbrace{\frac{z \cdot F_e}{d\pi l}}^{\tau} \cdot d\pi l \cdot \frac{d}{2}$$

• Kennggröße: „Spezifischer“ Schub  $\tau = F/A$

Bei Luftkühlung (Stromwärme  $\sim I_c^2$  „wegkühlen“):

$$\tau = \frac{z \cdot F_e}{d\pi l} \approx 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

Tangentialkraft = „Schubkraft“



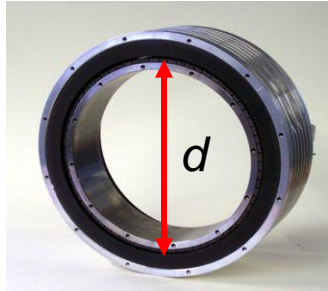
$$M_e \sim \tau \cdot \underbrace{d^2 \cdot l}_V \sim \tau \cdot V$$

$$M_e \sim d^2 \cdot l$$

- Das Drehmoment  $M_e$  bestimmt die „Baugröße“ (= Volumen  $V$ ) der E-Maschine!
- Die Leistung  $P$  steigt mit der Drehzahl  $n$ !
- Daher:  
Selbst Maschinen mit den größten Drehmomenten (E-Maschine, hydraulische Maschine, Verbrennungskraftmaschine, ...) erbringen im Stillstand  $n = 0$  KEINE Leistung!

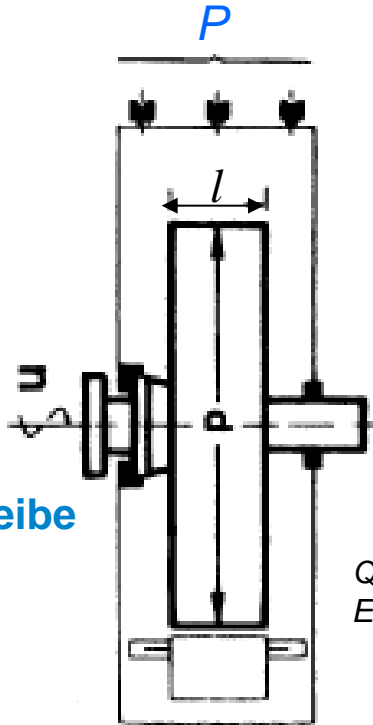


# Bauform „Scheibe“ vs. „schlanker Zylinder“ (bei gleicher Leistung $P$ )



PM-Synchronmotor  
 $M_1 = 800 \text{ Nm}$   
 $n_1 = 120/\text{min}$   
 $P_1 = 10 \text{ kW}$   
 (Quelle: EMT)

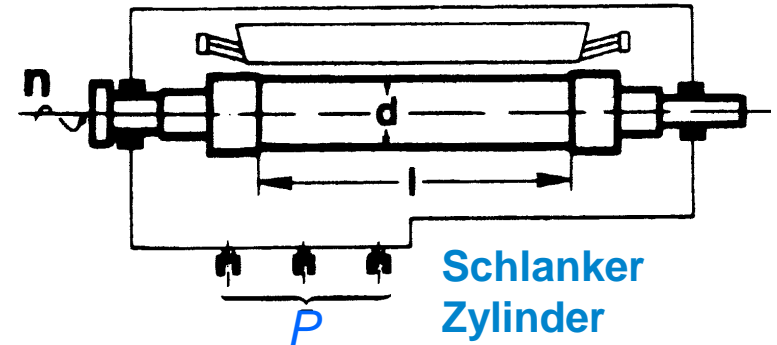
**Scheibe**



Das Drehmoment  $M_e$  bestimmt die Baugröße der E-Maschine!

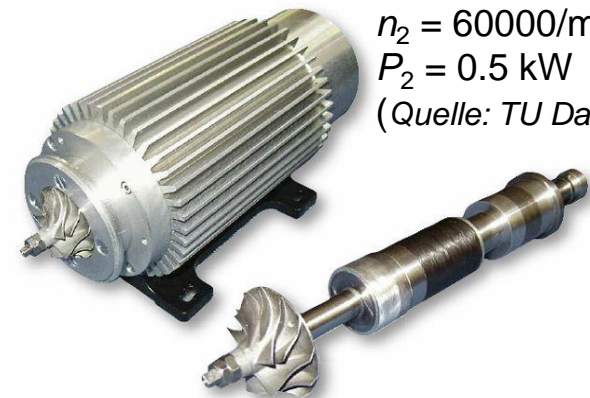
$$n = n_{\text{syn}} = f / p$$

Quelle: Bohn, T. (Hsg.):  
 El. Energietechnik



**Schlanker  
Zylinder**

PM-Synchronmotor  
 $M_2 = 0.08 \text{ Nm}$   
 $n_2 = 60000/\text{min}$   
 $P_2 = 0.5 \text{ kW}$   
 (Quelle: TU Darmstadt)



	<b>Scheibe</b>	<b>schl. Zylinder</b>
Drehzahl $n$	klein	groß
Drehmoment $M_e$	groß	klein
Durchmesser $d$	groß	klein
Länge $l$	klein	groß
Polzahl $2p$	groß	klein

# Beispiel: PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschine als Antrieb für Hybrid-Automobile

■ Technische Daten:	PSM M1	ASM M2
Bemessungsleistung $P_N$	20.5 kW	15 kW
Nenn-drehzahl $n_N$	1500 min <sup>-1</sup>	2765 min <sup>-1</sup>
Maximaldrehzahl $n_{max}$	6000 min <sup>-1</sup>	12500 min <sup>-1</sup>
Nenn-Drehmoment $M_N$	130 Nm	52 Nm
Außendurchmesser $d_{s,a}$	286 mm	150 mm
Eisenlänge $l$	95 mm	180 mm
<b>Bauweise</b>	<b>Scheibe</b>	<b>Zylinder</b>

## Flüssigkeitsmantelkühlung im Ständer:

Kühlmittel: 50% Wasser, 50% Glycol, Durchfluss: 8 l/min,  
Vorlauf-temperatur: 85 °C

PSM: PM-Synchronmaschine M1



ASM: Käfigläufer-Asynchronmaschine M2



Quelle: Daimler, Stuttgart

## 2. Drehfelder in elektrischen Maschinen

### 2.1 Grundprinzipien der Magnetfeldberechnung **Wiederholung**

2.2 Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen

2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

2.4 Wicklungsanordnungen

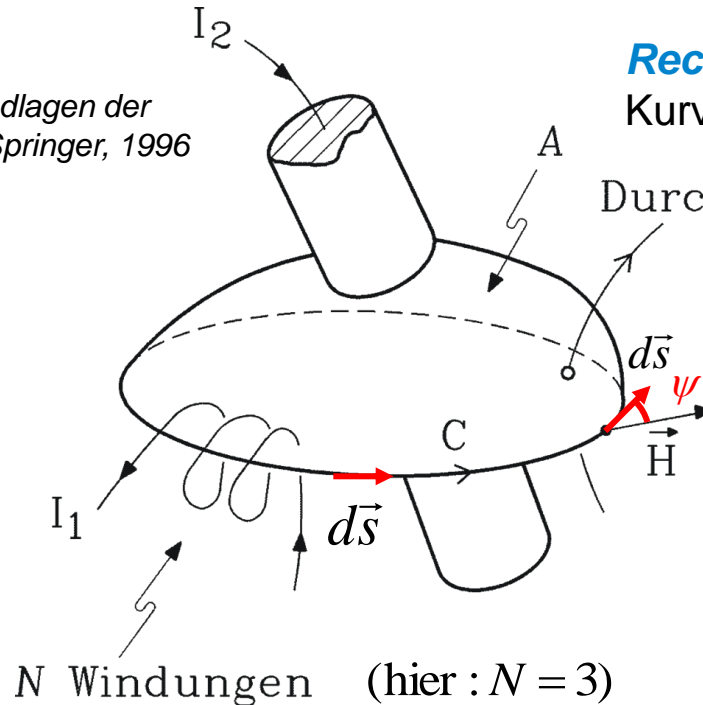
# Erregung von $H$ : AMPERE'scher Durchflutungssatz

Wiederholung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Quelle:  
Prechtl, A.: Grundlagen der  
Elektrotechnik, Springer, 1996



**Rechte-Hand-Regel** für die Zuordnung von  
Kurvenorientierung und Durchtrittssinn!

**Beispiel:**

Durchflutung

$$\Theta = N I_1 - I_2 \quad (\Theta = 3 \cdot I_1 - 1 \cdot I_2)$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta$$

Bei „Niederfrequenz“ ist das Kurvenintegral der magnetischen Feldstärke  $H$  längs der geschlossenen Kurve  $C$ , die die Fläche  $A$  aufspannt, gleich der resultierenden Durchflutung  $\Theta$ , die durch die Fläche  $A$  hindurch tritt.

„Niederfrequenz“:  $\int_A (\partial \vec{D} / \partial t) \cdot d\vec{A} \ll \Theta$   $D$ : dielektrische Verschiebung

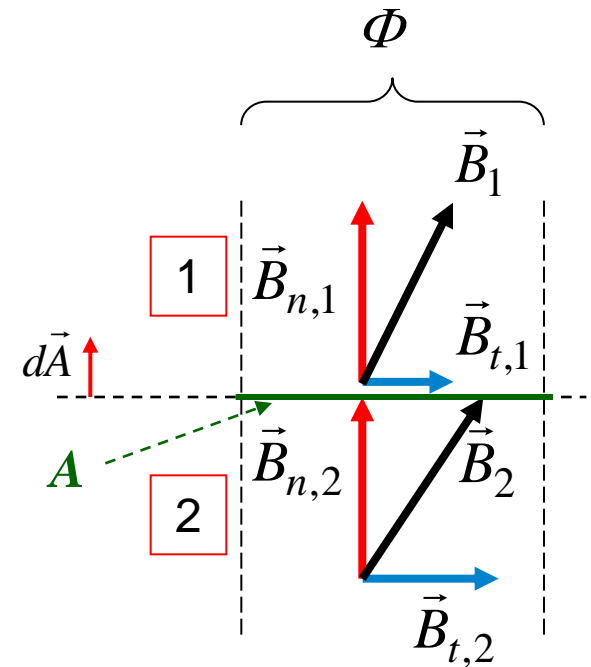
$$\vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot ds \cdot \cos \psi \quad \psi: \text{Winkel zwischen } \vec{H} \text{ und } d\vec{s}$$



$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

- Magnetischer Fluss  $\Phi$  ist die Summe (= das Integral) der durch eine Fläche  $A$  hindurch tretenden magnet. Flussdichte  $B$ .
- Einheit: V·s Wb („Weber“)
- Nur Normalkomponente  $B_n$  auf Fläche  $A$  trägt zum Fluss bei!

$$\Phi = \int_A (\vec{B}_n + \vec{B}_t) \cdot d\vec{A} = \int_A B_n \cdot dA$$



- **Daher:  $B$ -Normalkomponente** zu beiden Seiten der Fläche  $A$  gleich groß, also auch, wenn  $A$  die Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Materialien 1 und 2 ist.

Stetigkeit der Normalkomponente:  $B_{n,1} = B_{n,2}$

# Gesetz vom magnetischen Hüllenfluss

Wiederholung

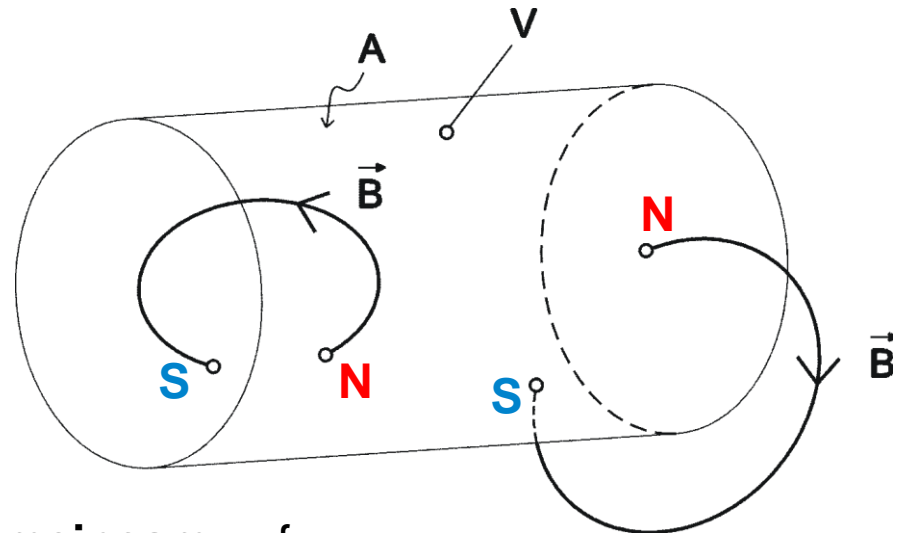


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Der magnetische Hüllenfluss  $\Phi$  über eine geschlossene Fläche  $A$  ist **stets Null** !
- Weil die  $B$ -Feldlinien stets geschlossene Linien sind!

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \Phi = 0$$

$A$ : Geschlossene Oberfläche  
 $V$ : Eingeschlossenes Volumen



- Daher treten **Nord- und Südpole** stets **gemeinsam** auf.
- Die Mindest-Polzahl ist 2 - ein Nord- und ein Südpol.
- Die Anzahl der Magnetpole ist  $2p$  (**Polpaarzahl**  $p = 1, 2, 3, \dots$ ).

Beispiel: Vierpolig:  $p = 2, 2p = 4$



## Zusammenfassung: Grundprinzipien der Magnetfeldberechnung

- Rotierende elektrische Maschine: Stator, Rotor und Luftspalt
- Flussleitend: Eisen, stromleitend: Kupfer und/oder Aluminium
- Isolationsmaterial: Beanspruchung durch elektrisches Feld.
- Für „niederfrequente“ Magnetfelder gilt der *AMPÈRE*'sche Durchflutungssatz.
- Konstanz des magnetischen Flusses in einer „Feldröhre“  
(2-dimensional: zwischen zwei Feldlinien)
- *B*-Feldröhren (2-dim.: *B*-Feldlinien) sind geschlossene geometrische Objekte.



## 2. Drehfelder in elektrischen Maschinen

2.1 Grundprinzipien der Magnetfeldberechnung

2.2 Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen

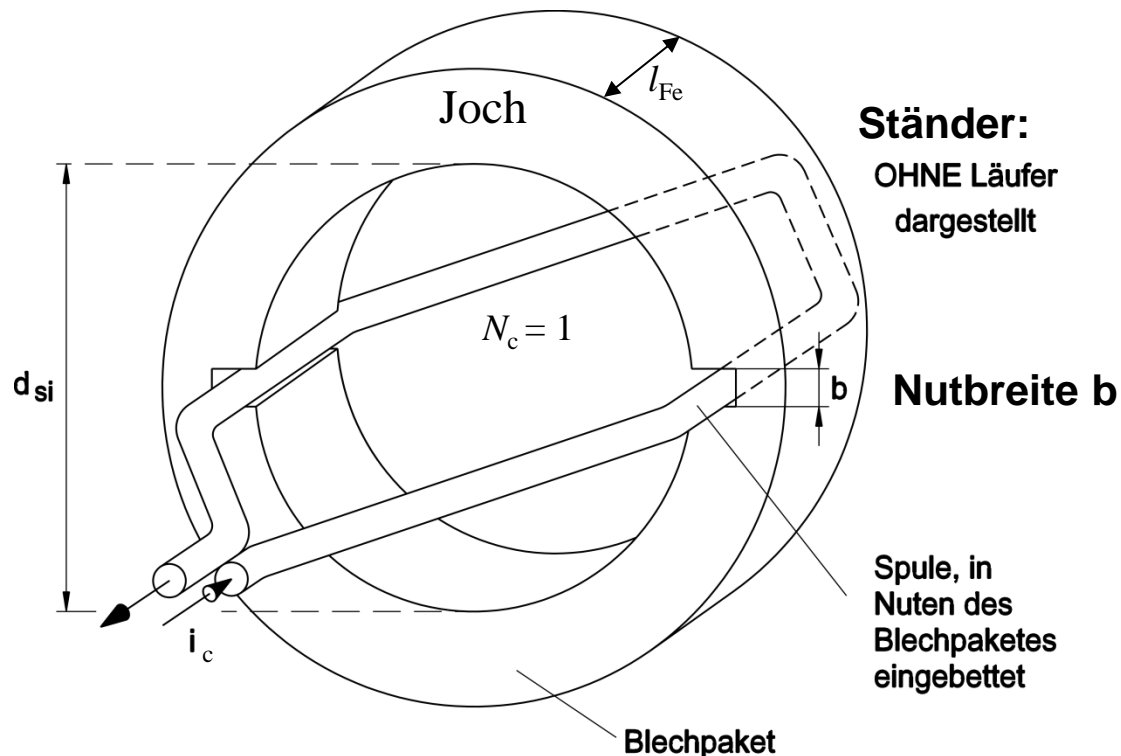
2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

2.4 Wicklungsanordnungen

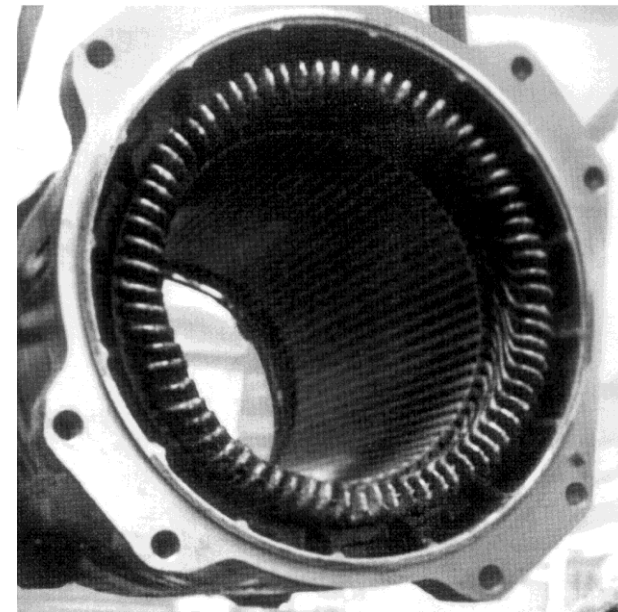
# Einzelspule in zwei Ständernuten

- Die Spule (coil: c) liegt mit ihrem Hin- und Rückleiter in je einer Ständernut.
- Der in ihr fließende Strom  $i$  (Pfeilrichtung!) erregt ein zweipoliges Magnetfeld, dessen Flussröhren sich in dem Ständer"rücken" (Blechpaket-Joch) schließen.

$d_{si}$ : Statorinnendurchmesser („Bohrung“)



Quelle: Siemens, Deutschland

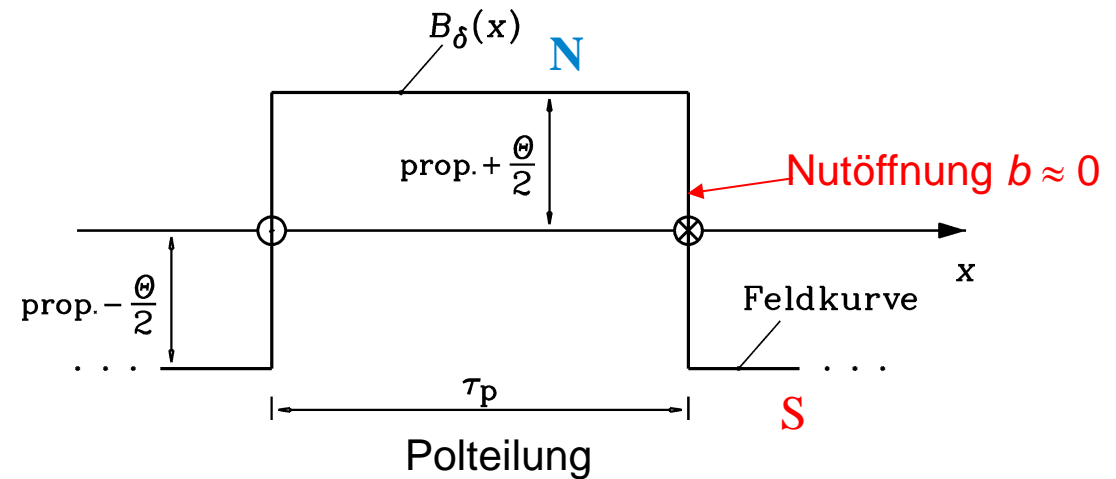
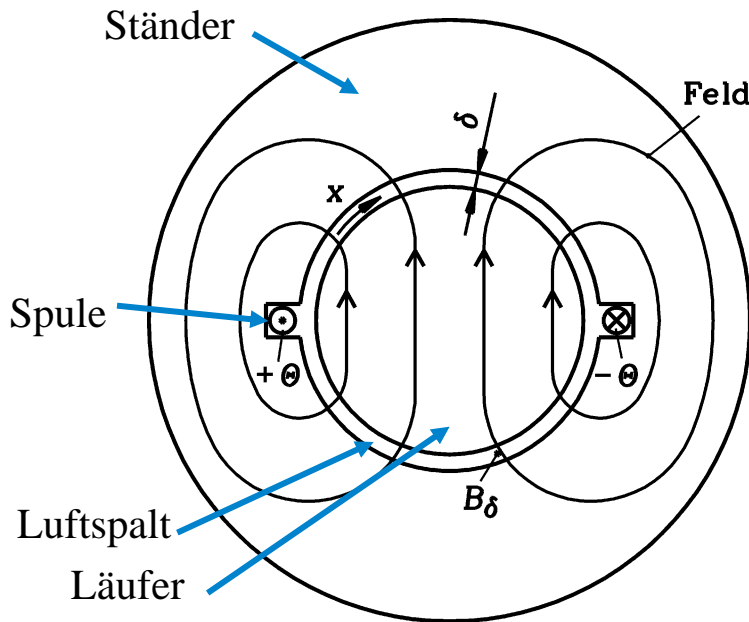


**Komplette Drehstromwicklung  
(Asynchron-Bahnmotor BR120)**



# Luftspaltfeld einer stromdurchflossenen Spule bei $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ , somit etwa $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$

• Durchflutungssatz:  $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2 \cdot \underbrace{H_{Fe} \cdot \Delta_{Fe}}_{\text{Null!}} + 2 \cdot H_{\delta} \cdot \delta = 2 \cdot H_{\delta} \cdot \delta = \Theta$

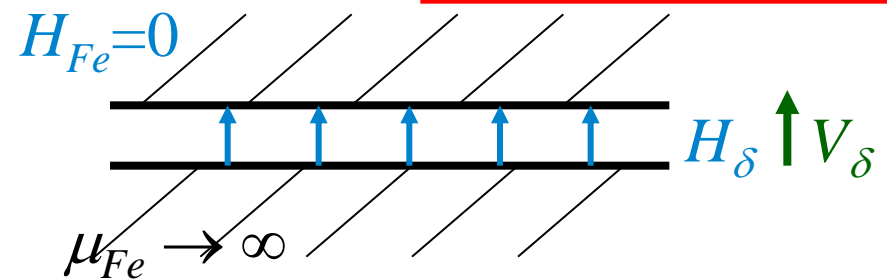
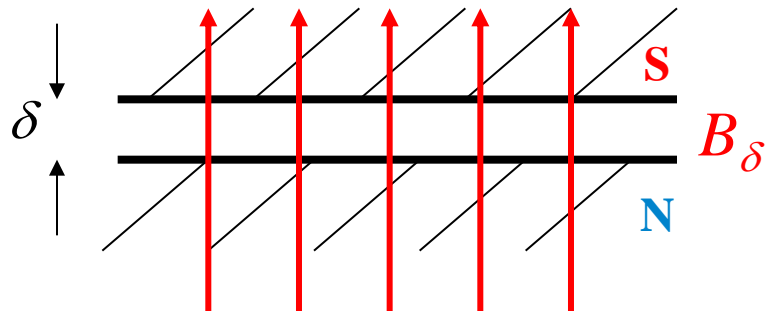


- $B_{\delta} = B_{Fe} \Rightarrow H_{Fe} = B_{Fe} / \mu_{Fe} = 0$  ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ) und  $H_{\delta} = B_{\delta} / \mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am}$ )
- **Feldvektoren**  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  im kleinen Luftspalt  $\delta$  (nahezu) nur **Radialkomponenten**.
- Spulenwindungszahl  $N_c$ , Spulenstrom  $I_c$ :  $B_{\delta} = \mu_0 \cdot H_{\delta} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta}{2 \cdot \delta} = \mu_0 \cdot \frac{N_c \cdot I_c}{2 \cdot \delta}$

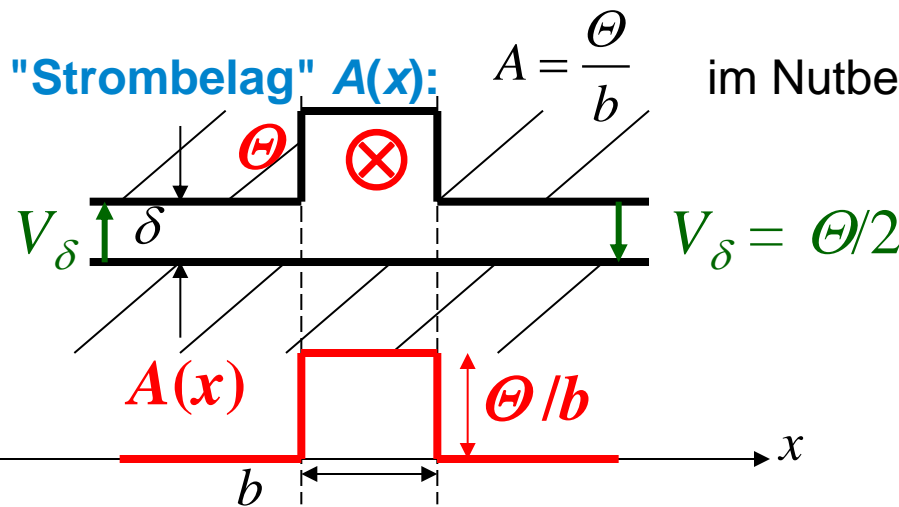
# Magnetische Spannung $V(x)$ und Strombelag $A(x)$

- Da  $H_{Fe} = 0$  ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ): Feldlinien von  $H_\delta$  entspringen an Eisenoberfläche!

- "Magnetische Spannung"  $V$  im Luftspalt:  $V_\delta = H_\delta \cdot \delta$  ;  $B_\delta(x) = \mu_0 \cdot \frac{V_\delta(x)}{\delta}$



- "Strombelag"  $A(x)$ :  $A = \frac{\Theta}{b}$  im Nutbereich,  $A = 0$  außerhalb des Nutbereichs

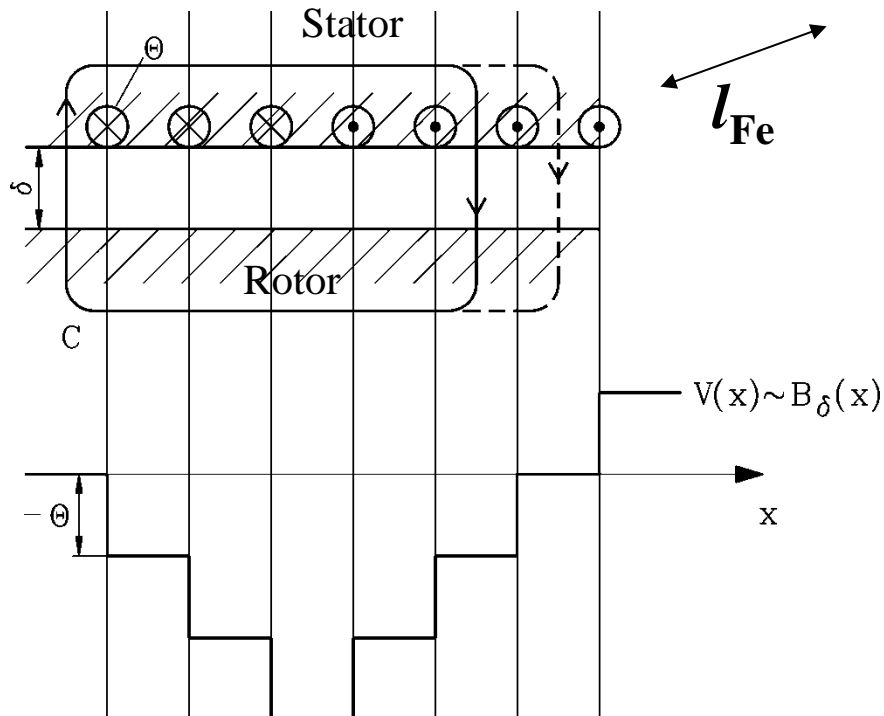


Einheit: von  $V$ : (A)  
von  $A$ : (A/m)

# Magnetische Spannungsverteilung $V(x)$

- **"Strombelag"  $A(x)$ :**  $A = \lim_{b \rightarrow 0} \frac{\Theta}{b} \rightarrow \infty$  im Nutbereich,  $A = 0$  außerhalb des Nutbereichs

**Beispiel:** Äquidistante Nuten mit gleicher Nutdurchflutung  $\Theta$



- **Berechnung von  $B_\delta$  mit dem Strombelag  $A(x)$ :**

$$B_\delta(x) = \mu_0 \cdot H_\delta(x) = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \int_0^x A(x) \cdot dx = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot (V(x) - V_0)$$

- **Magnetischer Summenfluss**  
durch Hüllfläche  $A_H$  um Rotor im Luftspalt ist Null  $\Rightarrow$  **Bestimmung von  $V_0$ !**

$$\oint_{A_H} \vec{B} \cdot d\vec{A} = l_{Fe} \cdot \int_{x=0}^{2p \cdot \tau_p} B_\delta(x) \cdot dx = 0$$

## Zusammenfassung: Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen

- Wicklung liegt in Nuten
- Eisenpermeabilität unendlich groß angenommen
- Luftspaltweite  $\delta$  konstant und klein gegenüber Hauptabmessungen  $d_{\text{si}}$ ,  $l_{\text{Fe}}$ , daher nur Radial- (bzw. Normal-)Komponente von  $B$  und  $H$
- $H$ -Feld nur im Luftspalt, Definition der magnetischen Spannung  $V$
- Vernachlässigter Einfluss der Nutöffnungen (Breite  $b \rightarrow 0$ ) führt zu treppenförmiger Verteilung der Luftspaltflussdichte-Radialkomponente  $B$

## 2. Drehfelder in elektrischen Maschinen

2.1 Grundprinzipien der Magnetfeldberechnung

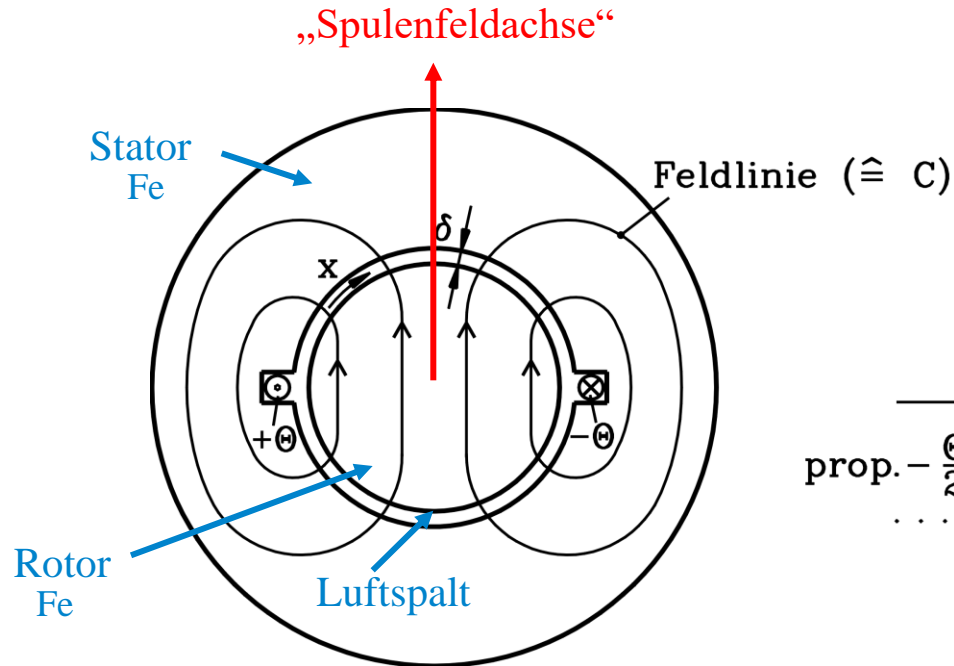
2.2 Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen

2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

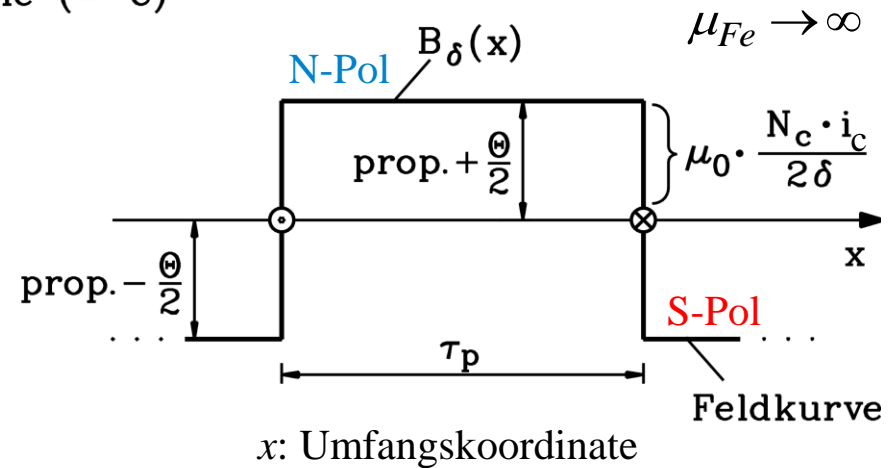
2.4 Wicklungsanordnungen



# Luftspaltfeld einer Ständerspule $q = 1$



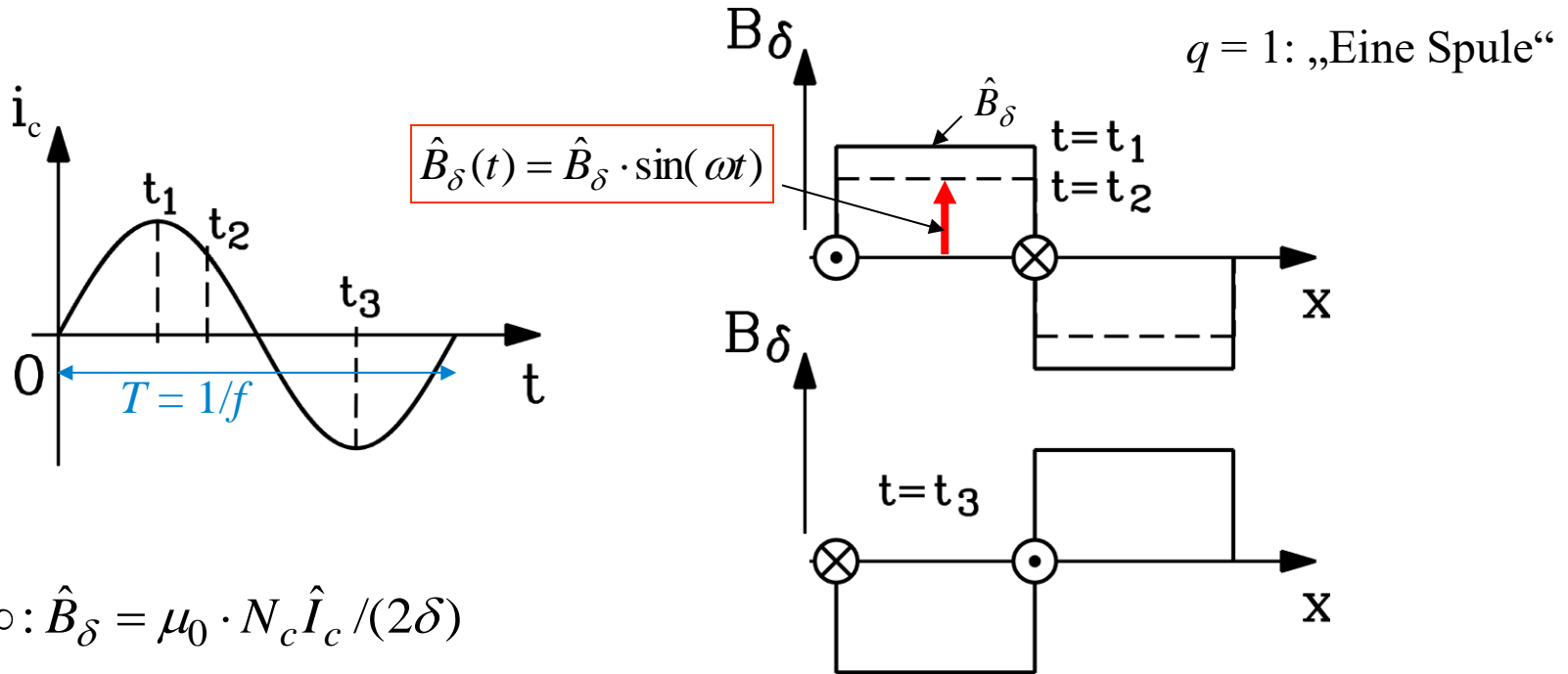
Radialkomponente  $B_\delta(x)$  des Luftspaltfelds:



Nutdurchflutung bei zeitlich veränderlichem Spulenstrom:  $\Theta(t) = N_c \cdot i_c(t)$

# Beispiel:

## Magnetisches Wechselfeld bei $q = 1$

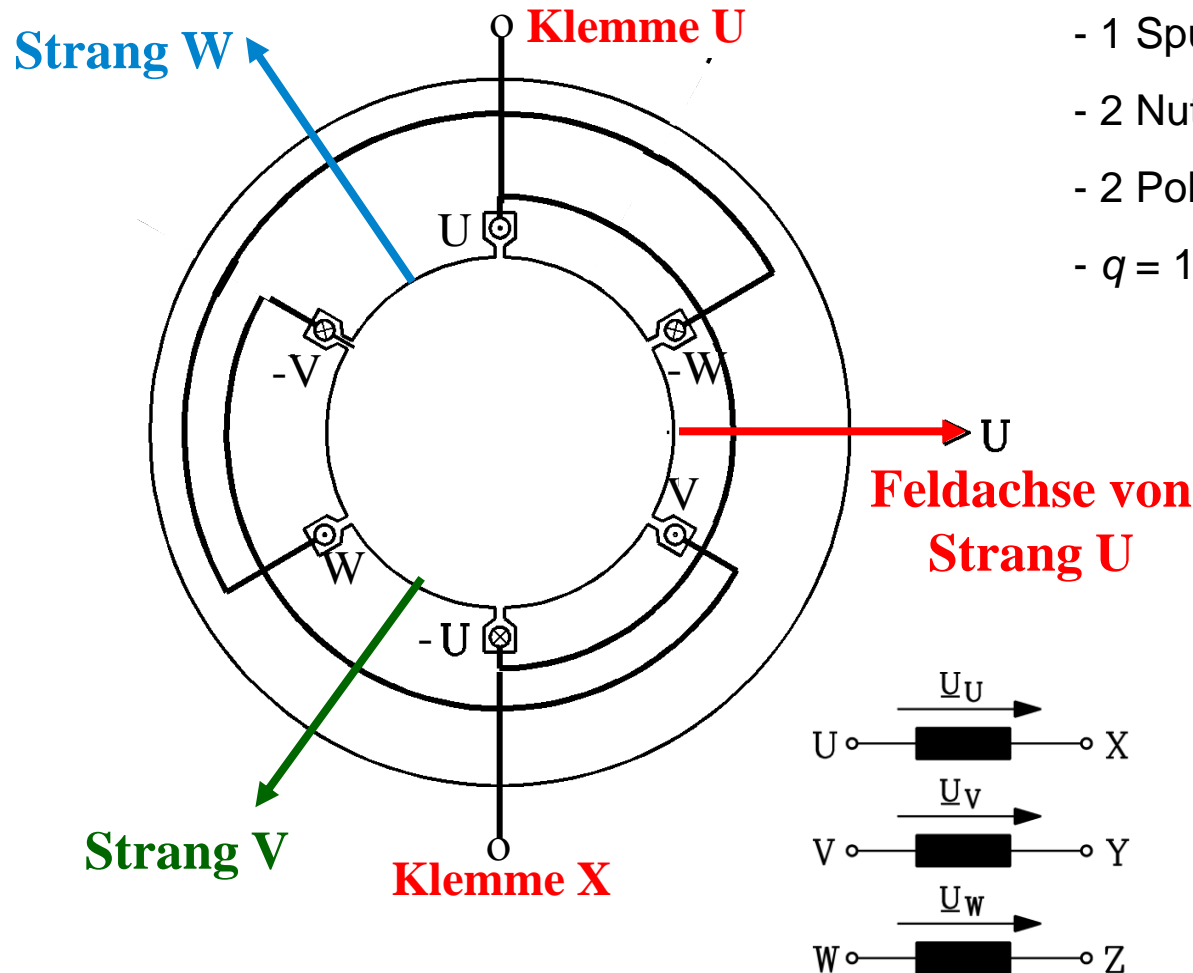


$$\mu_{Fe} \rightarrow \infty: \hat{B}_\delta = \mu_0 \cdot N_c \hat{I}_c / (2\delta)$$

- Speisung der Ständerspule mit Wechselstrom  $i_c(t)$ :  $i_c(t) = \hat{I}_c \cdot \sin \omega t$
- Pulsierendes stehendes Luftspaltfeld:  $\hat{B}_\delta(t) = \hat{B}_\delta \cdot \sin \omega t$   $f = \omega / (2\pi)$   
Das Luftspaltfeld hat WEITERHIN dieselbe Polzahl und ist rechteckförmig, aber seine Amplitude pulsiert mit Frequenz  $f$ .

# 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

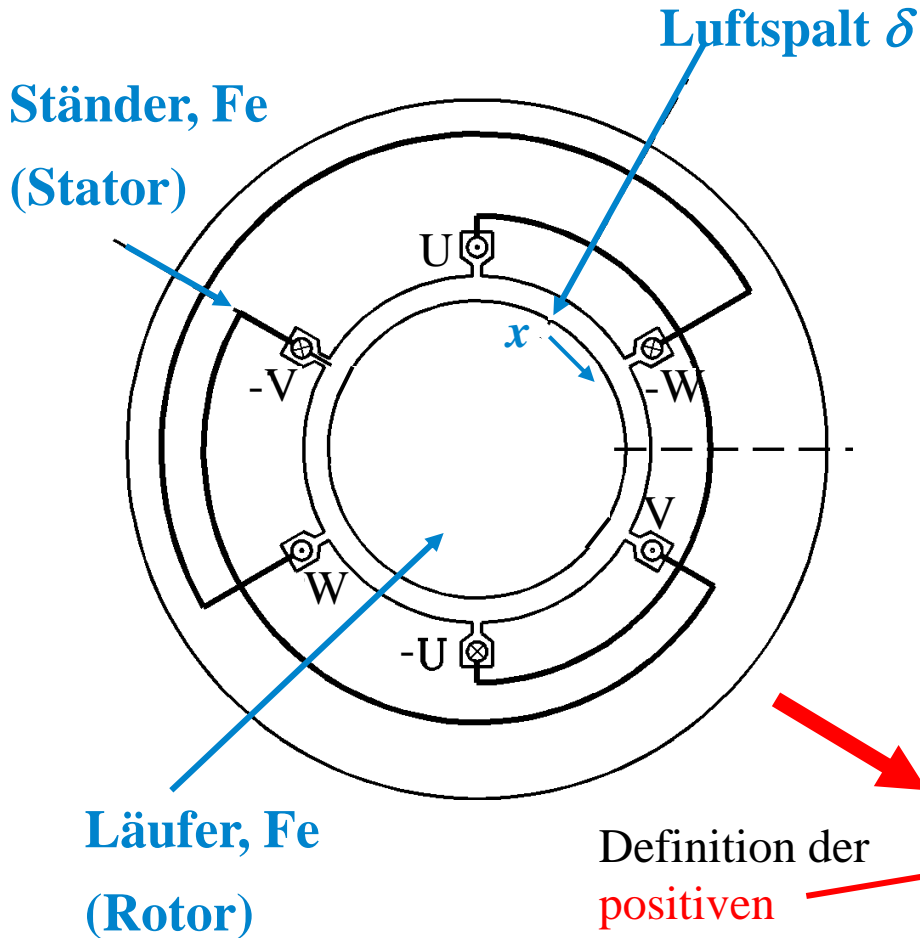
$$q = \frac{Q_s}{2p \cdot m} = \frac{6}{2 \cdot 3} = 1$$

Ständer-Nutzahl:  $Q_s = 6$

Polzahl:  $2p = 2$

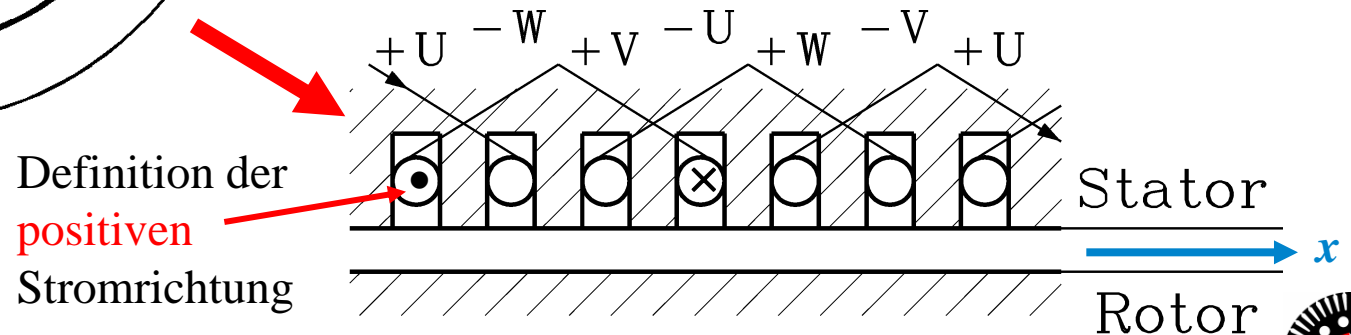
Strangzahl:  $m = 3$

# Ständer-Drehstromwicklung mit Eisenläufer

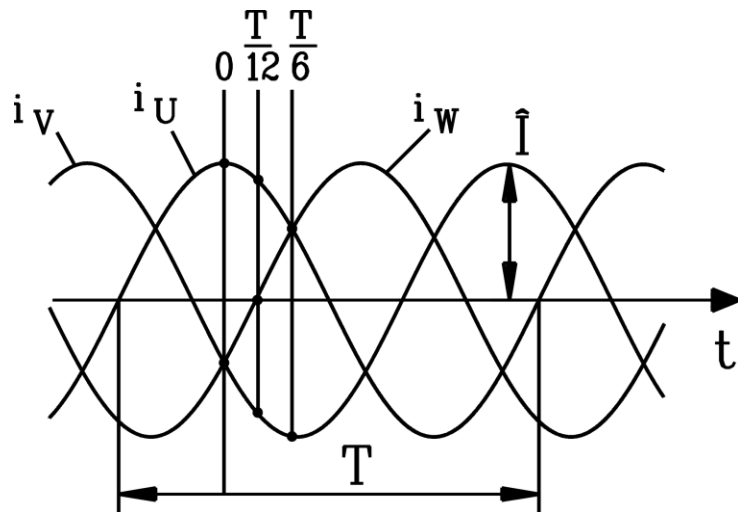


- Ständerfeld durch Drehstromwicklung
- Läufer aus Eisen
- konstante Luftspaltweite  $\delta$
- Magnetfeld im Luftspalt betrachtet
- Magnetfeld dreht
- Läufer dreht NICHT

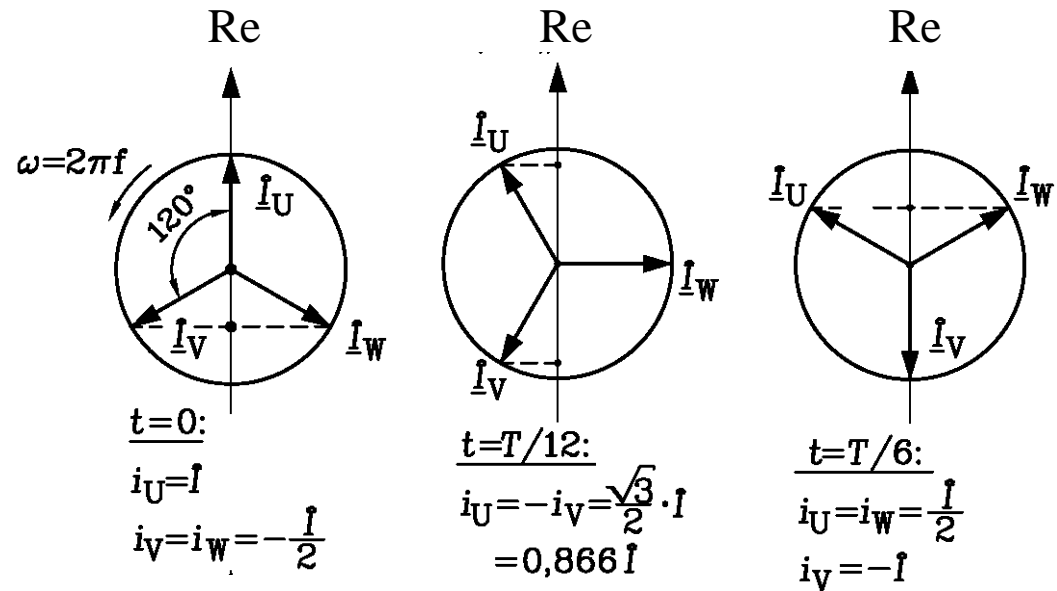
## Abgewickelte Darstellung: Einschichtwicklung



# Drehstromsystem: Zeit- und Frequenzbereich



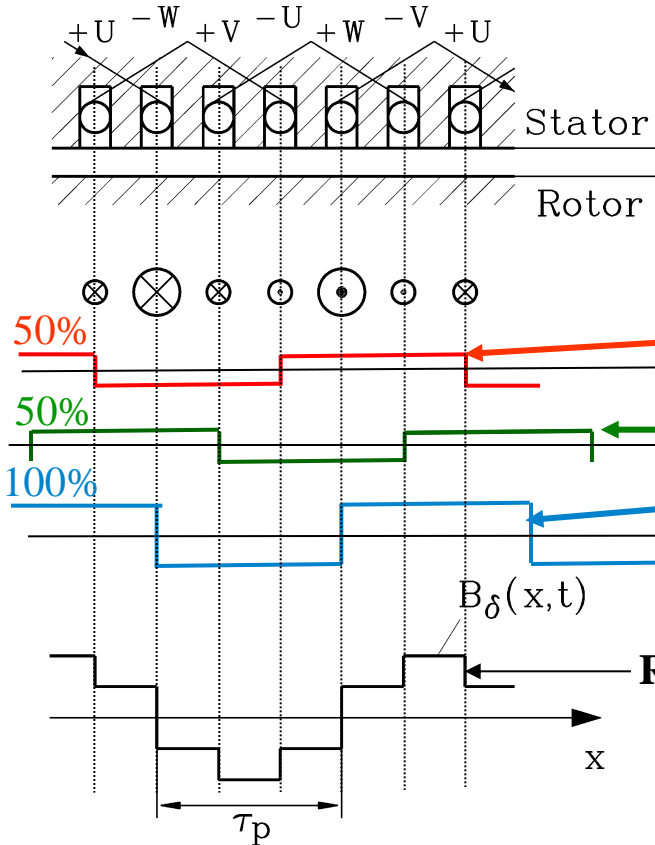
Darstellung im Zeitbereich



Darstellung in der komplexen Zahlenebene  
(„Frequenzbereich“)

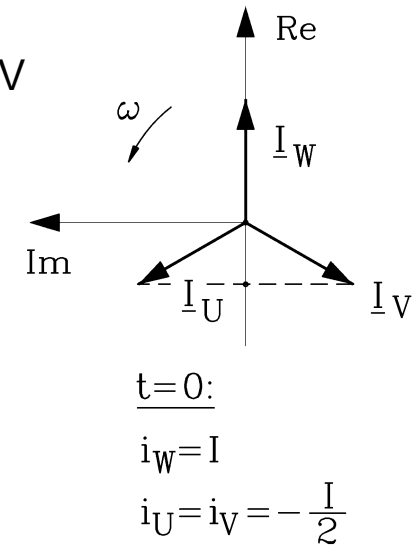
**Beispiel:** Phasenfolge U-W-V

# Technische Erzeugung eines Drehfelds



Überlagerung der Einzelfelder der drei Spulen zum resultierenden treppenförmigen Luftspaltfeld

**Beispiel:**  
Phasenfolge U-W-V  
Zeitpunkt  $t = 0$ :

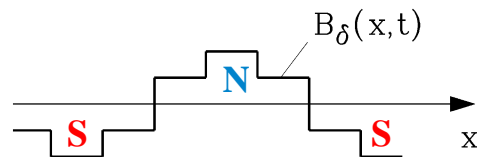
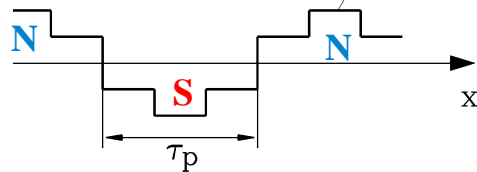
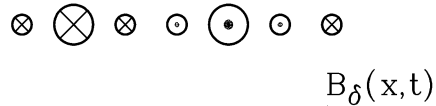
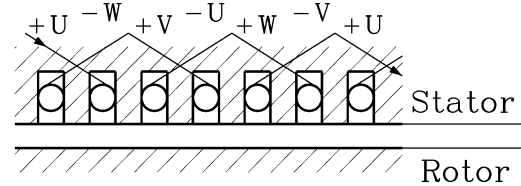


- +U: positiver Wicklungssinn (linke Spulenseite)  $\odot$
- U: negativer Wicklungssinn (rechte Spulenseite)  $\otimes$
- Ebenso: +V, -V, +W, -W

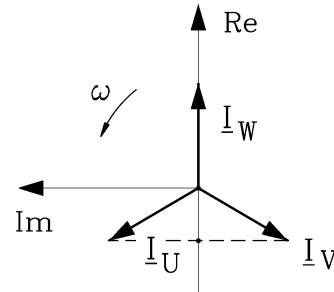
Nuten je Polpaar:  $Q_s/p = 6$   
Strangzahl:  $m = 3$



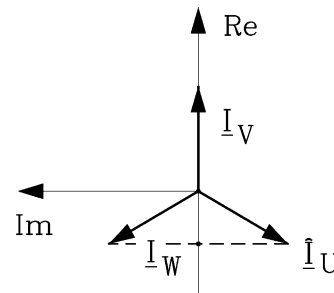
# Wandern des Drehfelds



Welle wandert nach links



$t=0:$   
 $i_W = I$   
 $i_U = i_V = -\frac{I}{2}$



$t=T/3:$   
 $i_V = I$   
 $i_U = i_W = -\frac{I}{2}$

Beispiel:

Phasenfolge U-W-V

Nuten je Polpaar:  $Q_s/p = 6$

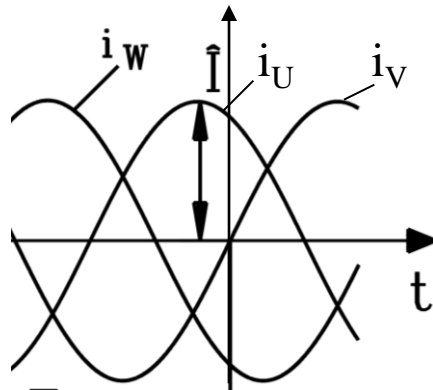
Strangzahl:  $m = 3$



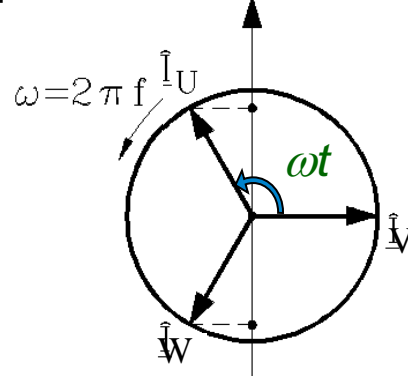
# Phasenfolge U, V, W versus U, W, V

## ZEITLICH:

Zeitbereich:



Frequenzbereich:

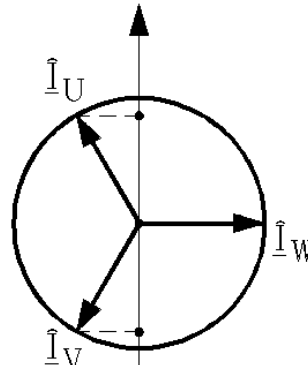


## Stromphasenfolge U, V, W

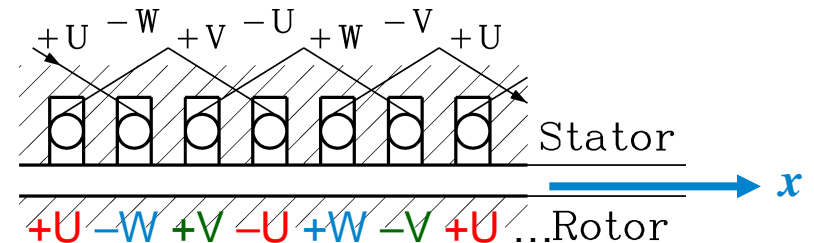
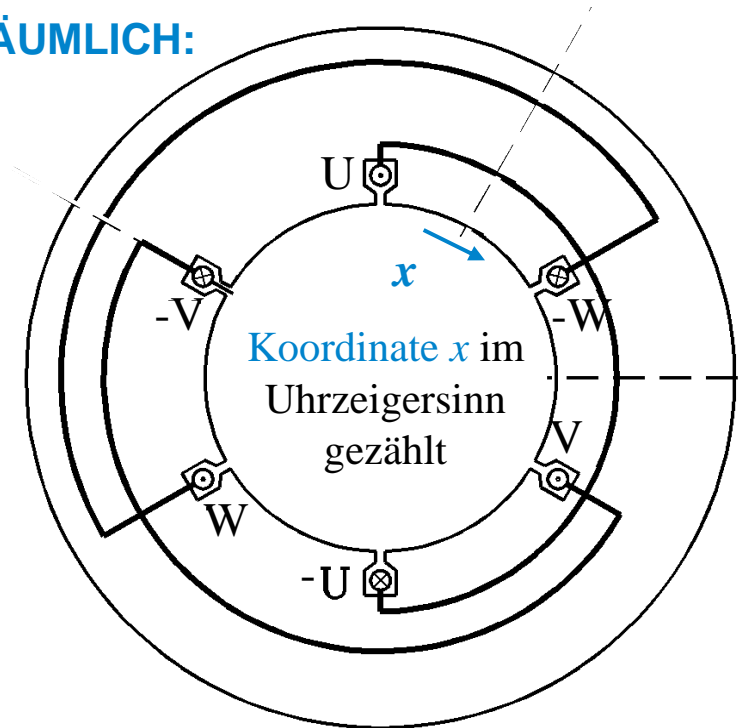
Zeiger-Dreibein dreht im mathematisch positiven Sinn in der komplexen Zahlenebene mit  $\omega$ , Winkel  $\omega t$

## Alternativ:

Phasenfolge U, W, V



## RÄUMLICH:



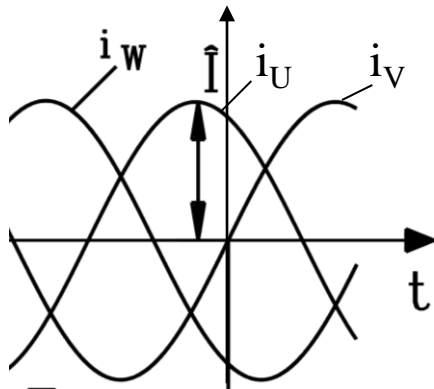
Alternativ: +U -V +W -U +V -W +U ...



# Drehrichtung des Drehfelds (1)

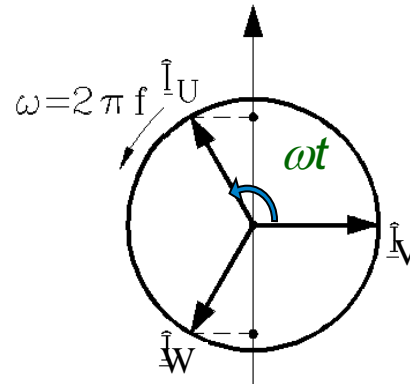
## ZEITLICH

Zeitbereich:

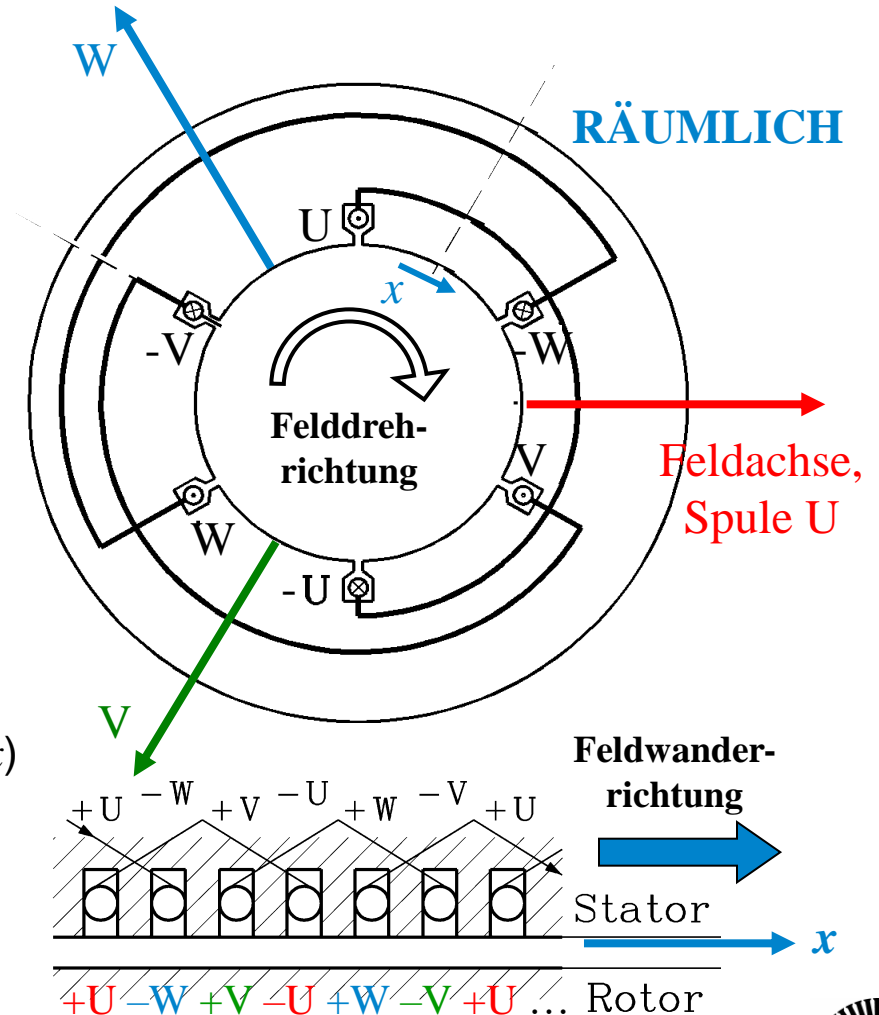


Stromphasenfolge U, V, W

Frequenzbereich:



## RÄUMLICH

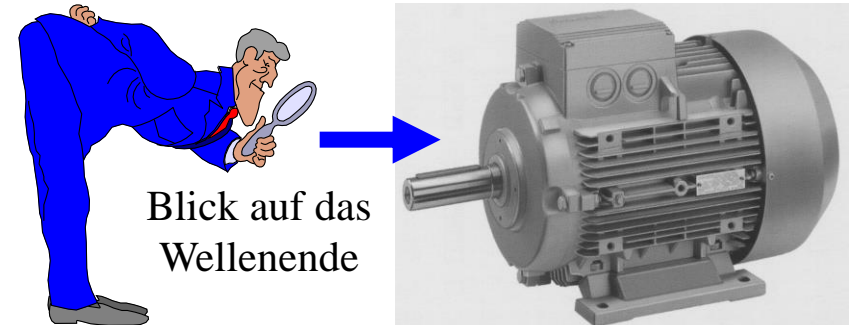


- Bei Phasenfolge U, V, W zeitlich ( $t$ ) und räumlich ( $x$ ) wandert (dreht) Feld in  $x$ -Richtung
- Bei zeitlicher Änderung der Phasenfolge bzw. bei Tausch zweier Klemmen als U, W, V kehrt sich die Wander- (Dreh)richtung um!

# Drehrichtung des Drehfelds (2)

Zeitliche Stromphasenfolge U – V – W  
Räumliche Zonenfolge im Uhrzeigersinn U – V - W  
Zeitliche Stromphasenfolge U – W – V  
Räumliche Zonenfolge im Uhrzeigersinn U – W - V

Drehfeld dreht **IM Uhrzeigersinn**:  
„RECHTSLAUF“  
„bei Blick auf das Wellenende“  
(Mathematisch negativer Drehsinn)



Blick auf das  
Wellenende

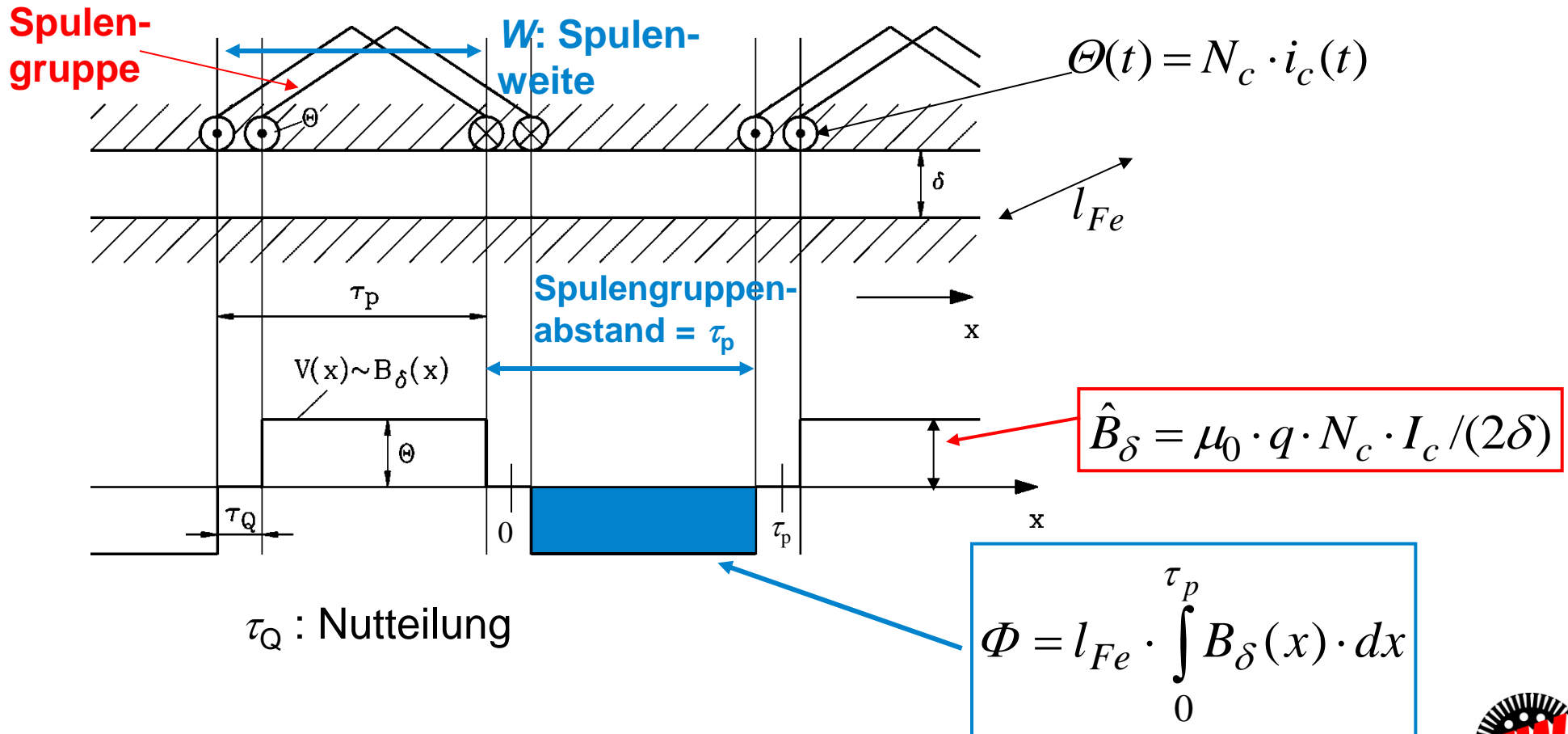
Quelle: Siemens AG, Deutschland

Zeitliche Stromphasenfolge U – V – W  
Räumliche Zonenfolge im Uhrzeigersinn U – W - V  
Zeitliche Stromphasenfolge U – W – V  
Räumliche Zonenfolge im Uhrzeigersinn U – V - W

Drehfeld dreht **GEGEN Uhrzeigersinn**:  
„LINKSLAUF“  
„bei Blick auf das Wellenende“  
(Mathematisch positiver Drehsinn)

# Magnetisches Feld von Spulengruppen (1)

**Beispiel:**  $q = 2$



# Magnetisches Feld von Spulengruppen (2)

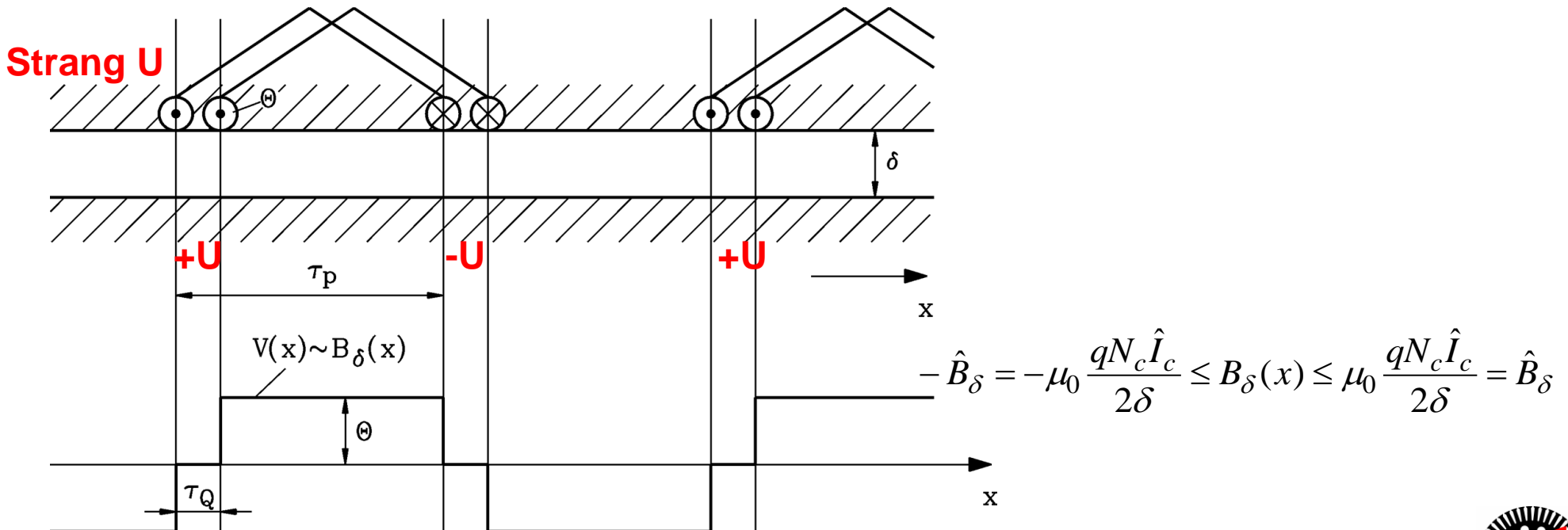
- **Spulengruppe:**  
Die Windungen je Strang pro Pol sind auf mehrere in Serie geschaltete Spulen verteilt  
( $q$  Spulen je Gruppe = z. B.: "Lochzahl"  $q = 2$ )
- Spulengruppen:  
Sind im Abstand einer **Polteilung**  $\tau_p$  am Maschinenumfang verteilt
- **"Konzentrierte" Nut-Durchflutung** je Spule:  
Hat stets den gleichen Wert  $\Theta = N_c \cdot I_c$
- Zugehörige Feldtreppe  $B_\delta(x)$  ist **abszissensymmetrisch** =  
= Kurvenverlauf  $B_\delta(x)$  ober- und unterhalb Abszisse  $x$  spiegelbildlich
- **Polflüsse**  $\Phi$  = positive u. negative Flächen unter der Feldkurve gleich groß.

# Magnetisches Wechselfeld

- Speisung der Spulengruppen-Anordnung mit **sinusförmigem Wechselstrom**  $i_c$ :  
Amplitude  $\hat{I}_c$ , Frequenz  $f$ , Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$ ,  $T = 1/f$ : Schwingungsperiode

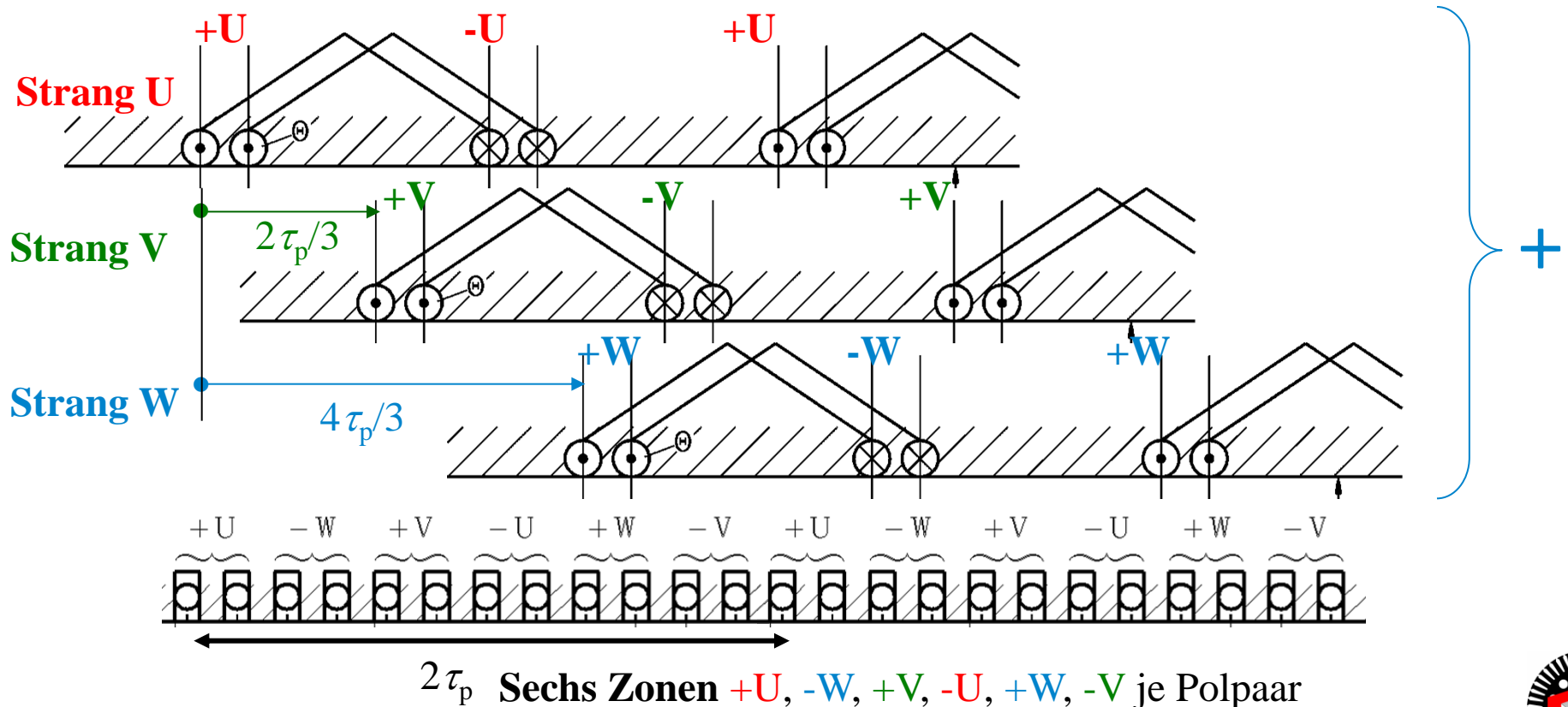
$$i_c(t) = \hat{I}_c \cdot \cos \omega t \Rightarrow B_\delta(x, t) = B_\delta(x) \cdot \cos \omega t$$

- Luftspaltfeld ändert sich auch zeitlich sinusförmig,  
behält aber **seine räumliche Form** (Verteilung längs  $x$ ) bei!
- Radiale Feldkomponente  $B_\delta(x)$  am Ort  $x$  ändert sich zwischen positiven und negativen Maximalwert.



# Sechszonen-Wicklung für das magnetische Drehfeld

- DREI Wicklungsstränge U, V, W mit Hin- und Rückleiter angeordnet = **sechs Zonen je Polpaar** (mit Bezeichnungsfolge +U, -W, +V, -U, +W, -V)
- Räumlich positive Stromrichtung je Strang so gewählt, dass sie im Strang V gegenüber U um  $2\tau_p/3$  versetzt ist, im Strang W um  $4\tau_p/3$

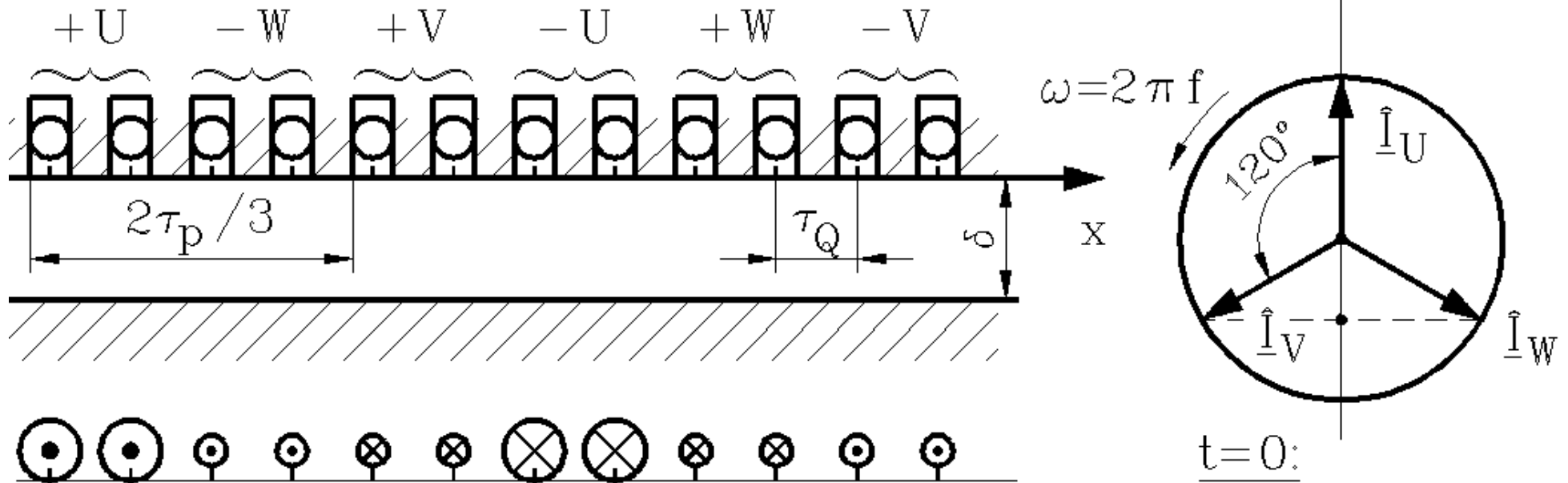


# Magnetisches Drehfeld

## Dreisträngige Wicklung (1)

**Beispiel:** Zeitliche Stromphasenfolge U – W – V

Räumliche Zonenfolge im Uhrzeigersinn U – V - W



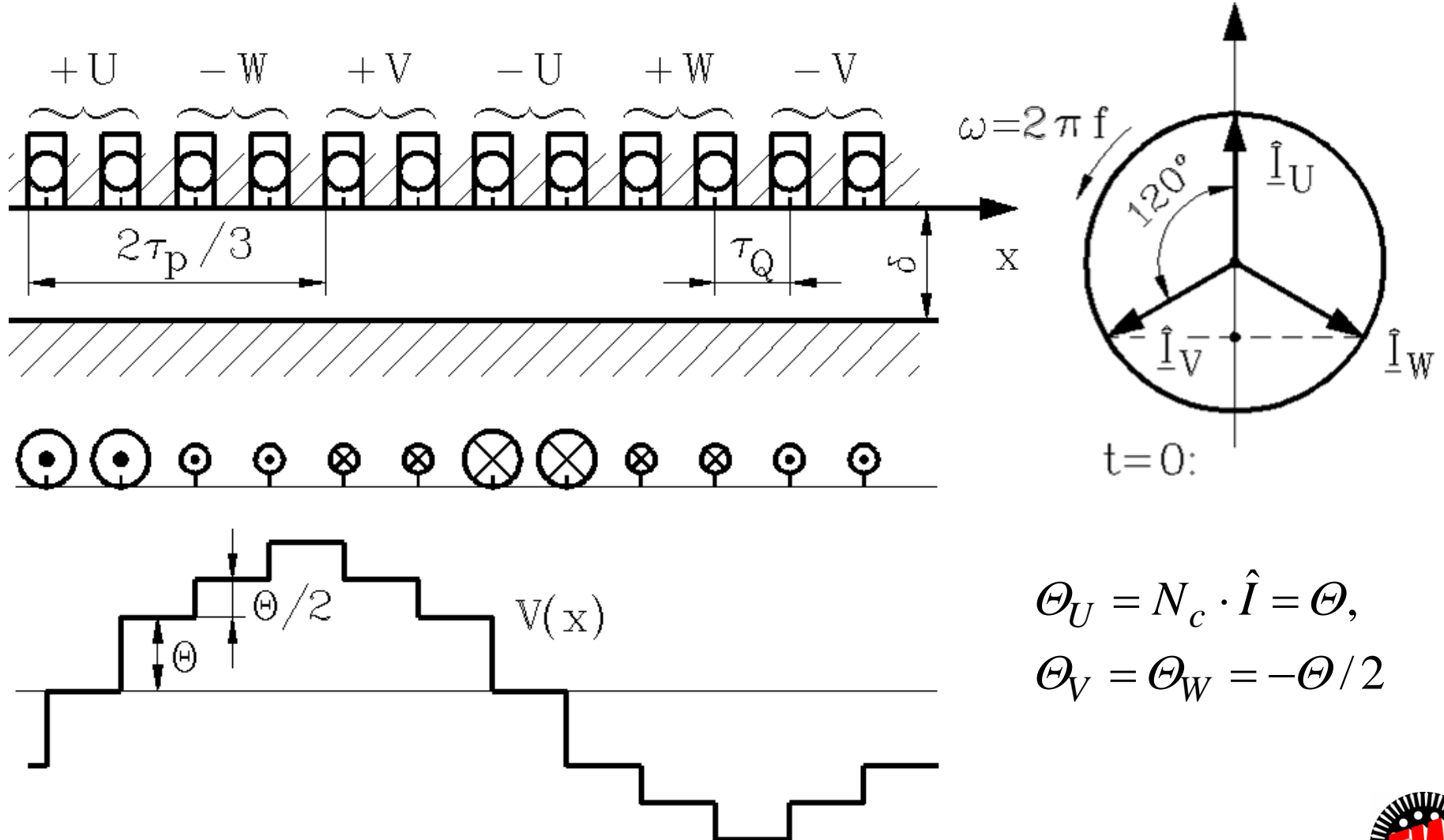
$t=0:$

$$i_U = \hat{I},$$

$$i_V = i_W = -\hat{I}/2$$

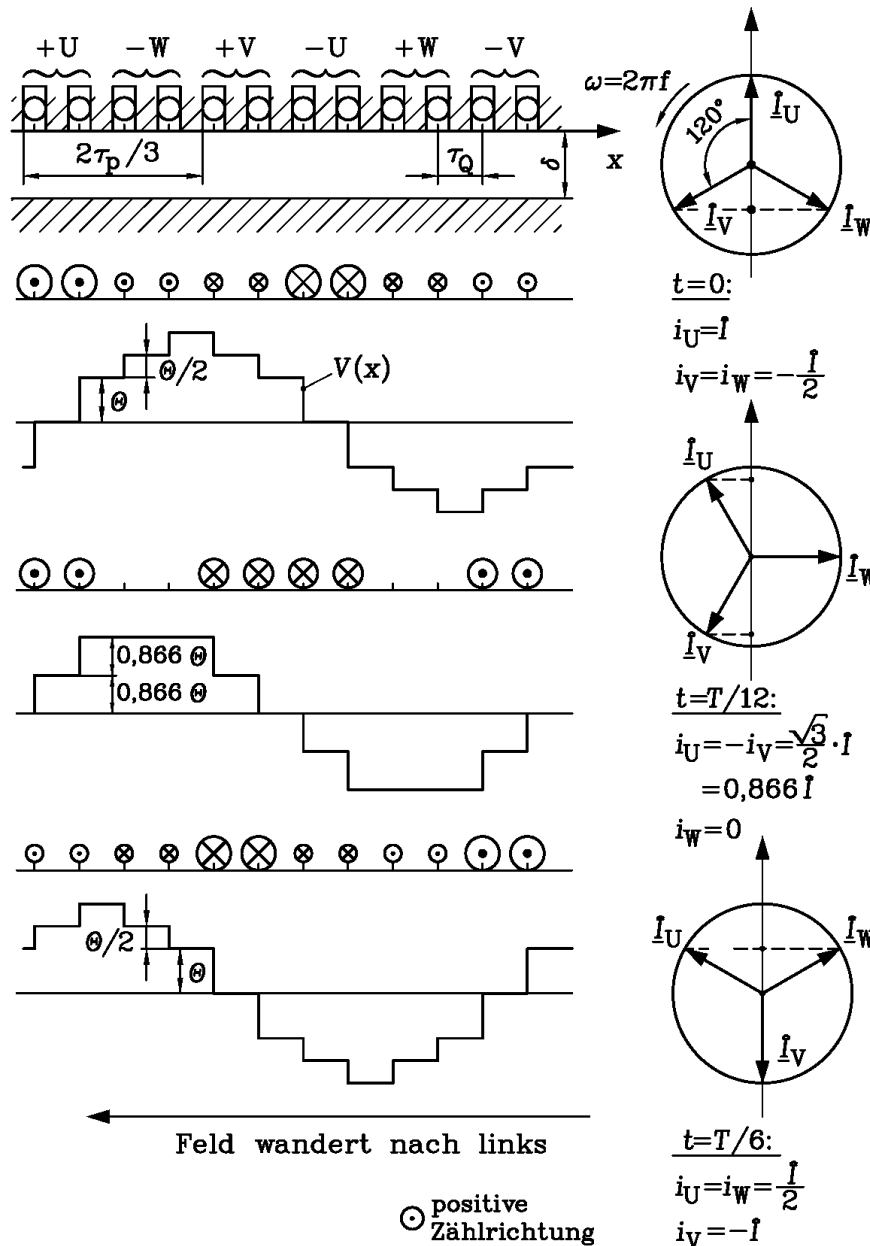
# Magnetisches Drehfeld

## Dreisträngige Wicklung (2)





# Magnetisches Drehfeld



- Mit fortschreitender Zeit wandert die Feldtreppe nach links.
- Nach der Zeit  $T$  ist die Strecke  $2\tau_p$  zurückgelegt.
- **Synchrone Geschwindigkeit**  $v_{syn}$

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

- **Synchrodrehzahl**  $n_{syn} = 1/T_{syn}$ , mit der das Drehfeld rotiert.  
Mit  $2p\tau_p = d_{si}\pi$  folgt:

$$v_{syn} = d_{si}\pi / T_{syn} = d_{si}\pi \cdot n_{syn}$$

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

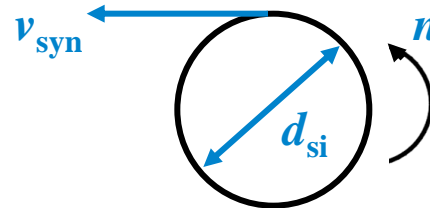
$$n_{syn} = \frac{f}{p}$$



Wanderfeld: Wandergeschwindigkeit:

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

Synchrone Geschwindigkeit



Drehfeld:

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

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

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

Synchrondrehzahl

# Drehfrequenz $n_{\text{syn}}$ des Drehfelds

- **Beispiel:**

a) **Zweipolig**  $2p = 2$ ,  $f = 50$  Hz:

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

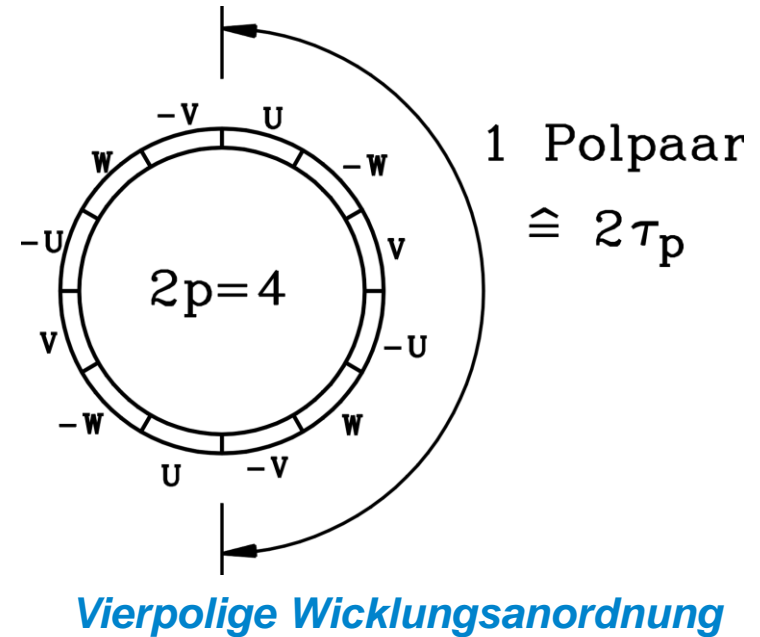
b) **Vierpolig**  $2p = 4$ ,  $f = 50$  Hz:

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

- Synchrondrehzahl folgt streng der Frequenz der Wicklungsströme:

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

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

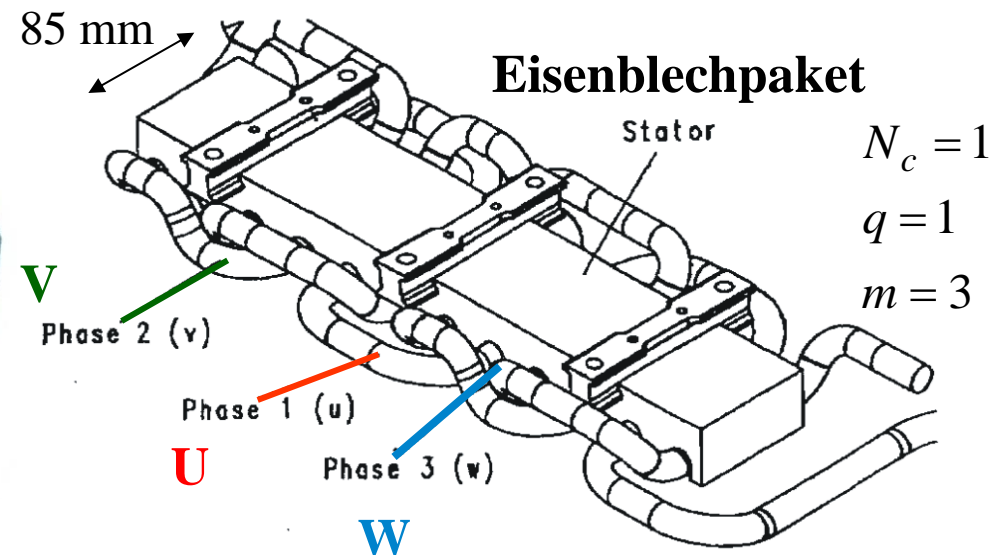
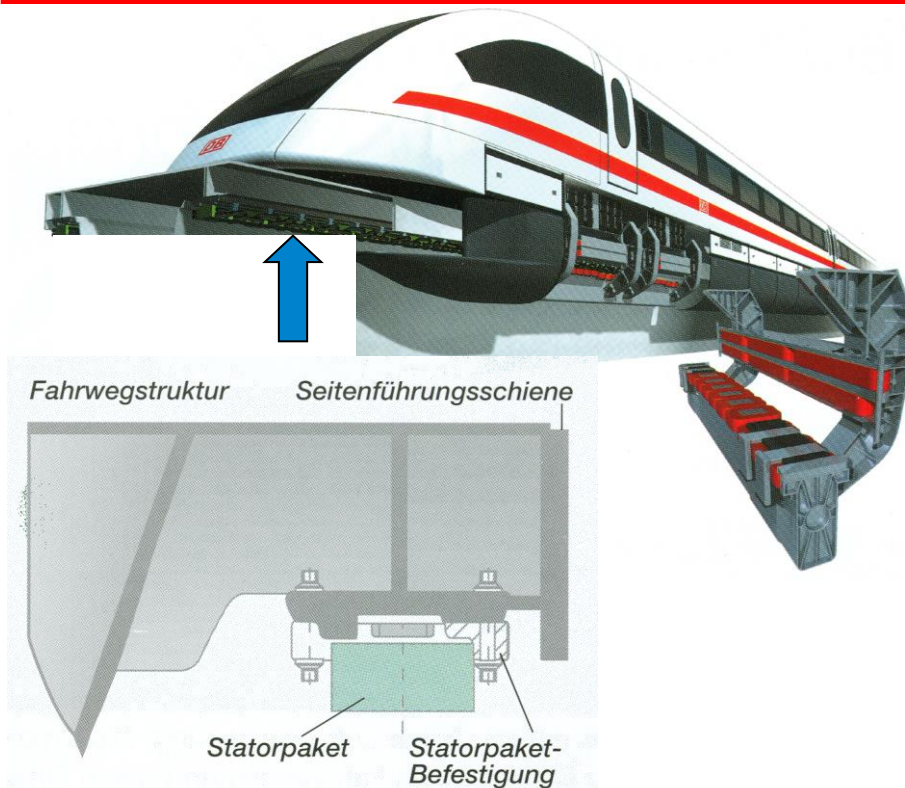


# Linearmaschinen

- **Geradlinig bewegter Läufer**, z. B. Antrieb einer Magnetschwebebahn
- Reisegeschwindigkeit der *TRANSRAPID*-Magnetschwebebahn

$\tau_p = 258 \text{ mm}$ ,  $f = 270 \text{ Hz}$  (Ausgangsfrequenz des speisenden Umrichters)

$$v_{syn} = 2f\tau_p = 2 \cdot 270 \cdot 0.258 = \underline{139.3 \text{ m/s}} = 501.6 \text{ km/h}$$



Quelle:  
Thyssen Krupp & Siemens, Deutschland

- **Rotierender Läufer (= Rotor) bei  $f = 50$  Hz:**

Zweipolige Maschine ( $2p = 2$ ): Drehfeld dreht mit  $n_{syn} = 50$  Hz = 3000/min,

Sechzigpoliger Wasserkraftgenerator ( $2p = 60$ ):  $n_{syn} =$  100/min

	$2p$	-	2	4	6	8	10	12	14
$f = 50$ Hz	$n_{syn}$	1/min	3000	1500	1000	750	600	500	428.6
$f = 60$ Hz	$n_{syn}$	1/min	3600	1800	1200	900	720	600	514.2

- **Bei 60 Hz drehen Drehfelder um 20% schneller als bei 50 Hz.**

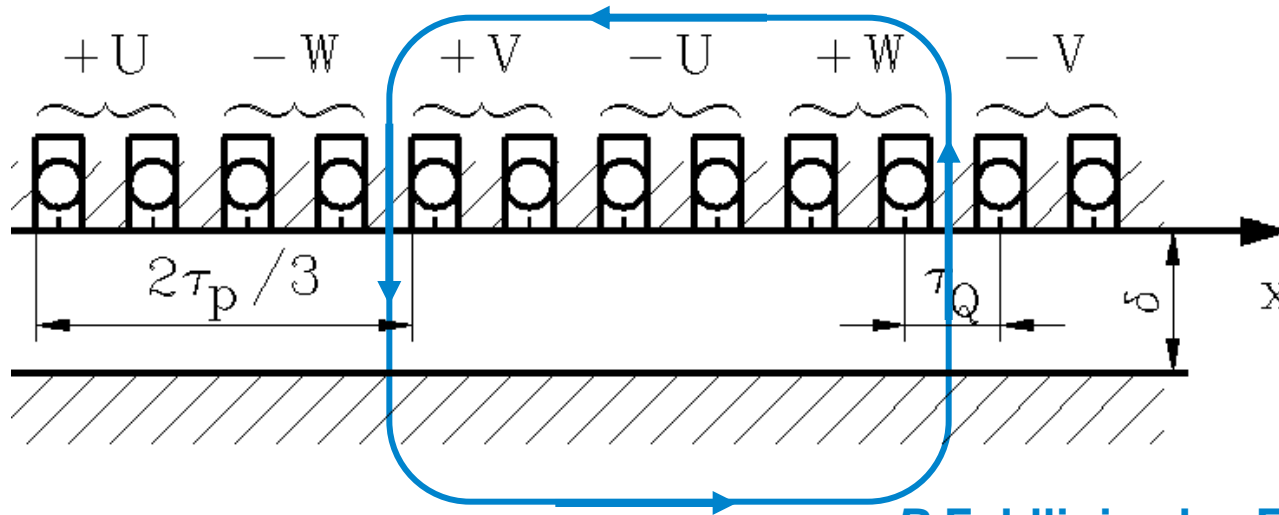
⇒ Bei gleichem Drehmoment  $M$  steigt Leistung  $P$  um 20%.

- **Frequenz zu hoch** ⇒ Ummagnetisierungsverluste zu hoch,

**Frequenz zu niedrig** ⇒ zu wenig Leistung;

Kompromiss: Wahl der Netzfrequenz 50 Hz (*Europa*) bzw. 60 Hz (z. B. *USA*)

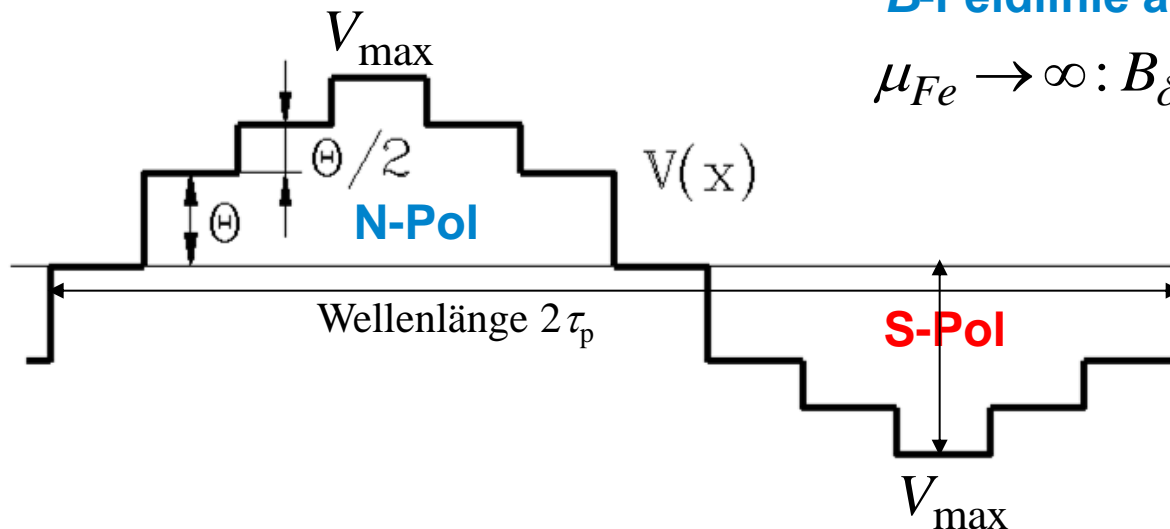
# Ständer-Feldwelle eines Polpaares



**Beispiel:**  
 $m = 3, q = 2$

**B-Feldlinie als „Feldwirbel“**

$$\mu_{Fe} \rightarrow \infty : B_{\delta, \max} = \mu_0 \cdot V_{\max} / \delta$$



**„Feldtreppe“:**  
Im Idealfall eine Sinuskurve:  
 $m \rightarrow \infty, q \rightarrow \infty$

## Zusammenfassung: Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

- Wicklung liegt in Nuten
- Eisenpermeabilität  $\mu_{Fe}$  unendlich groß angenommen
- Luftspaltweite  $\delta$  konstant und klein gegenüber Hauptabmessungen
- $H$ -Feld nur im Luftspalt, Definition der magnetischen Spannung  $V$
- Vernachlässigte Nutöffnungen
- Treppenförmige Verteilung der Luftspaltflussdichte-Radialkomponente
- Wanderwellengeschwindigkeit: Frequenz x Wellenlänge
- Synchrondrehzahl: Frequenz / Polpaarzahl

## 2. Drehfelder in elektrischen Maschinen

2.1 Grundprinzipien der Magnetfeldberechnung

2.2 Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen

2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

2.4 Wicklungsanordnungen



# Bezeichnungsweisen bei Wicklungen

$p$ : Polpaarzahl

$m$  (= 3): Strangzahl (Phasenzahl): U-X, V-Y, W-Z, in **Stern** oder **Dreieck** schaltbar

$Q$ : Nutzahl

$q$ : Lochzahl (= Nuten pro Pol und Strang) = Anzahl der Spulen je Gruppe

$N_c$ : Windungszahl je Spule (c: coil (engl. für Spule))

$N$ : Windungszahl je Strang (= Wicklungsstrang) z. B. zw. U und X

$a$ : Anzahl der parallelen Zweige je Strang

$W$ : Spulenweite

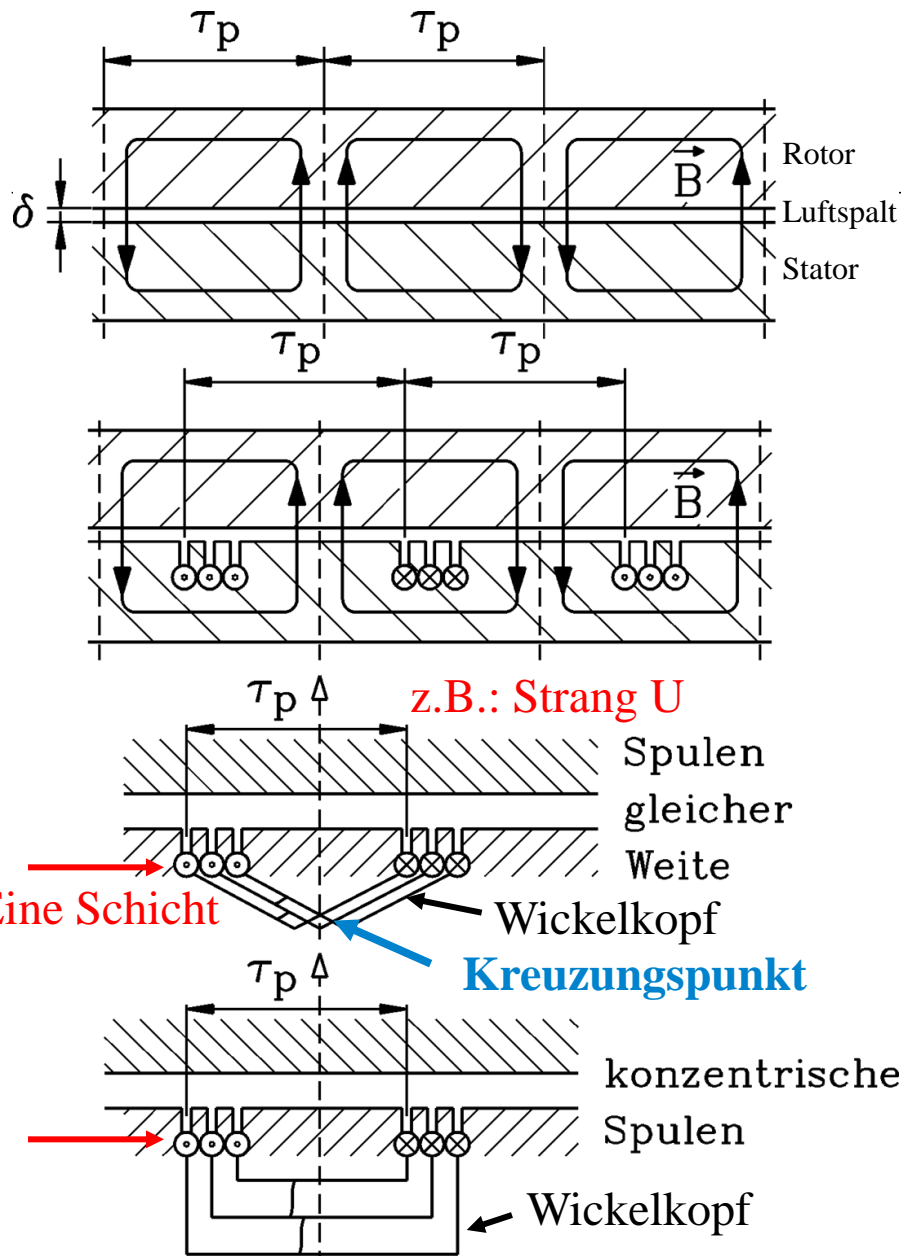
$d_{si}$ : Stator-Innendurchmesser („Bohrung“)

$\tau_p$ : Polteilung =  $d_{si}\pi/(2p)$

$\tau_Q$ : Nutteilung =  $d_{si}\pi/Q$



# Einschicht- wicklungen



- Je Nut liegt nur die Spule eines Strangs
- Ausführung als:
  - a) **Spulen mit gleicher Weite:**  $W = \tau_p$
  - b) **Konzentrische Spulen** mit unterschiedlicher Weite  $W$

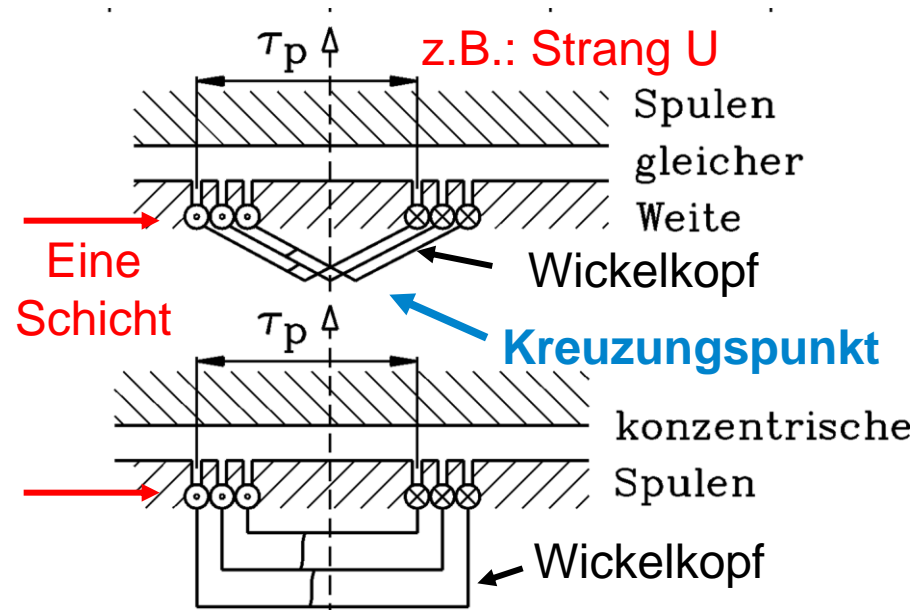
## Beispiel:

Dreisträngige, 12-polige Maschine mit  $q = 3$   
Spulen je Gruppe:

$$\text{Nutzahl: } Q = m \cdot 2p \cdot q = 3 \cdot 12 \cdot 3 = \underline{108}$$



# Problem bei Einschichtwicklungen



## Problem bei Einschichtwicklungen:

Im Wickelkopf Kreuzungspunkte, da alle Spulen in der gleichen Ebene liegen.

Abhilfe: Konzentrische Spulen

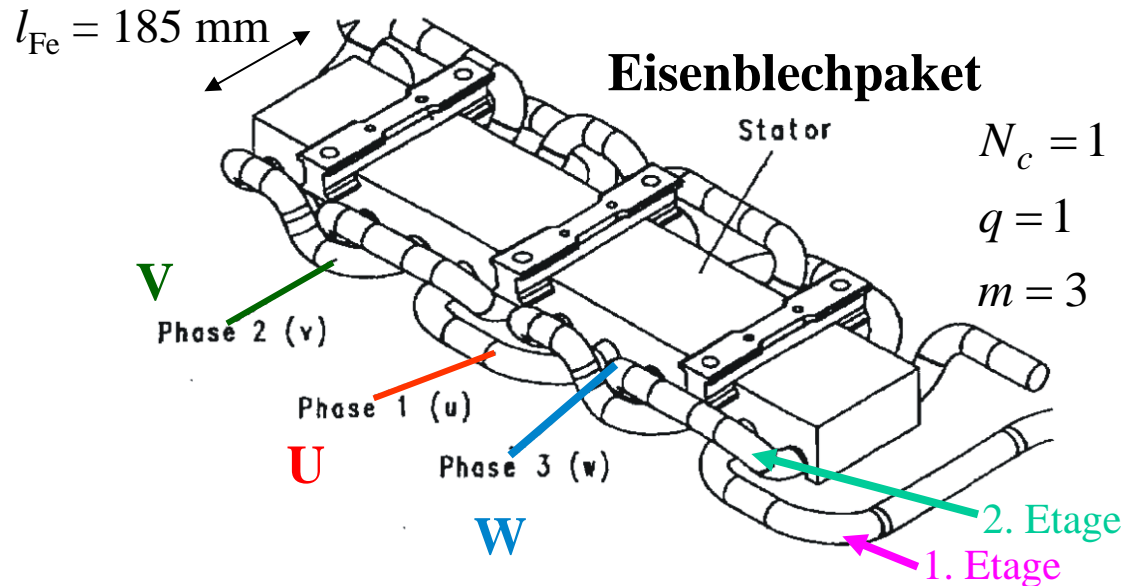
Aber: Kreuzungen zw. Phasen U, V, W

Daher: Stirnverbindungen von zwei Phasen in zweite Ebene hoch gebogen:

**"Zwei-Etagen-Wicklung"**

# Zweietagen-Einschichtwicklungen

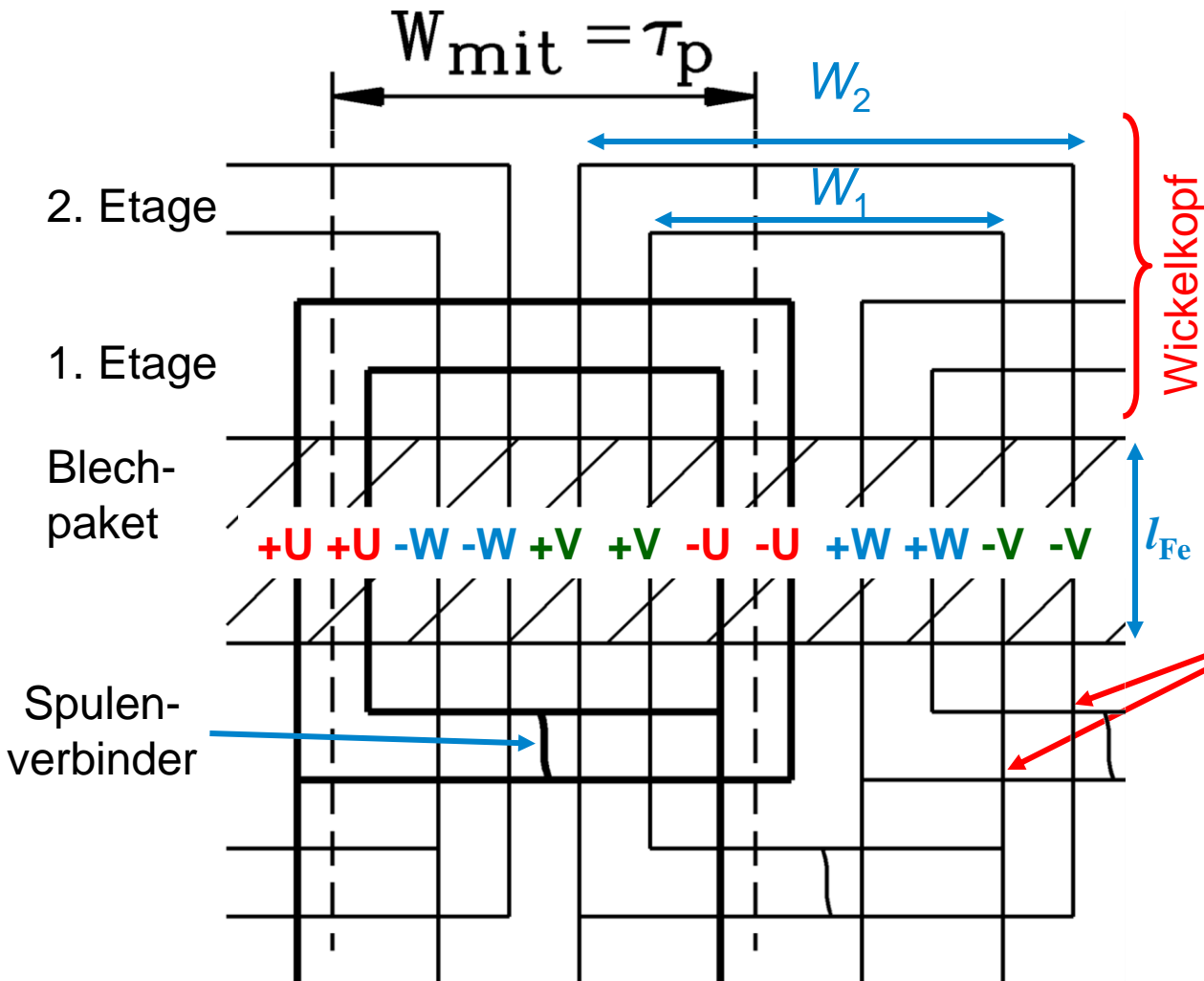
## Beispiel: TRANSRAPID-Longstatorwicklung



Quelle: Thyssen Krupp & Siemens, Deutschland

Stirnverbindungen von zwei Phasen in zweite Ebene hoch gebogen: **"Zwei-Etagen-Wicklung"**

# Beispiel: Einschichtwicklung: Ein Polpaar



Abgewickelte Darstellung,  
 $m = 3, q = 2$ .

## Konzentrische Spulen =

= Spulen unterschiedlicher Weite:

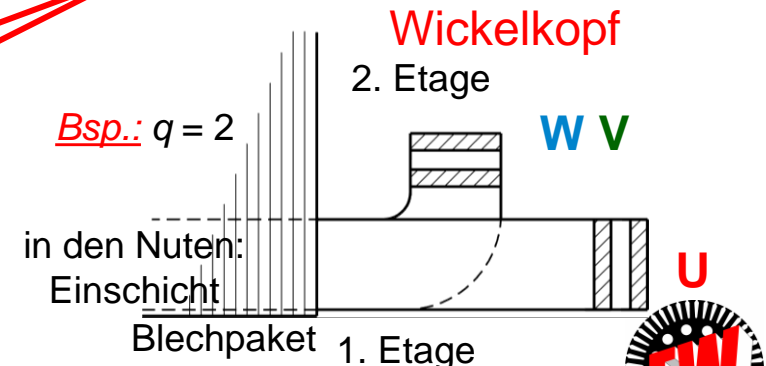
$$W_1 < W_2$$

- Mittlere Spulenweite:

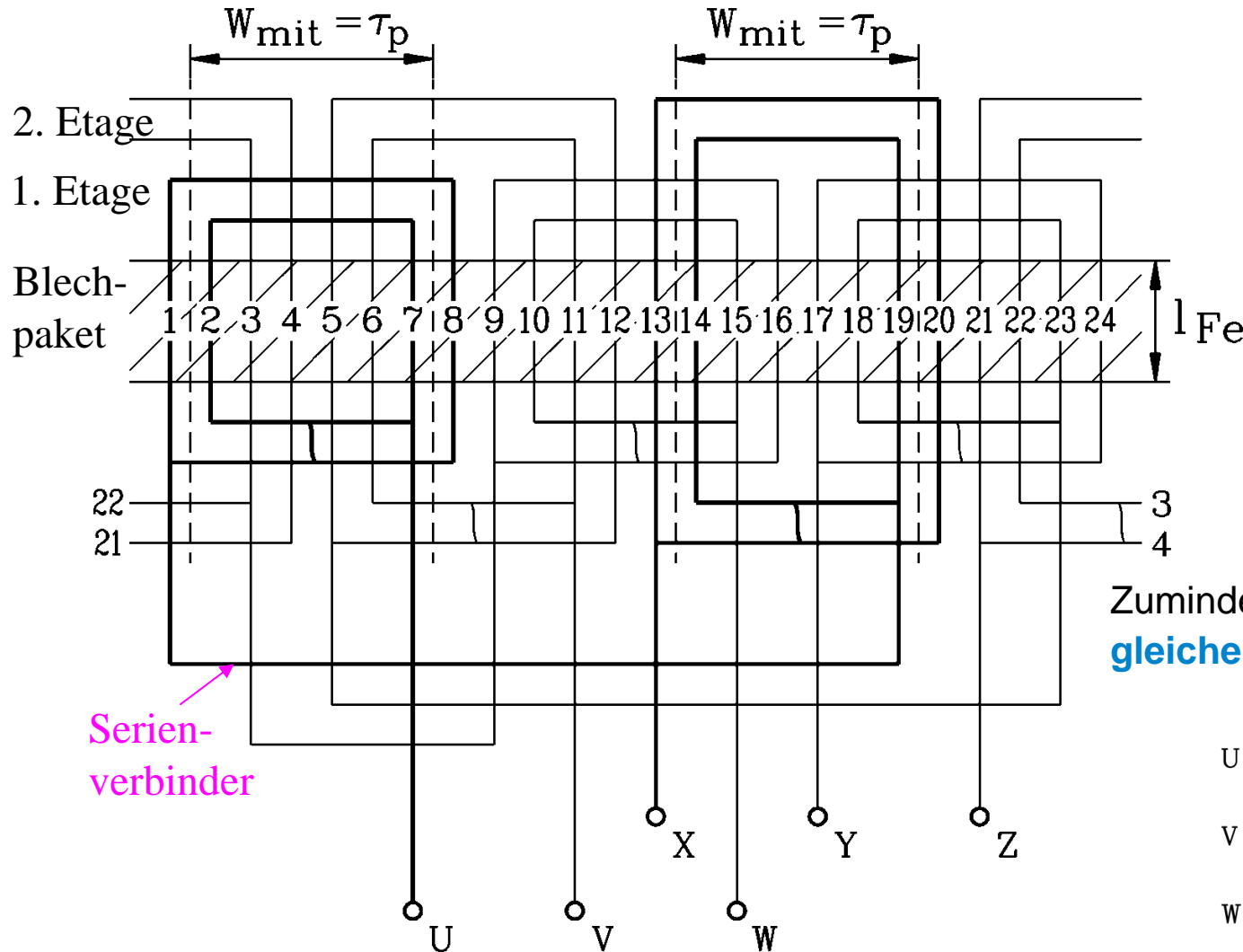
$$W_{mit} = (W_1 + W_2)/2$$

-  $W_{mit} =$  Polteilung  $\tau_p$

**Problem:** Kreuzungspunkte,  
daher: Hochbiegen



# Einschichtwicklung mit kurzen und langen Spulen



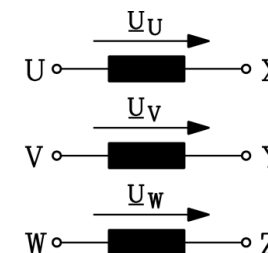
Abgewickelte Darstellung,  
vierpolige Maschine:  $2p = 4$ ,  
 $m = 3$ ,  $q = 2$ ,  $Q = 24$

Ausführung mit  
**konzentrischen Spulen**

Spulen mit den **längeren**  
Stirnverbindungen müssen  
**hoch** gebogen werden

(= „2. Etage“). Dann aber:

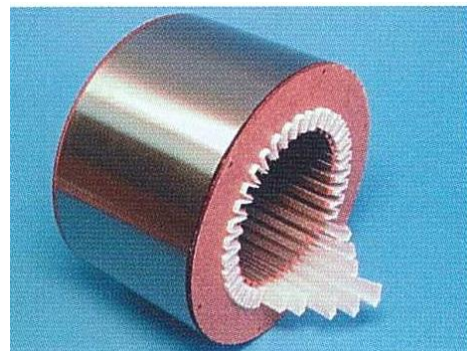
Zumindest vier Pole erforderlich für  
**gleiche Gesamt-Windungslänge/Strang.**



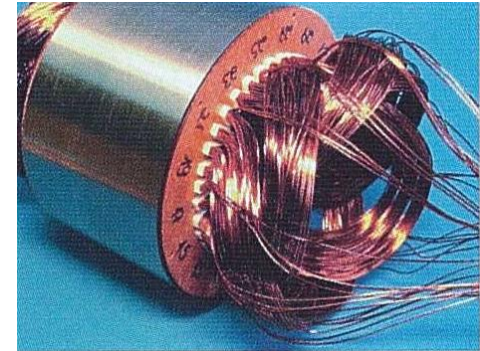
# Statorfertigung mit Niederspannungs-Einschichtwicklung ( $U_N \leq 1\text{kV}$ )



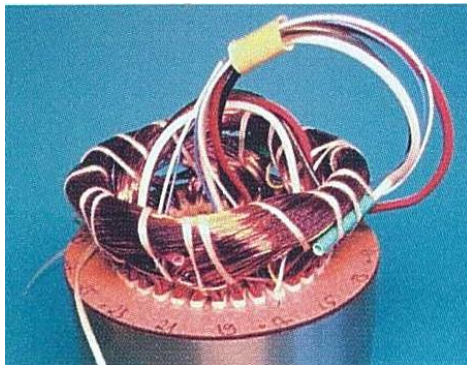
Elektrisch isolierte Fe-Si-Bleche bilden das Statorblechpaket



Einlegen der Nutisolation, z. B.: aromatische Polyamide



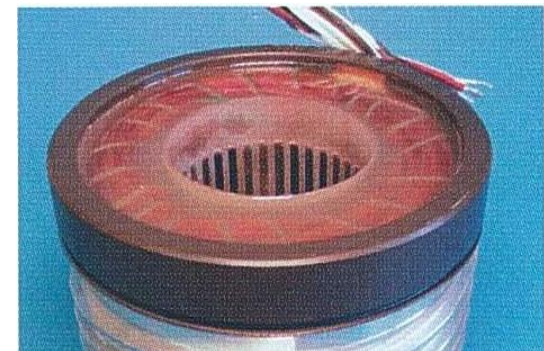
Einlegen der lackisolierten Kupfer-Runddrahtspulen



Schalten der Spulen zu drei Strängen U, V, W



Formen und Bandagieren der Wickelköpfe

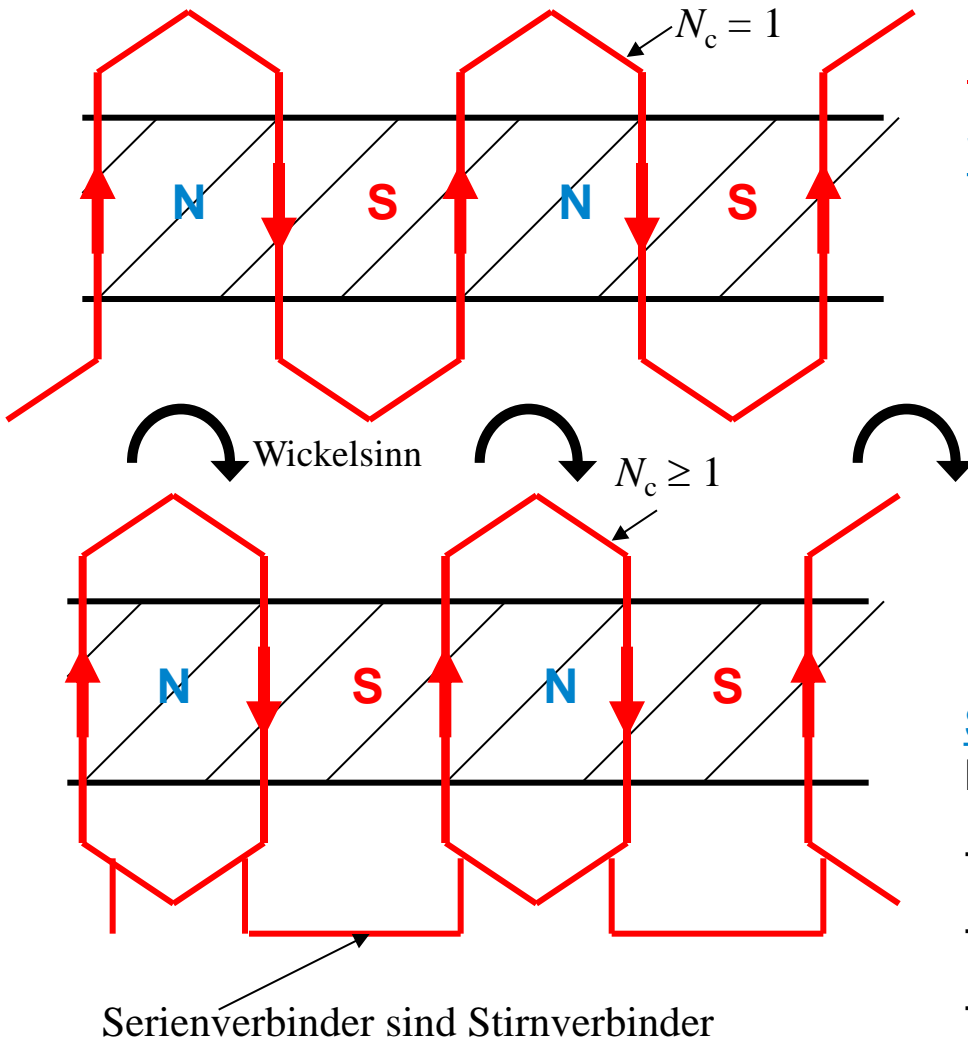


Hochwertiger Epoxidharz-Verguss des kompletten Stators im Vakuum

Zweipolige, dreisträngige Wicklung, 36 Nuten

Quelle: Fa. Levitec,  
Lahnau, Deutschland

# Wellen- versus Schleifenwicklung



Beispiel: Einschichtwicklung,  $q = 1$

Wellenwicklung: Für einwindige Spulen ( $N_c = 1$ )

Dadurch keine Serienverbinder = Kupferersparnis

Halbe Windung  
 $N_c = \frac{1}{2}$  „Stab“

Einlegen der  
Wellenwicklung in die  
Nuten als verlötete  
Stabwicklung

Schleifenwicklung:

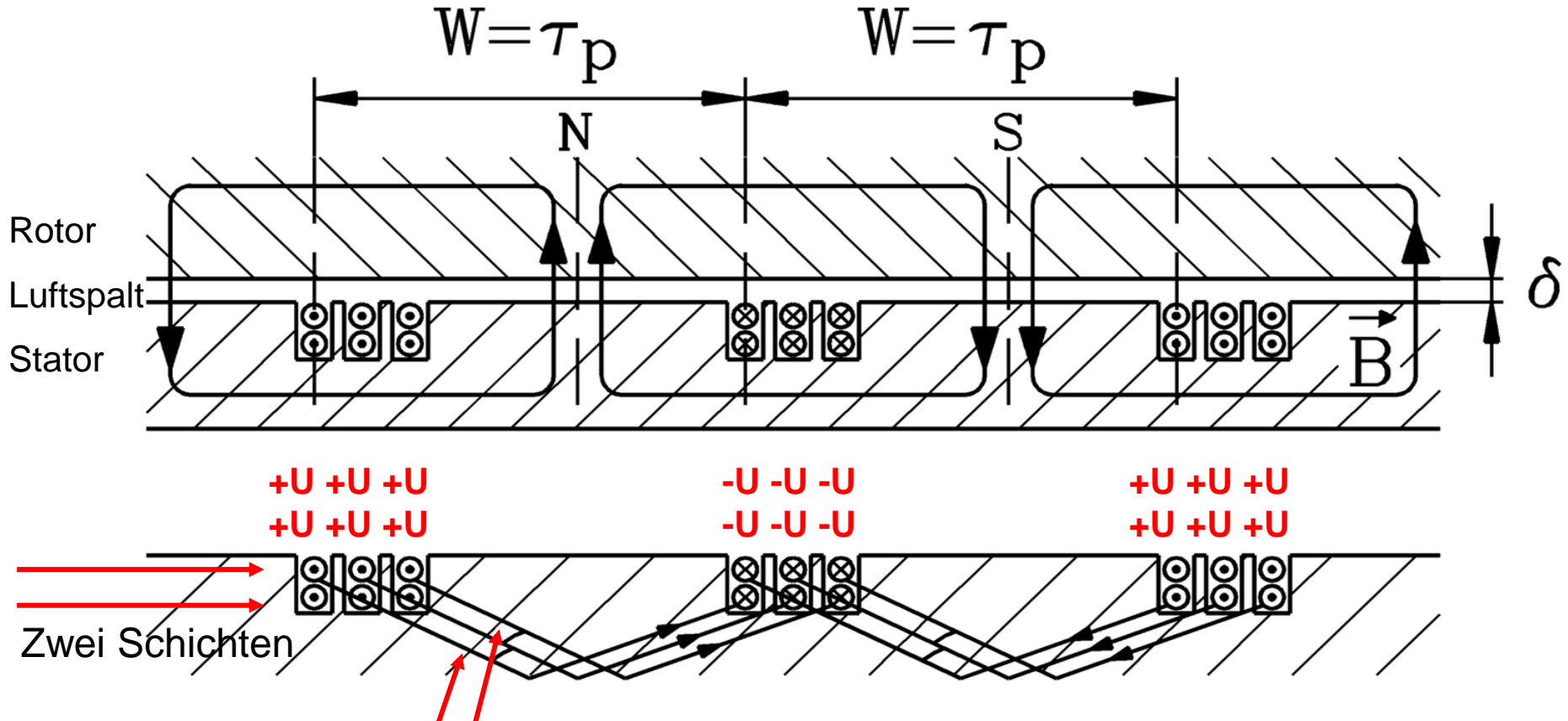
Für ein- und mehrwindige Spulen ( $N_c \geq 1$ )

- mehr Aufwand wegen Serienverbinder
- mehr Leitermaterial nötig
- höhere Stromwärmeverluste



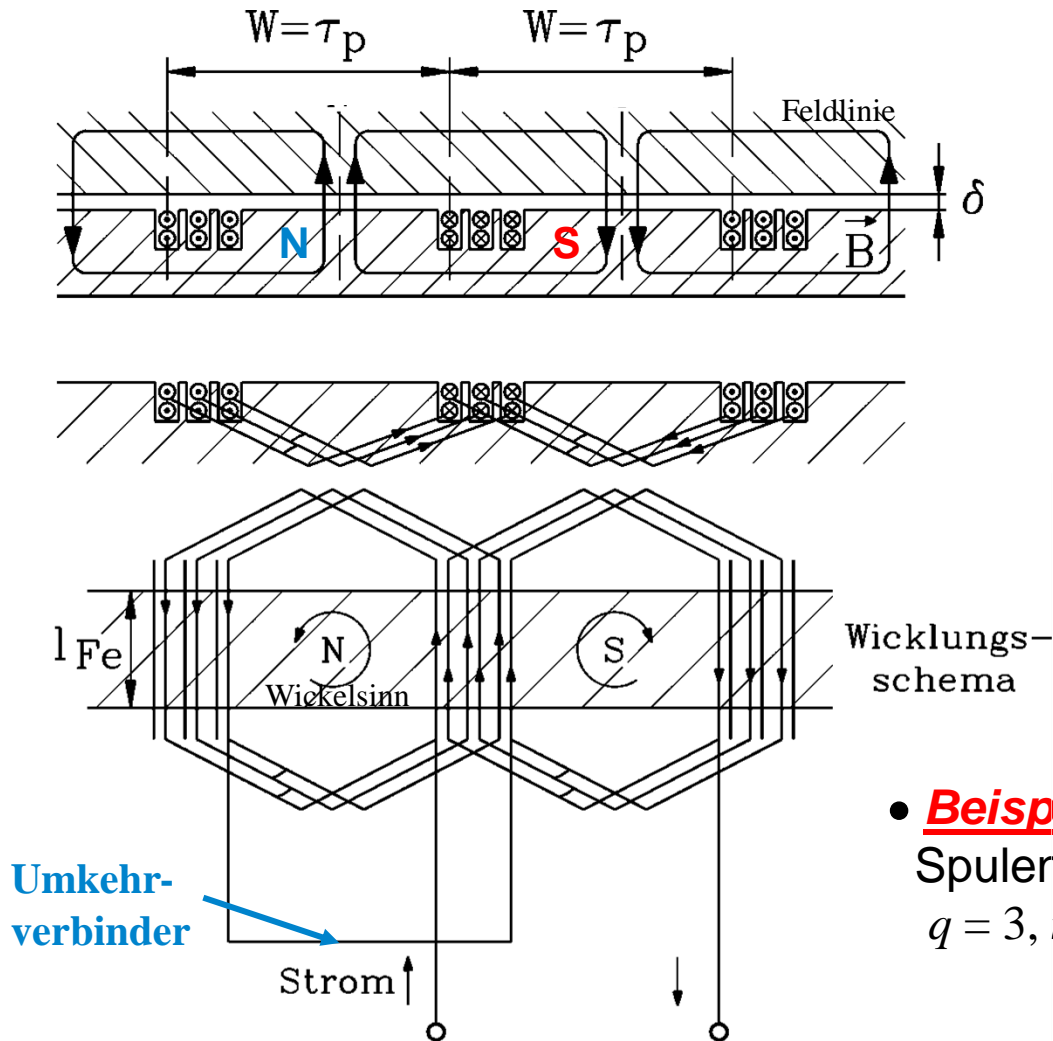
# Zweischichtwicklungen: Spulen gleicher Weite

Beispiel:  $q = 3, m = 3$



**Keine** Kreuzungspunkte, daher: Alle Spulen identisch ausgeführt

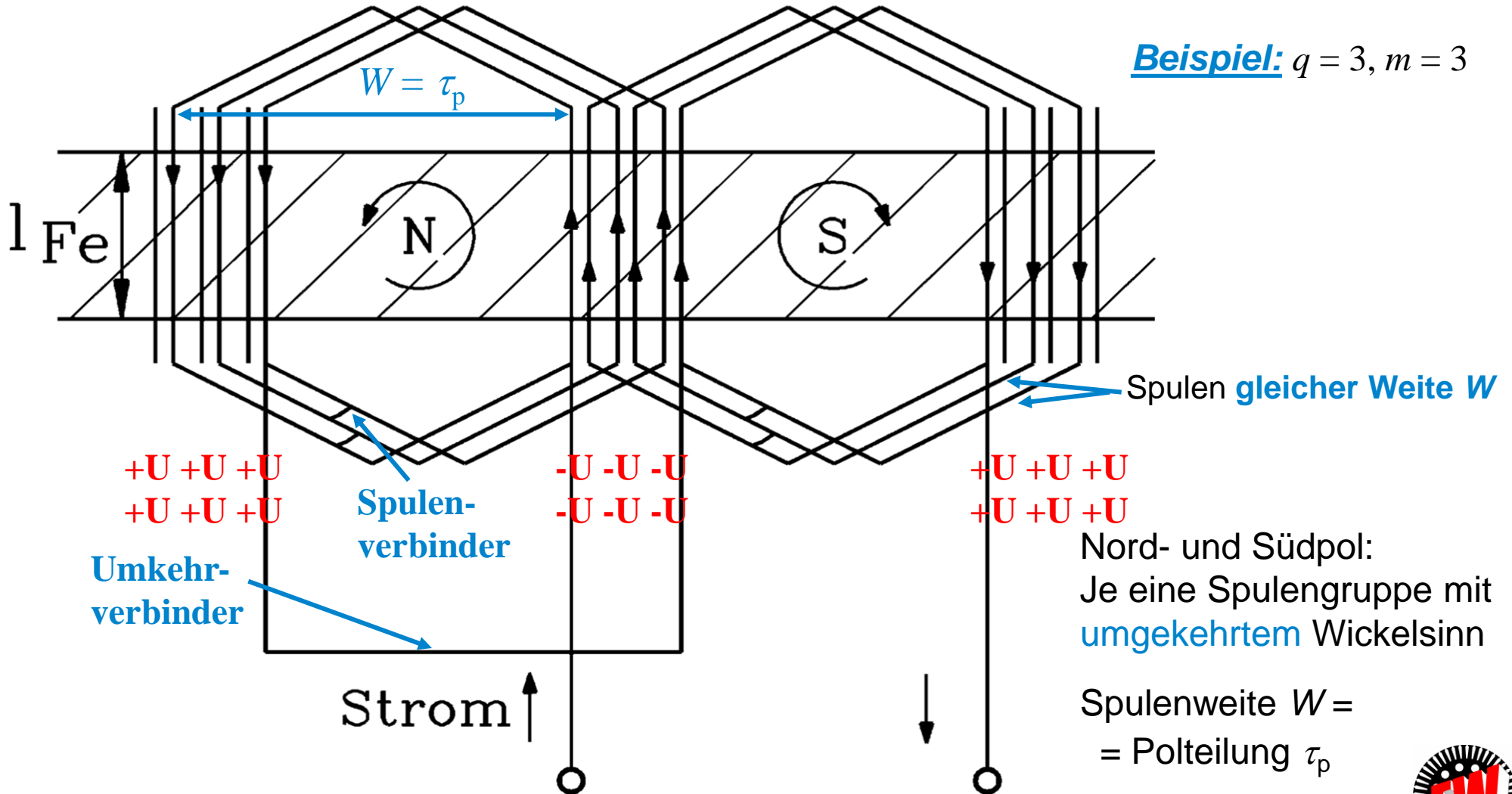
# Zweischichtwicklungen



- Bei größeren Leistungen ca. ab 500 kW: Spulenleiter aus **Profilkupfer**
- Spulen **gleicher Weite  $W$**
- **Zweischichtwicklung:**  
Je Nut zwei Spulenseiten übereinander
- Nord- und Südpol werden von **zwei** Spulengruppen erzeugt
- Wickelsinn der Spulengruppe im S-Pol-Bereich umgekehrt zu jener im N-Pol-Bereich: **Umkehrverbinder**

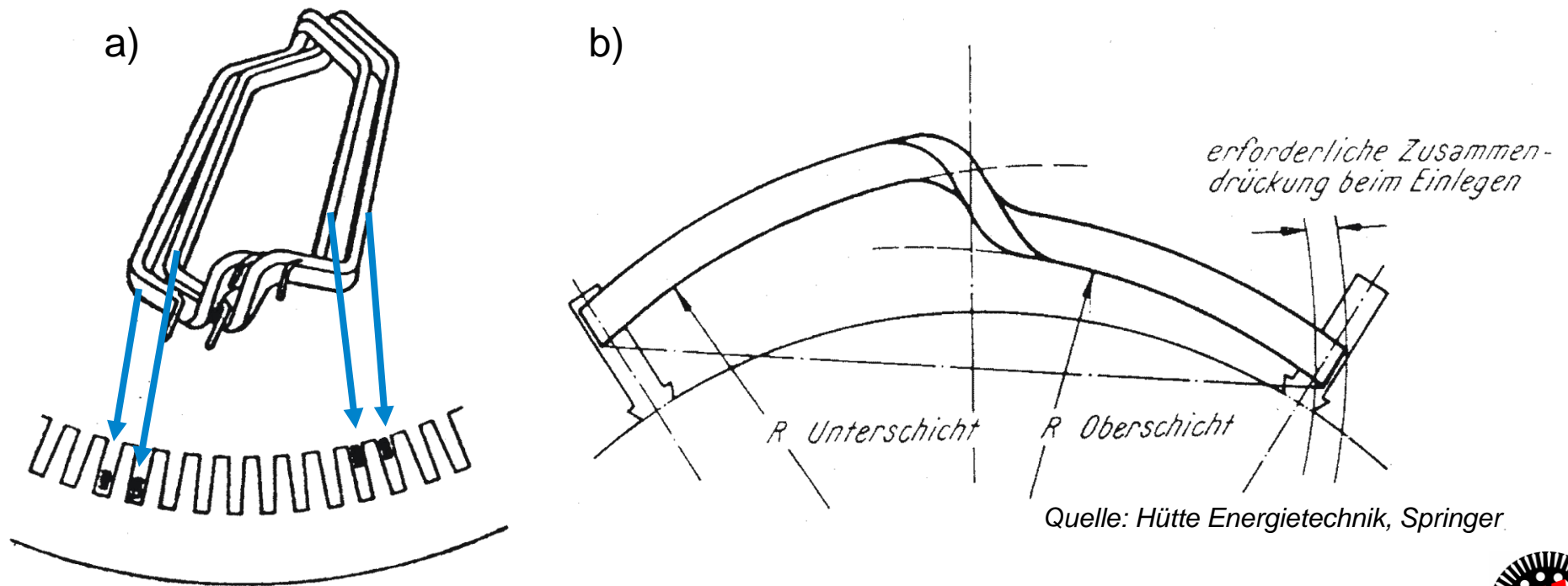
- **Beispiel:** Für vier Pole ( $2p = 4$ ) sind vier Spulengruppen pro Strang erforderlich  
 $q = 3, m = 3, Q = 2p \cdot q \cdot m = \underline{36}$

# Zweischichtwicklungen: Ein Strang dargestellt



# Wickelkopf von Zweischichtwicklungen

- a) Zwei Formspulen vor dem Einlegen in die Nuten des Blechpakets:  
Es gibt **keine** Kreuzungspunkte im Wickelkopf.
- b) In die Nuten eingelegte Formspule aus Profilkupfer:  
Deutlich **höherer Fertigungsaufwand** als bei Runddraht-Einschichtwicklung,  
daher vorzugsweise für **Hochspannungswicklungen ( $U_N > 1 \text{ kV}$ )** bis ca. 30 kV verwendet.



# Vorgeformte Hochspannungs-Statorspule mit $N_c$ Windungen für eine Zweischichtwicklung

Spule aus lackisolierten Profilkupferdrähten, mit Glimmer-Glasfaser-Band umwickelt, im Vakuum mit Epoxidharz getränkt

Spulenseite, liegt in der Nut

Halbleitender Anti-Korona-Anstrich (grau)

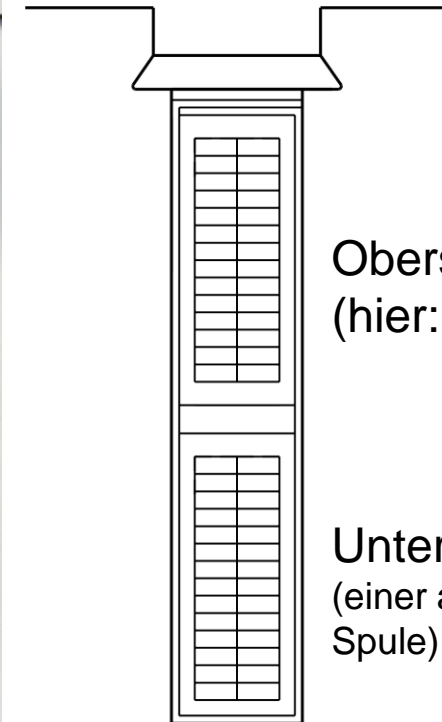
Spulenden = Anschlüsse

Quelle: Andritz Hydro, Austria



Wickelkopf

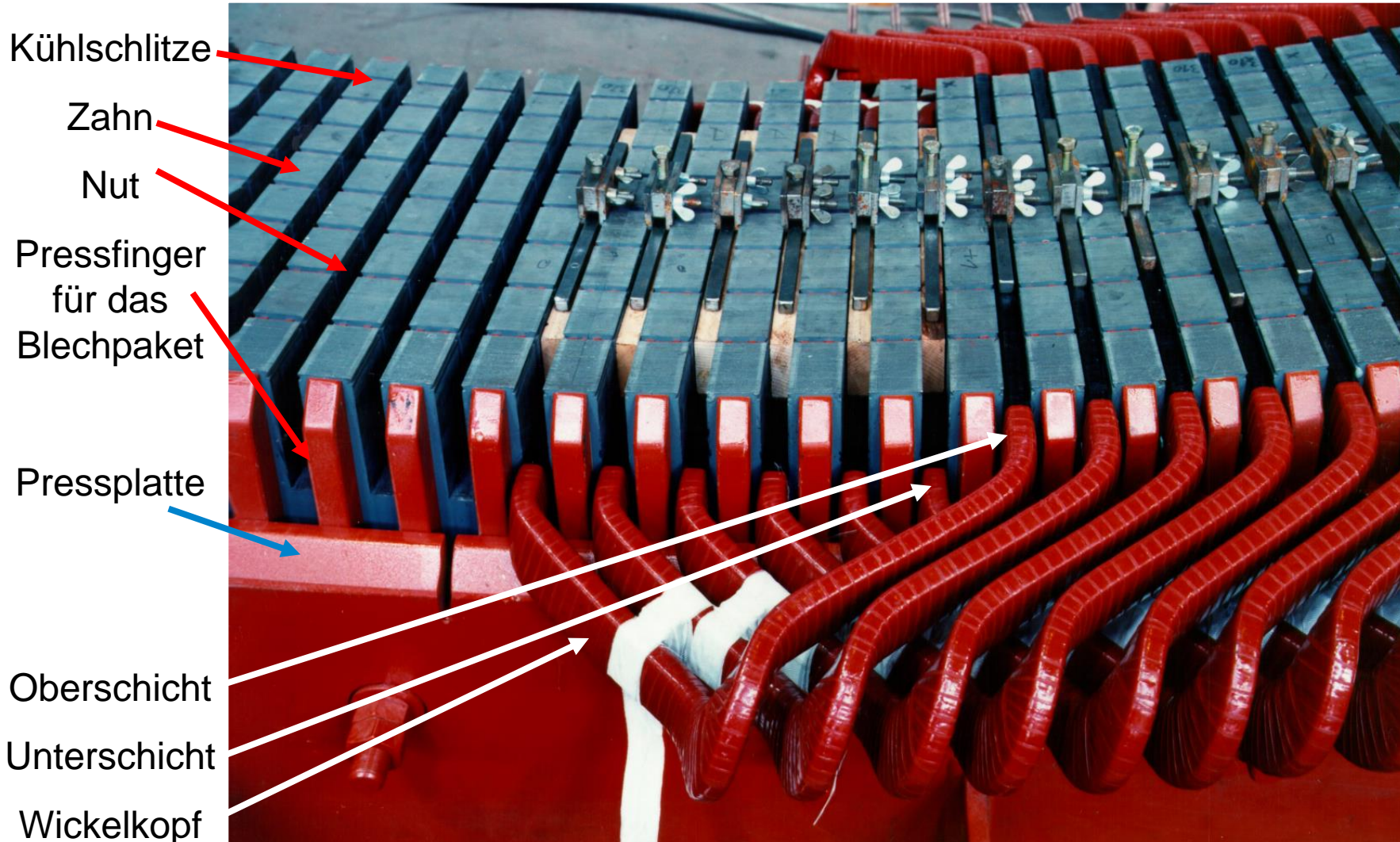
Nut



# Einlegen von vorgeformten Statorspulen in die Nuten eines hochpoligen Wasserkraftgenerators



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle:  
Andritz Hydro,  
Austria



# Sehnung von Spulen $W < \tau_p$ (1)

- Bei **Zweischichtwicklung**: **Gesehnte Spulenausführung**  $W < \tau_p$  möglich
- **Sehnung** = Verkürzung der Spulenweite  $W$  in Nutteilungseinheiten  $S$

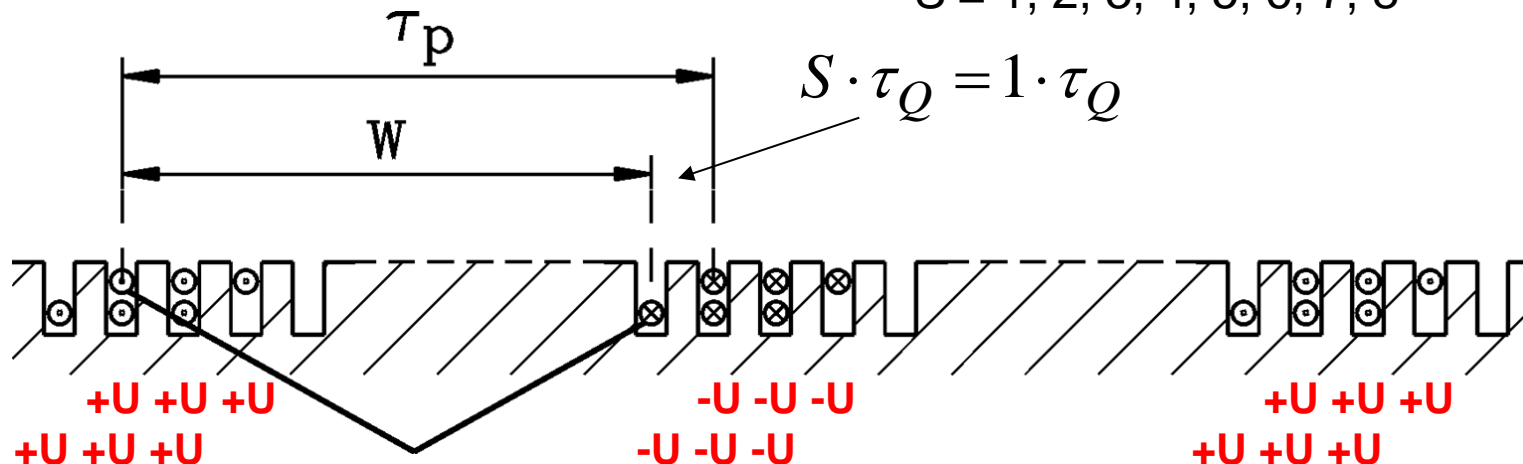
$$W = \tau_p \cdot \frac{m \cdot q - S}{m \cdot q} = \tau_p \cdot \frac{Y_Q}{m \cdot q}$$

$S$  ganzzahlig

- **Beispiel:**

$m = 3, q = 3, S = 1, Y_Q = 8, W/\tau_p = 8/9$

Sehnung ist möglich für  $S < m \cdot q = 3 \cdot 3 = 9$ :  
 $S = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$

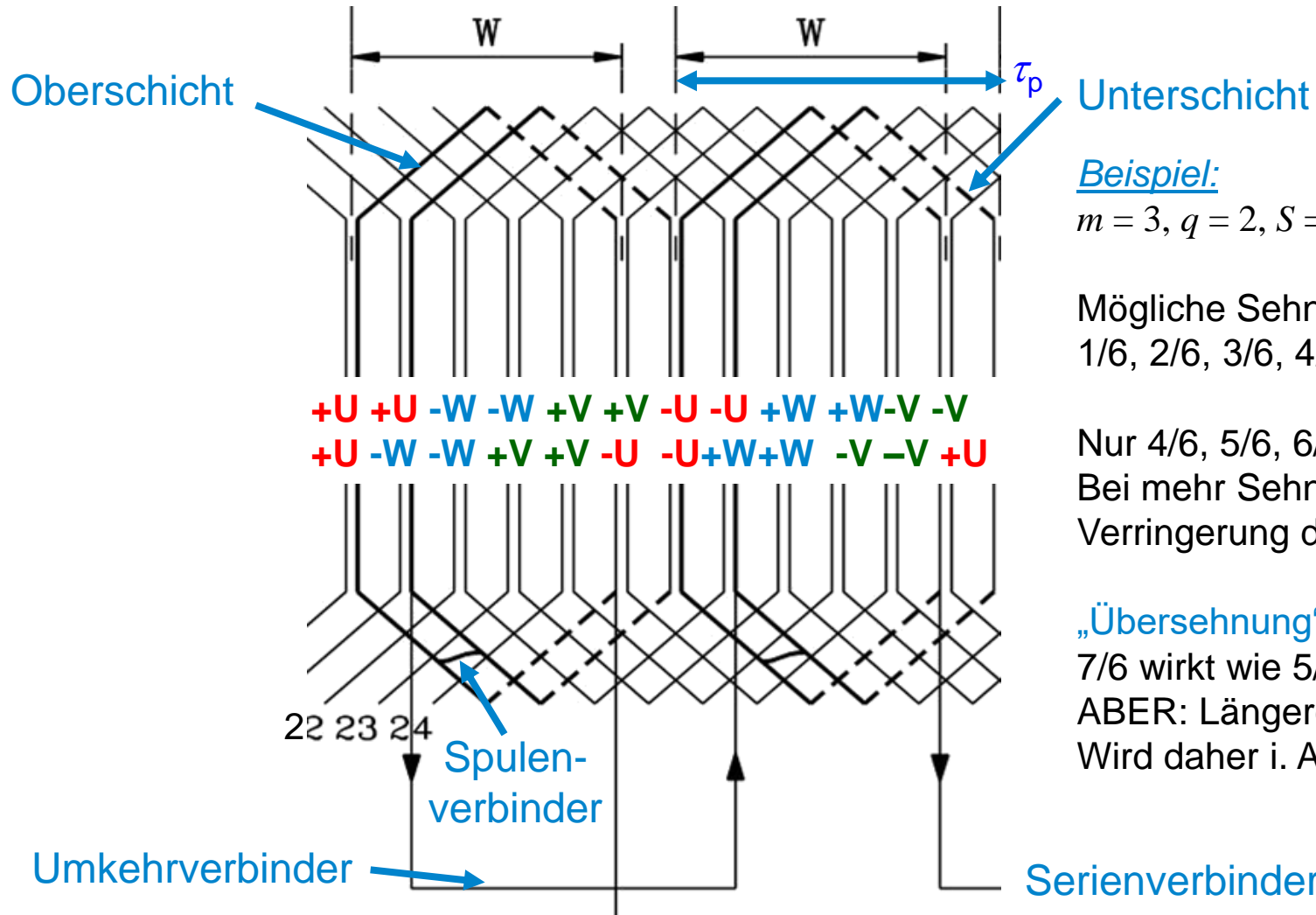


# Sehnung von Spulen $W < \tau_p$ (2)

- Bessere **Anpassung** der "Feldtreppen"-Kurve an erwünschte Sinusform
- **Kürzere** Wickelköpfe = geringeres Leitervolumen,  
kleinerer *ohm'scher* Widerstand =  
= geringere Stromwärmeverluste,
- ABER: Etwas **geringere** Feldamplitude  $B_{\delta, \max}$  = etwas kleinerer Magnetfluss/Pol
- Optimale Sehnung = minimale Abweichung der Feldtreppe von der Sinusform  
(bei gegebenem  $m = 3$ ,  $q$ ):  **$W/\tau_p = 0.8$**



# Gesehnte Zweischicht-Drehstromwicklung



Beispiel:

$$m = 3, q = 2, S = 1, W/\tau_p = 5/6$$

Mögliche Sehnungen:

1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6, 6/6, 7/6, ....

Nur 4/6, 5/6, 6/6 sinnvoll!

Bei mehr Sehnung zu starke  
Verringerung des Pol-Flusses  $\Phi$

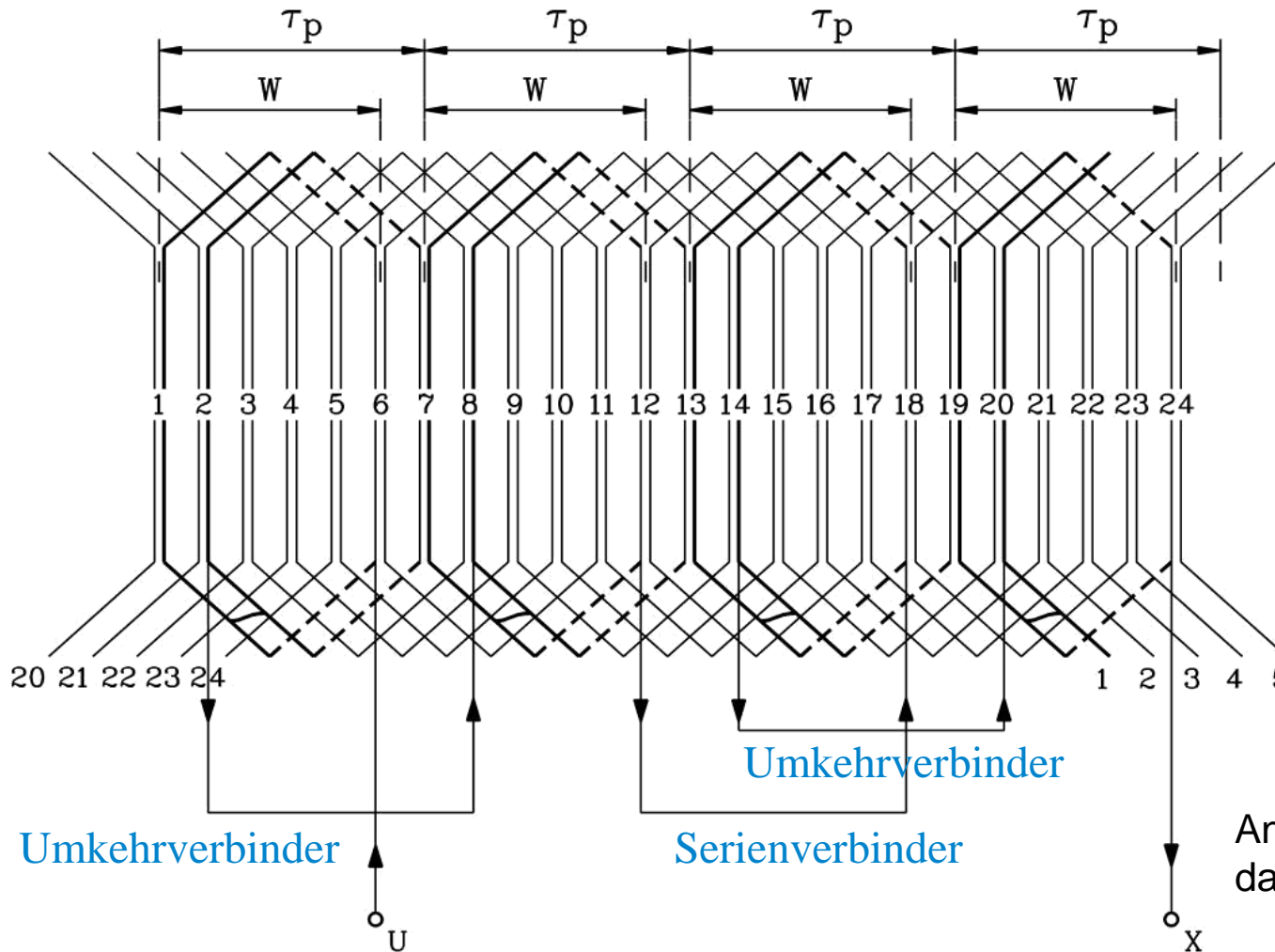
„Übersehnung“:  $W/\tau_p > 1$ , z. B.:

7/6 wirkt wie 5/6,

ABER: Längerer Wickelkopf!

Wird daher i. A. nicht ausgeführt!

# Gesehnte Zweischicht-Drehstromwicklung

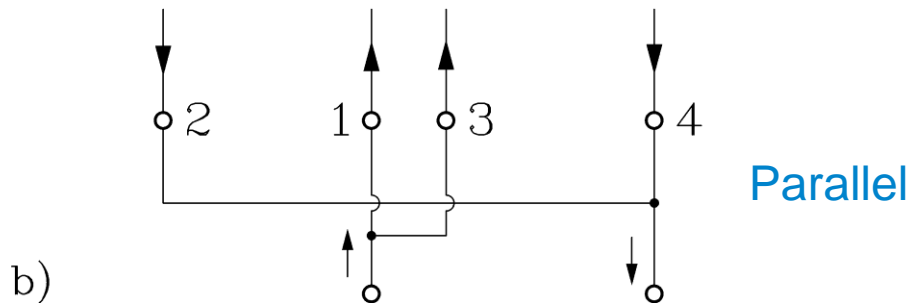
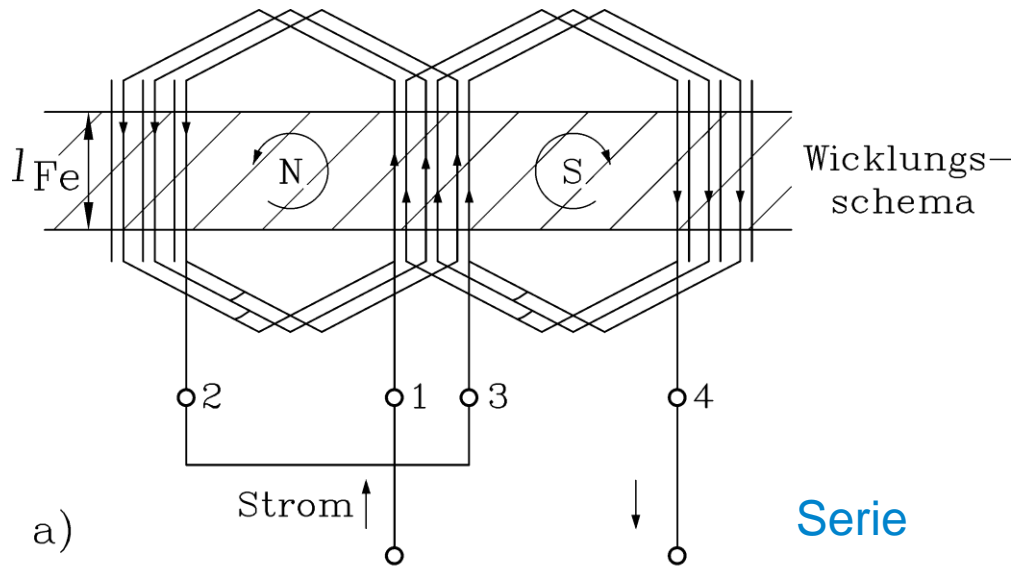


## Beispiel:

Vierpolige Maschine,  
 $m = 3, Q = 24, q = 2$ :  
Sehnung  $W/\tau_p = 5/6$

Anschlüsse V-Y, W-Z nicht dargestellt

# Beispiel: Serien- und Parallelschaltung von Spulengruppen



## Beispiel:

Zweischichtwicklung:

$$2p = 2, q = 3,$$

z. B.: elfwändige Spulen ( $N_c = 11$ ),

a) **Serienschaltung** aller Spulengruppen:

$$a = 1:$$

Windungszahl je Strang

$$N = \frac{2pqN_c}{a} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 11}{1} = 66$$

b) **Parallelschaltung** der Spulengruppen:

$$a = 2:$$

Windungszahl je Strang

$$N = \frac{2pqN_c}{a} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 11}{2} = 33$$

# Serien- und Parallelschaltung von Spulengruppen (1)

- **Serien- und Parallelschaltung** der Spulengruppen zu **Wicklungssträngen**

- **Zweischichtwicklung:**

**Beispiel:** Achtpolige Maschine: 8 Spulengruppen mit VIER Schaltvarianten:

$a = 1$ : Serienschaltung aller 8 Spulengruppen

$a = 2$ : 4 Spulengruppen in Serie, parallel mit dem **zweiten** Serienabschnitt

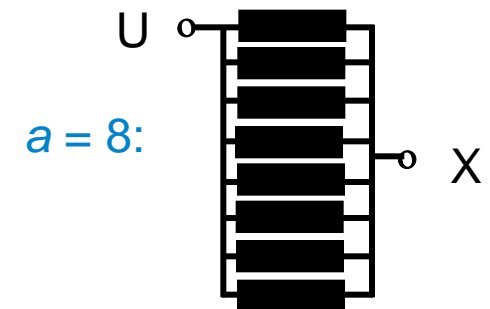
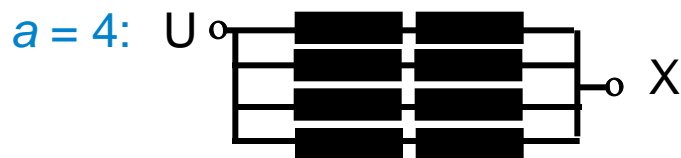
$a = 4$ : 2 Spulengruppen in Serie, **vier** parallele Serienabschnitte

$a = 8$ : Alle **8** Spulengruppen parallel geschaltet

- Magnetisch wirksame **Wicklungszahl je Strang**  $N$ :

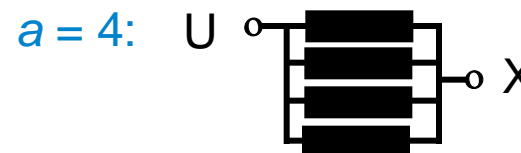
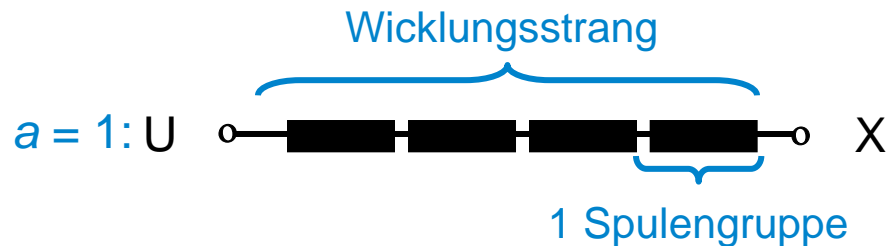
$$N = \frac{2pqN_c}{a}$$

Wicklungsstrang



# Serien- und Parallelschaltung von Spulengruppen (2)

- **Beispiel:** Achtpolige Maschine: **Einschichtwicklung:**  
4 Spulengruppen mit DREI Schaltvarianten:  
 $a = 1$ : Serienschaltung aller 4 Spulengruppen  
 $a = 2$ : 2 Spulengruppen in Serie, parallel mit dem **zweiten** Serienabschnitt  
 $a = 4$ : Alle **4** Spulengruppen parallel geschaltet
- Magnetisch wirksame **Windungszahl je Strang**  $N$ : 
$$N = \frac{pqN_c}{a}$$



# Serien- und Parallelschaltung von Spulengruppen (3)

## Beispiel:

$2p = 4$ ,  $q = 2$ , elfwindige Spulen ( $N_c = 11$ ),

Parallelschaltung der Spulengruppen:

$a = 2$ :

### I) Einschicht:

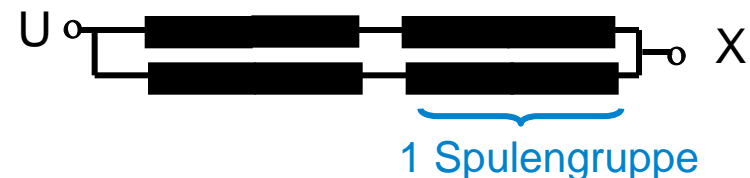
Je Strang  $N = 2 \cdot 2 \cdot 11 / 2 = 22$  Windungen

$$N = \frac{pqN_c}{a} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 11}{2} = 22$$

### II) Zweischicht:

Je Strang  $N = 4 \cdot 2 \cdot 11 / 2 = 44$  Windungen

$$N = \frac{2pqN_c}{a} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 11}{2} = 44$$



# Beispiel: 2-fach-Parallelschaltung je Strang bei Sternschaltung

Achtpolige Maschine:

**Einschichtwicklung:**

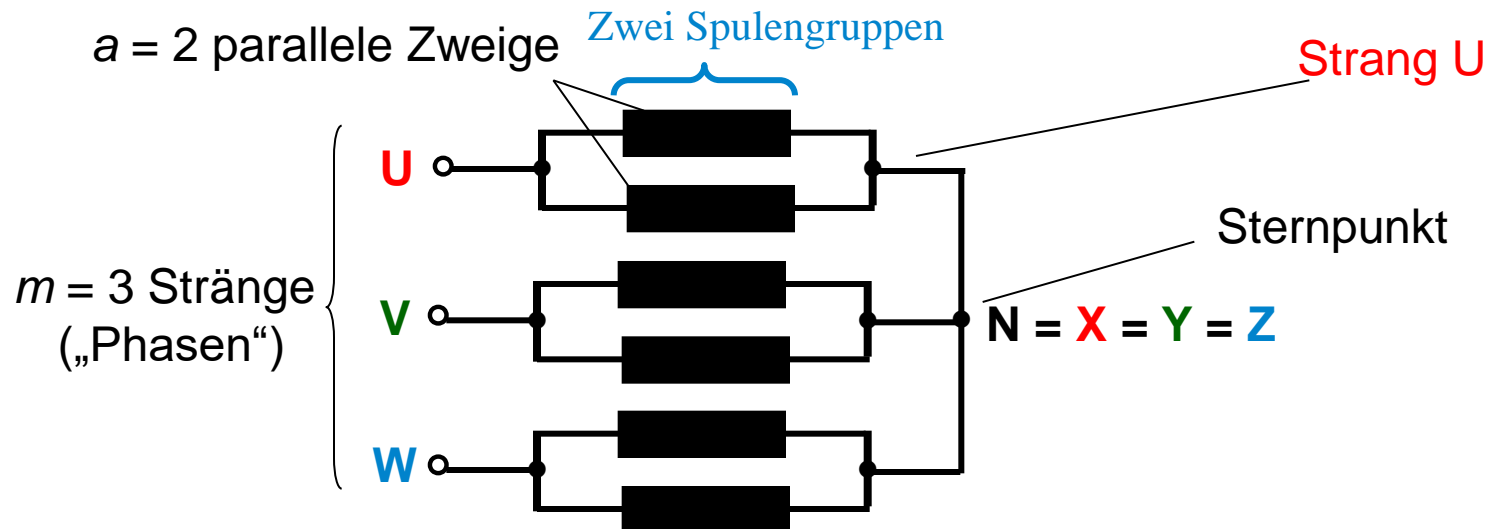
**Sternschaltung:**

4 Spulengruppen je Strang

$$N = \frac{pqN_c}{a} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 11}{2} = 44$$

$a = 2$ :

2 Spulengruppen in Serie, parallel mit dem **zweiten** Serienabschnitt



# Einlegen der Statorbleche bei einem Synchron-Wasserkraftgenerator



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle:

*Andritz Hydro, Austria*

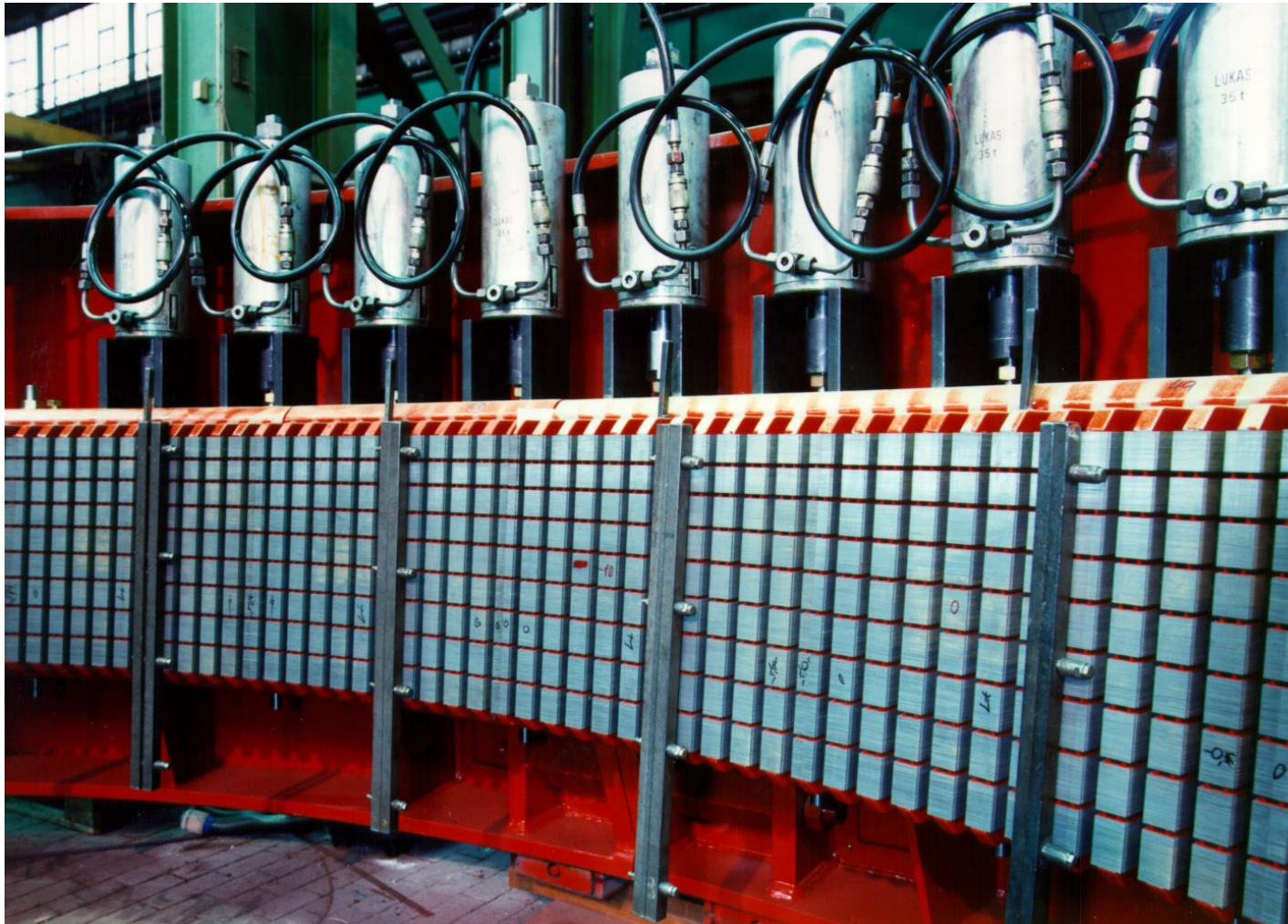




# Hydraulisches Pressen des Statorblechpakets eines Synchron-Wasserkraftgenerators



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle:  
Andritz Hydro,  
Austria



# Eingelegte Zweischicht-Statorwicklung in den Nuten eines Wasserkraftgenerators – Einpressen der Spulen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



- Einwindige Spulen  
 $N_c = 1$ , daher:  
Wellenwicklung
- Dadurch keine  
Serienverbinder =  
Leiterersparnis
- Eingelegt als Halb-  
spulen („Stäbe“), die  
zwischen Ober- und  
Unterschicht im  
Stirnbereich verlötet  
werden

Quelle:

Andritz Hydro, Austria



# Drehfelder bei beliebiger Phasenzahl $m$

## a) $m$ ist ungerade und $m > 1$ : $m = 3, 5, 7, \dots$

Bei  $m$  Wicklungssträngen („Phasen“):

Räumliche Verschiebung der Stränge um  $2\tau_p/m$  erforderlich,  
Stränge müssen mit einem symmetrischen  $m$ -phasigen Wechselstromsystem (Frequenz  $f$ )  
gespeist werden, dessen Ströme zueinander um  $360^\circ/m$  phasenverschoben sind.

### Beispiel:

a)  $m = 3$ , b)  $m = 5$ : räumlicher Versatz der Stränge: a)  $2\tau_p/3$ , b)  $2\tau_p/5$   
zeitliche Verschiebung zw. benachbarten Strömen: a)  $360^\circ/3 = 120^\circ$ , b)  $360^\circ/5 = 72^\circ$

## b) $m$ ist gerade: $m = 2, 4, 6, \dots$

Räumliche Verschiebung der Stränge um  $2\tau_p/(2m)$  erforderlich,  
Stränge müssen mit einem symmetrischen  $m$ -phasigen Wechselstromsystem (Frequenz  $f$ )  
gespeist werden, dessen Ströme zueinander um  $360^\circ/(2m)$  phasenverschoben sind.

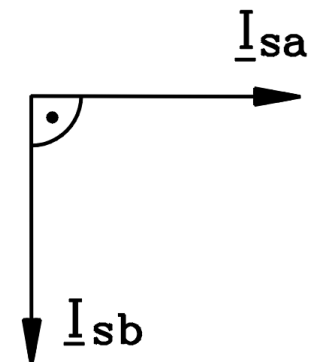
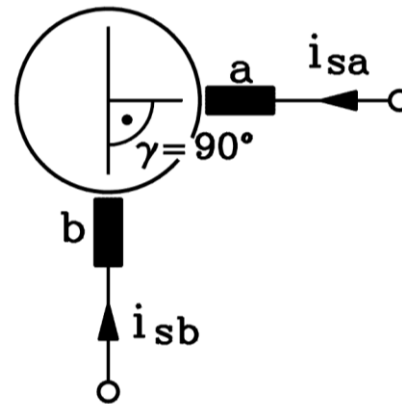
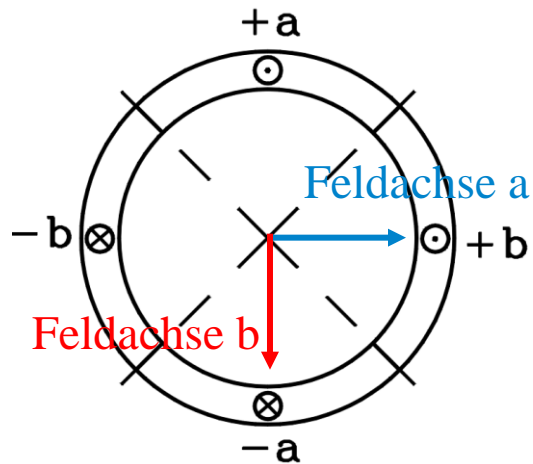
Beispiel:  $m = 2$ : räumlicher Versatz der Stränge:  $\tau_p/2$

zeitliche Verschiebung der beiden Ströme:  $360^\circ/4 = 90^\circ$

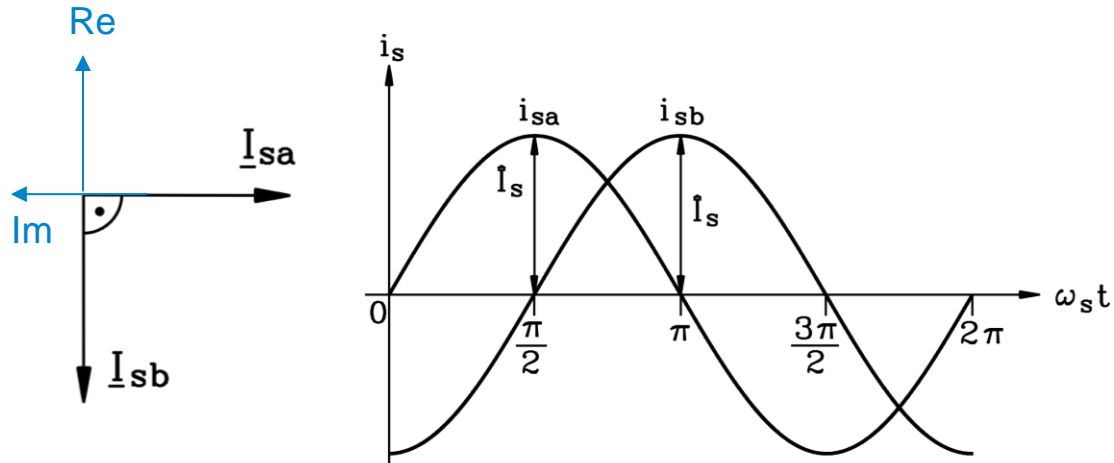
# Sonderfall: Zweistängige Statorwicklung $m = 2$

Beispiel:  $2p = 2$

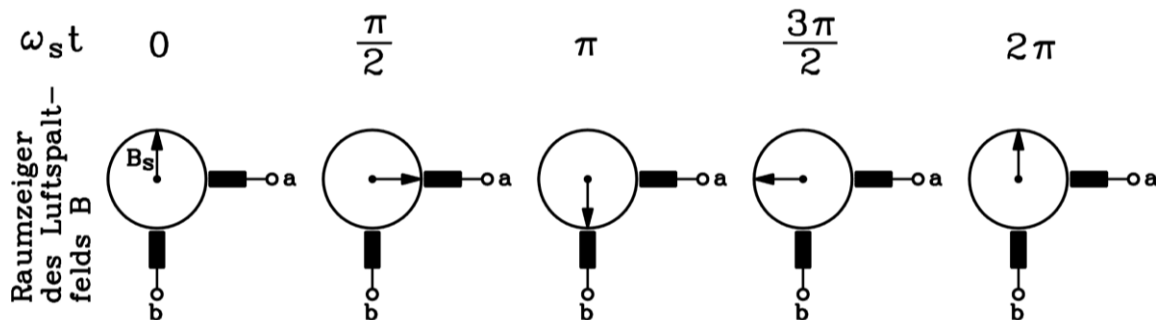
- Zwei Stränge a und b, um **räumlich  $90^\circ$**  versetzt bei zweipoliger Wicklung
- Gespeist mit zweiphasigem Stromsystem  $i_{sa}, i_{sb}$ , wobei die Ströme um  **$90^\circ$ el** **elektrisch** phasenverschoben sind



# Drehfeld bei zweiphasigem Stromsystem $m = 2$



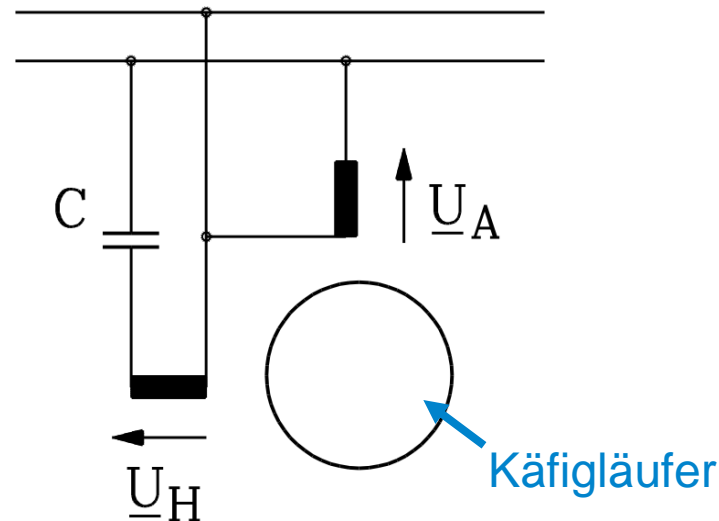
$\omega_{st}$	0	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$	$\frac{3\pi}{2}$	$2\pi$
$i_{sa}$	0	$I_s\sqrt{2}$	0	$-I_s\sqrt{2}$	0
$i_{sb}$	$-I_s\sqrt{2}$	0	$I_s\sqrt{2}$	0	$-I_s\sqrt{2}$



# Zweiphasiger Betrieb am Einphasennetz

- **Zweiphasiger Betrieb am Einphasennetz: „Einphasen-Asynchronmotor“**  
Zweisträngige Stator-Wicklung mit „Arbeits“-Phase A und „Hilfs“-Phase H und Kondensator C als **Phasenschieber** zwischen Phasen a und b ( $H = a, A = b$ )
- **Käfigläufer** wird vom Drehfeld induziert  $\Rightarrow$  Läuferströme  $\Rightarrow$  Drehmoment
- Wegen Läuferfeld-Rückwirkung funktioniert **90°-Phasenverschiebung nur in einem Betriebspunkt**.  
Sonst „elliptisches“ Drehfeld  $\Rightarrow$  Verringerter Wirkungsgrad  
 $\Rightarrow$  Nur für kleine Motorleistungen < ca. 1 ... 2 kW im Einsatz

Einphasennetz:



## Zusammenfassung: Wicklungsanordnungen

- Einschichtwicklungen kostengünstiger als Zweischichtwicklungen
- Spulengruppen in Nuten je Pol und Strang
- Hochwertigere dreisträngige Zweischichtwicklungen
- Zweischicht: Sehnung der Spulen möglich
- Hochspannungswicklungen ( $> 1$  kV) meist als Zweischichtwicklung
- Parallelschaltung gleichartiger Spulengruppen je Strang möglich
- Auch andere Strangzahlen  $m \geq 2$  für symmetrische Drehfeldwicklungen möglich, benötigen aber entsprechend  $m$ -phasige Drehstromsysteme