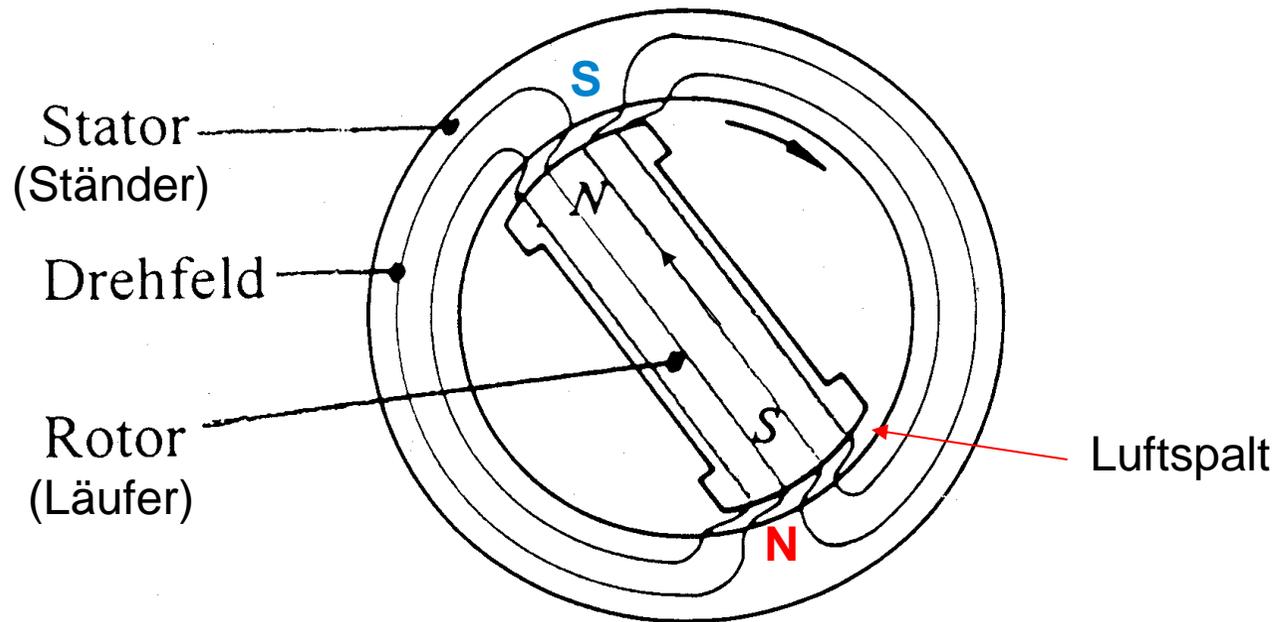


Vorlesungsinhalt

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

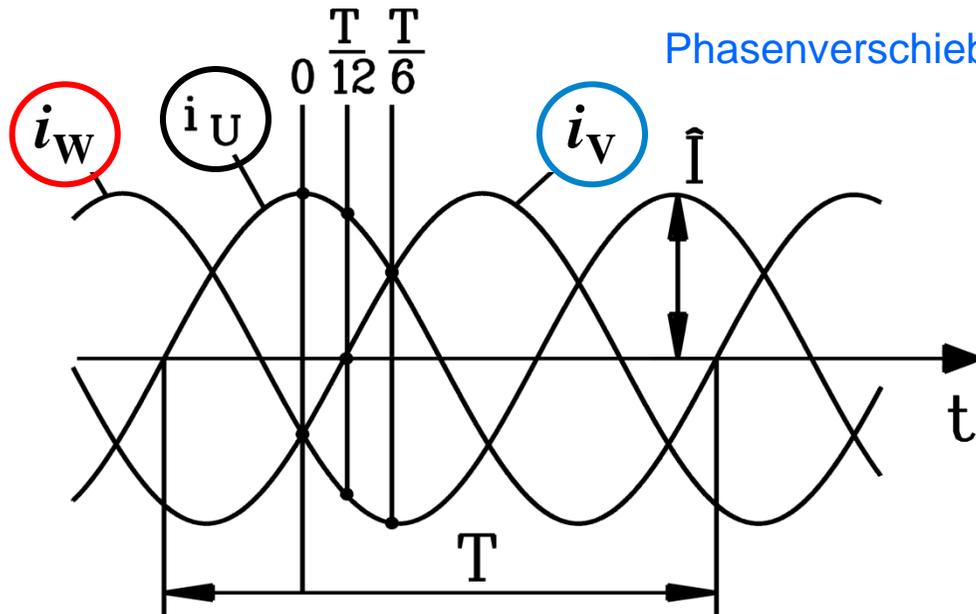


Quelle: H. Kleinrath, *Elektrische Maschinen*,
Uni-Text, Akad. Verlagsgesellschaft, 1975



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.



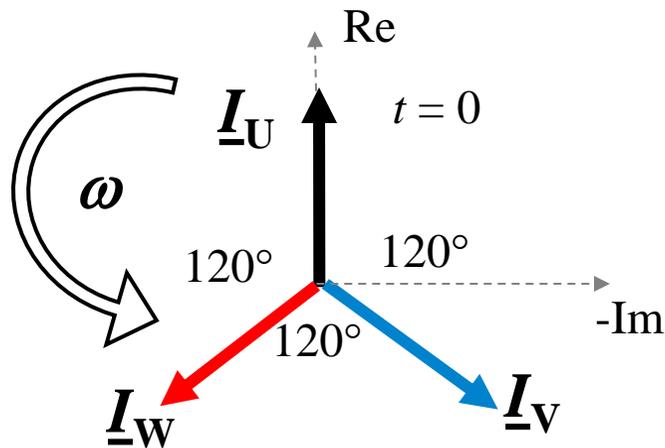
Beispiel: Phasenfolge U - V - W

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

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

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





- 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:

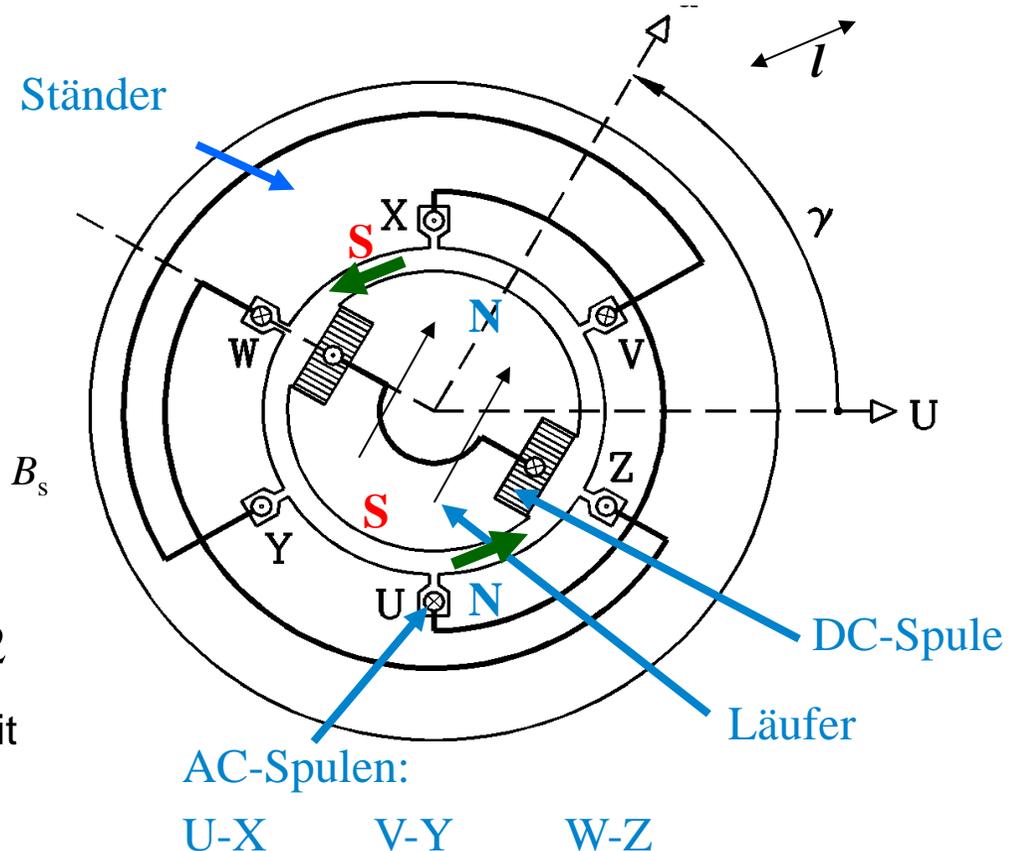
$$\underline{I}_U = I$$

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

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

- **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

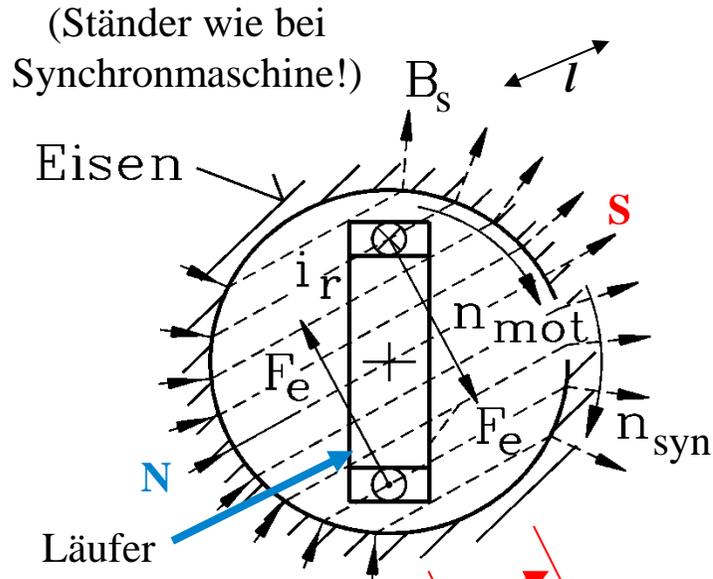
Drehzahl $n_{\text{syn}} = f / p$



Beispiel:

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

Asynchronmaschinen



- Ständer 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 Δ Läuferdurchmesser $d \Rightarrow$ Drehmoment: $M_e = z_r \cdot F_e \cdot (d/2)$

Drehmoment M_e bestimmt die Baugröße



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

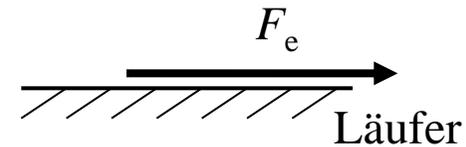
$$P = 2\pi \cdot n \cdot M_e = 2\pi \cdot n \cdot \overbrace{\frac{z \cdot F_e}{d\pi l}}^{\tau} \cdot d\pi l \cdot \frac{d}{2}$$

• 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“



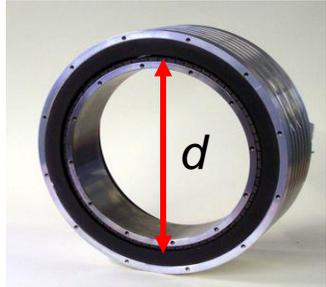
$$M_e \sim \tau \cdot \underbrace{d^2 \cdot l}_V \sim \tau \cdot V$$

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

- 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!

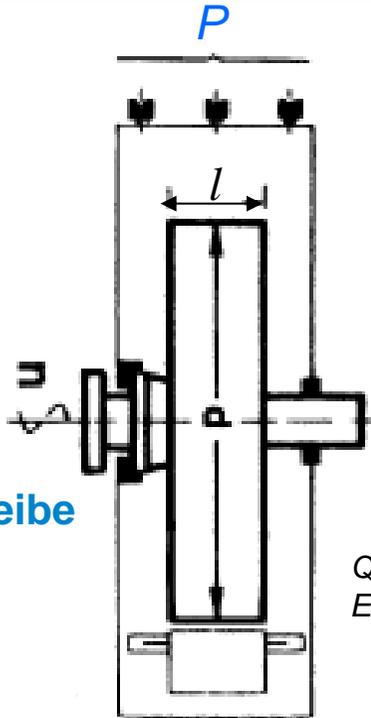


Bauform „Scheibe“ vs. „schlanker Zylinder“ (bei gleicher Leistung P)



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

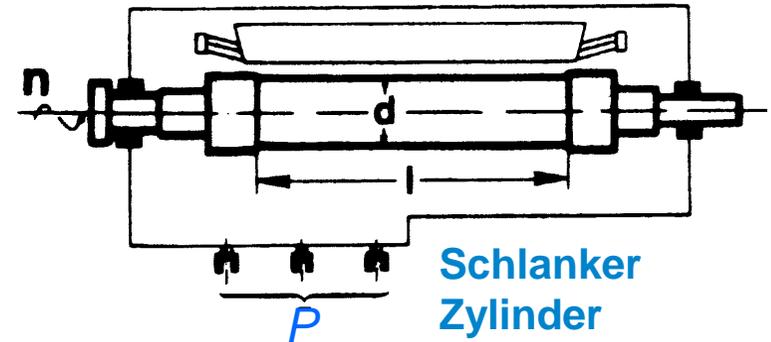
Scheibe



Das Drehmoment M_e bestimmt die Baugröße der E-Maschine!

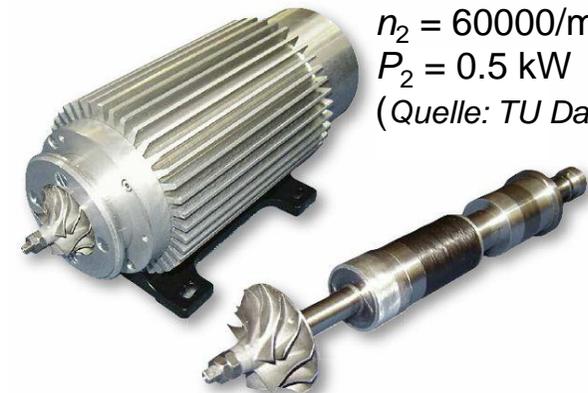
$$n = n_{\text{syn}} = f / p$$

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)



	Scheibe	schl. Zylinder
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 ⁻¹	2765 min ⁻¹
Maximaldrehzahl n_{max}	6000 min ⁻¹	12500 min ⁻¹
Nenn-Drehmoment M_N	130 Nm	52 Nm
Außendurchmesser $d_{s,a}$	286 mm	150 mm
Eisenlänge l	95 mm	180 mm
Bauweise	Scheibe	Zylinder

Flüssigkeitsmantelkühlung im Ständer:

Kühlmittel: 50% Wasser, 50% Glycol, Durchfluss: 8 l/min,
Vorlauftemperatur: 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

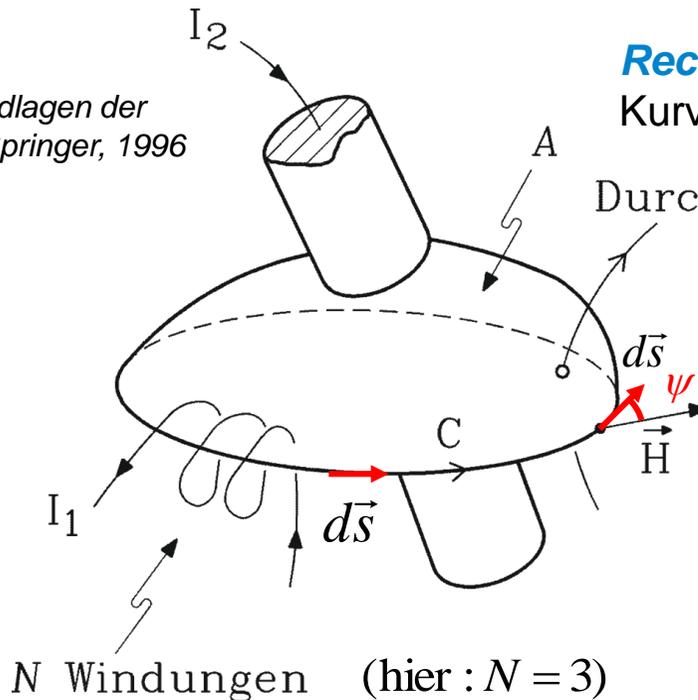
Erregung von H : AMPERE'scher Durchflutungssatz

Wiederholung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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



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

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 Θ , die durch die Fläche A hindurch tritt.

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

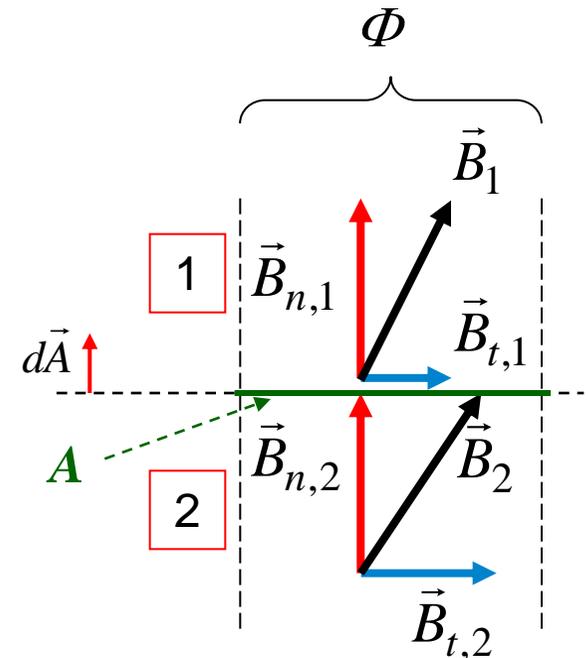
$$\vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot ds \cdot \cos\psi \quad \psi: \text{Winkel zwischen } \vec{H} \text{ und } d\vec{s}$$



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

- Magnetischer Fluss Φ 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

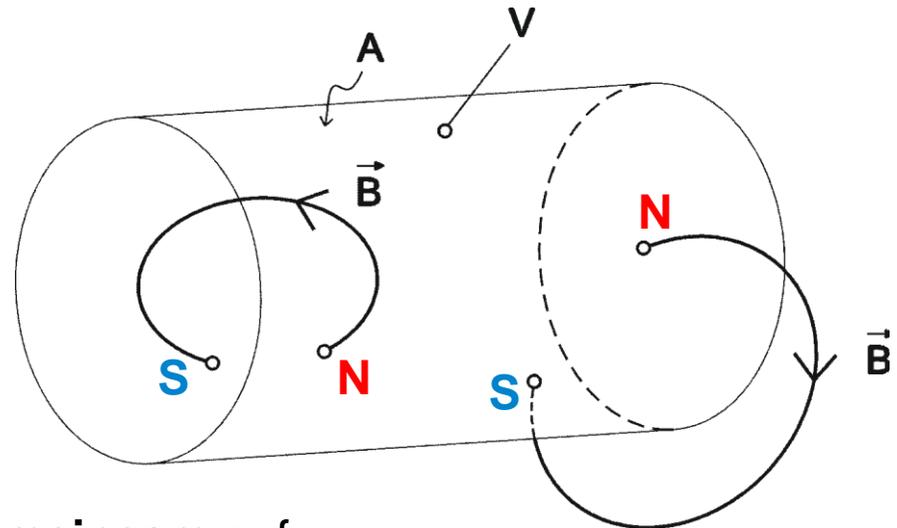


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Der magnetische Hüllenfluss Φ 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

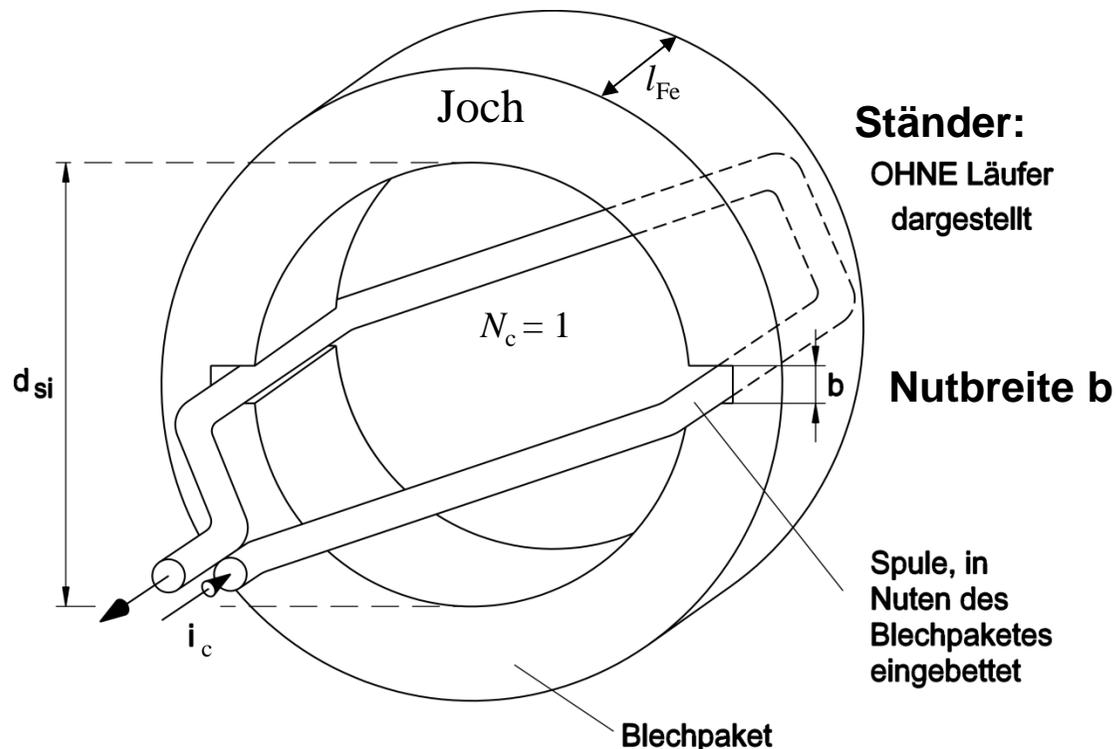
2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

2.4 Wicklungsanordnungen

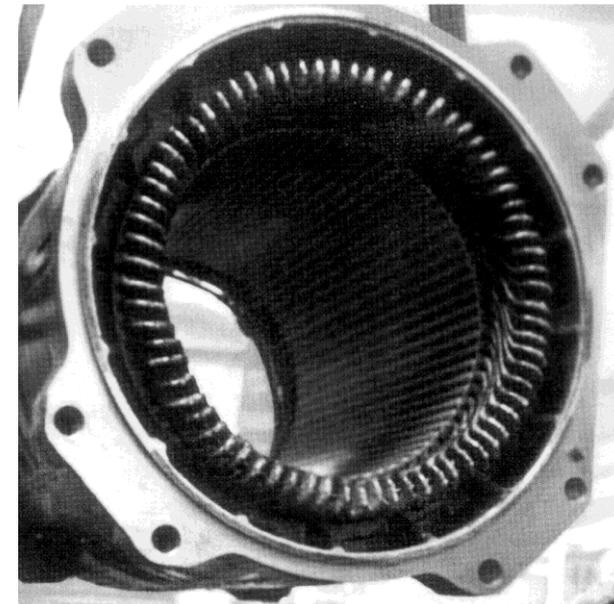
Einzelspanne in zwei Ständernuten

- 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“)



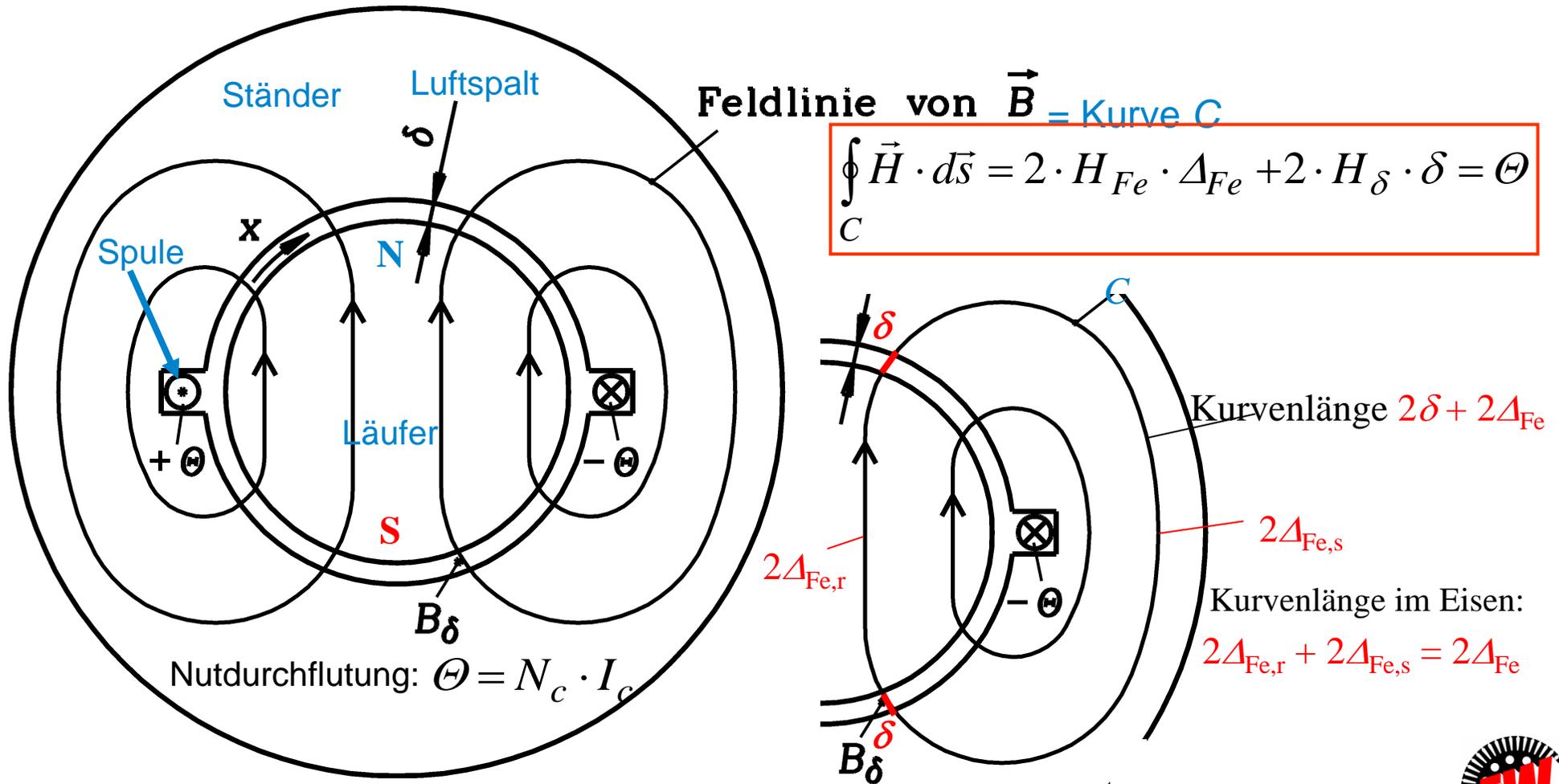
Quelle: Siemens, Deutschland



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

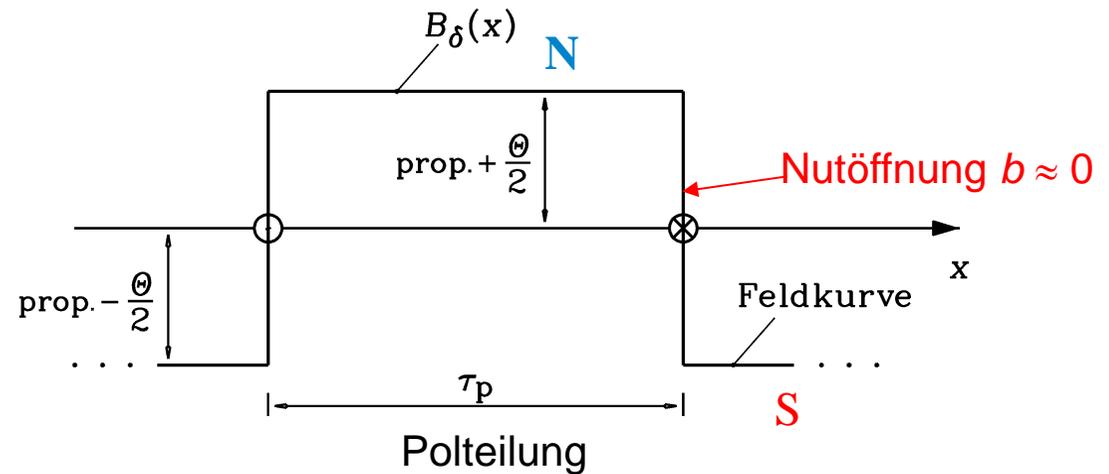
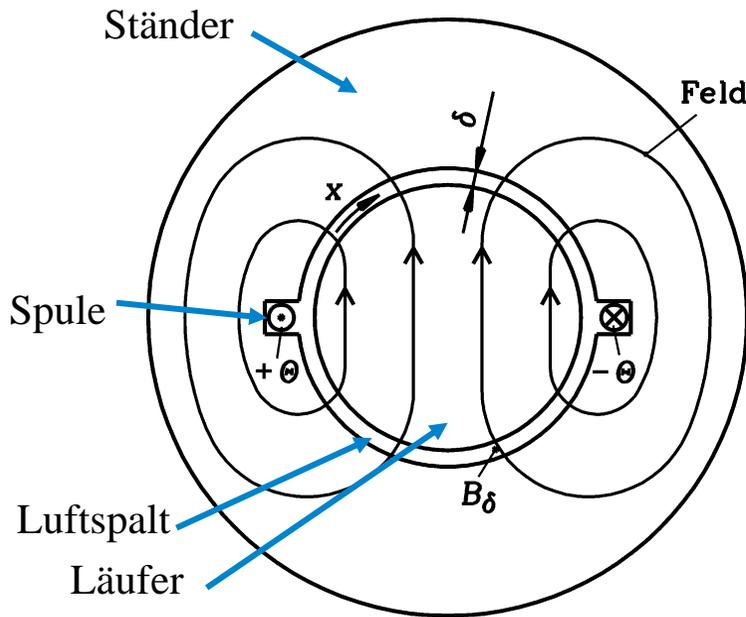
Anwendung des Durchflutungssatzes

- **Durchflutungssatz:** Kurve C identisch mit B-Feldlinie gewählt: Länge $2\delta + 2\Delta_{Fe}$



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

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

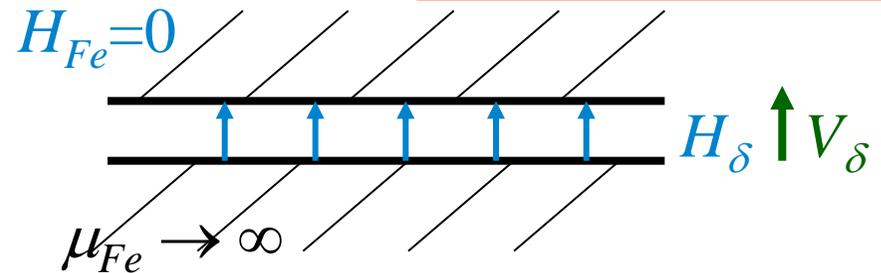
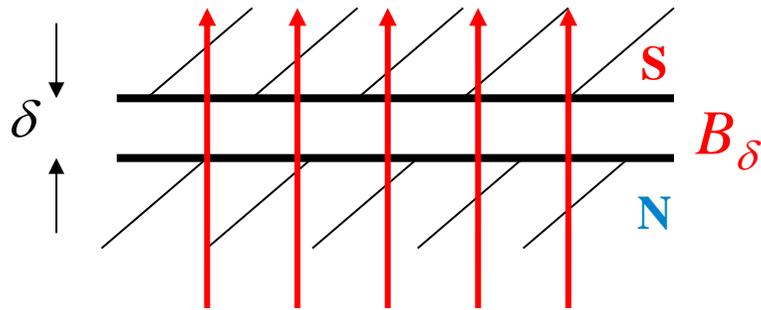


- $B_{\delta} = B_{Fe} \Rightarrow H_{Fe} = B_{Fe}/\mu_{Fe} = 0$ ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$) und $H_{\delta} = B_{\delta}/\mu_0$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am}$)
- **Feldvektoren** \vec{H}, \vec{B} im kleinen Luftspalt δ (nahezu) nur **Radialkomponenten**.
- Spulenwindungszahl N_c , Spulenstrom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

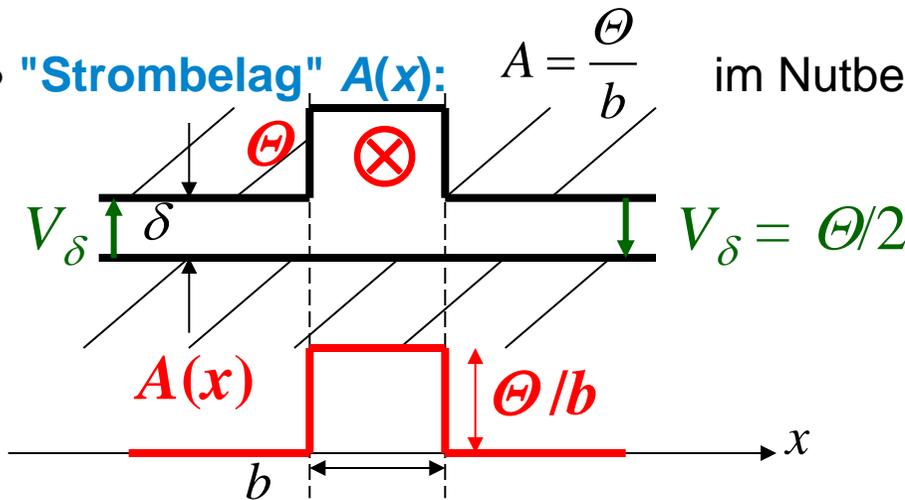
- Da $H_{Fe} = 0$ ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$): Feldlinien von H_δ entspringen an Eisenoberfläche!

- "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

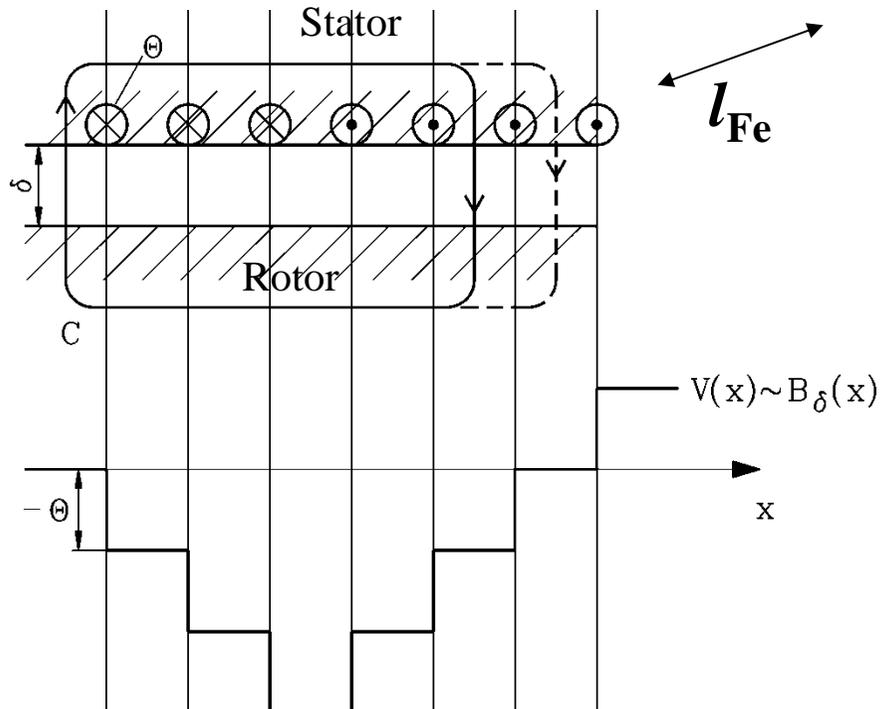
Einheit: von V : (A)
von A : (A/m)



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 Θ



- Berechnung von B_δ 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 δ konstant und klein gegenüber Hauptabmessungen d_{si} , l_{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

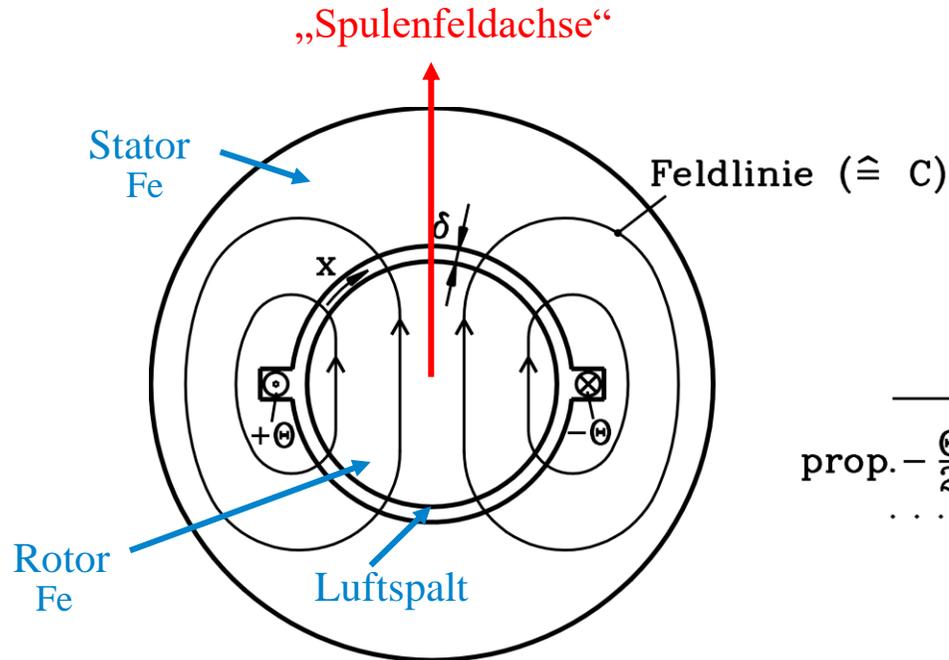
2.1 Grundprinzipien der Magnetfeldberechnung

2.2 Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen

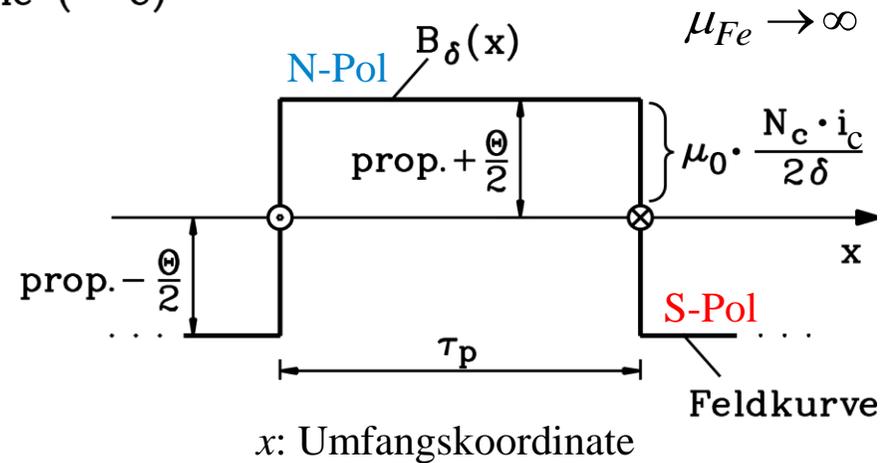
2.3 Erzeugung von magnetischen Drehfeldern

2.4 Wicklungsanordnungen

Luftspaltfeld einer Ständerspule $q = 1$



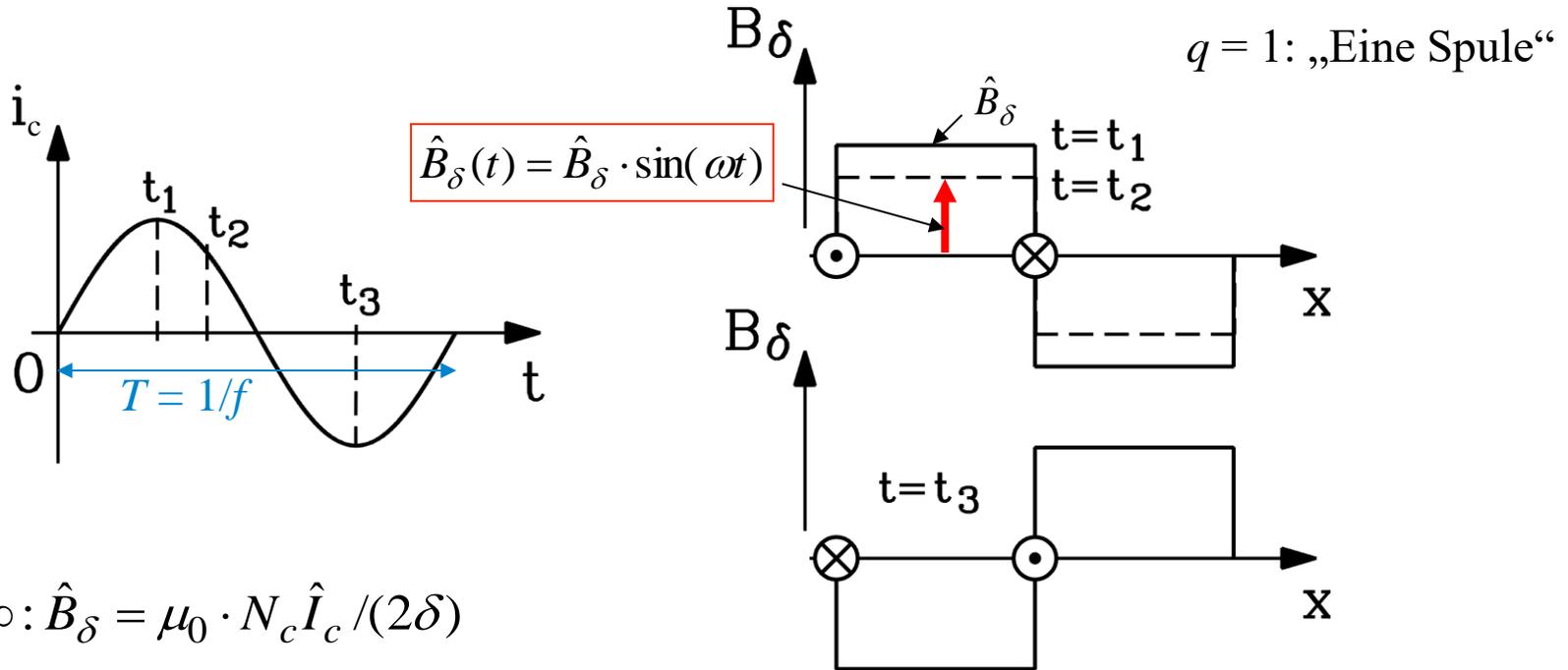
Radialkomponente $B_\delta(x)$ des Luftspaltfelds:



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

Beispiel:

Magnetisches Wechselfeld bei $q = 1$

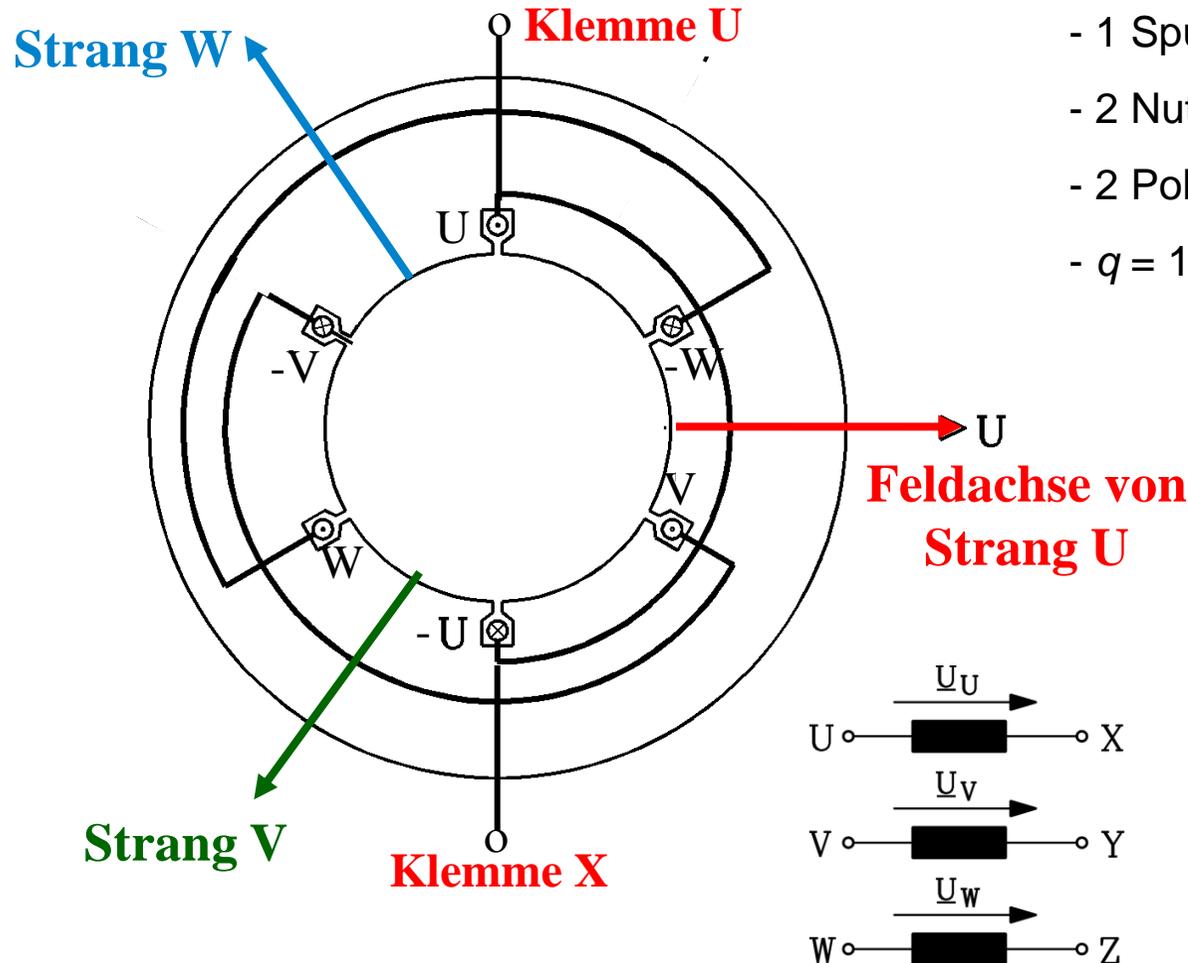


$$\mu_{Fe} \rightarrow \infty: \hat{B}_\delta = \mu_0 \cdot N_c \hat{I}_c / (2\delta)$$

- 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

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

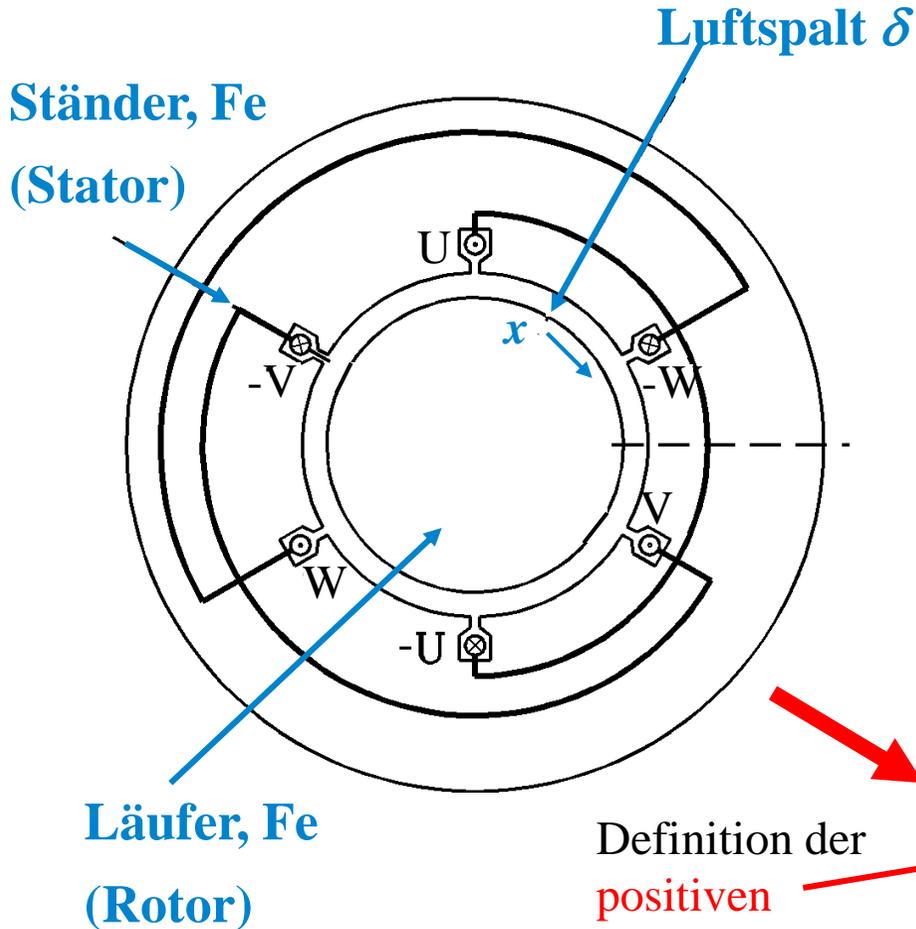
Ständer-Nutzahl: $Q_s = 6$

Polzahl: $2p = 2$

Strangzahl: $m = 3$

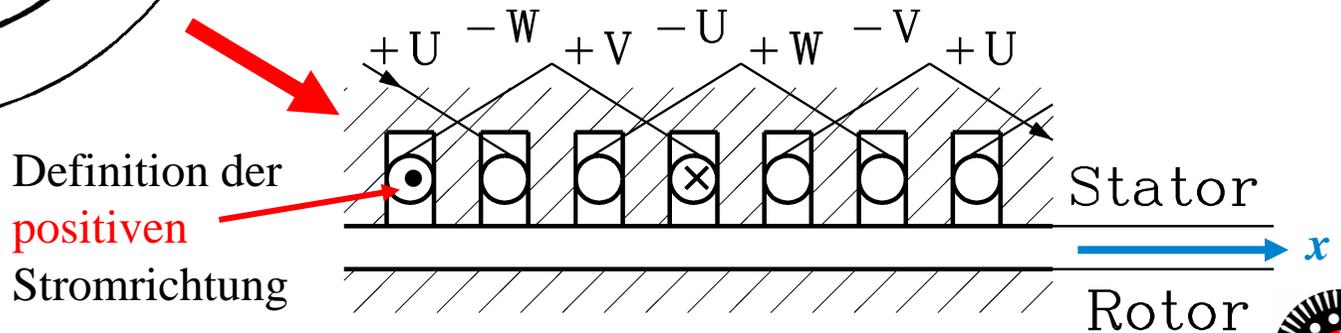


Ständer-Drehstromwicklung mit Eisenläufer

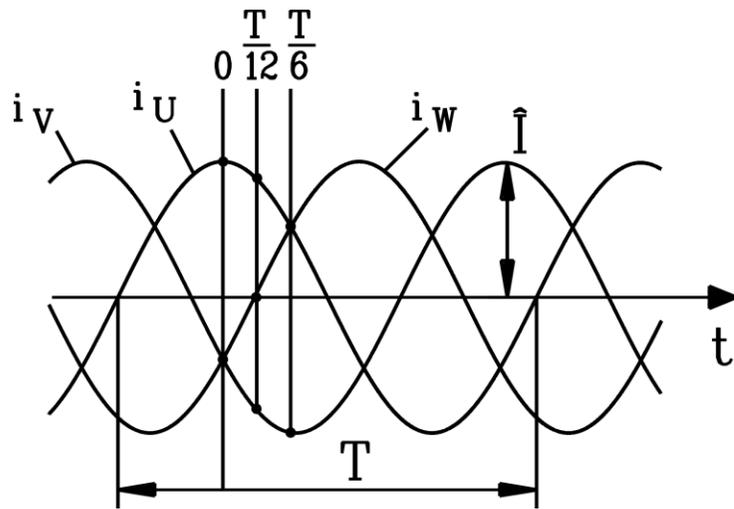


- Ständerfeld durch Drehstromwicklung
- Läufer aus Eisen
- konstante Luftspaltweite δ
- Magnetfeld im Luftspalt betrachtet
- Magnetfeld dreht
- Läufer dreht NICHT

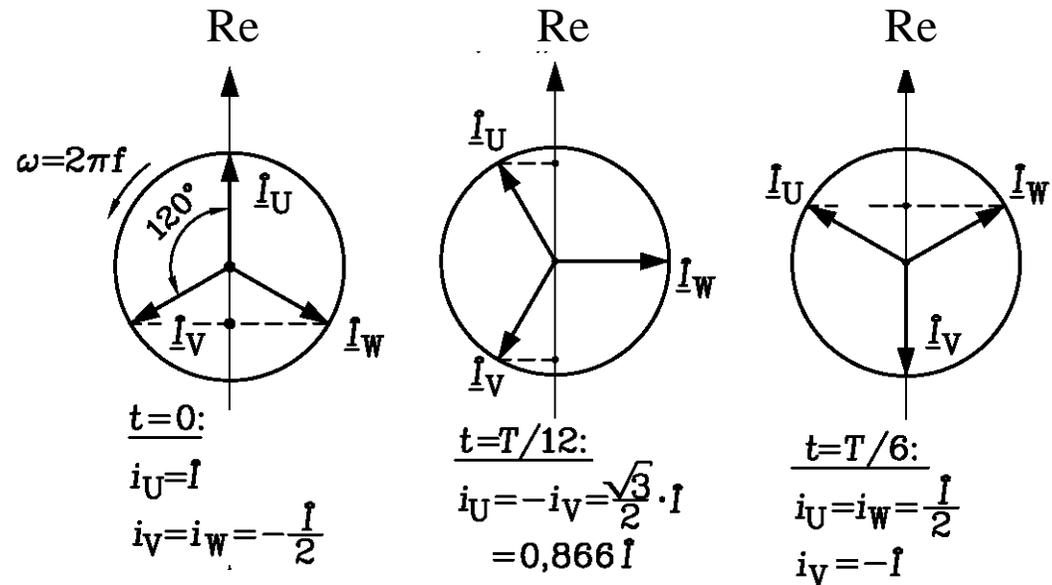
Abgewickelte Darstellung: Einschichtwicklung



Drehstromsystem: Zeit- und Frequenzbereich



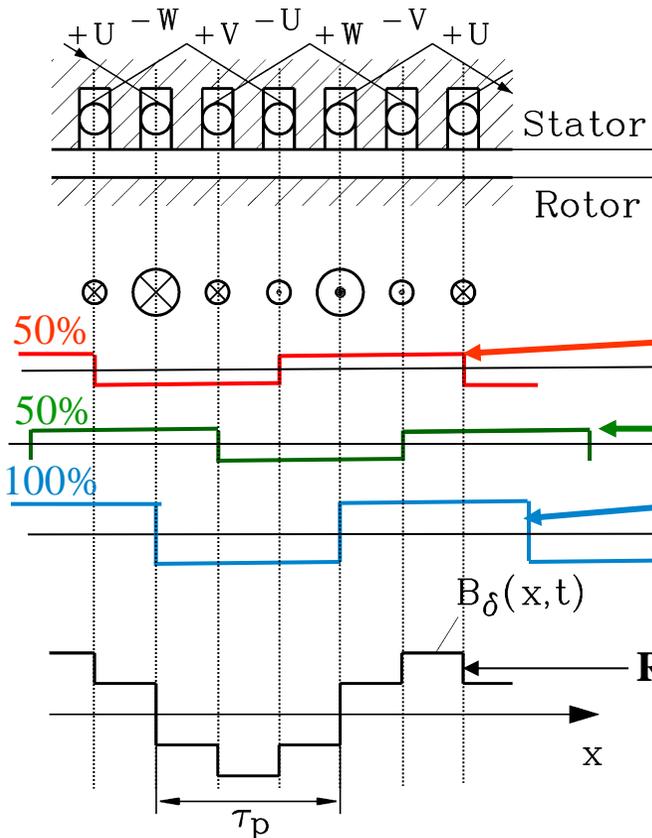
Darstellung im Zeitbereich



Darstellung in der komplexen Zahlenebene
(„Frequenzbereich“)

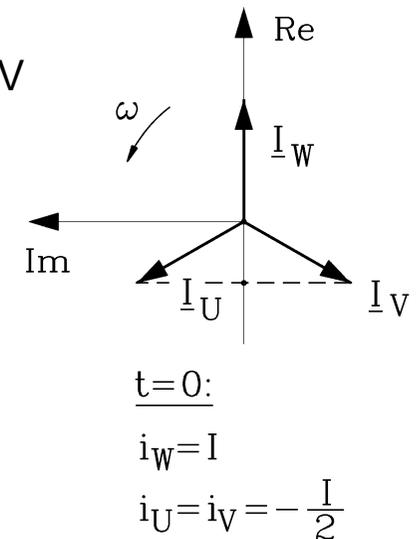
Beispiel: Phasenfolge U-W-V

Technische Erzeugung eines Drehfelds



Überlagerung der Einzelfelder der drei Spulen zum resultierenden treppenförmigen Luftspaltfeld

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

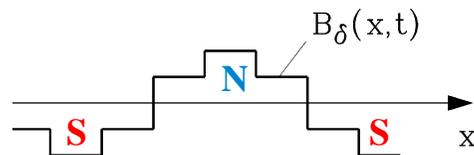
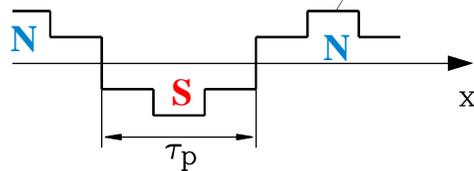
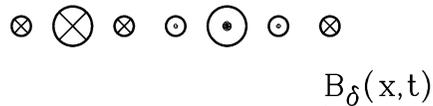
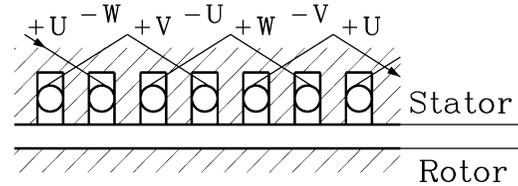


- +U: positiver Wicklungssinn (linke Spulenseite) \odot
- U: negativer Wicklungssinn (rechte Spulenseite) \otimes
- Ebenso: +V, -V, +W, -W

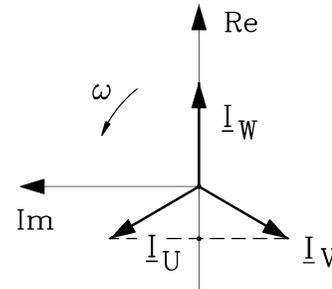
Nuten je Polpaar: $Q_s/p = 6$
Strangzahl: $m = 3$



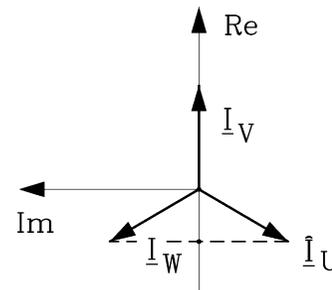
Wandern des Drehfelds



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: $Q_s/p = 6$

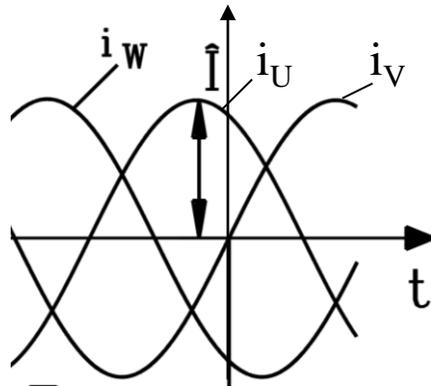
Strangzahl: $m = 3$



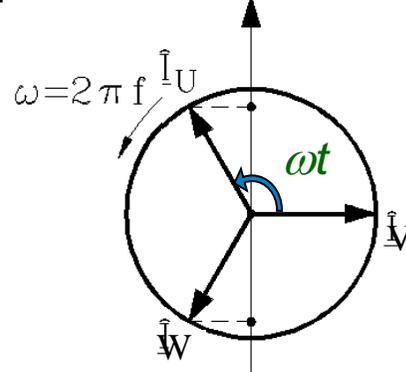
Phasenfolge U, V, W versus U, W, V

ZEITLICH:

Zeitbereich:



Frequenzbereich:

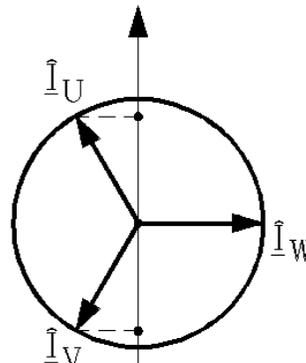


Stromphasenfolge U, V, W

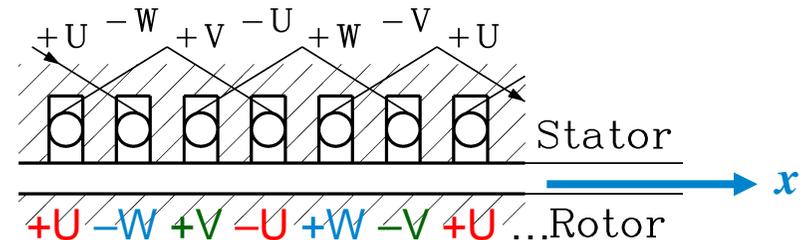
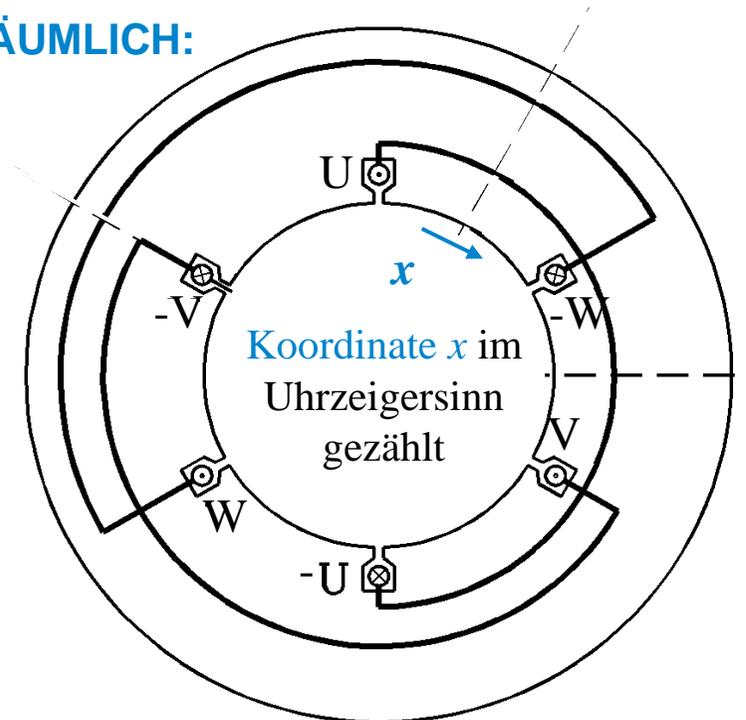
Zeiger-Dreibein dreht im mathematisch positiven Sinn in der komplexen Zahlenebene mit ω , Winkel ωt

Alternativ:

Phasenfolge U, W, V



RÄUMLICH:

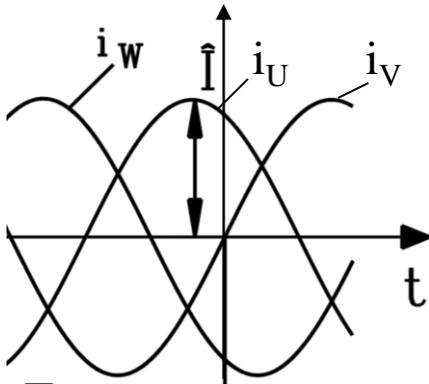


Alternativ: +U -V +W -U +V -W +U ...

Drehrichtung des Drehfelds (1)

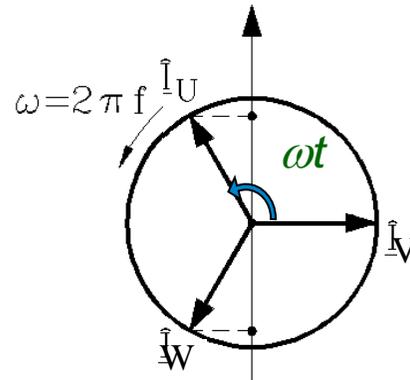
ZEITLICH

Zeitbereich:

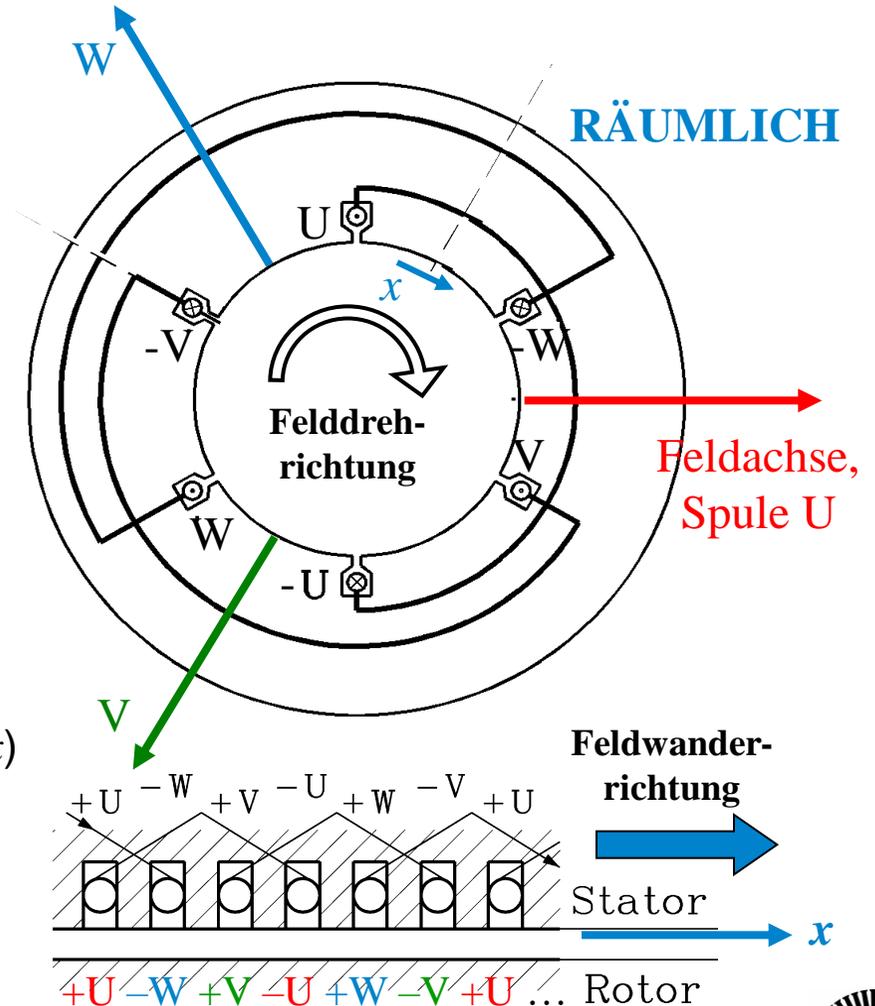


Stromphasenfolge U, V, W

Frequenzbereich:



RÄUMLICH

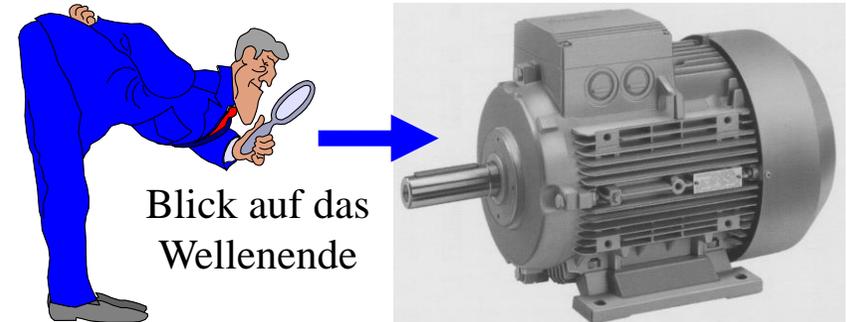


- Bei Phasenfolge U, V, W zeitlich (t) und räumlich (x) wandert (dreht) Feld in x -Richtung
- Bei zeitlicher Änderung der Phasenfolge bzw. bei Tausch zweier Klemmen als U, W, V kehrt sich die Wander- (Dreh)richtung um!

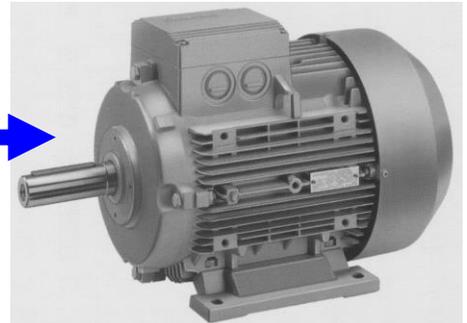
Drehrichtung des Drehfelds (2)

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



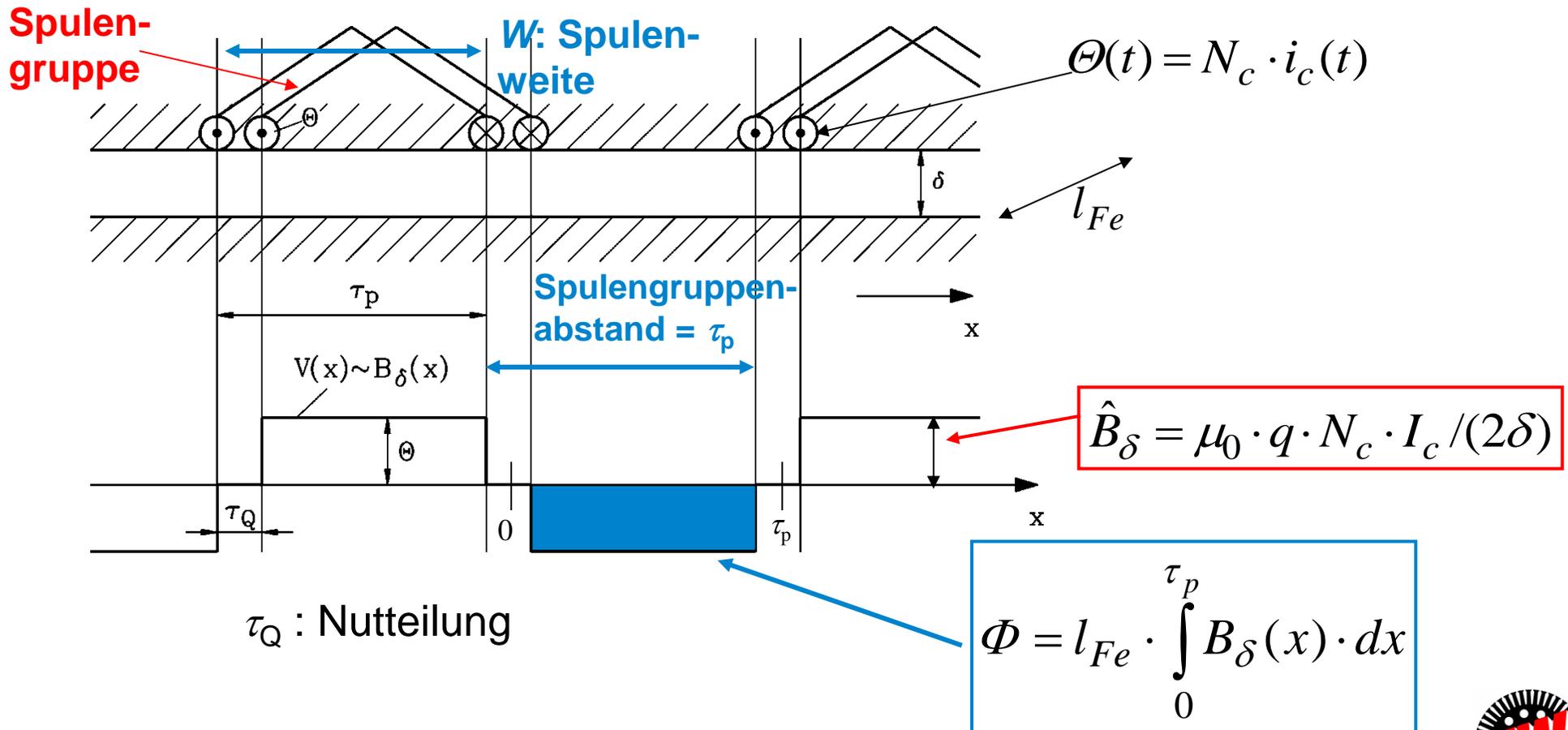
Quelle: Siemens AG, Deutschland

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)

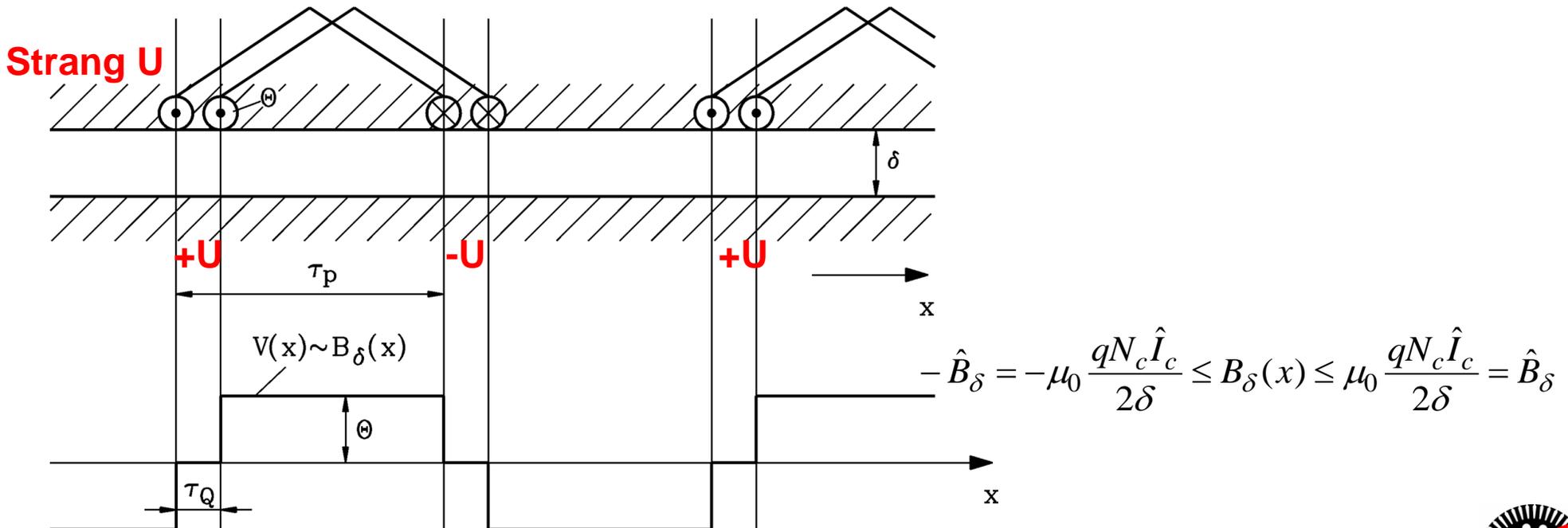
- **Spulengruppe:**
Die Windungen je Strang pro Pol sind auf mehrere in Serie geschaltete Spulen verteilt
(q Spulen je Gruppe = z. B.: "Lochzahl" $q = 2$)
- Spulengruppen:
Sind im Abstand einer **Polteilung** τ_p am Maschinenumfang verteilt
- **"Konzentrierte" Nut-Durchflutung** je Spule:
Hat stets den 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** Φ = 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

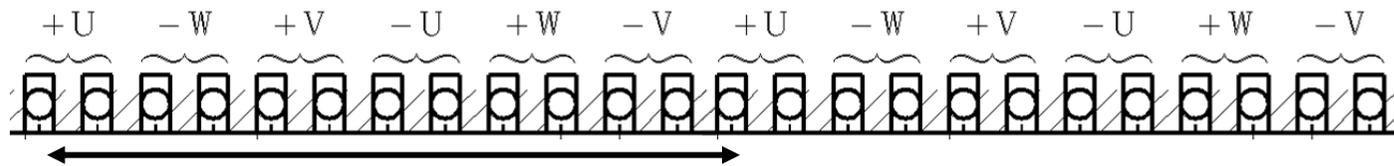
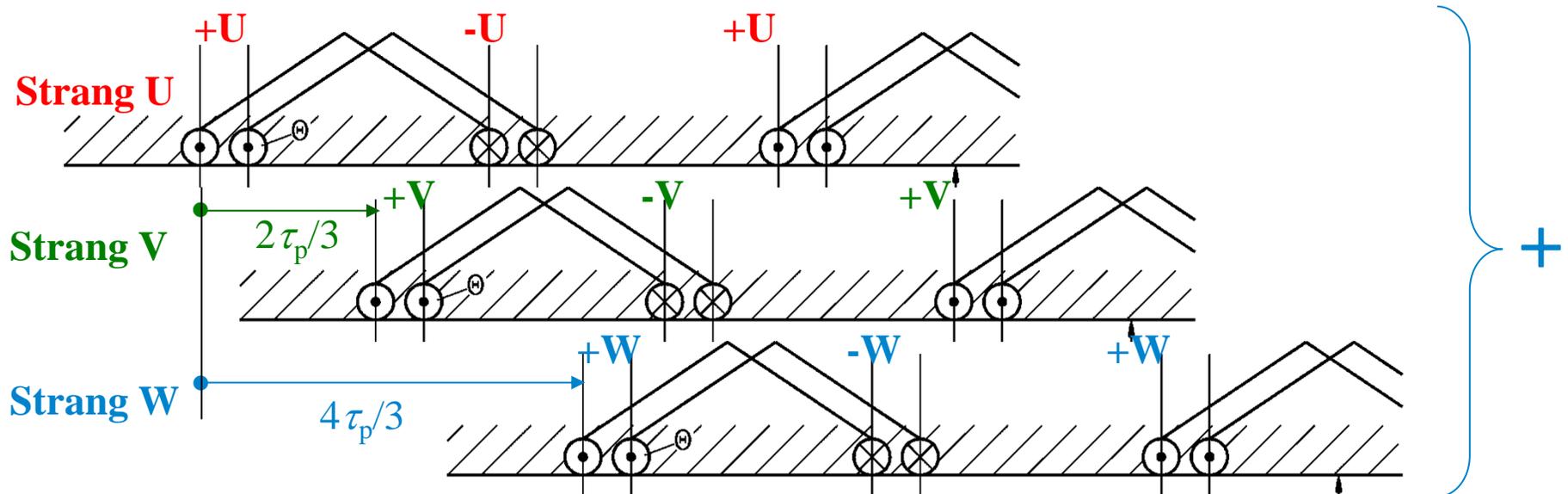
$$i_c(t) = \hat{I}_c \cdot \cos \omega t \Rightarrow B_\delta(x, t) = B_\delta(x) \cdot \cos \omega t$$

- 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 $4\tau_p/3$



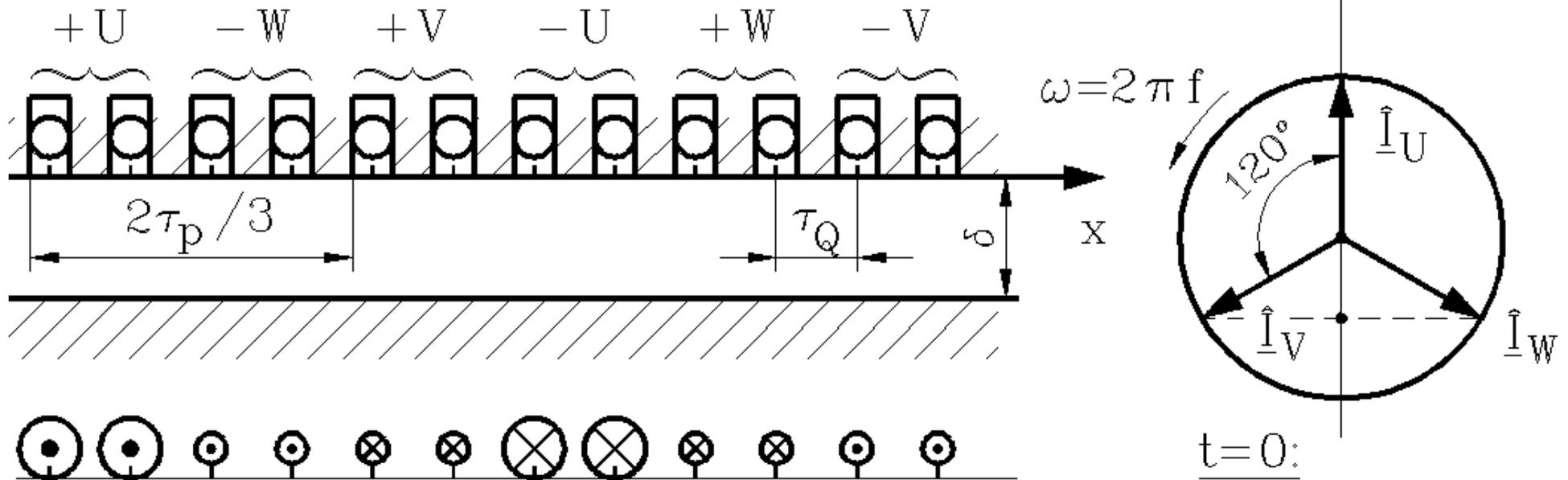
$2\tau_p$ **Sechs Zonen** +U, -W, +V, -U, +W, -V je Polpaar

Magnetisches Drehfeld

Dreisträngige Wicklung (1)

Beispiel: Zeitliche Stromphasenfolge U – W – V

Räumliche Zonenfolge im Uhrzeigersinn U – V - W



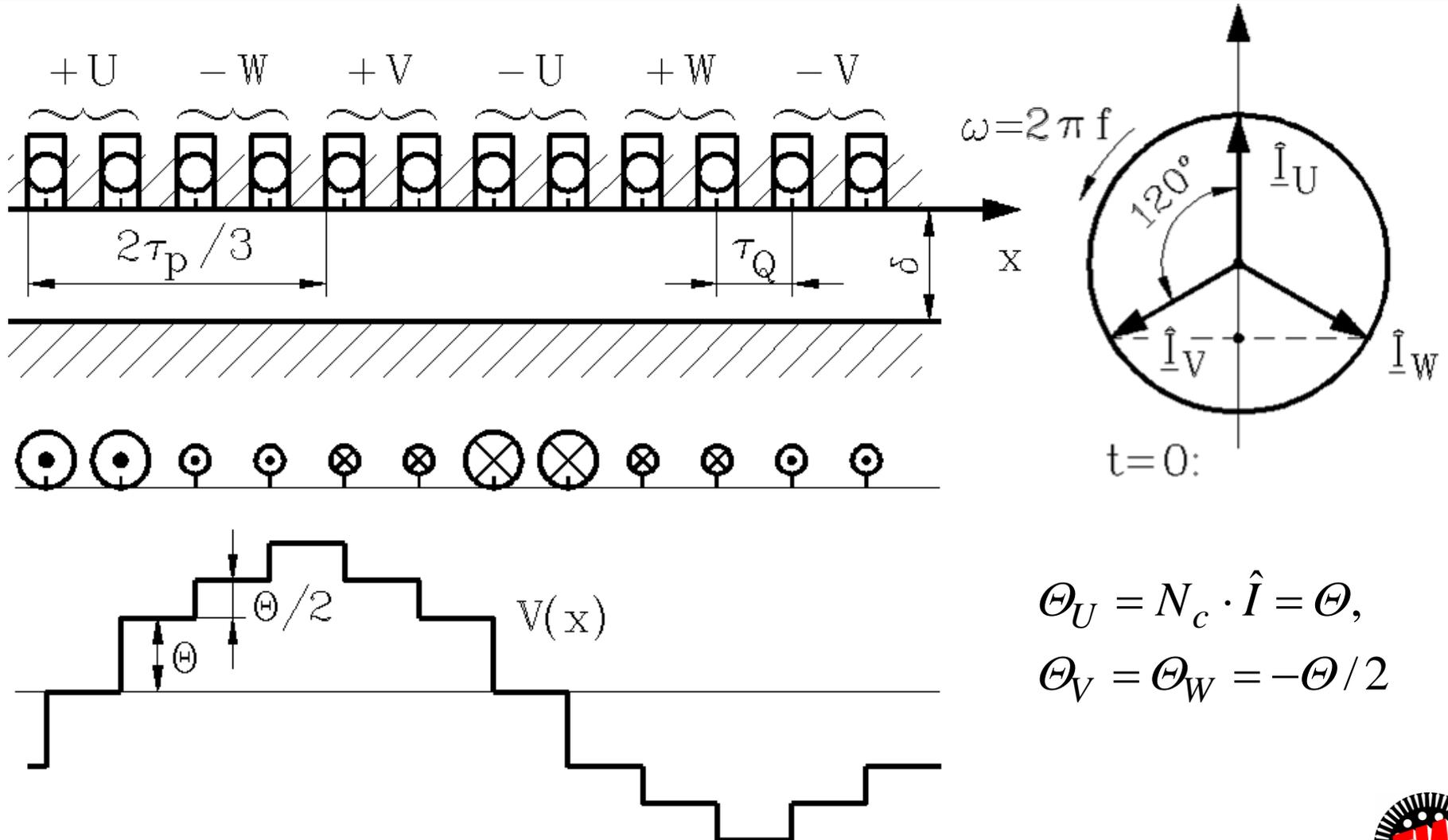
$t=0:$

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

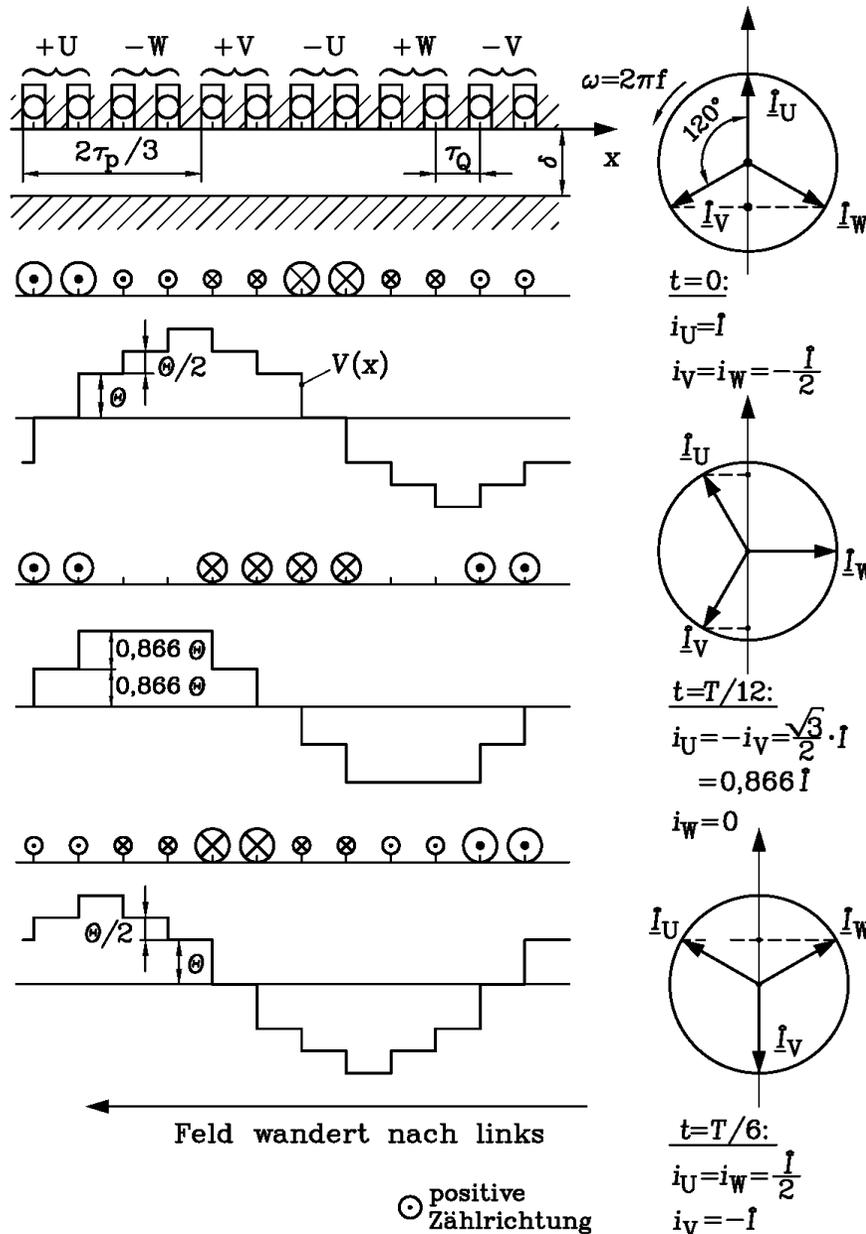
$$i_V = i_W = -\hat{I}/2$$

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}

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

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

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

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

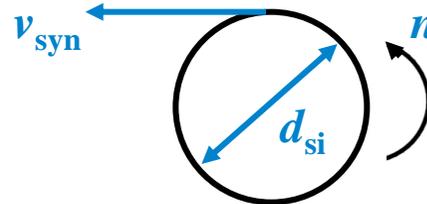
$$n_{syn} = \frac{f}{p}$$



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_{syn} des Drehfelds

- **Beispiel:**

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

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

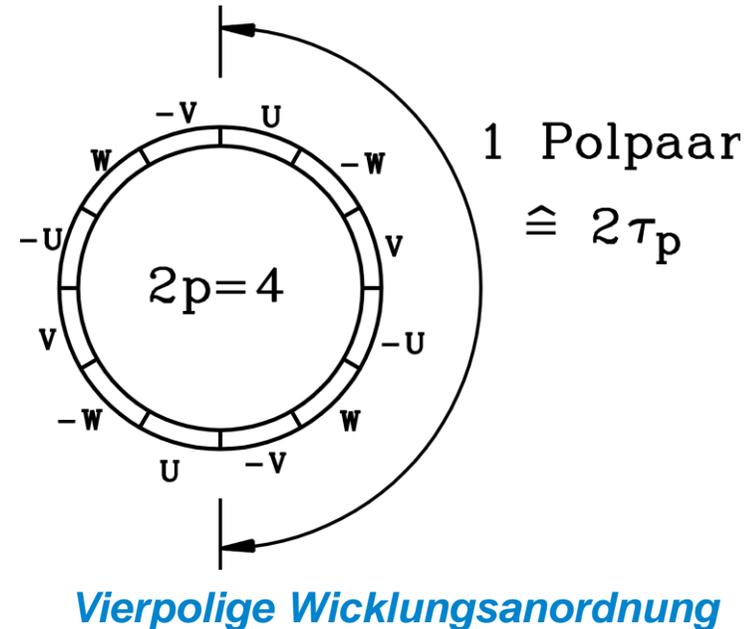
b) **Vierpolig** $2p = 4$, $f = 50$ Hz:

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

- 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.

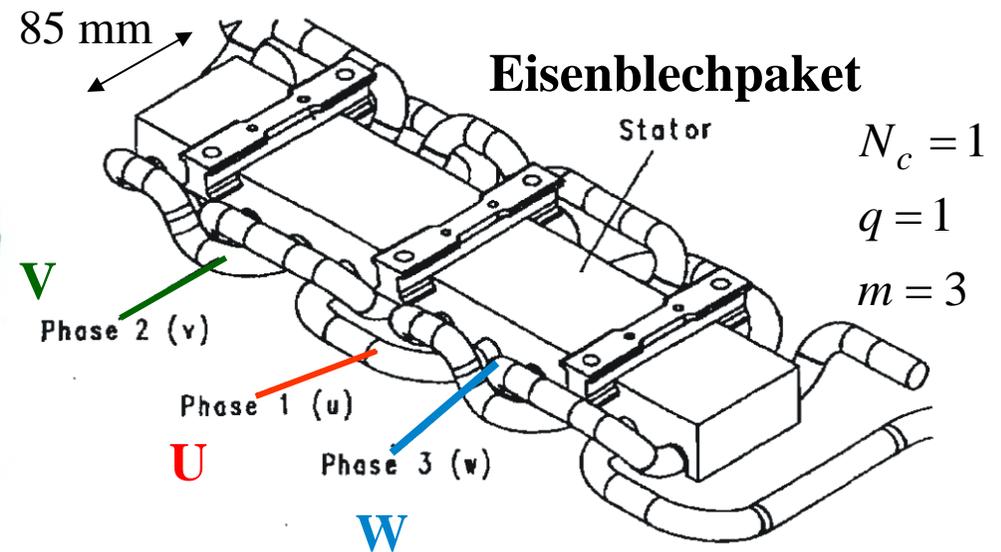
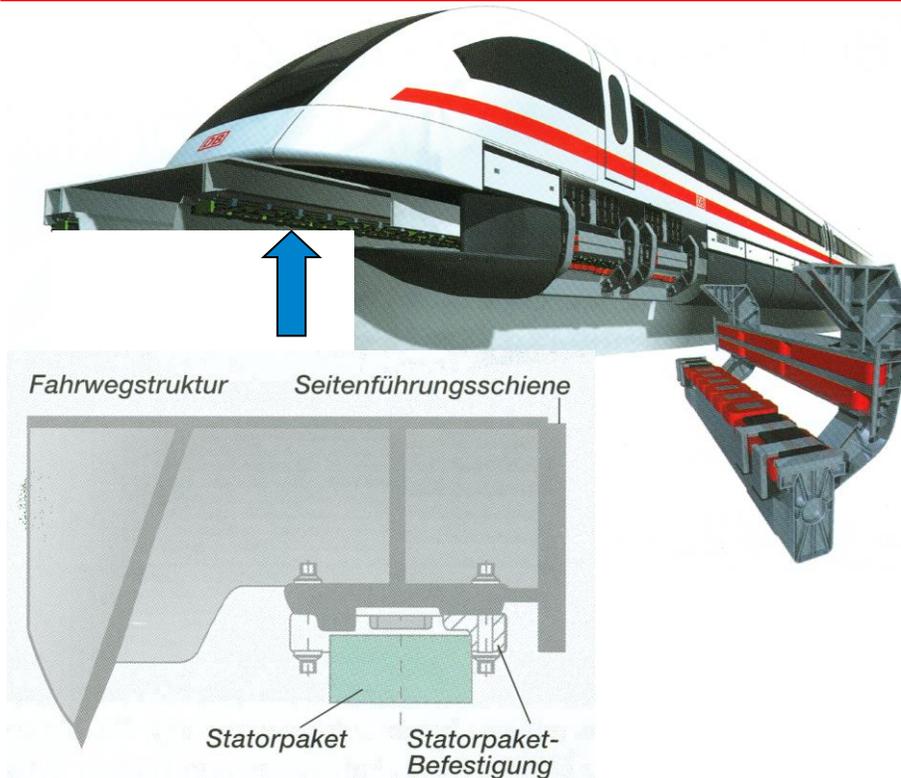


Linearmaschinen

- **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.**

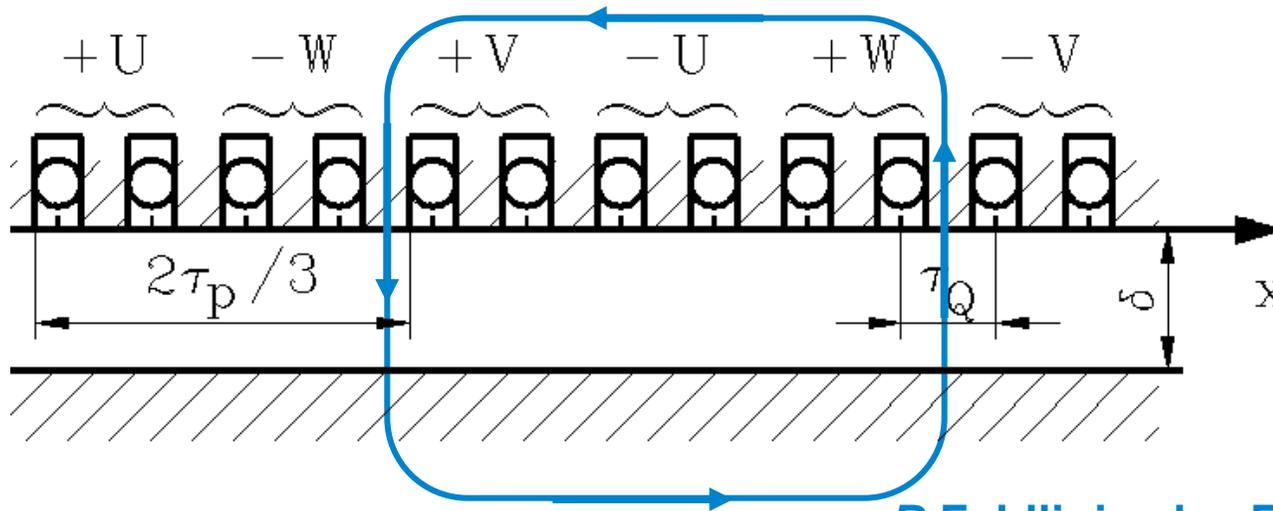
⇒ Bei gleichem Drehmoment M steigt Leistung P um 20%.

- **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*)

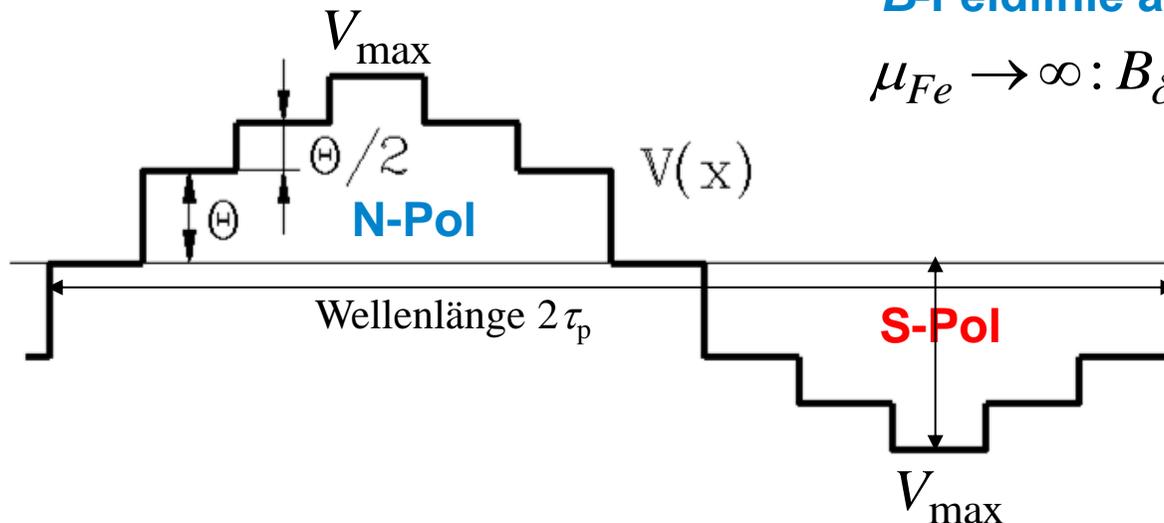
Ständer-Feldwelle eines Polpaares



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 μ_{Fe} unendlich groß angenommen
- Luftspaltweite δ 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

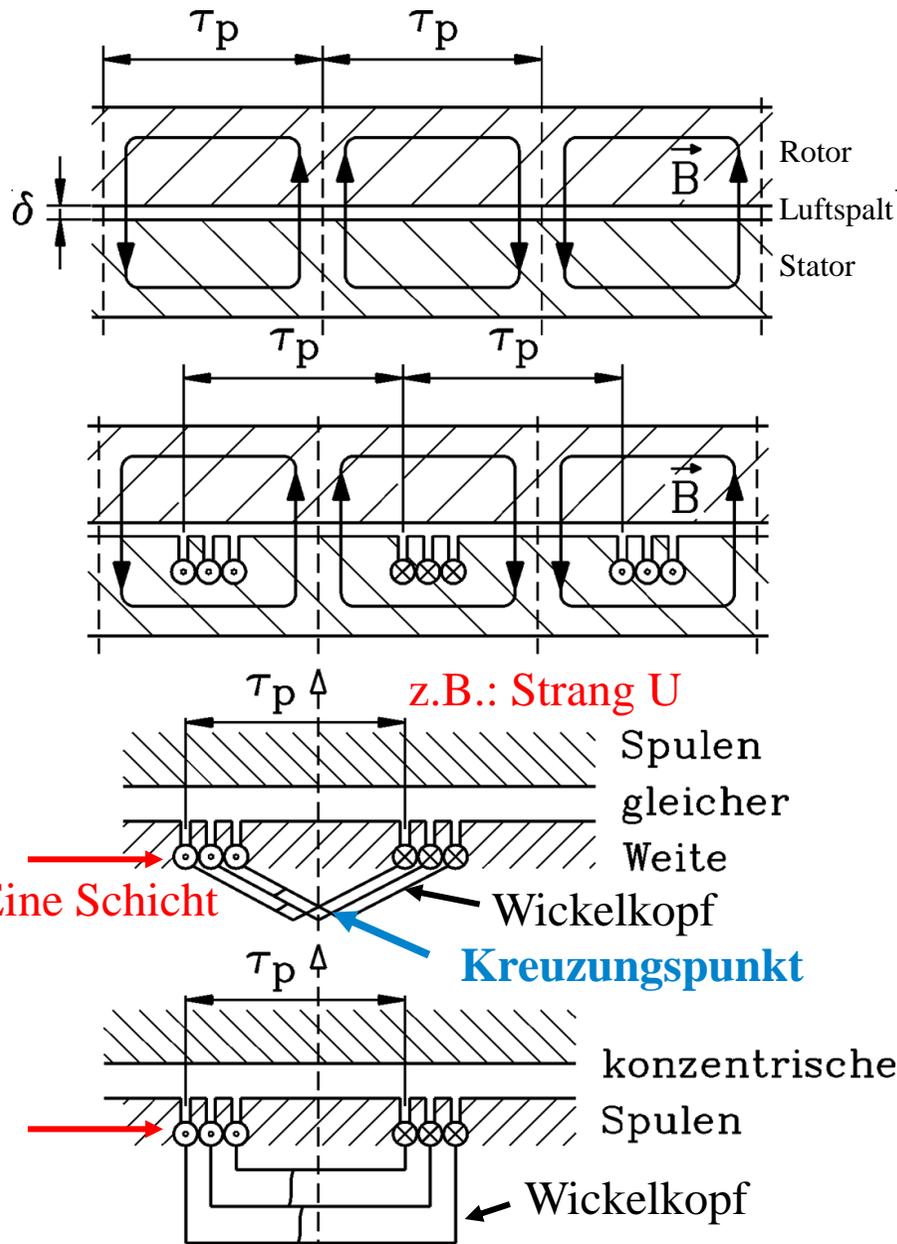
d_{si} : Stator-Innendurchmesser („Bohrung“)

τ_p : Polteilung = $d_{si}\pi/(2p)$

τ_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

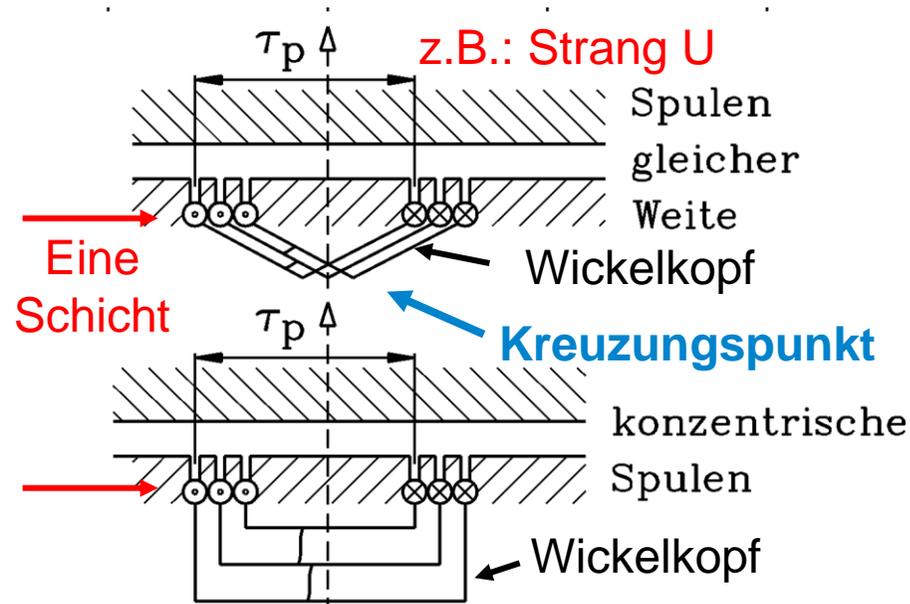
Beispiel:

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

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

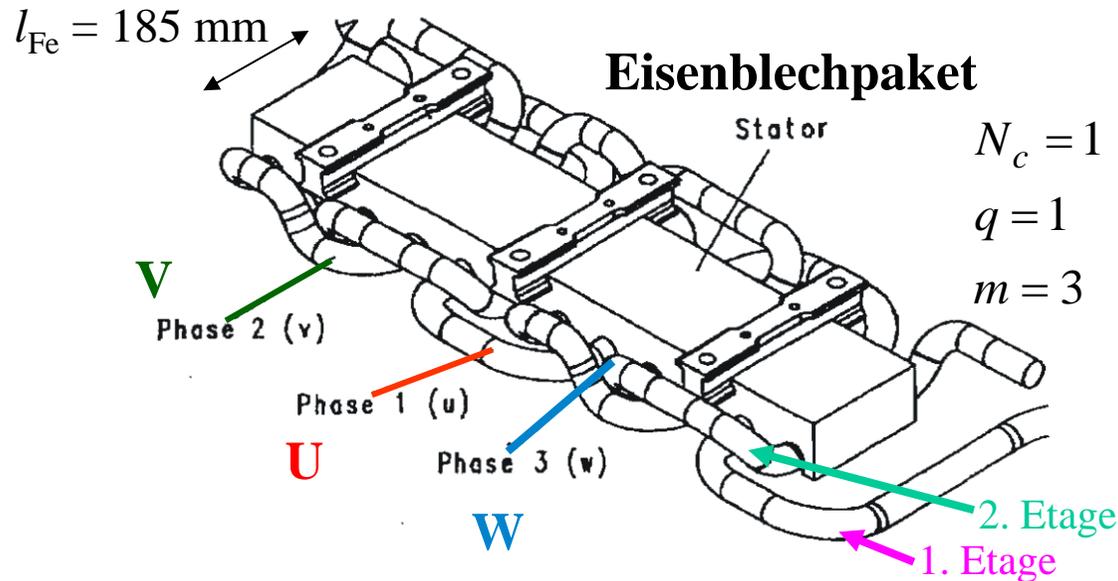
Aber: Kreuzungen zw. Phasen U, V, W

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

"Zwei-Etagen-Wicklung"

Zweietagen-Einschichtwicklungen

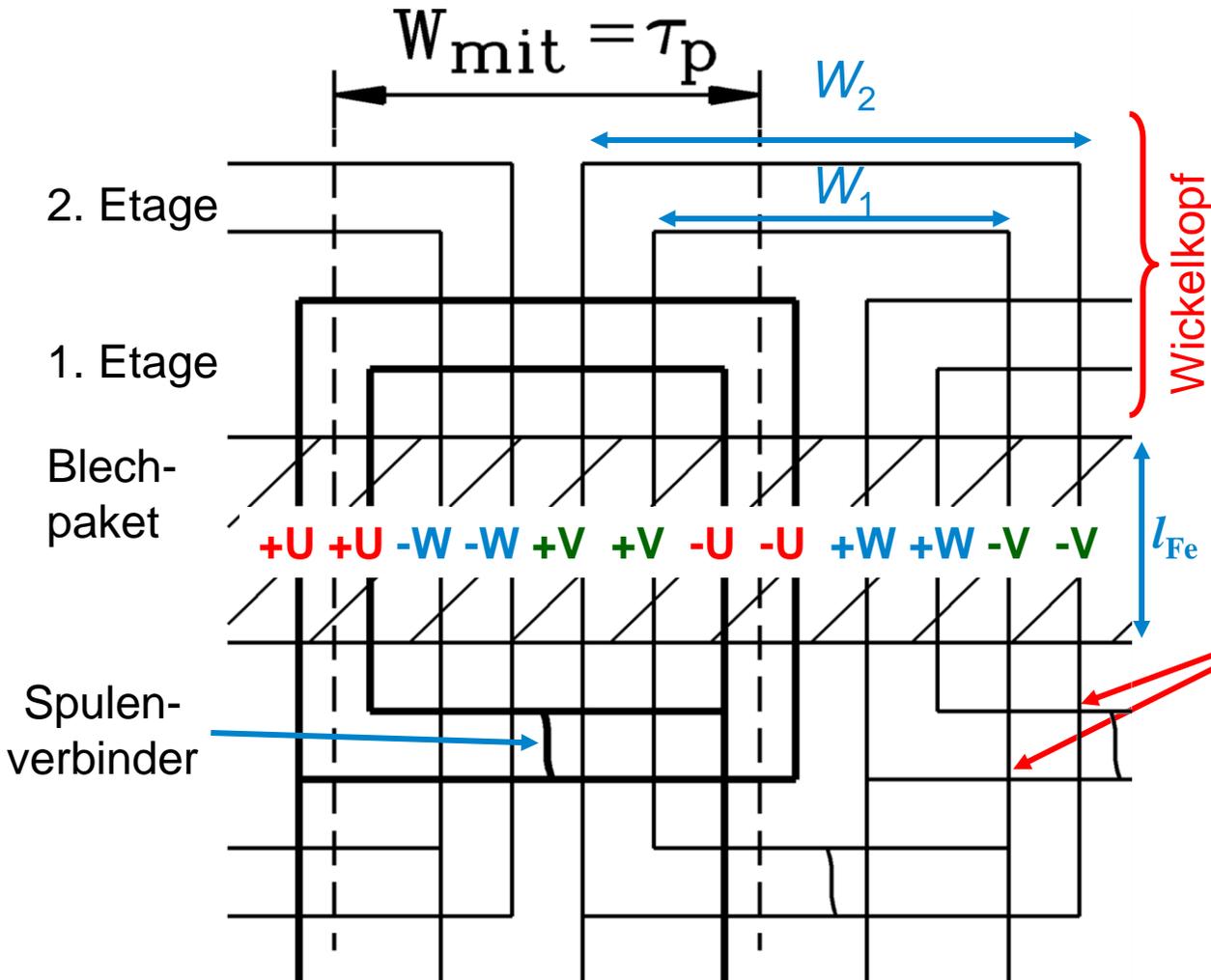
Beispiel: TRANSRAPID-Longstatorwicklung



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:

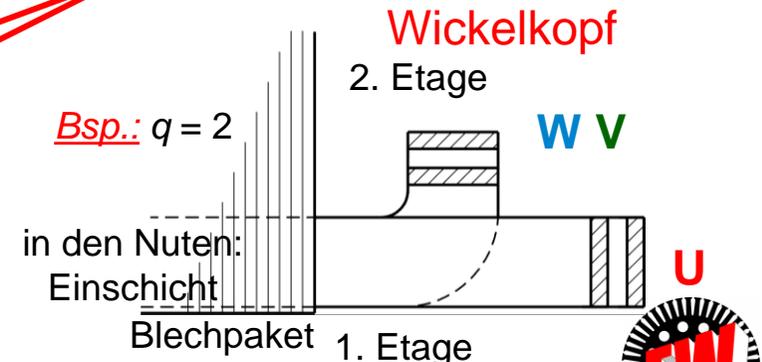
$$W_1 < W_2$$

- Mittlere Spulenweite:

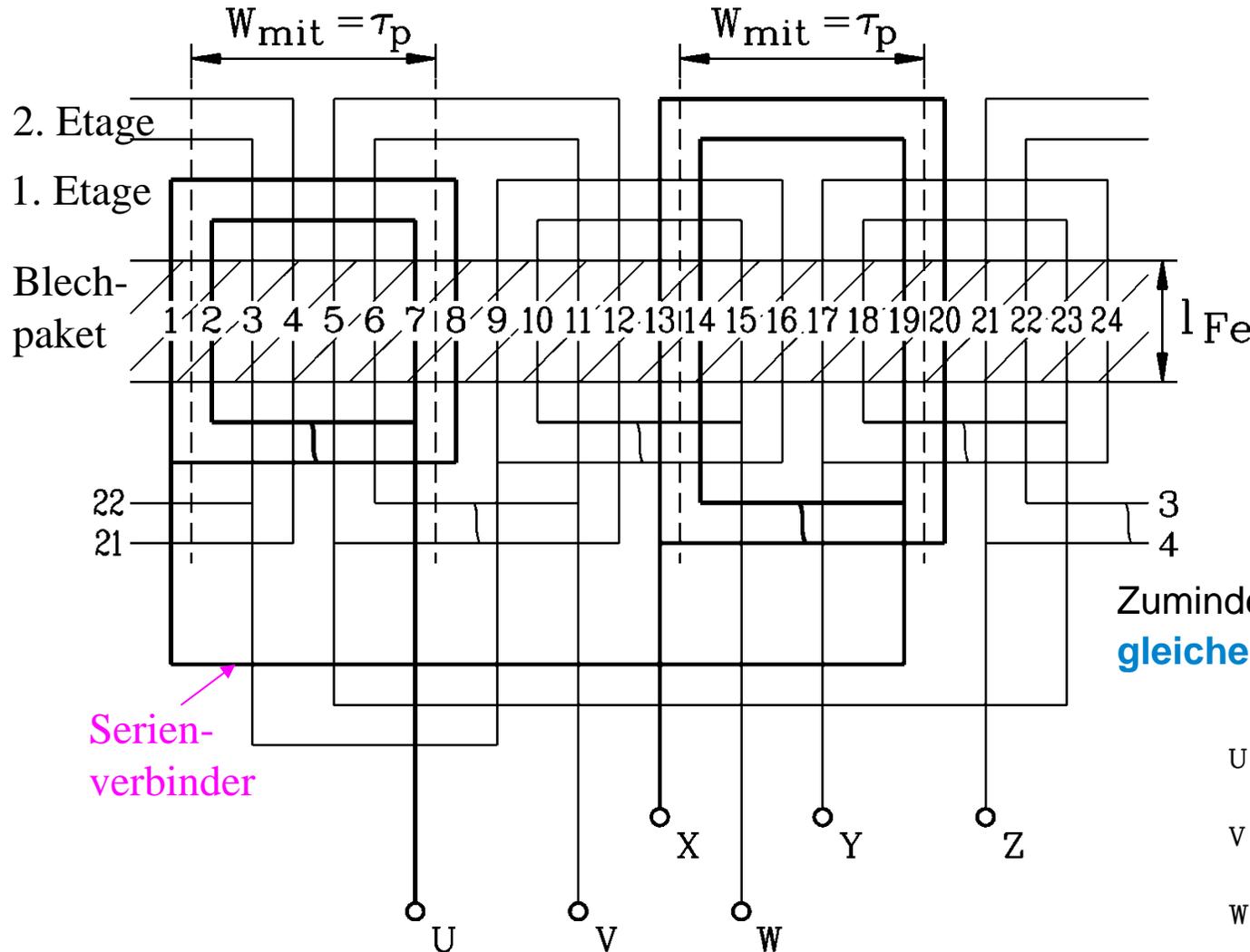
$$W_{mit} = (W_1 + W_2)/2$$

- $W_{mit} =$ Polteilung τ_p

Problem: Kreuzungspunkte,
daher: Hochbiegen



Einschichtwicklung mit kurzen und langen Spulen



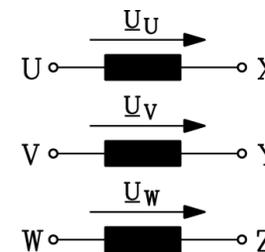
Abgewickelte Darstellung,
vierpolige Maschine: $2p = 4$,
 $m = 3$, $q = 2$, $Q = 24$

Ausführung mit
konzentrischen Spulen

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

(= „2. Etage“). Dann aber:

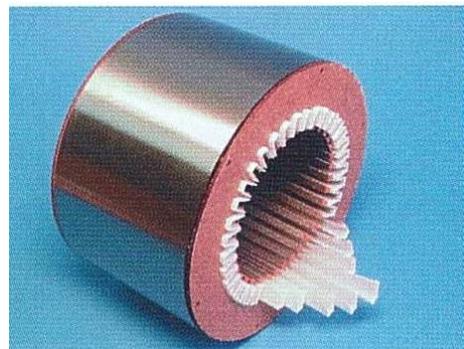
Zumindest vier Pole erforderlich für
gleiche Gesamt-Windungslänge/Strang.



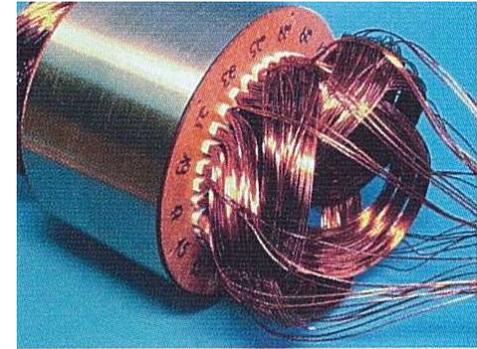
Statorfertigung mit Niederspannungs-Einschichtwicklung ($U_N \leq 1\text{kV}$)



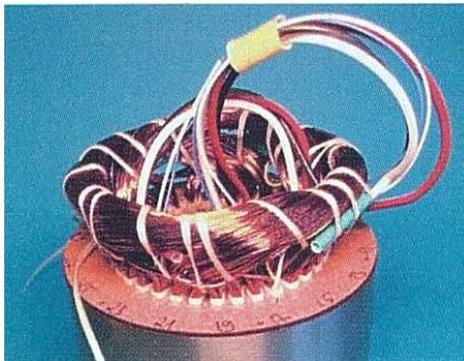
Elektrisch isolierte Fe-Si-Bleche bilden das Statorblechpaket



Einlegen der Nutisolation, z. B.: aromatische Polyamide



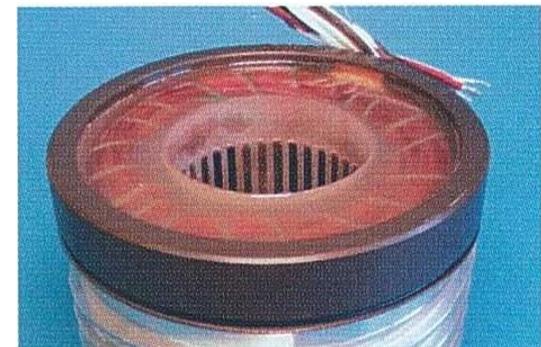
Einlegen der lackisolierten Kupfer-Runddrahtspulen



Schalten der Spulen zu drei Strängen U, V, W



Formen und Bandagieren der Wickelköpfe

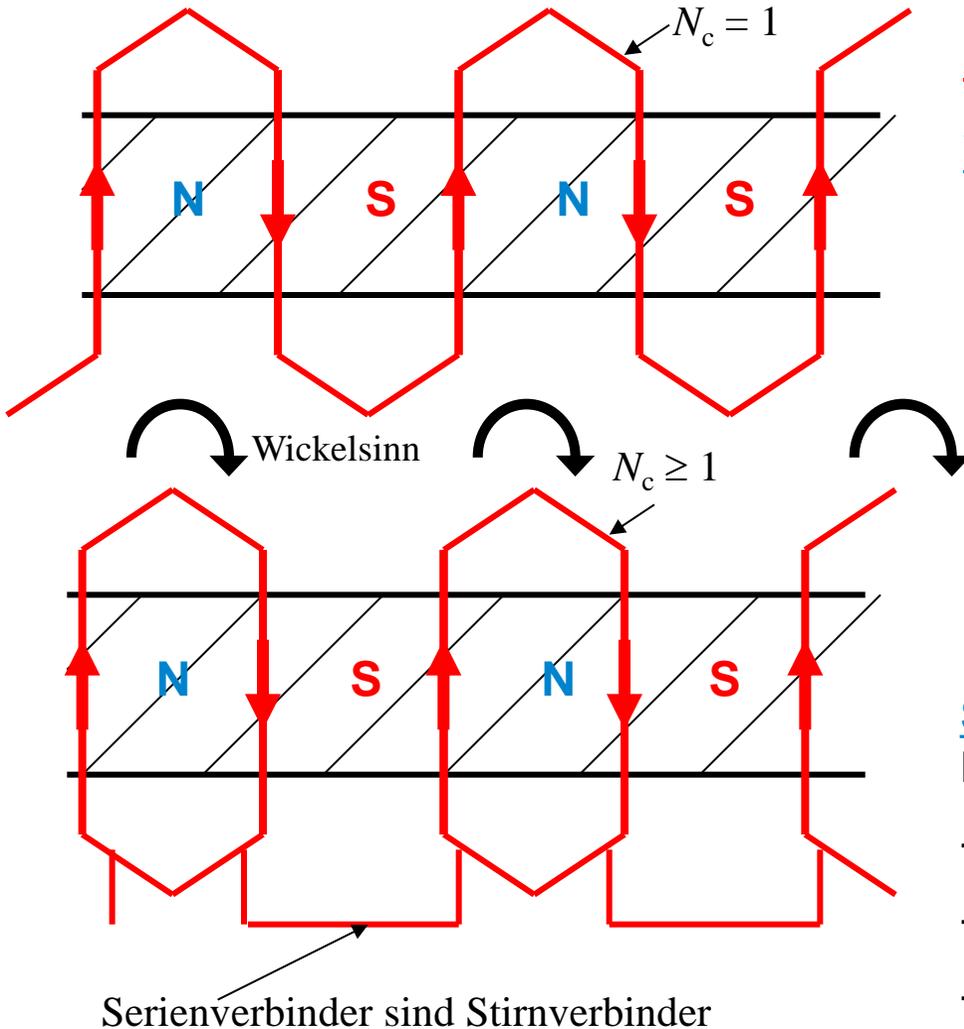


Hochwertiger Epoxidharz-Verguss des kompletten Stators im Vakuum

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

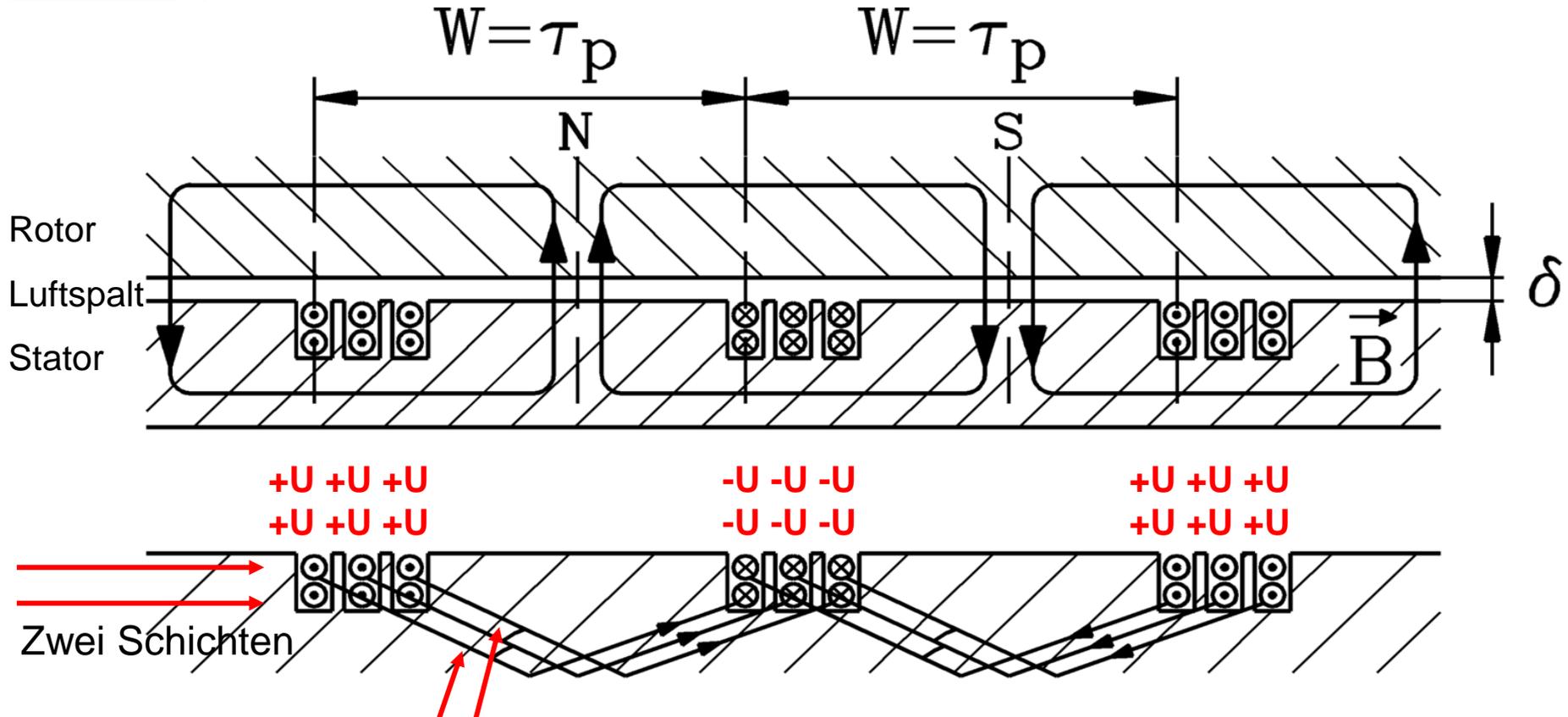
Schleifenwicklung:

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

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

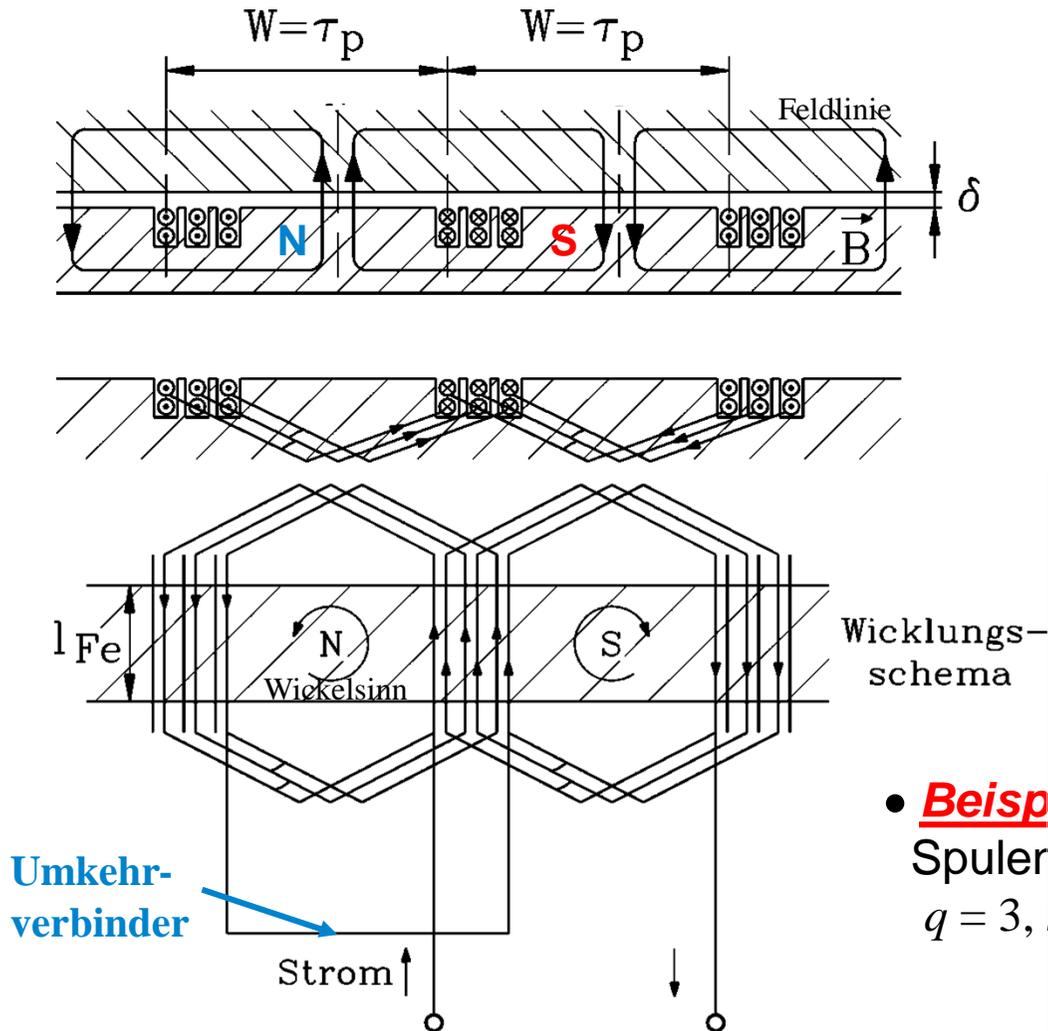
Zweischichtwicklungen: Spulen gleicher Weite

Beispiel: $q = 3, m = 3$



Keine Kreuzungspunkte, daher: Alle Spulen identisch ausgeführt

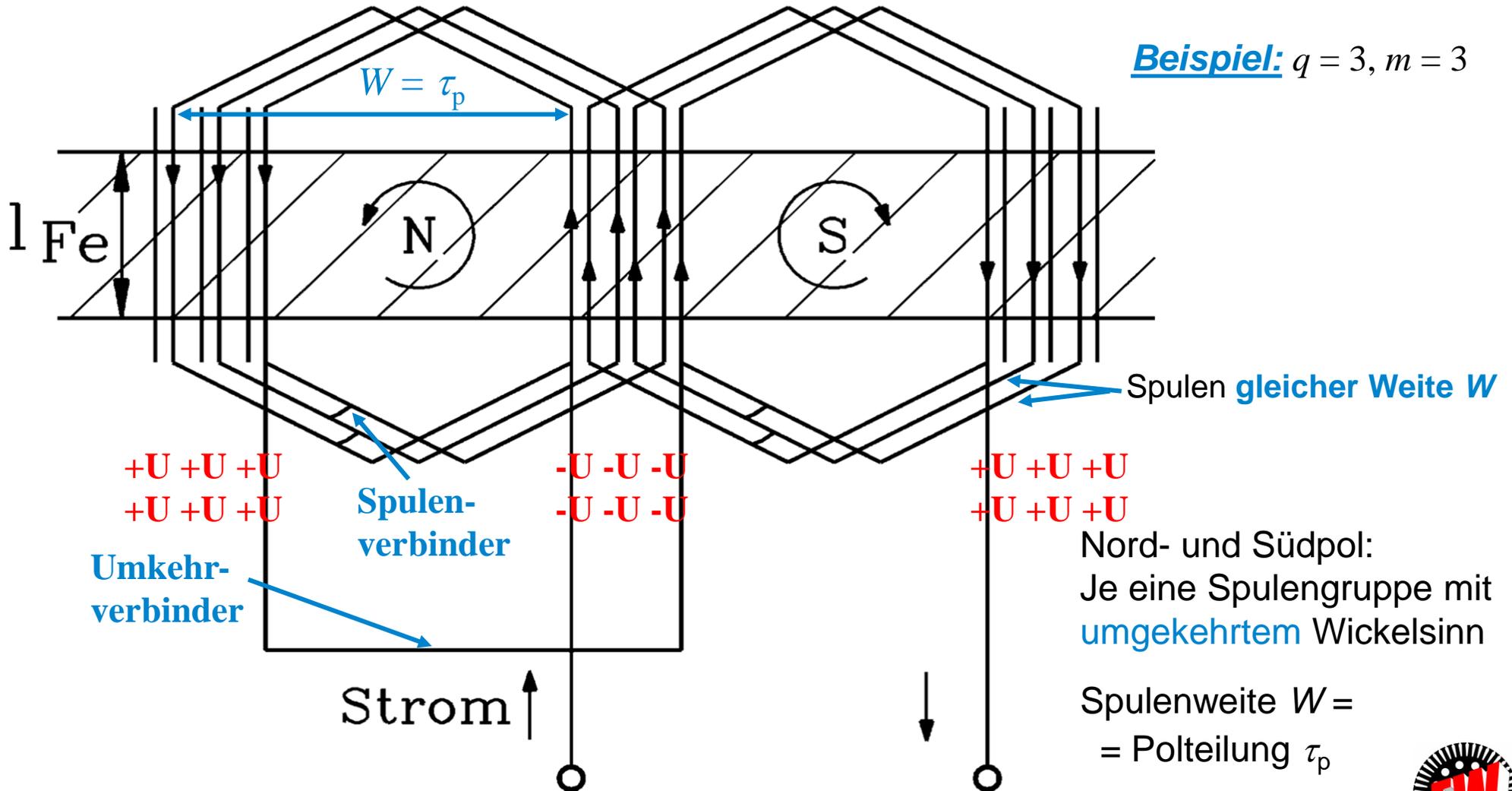
Zweischichtwicklungen



- 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**

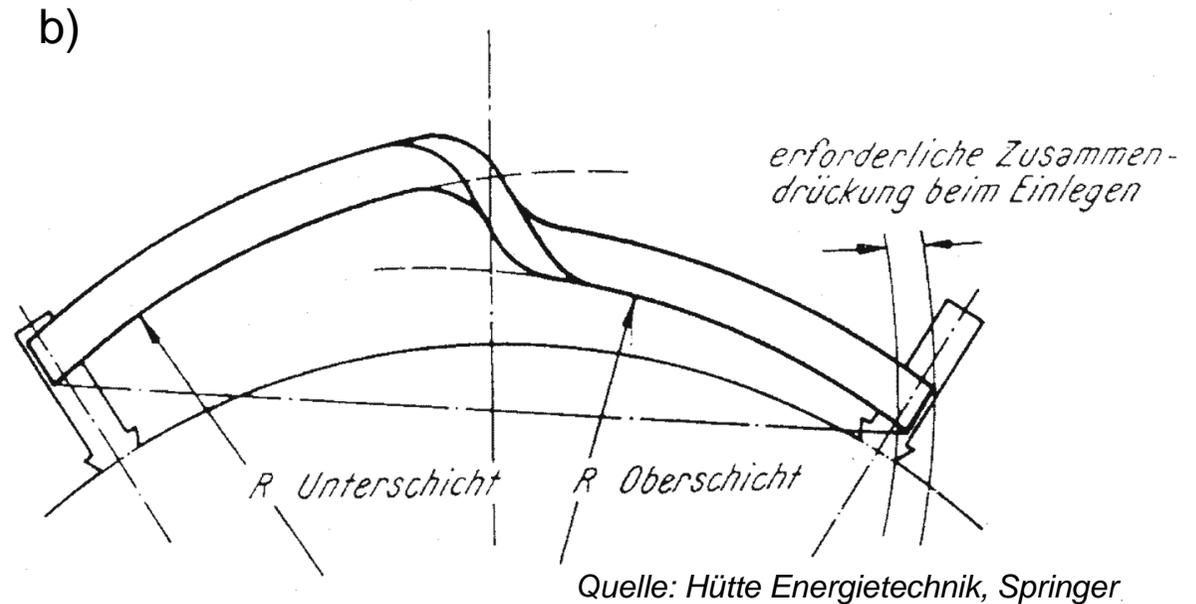
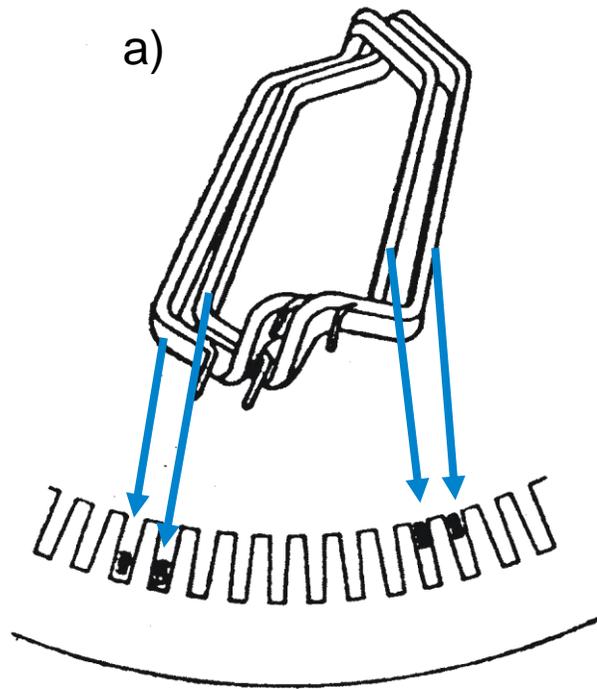
- **Beispiel:** Für vier Pole ($2p = 4$) sind vier Spulengruppen pro Strang erforderlich
 $q = 3, m = 3, Q = 2p \cdot q \cdot m = \underline{36}$

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

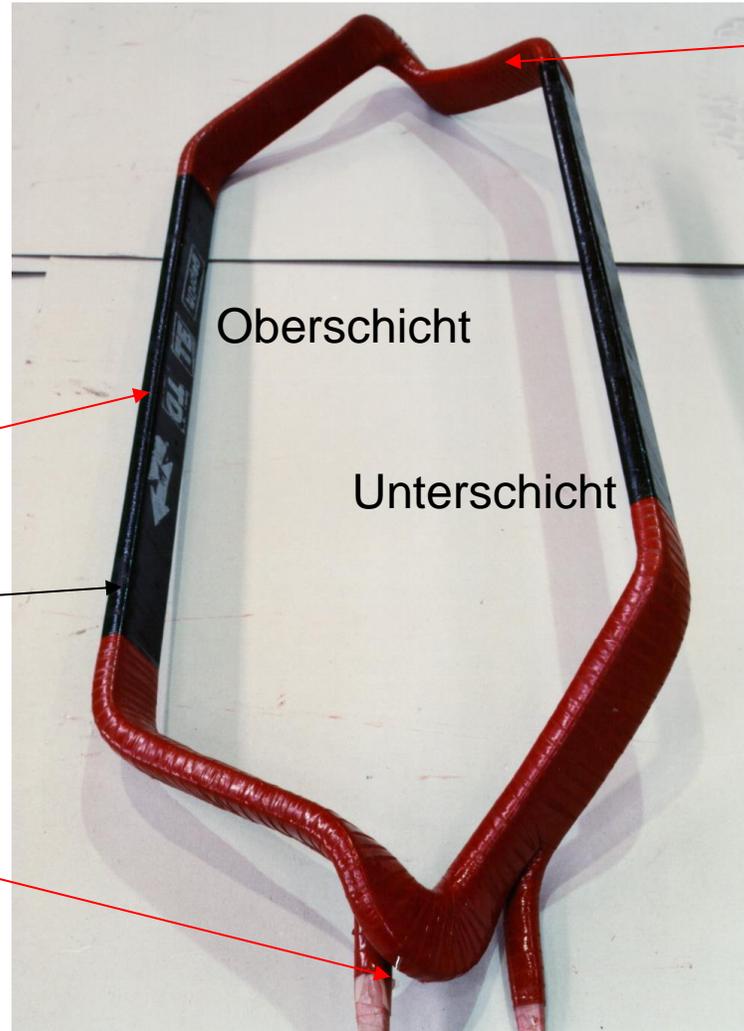
Spule aus lackisolierten Profilkupferdrähten, mit Glimmer-Glasfaser-Band umwickelt, im Vakuum mit Epoxidharz getränkt

Spulenseite, liegt in der Nut

Halbleitender Anti-Korona-Anstrich (grau)

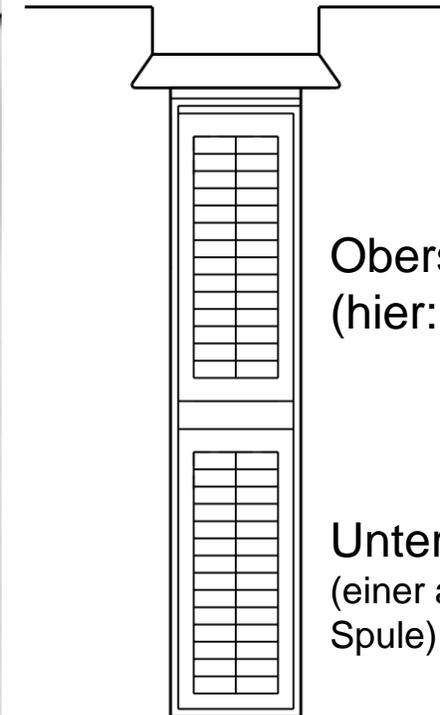
Spulenden = Anschlüsse

Quelle: Andritz Hydro, Austria



Wickelkopf

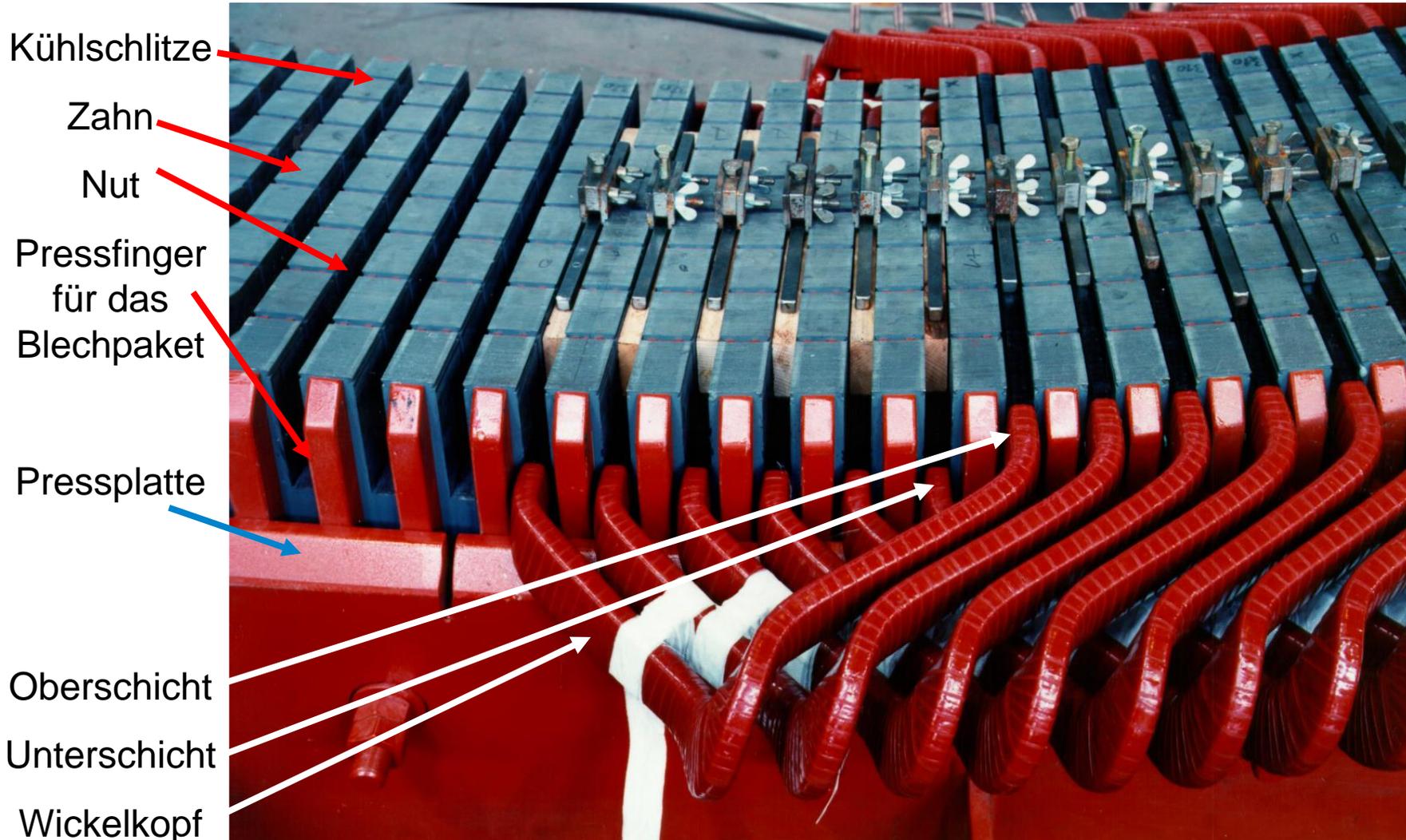
Nut



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

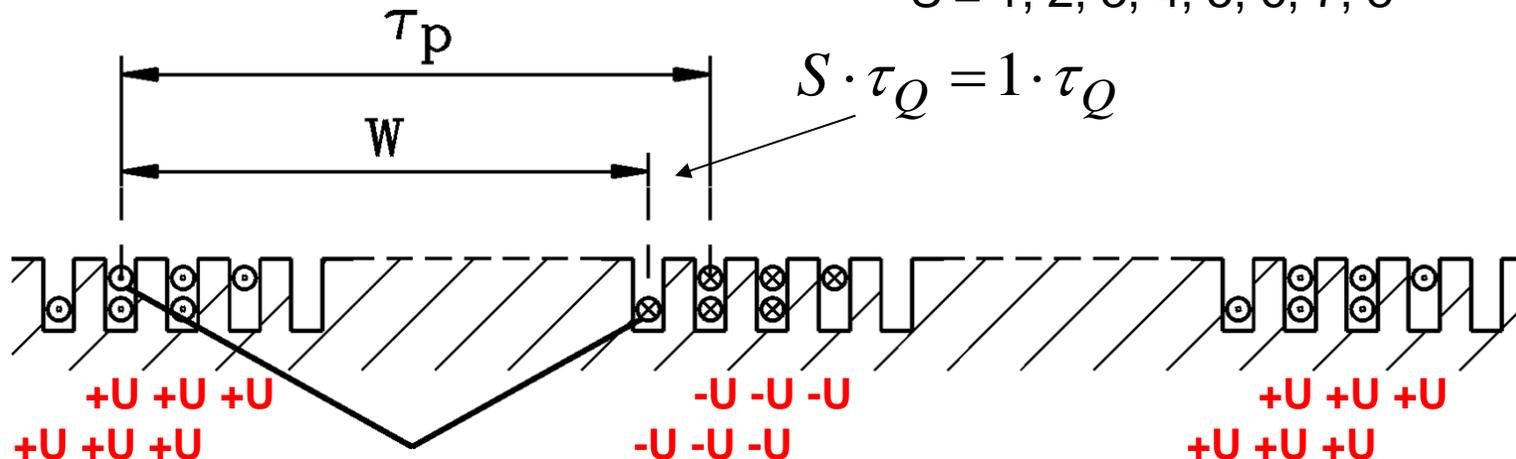
$$W = \tau_p \cdot \frac{m \cdot q - S}{m \cdot q} = \tau_p \cdot \frac{Y_Q}{m \cdot q}$$

S ganzzahlig

- **Beispiel:**

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

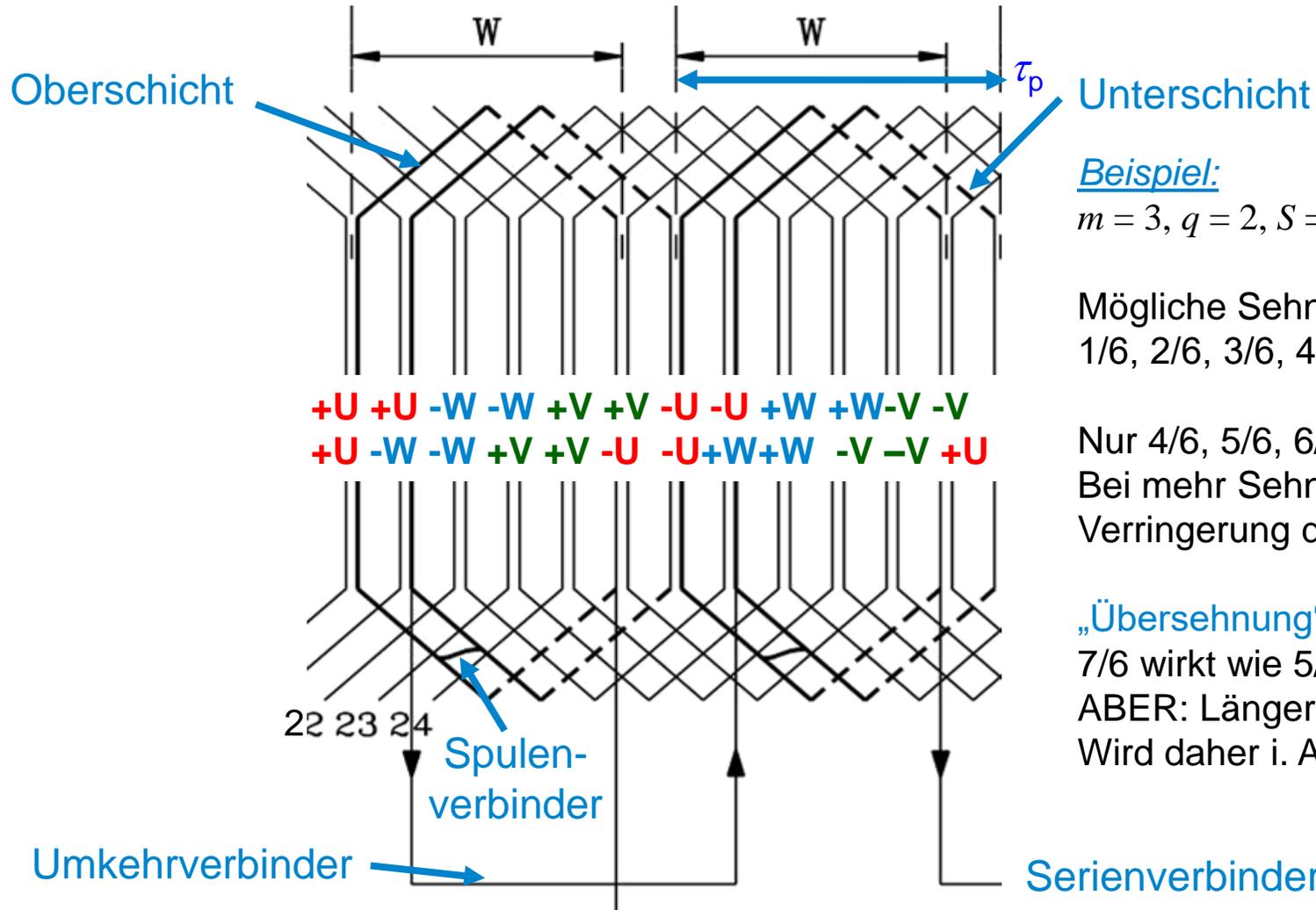
Sehnung ist möglich für $S < m \cdot q = 3 \cdot 3 = 9$:
 $S = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$



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 Φ

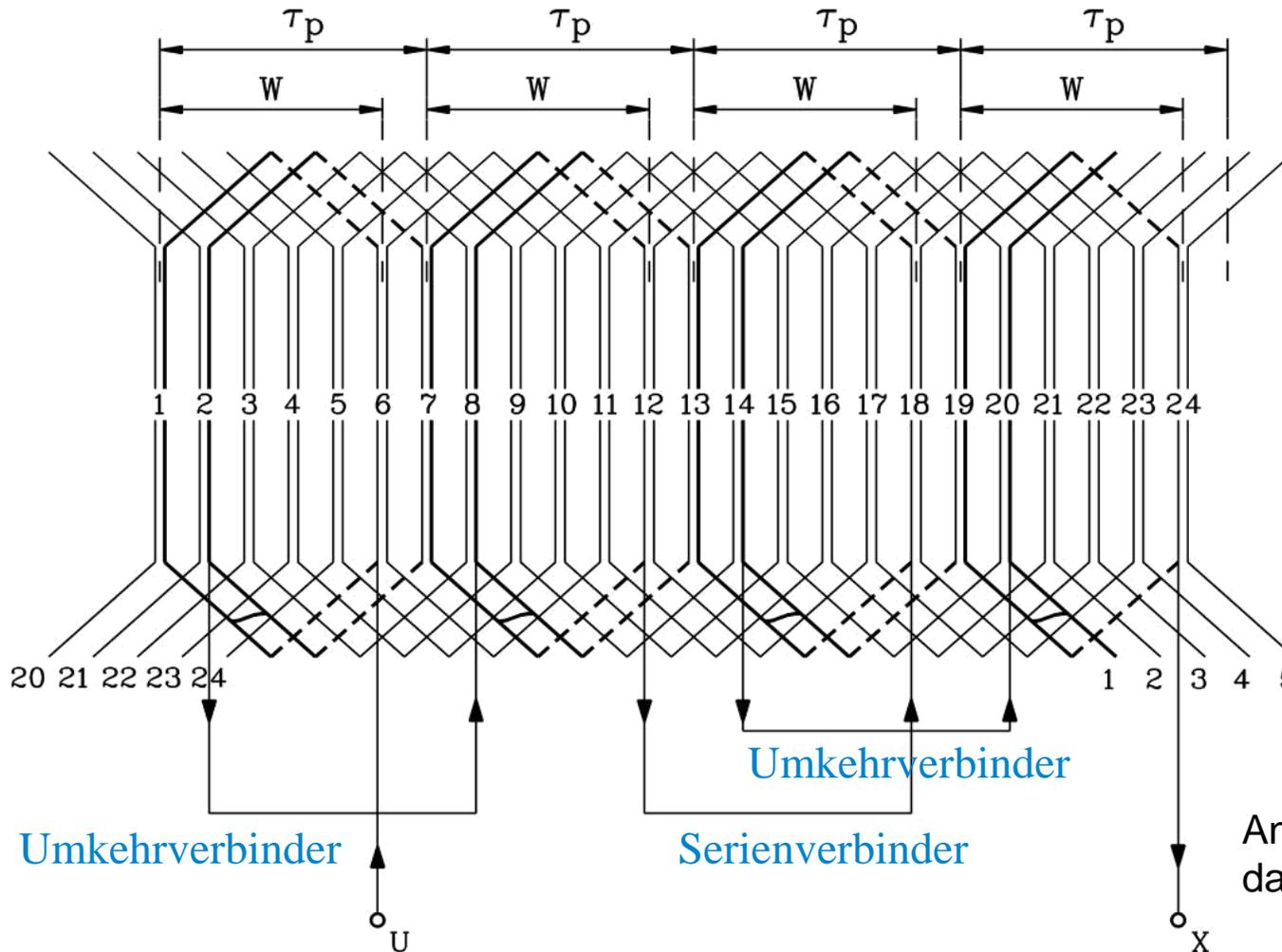
„Übersehnung“: $W/\tau_p > 1$, z. B.:

7/6 wirkt wie 5/6,

ABER: Längerer Wickelkopf!

Wird daher i. A. nicht ausgeführt!

Gesehnte Zweischicht-Drehstromwicklung

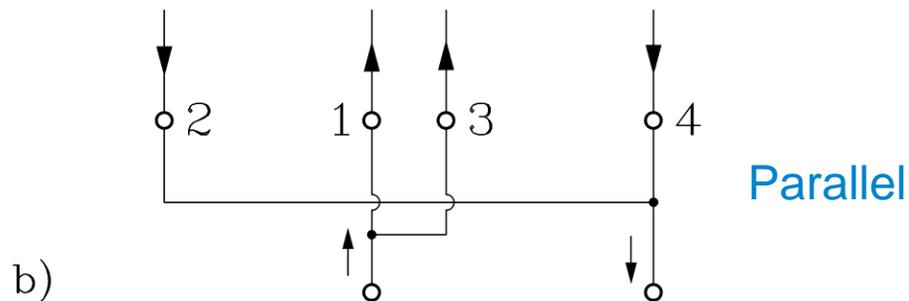
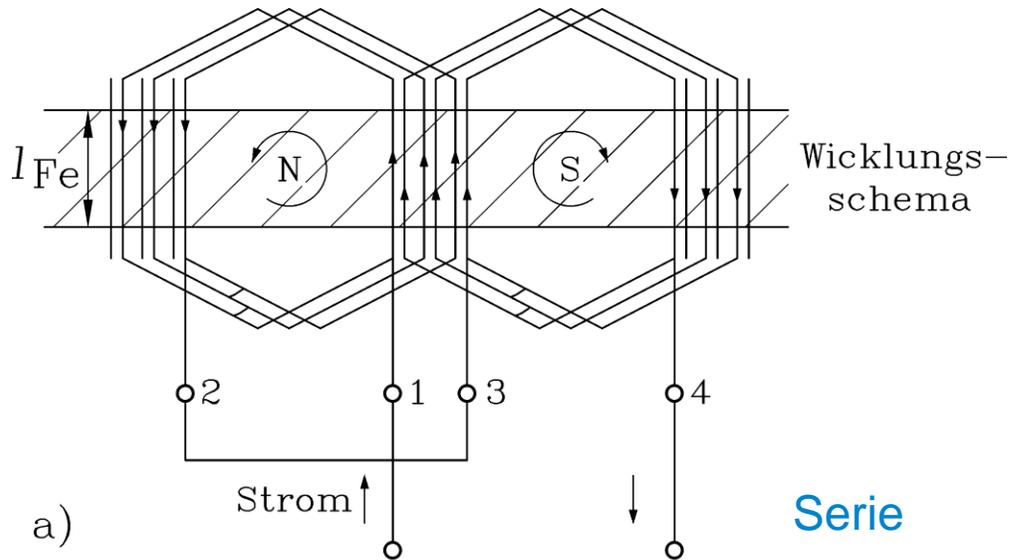


Beispiel:

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.: elfwindige 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

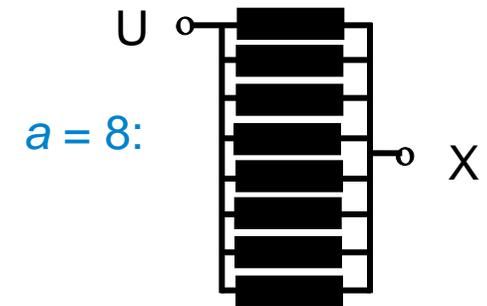
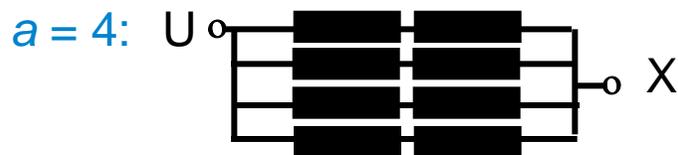
$a = 4$: 2 Spulengruppen in Serie, **vier** parallele Serienabschnitte

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

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

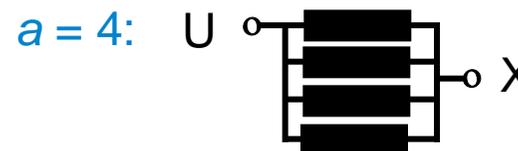
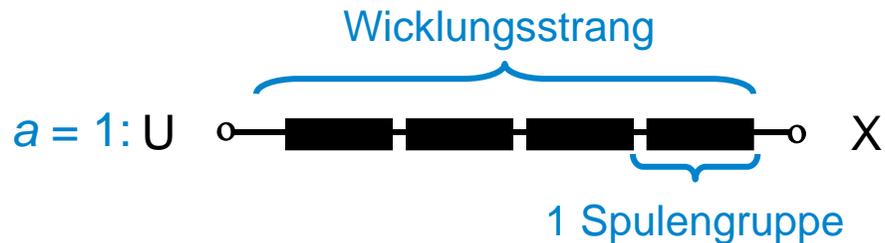
$$N = \frac{2pqN_c}{a}$$

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:

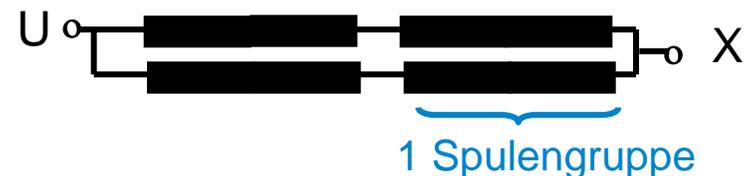
Je Strang $N = 2 \cdot 2 \cdot 11 / 2 = 22$ Windungen

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

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:

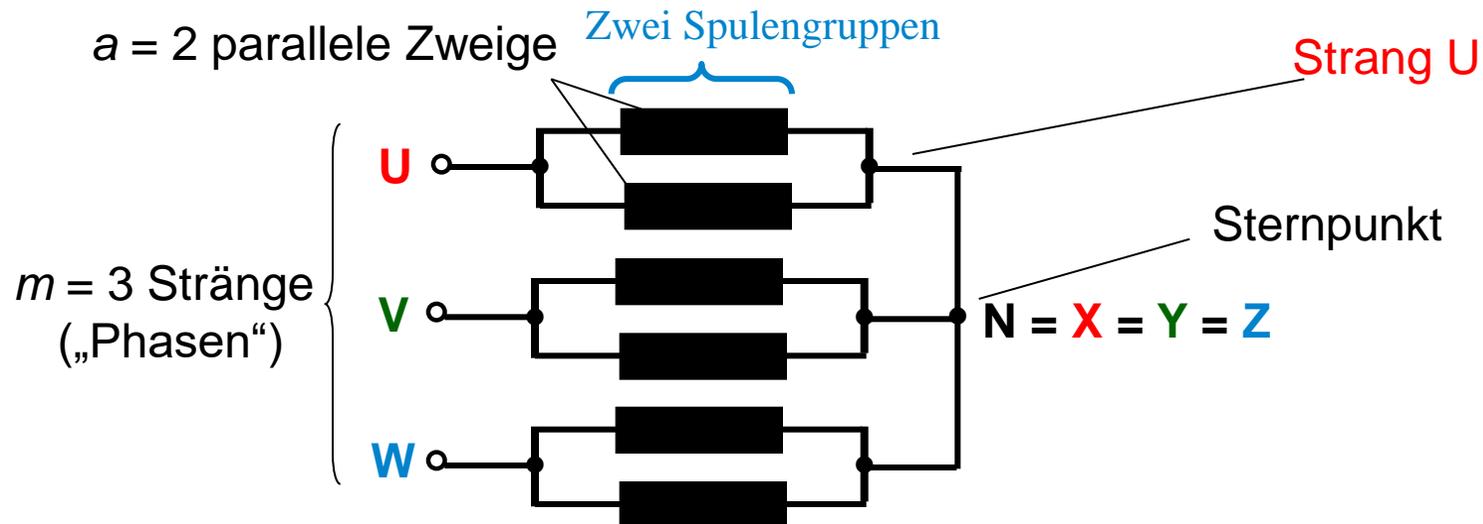
Sternschaltung:

4 Spulengruppen je Strang

$a = 2$:

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

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



Einlegen der Statorbleche bei einem Synchron-Wasserkraftgenerator



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle:

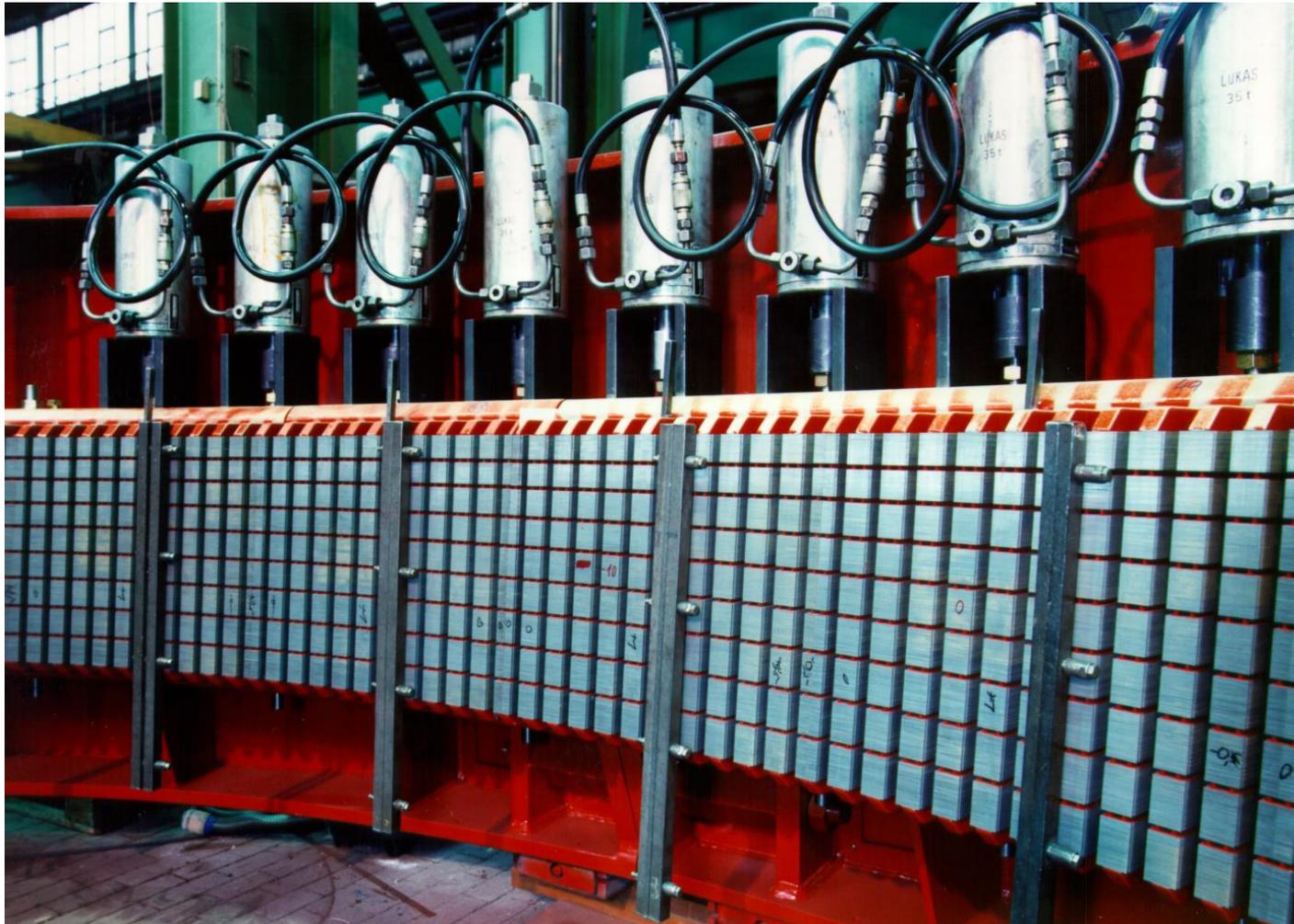
Andritz Hydro, Austria



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.

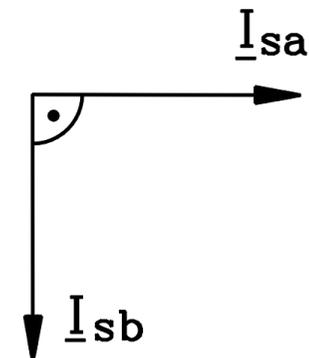
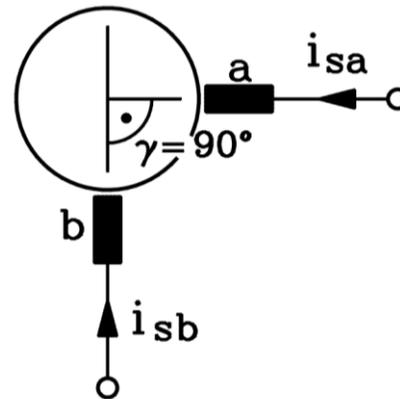
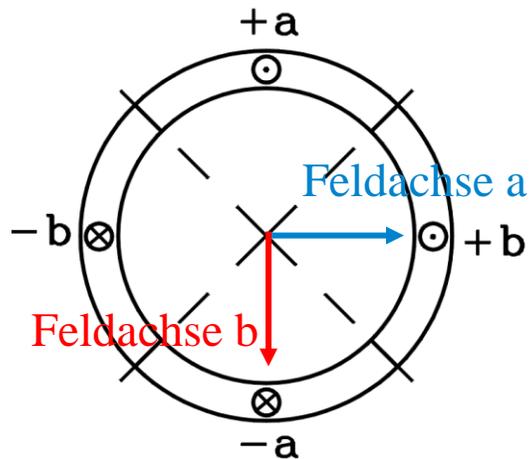
Beispiel: $m = 2$: räumlicher Versatz der Stränge: $\tau_p/2$

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

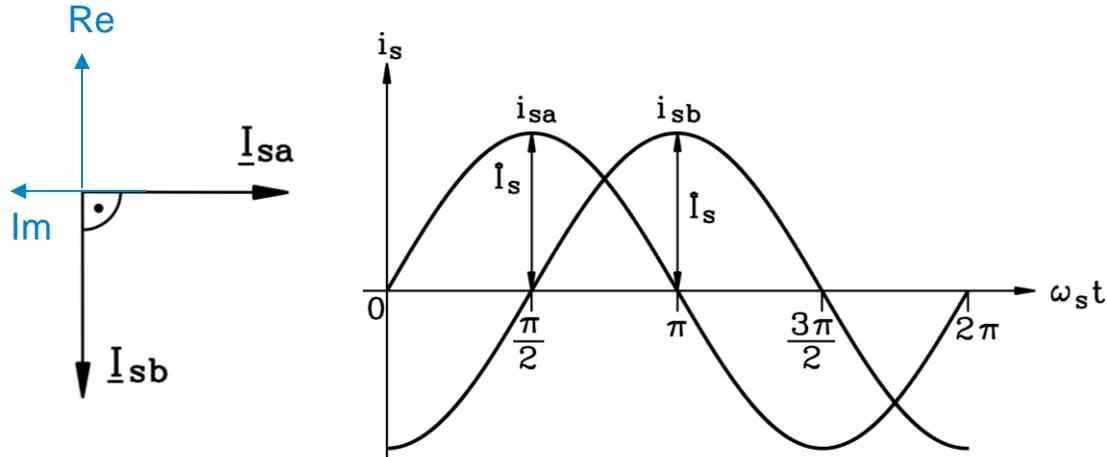
Sonderfall: Zweistrangige Statorwicklung $m = 2$

Beispiel: $2p = 2$

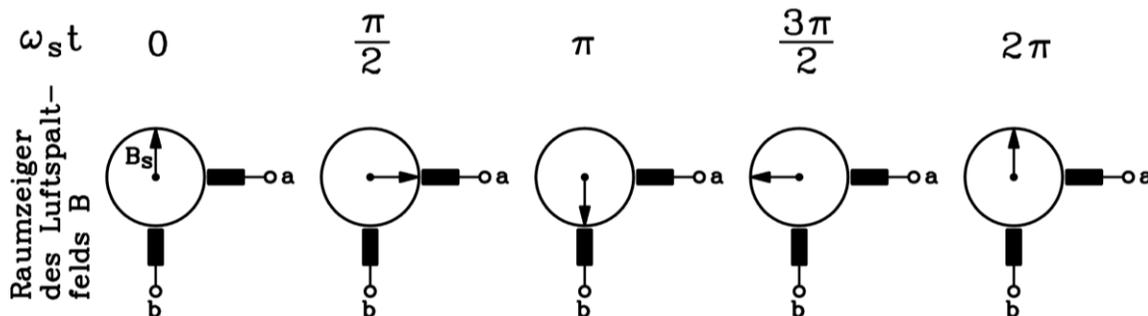
- Zwei Stränge a und b, um **räumlich 90°** versetzt bei zweipoliger Wicklung
- Gespeist mit zweiphasigem Stromsystem i_{sa}, i_{sb} , wobei die Ströme um **90° el** **elektrisch** phasenverschoben sind



Drehfeld bei zweiphasigem Stromsystem $m = 2$



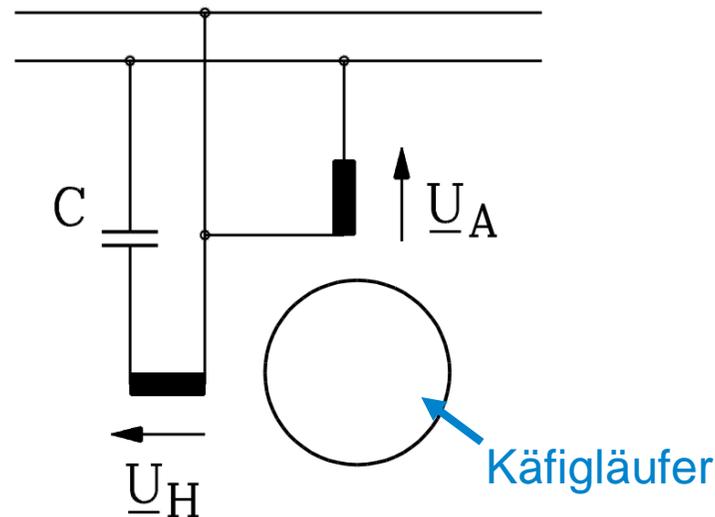
ω_{st}	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π
i_{sa}	0	$I_s\sqrt{2}$	0	$-I_s\sqrt{2}$	0
i_{sb}	$-I_s\sqrt{2}$	0	$I_s\sqrt{2}$	0	$-I_s\sqrt{2}$



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