

# E-Maschinen für elektrifizierte Triebstränge



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Eintägiger Einführungskurs

**Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder**

**Technische Universität Darmstadt**  
Institut für Elektrische Energiewandlung  
[abinder@ew.tu-darmstadt.de](mailto:abinder@ew.tu-darmstadt.de)



# Inhalt

- Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung
- Synchronmaschinen (PM-erregt, ele. erregt)
- Asynchronmaschinen
- Geschaltete Reluktanzmaschinen
- Drehfeldwicklungen
- Zahnspulenwicklungen
- Käfigwicklungen
- Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe
- Magnetkreisberechnung
- Verluste, Erwärmung, Kühlung
- Sensorik

# Warum Wechselstrommotoren ?

- Obwohl Gleichstrom (**Batteriespeicher**) erforderlich, sind E-Motoren im Kfz weitgehend **Wechselstrommaschinen!**

- **Gleichstrommaschinen:** Antriebsleistung über Kohlebürsten & Kommutator übertragen: Funkenbildung durch **Stromwendung** (mechanische Gleichrichtung)

Quelle:  
Brenner,  
Bürstadt

⇒ erhöhte rotierende Masse

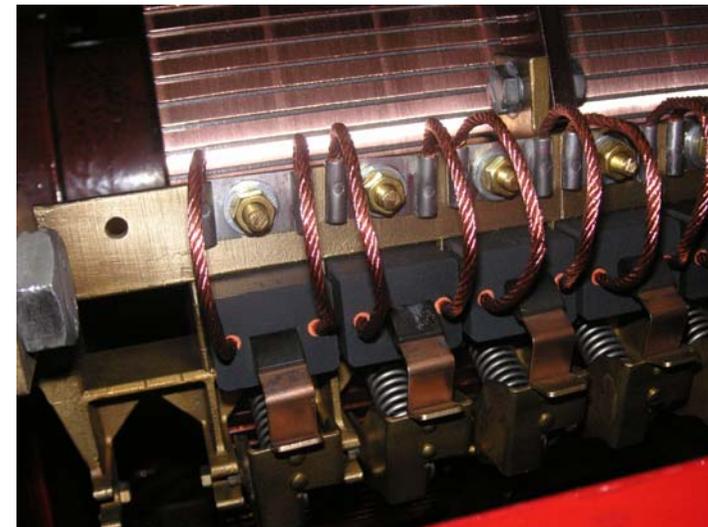
⇒ erhöhte Verluste (Bürsten, Wendepole)

⇒ Bürstenwartung, Kohlestaub

## **Fazit:**

1) **Wechselstrommaschinen** als  
**Synchronmaschinen** und  
**Asynchronmaschinen** im Einsatz!

2) **Wechselrichter** zwischen Batterie und E-Motor erforderlich!

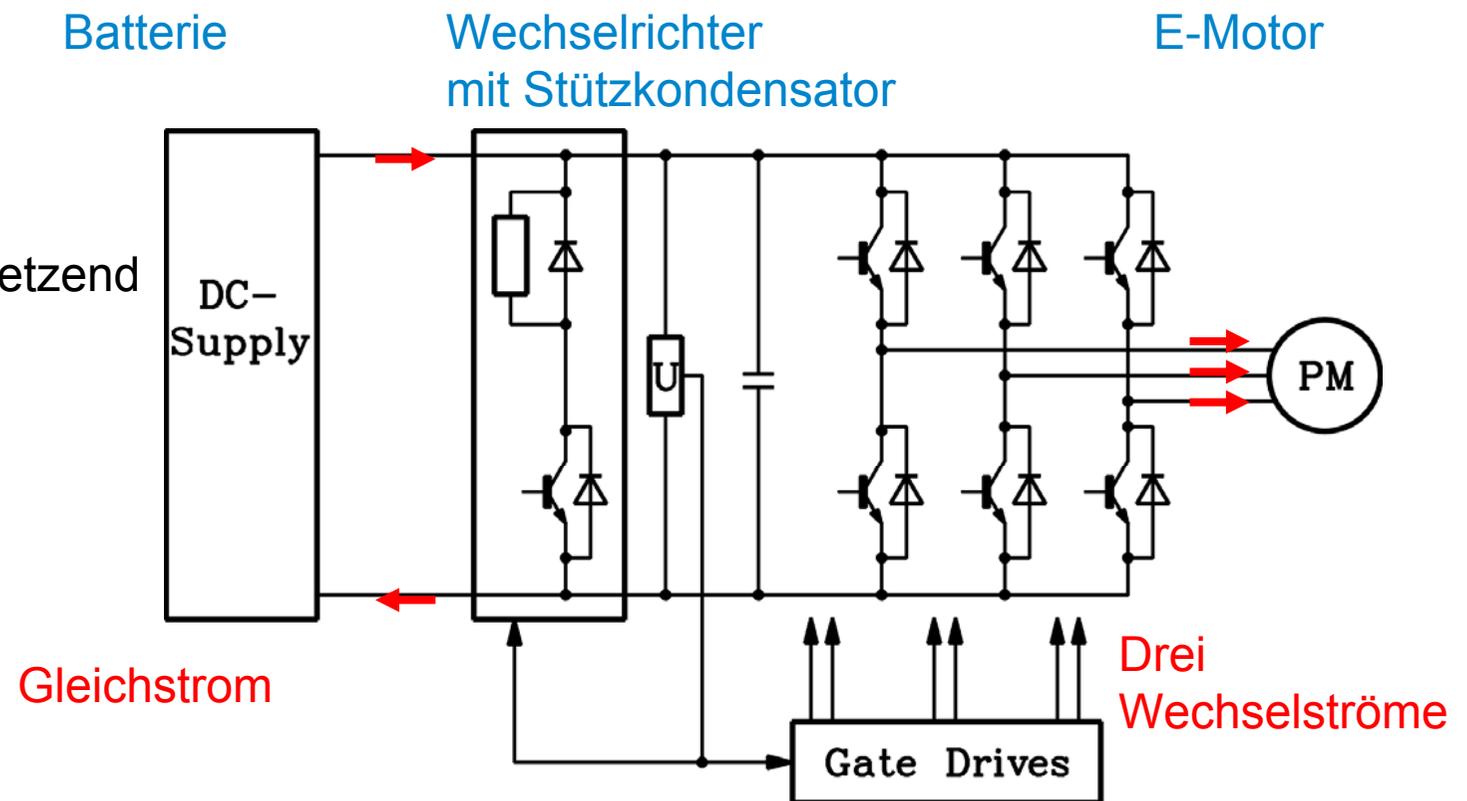


Kupferkommutator & Graphitbürsten

# Beispiel: Batteriebetriebene Fahrzeuge

System:

- a) Batterie
- b) Wechselrichter
- c) E-Motor
- d) Getriebe untersetzend
- e) Rad
- f) Fahrbahn



PM: Permanentmagnet-Synchronmotor



# Inhalt

## 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

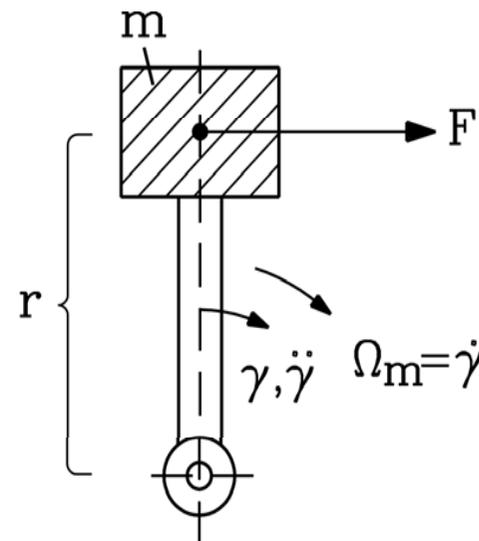
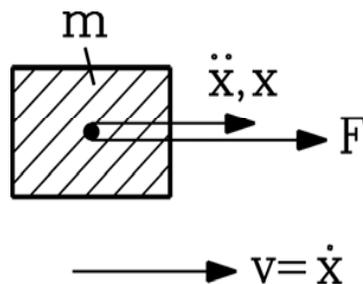
## Kraft und Drehmoment

- **Kraft** = Masse x Beschleunigung (NEWTON) :

$$F = m \times (d^2x/dt^2)$$

- **Drehmoment** = Trägheitsmoment x Winkelbeschleunigung

$$M = J \times (d^2\gamma / dt^2) \quad \text{mit: } M = F \cdot r, J = m \cdot r^2$$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Mechanische Energie und Leistung

- **Energie** als geleistete Arbeit = Kraft x Weg:

$$W = F \cdot x$$

- **Leistung** = Energie / Zeit = Kraft x Geschwindigkeit

$$P = W/t = F \cdot x/t = F \cdot v$$

- **Leistung** = Energie / Zeit = Drehmoment x Winkelgeschwindigkeit

$$P = W/t = (F \cdot r) \cdot (x/r) / t = M \cdot \gamma / t = M \cdot \Omega_m$$

- **Gespeicherte** mechanische Energie  $W$  als kinetische Energie  
(z. B. Schwungmassenspeicher):

$$W = m \cdot v^2 / 2 \text{ (translatorisch)}$$

$$W = J \cdot \Omega_m^2 / 2 \text{ (rotatorisch)}$$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

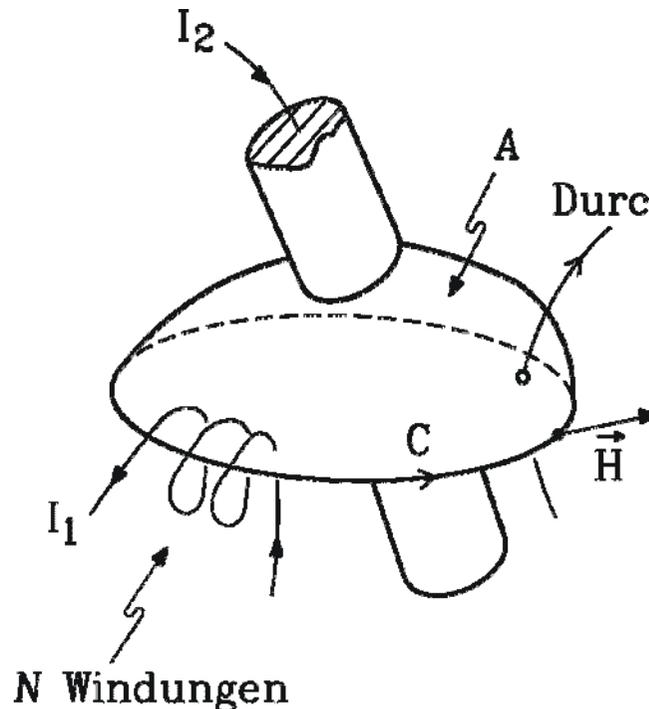
## Erzeugung magnetischer Felder

<b>Stromdurchflossene Spulen</b>	<b>Permanentmagnete</b>
<b>- Erregerverluste (Abhilfe: Supraleitung)</b>	<b>+ keine Verluste</b>
<b>- Stromversorgung nötig</b>	<b>+ einfacher Aufbau des Motors</b>
<b>+ (beliebig) hohe Felder möglich</b>	<b>- Magnetfeld nicht veränderbar</b>
<b>+ Magnetfeld veränderbar</b>	<b>- Gefahr der Entmagnetisierung</b>
<b>+ bei großen Maschinen kostengünstiger</b>	

Material: Kupfer, Isolierstoff

Eisen-Nickel-Kobalt-Legierungen u.  
Sinterwerkstoffe mit Seltenen Erden

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung



## Der *AMPERE*'sche Durchflutungssatz

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

Durchflutung  
 $\Theta = NI_1 - I_2$

- Das Kurvenintegral der magnetischen Feldstärke  $H$  längs der geschlossenen Kurve  $C$ , die die Fläche  $A$  aufspannt, ist gleich der resultierenden Durchflutung  $\Theta$ , die durch die Fläche  $A$  hindurch tritt.

**Beispiel für  $\Theta$  :  $\Theta = NI_1 - I_2$**

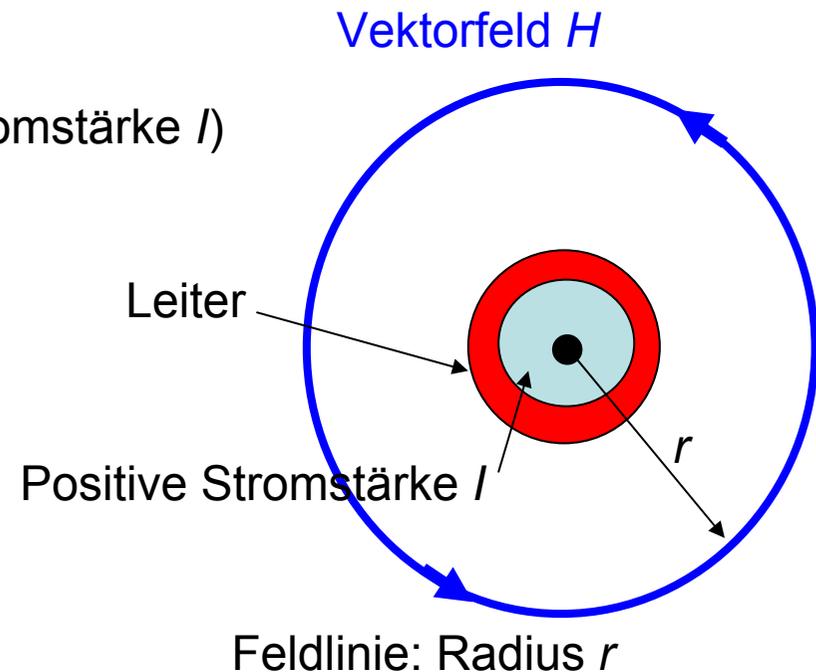
# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Beispiel: AMPERE'scher Durchflutungssatz

- Magnetische Feldstärke eines geraden, stromdurchflossenen elektrischen Leiters (Stromstärke  $I$ ) außerhalb des Leiters

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_0^{2\pi} H_t \cdot r d\varphi = H_t \cdot r 2\pi = \Theta = I$$

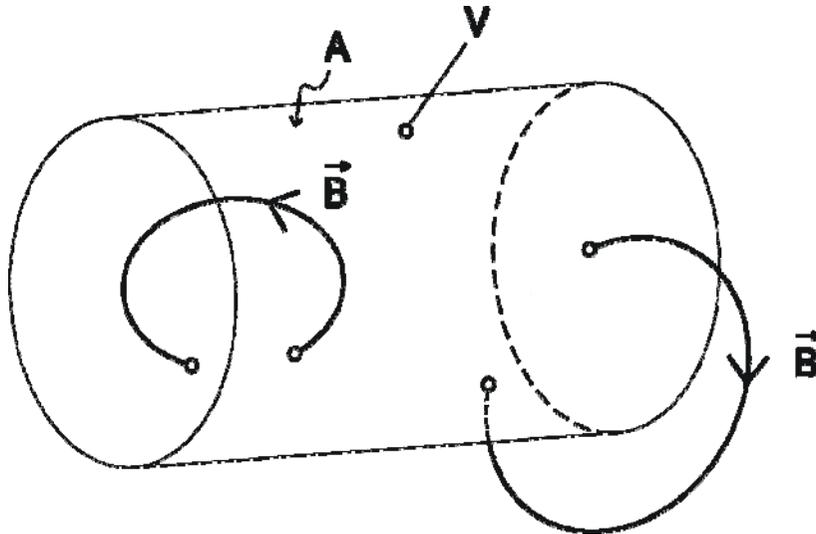
$$H(r) = H_t(r) = I / (2\pi \cdot r)$$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Gesetz vom magnetischen Hüllenfluss

- Der magnetische Hüllenfluss  $\Phi$  über eine geschlossene Fläche  $A$  ist **stets Null** !



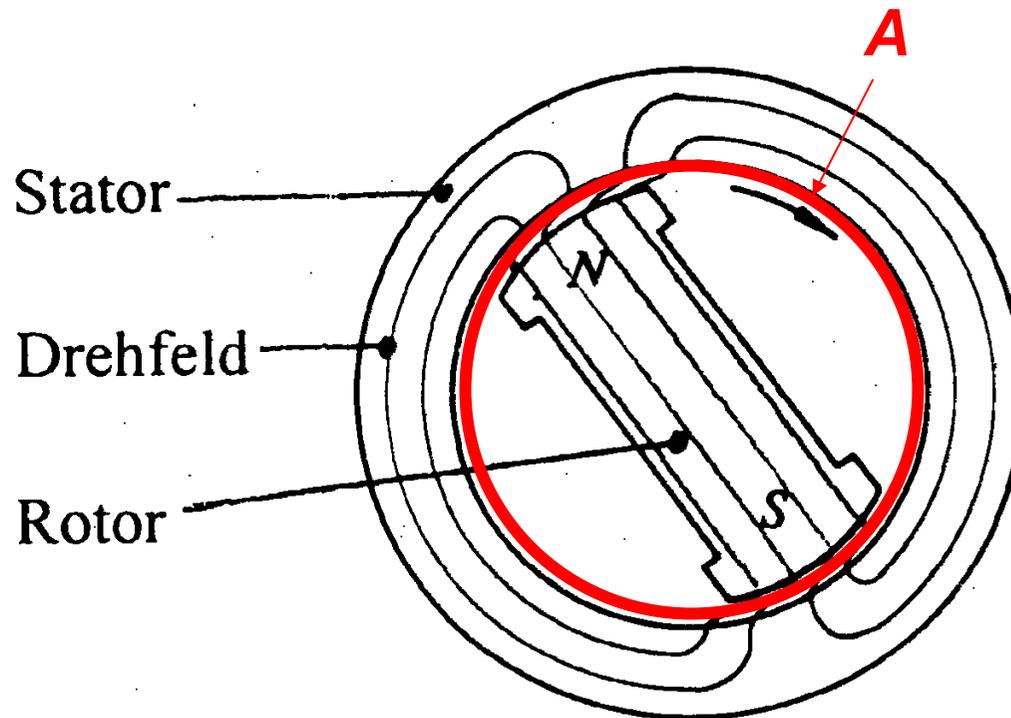
$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \Phi = 0$$

- **Konstanz der  $B$ -Normalkomponente:**  $B_{n,1} = B_{n,2}$
- **Nord- und Südpole** treten stets **gemeinsam** auf.
- Die Mindest-Polzahl ist 2 - ein Nord- und ein Südpol.
- Die Anzahl der Magnetpole ist  $2p$  (**Polpaarzahl**  $p = 1, 2, 3, \dots$ ).

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Beispiel: Gesetz vom magnetischen Hüllenfluss

- Magnetischer Hüllenfluss um einen Doppel-T-Anker (Permanentmagnet)



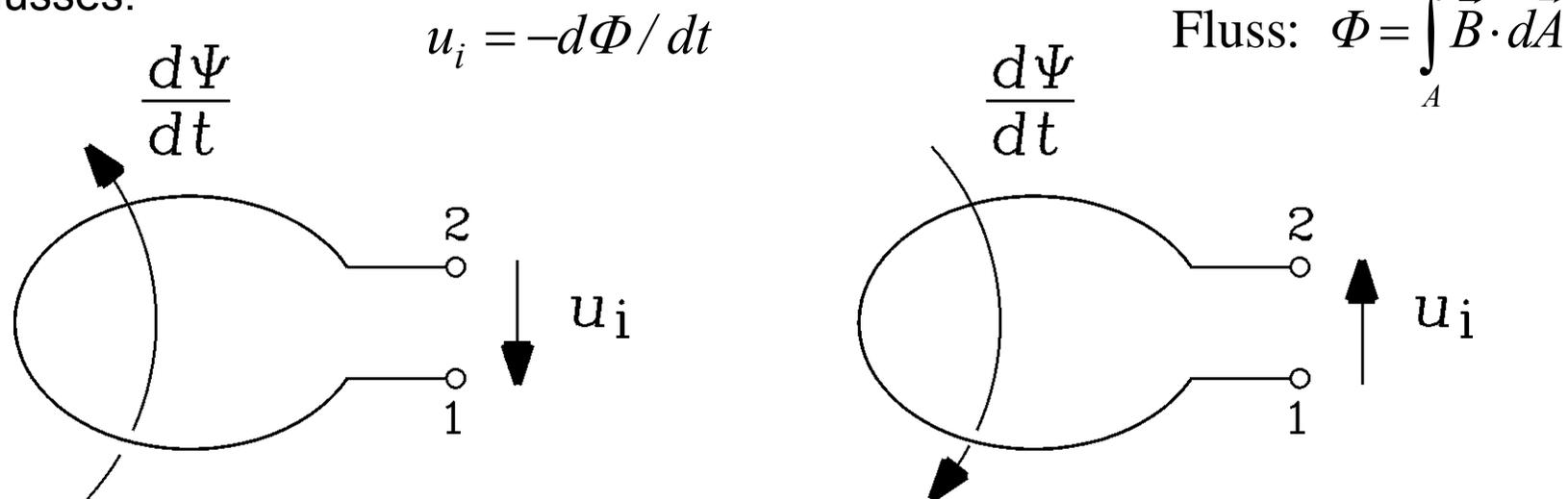
Resultierender Fluss = Null:  
Nord- und Südpolfluss heben sich gegenseitig auf.

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

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## FARADAY'sches Induktionsgesetz

Jede Änderung des mit der Leiterschleife  $C$  verketteten Flusses  $\Phi$  ruft eine induzierte Spannung  $u_i$  hervor; die induzierte Spannung ist die negative Änderung des Flusses.



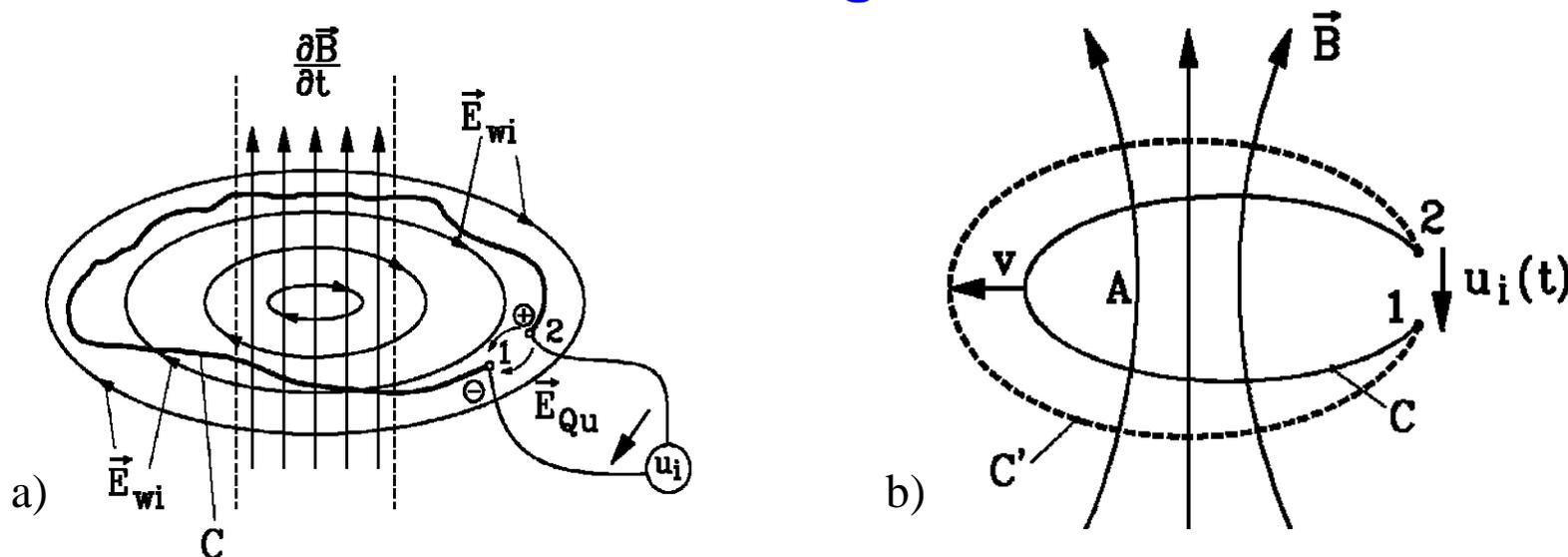
- Hat die Schleife  $N$  Windungen in Serie, so ist  $u_i$   $N$ -mal so groß:

$$u_i = -N \cdot d\Phi / dt$$

- **Flussverkettung**  $\Psi = N \cdot \Phi \Rightarrow u_i = -d\Psi / dt$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## FARADAY'sches Induktionsgesetz



$$u_i = -d\Psi / dt$$

- **Änderung von  $\Psi$ :**
  - a)  $B$  ändert sich: RUHINDUKTION
  - b) Fläche  $A$  ändert sich mit Geschwindigkeit  $v$ : BEWEGUNGSINDUKTION

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung



<b>Ruhinduktion</b>	<b>Bewegungsinduktion</b>
Feld $B$ zeitlich veränderlich	Feld $B$ zeitlich konstant
Spule ruht	Spule bewegt sich mit Geschwindigkeit $v$
$u_i = -d\Psi / dt = -N \cdot d\Phi / dt$	
$u_i = -\partial\Psi / \partial t = \oint \vec{E}_{wi} \cdot d\vec{s}$	$u_i = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} = \oint \vec{E}_b \cdot d\vec{s}$
Wirbelfeldstärke $\vec{E}_{wi}$ ( $\vec{E}_{wi} \Leftrightarrow -\partial\vec{B}/\partial t$ )	Bewegungsfeldstärke $\vec{E}_b = \vec{v} \times \vec{B}$
<b>Anwendung des Induktionsgesetzes:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformatorspulen</li> <li>• Ständerspulen in Drehfeldmaschinen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotierende Ankerwicklung in Gleichstrommaschinen</li> </ul>
• <b>Transformatorische Induktion</b>	• <b>Rotatorische Induktion</b>

$$u_i = \oint_{N \cdot C} (\vec{E}_{wi} + \vec{E}_b) \cdot d\vec{s} = N \cdot \int_A -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} + N \cdot \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Psi}{dt}$$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

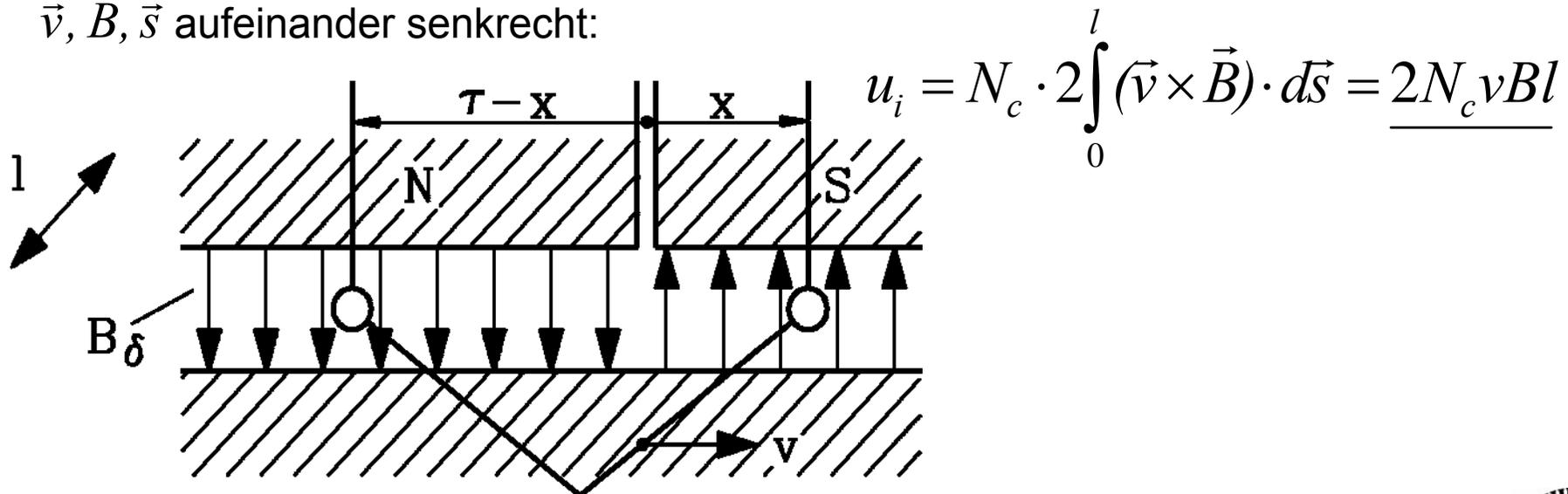
## Beispiel: Einfache Linearmaschine (1)

- Spule (Windungszahl  $N_c$ , Spulenweite  $\tau$ ) im Luftspalt zwischen Eisenjoch und Permanentmagneten (Polfolge N-S-N-S, Polbreite  $b_p = \tau$ ) mit Geschwindigkeit  $v$  bewegt.

a)  $u_i$  aus Bewegungsinduktion:  $\partial B / \partial t = 0$  : keine Ruhinduktion.

Kurve C "entartet" zur Länge  $2l$ , da die Stirnseiten der Spule im feldfreien Raum.

$\vec{v}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{s}$  aufeinander senkrecht:



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung



## Beispiel: Einfache Linearmaschine (2)

b)  $u_i$  aus allgemeinem Induktionsgesetz  $u_i = -d\Psi/dt$  :  
(ALTERNATIVE BETRACHTUNG)

- Flussverkettungsänderung  $d\Psi/dt$  auf Grund der Spulenbewegung, Ortskoordinate  $x = vt$  !

$$\text{Flussverkettung: } \Psi = N_c \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = N_c \cdot l \cdot [(\tau - x)B_\delta - xB_\delta] = N_c l B_\delta (\tau - 2x)$$

$$\text{Induzierte Spannung: } u_i = -d\Psi/dt = -N_c l B_\delta \cdot d(\tau - 2 \cdot v \cdot t)/dt = \underline{2N_c v B_\delta l}$$

$$N_c = 10, l = 1m, v = 20m/s, B_\delta = 1T$$

$$u_i = \underline{2N_c v B_\delta l} = 2 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 1 = 400V$$

**Fazit :  $u_i$  IMMER aus Flussverkettungsänderung berechenbar.**



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Satz vom elektrischen Hüllenfluss:

Der elektrische Fluss  $\Phi_e$  durch eine geschlossene Fläche  $A$  ist gleich der Summe der eingeschlossenen elektrischen Ladungen  $Q$ .

$$\Phi_e = \oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$$

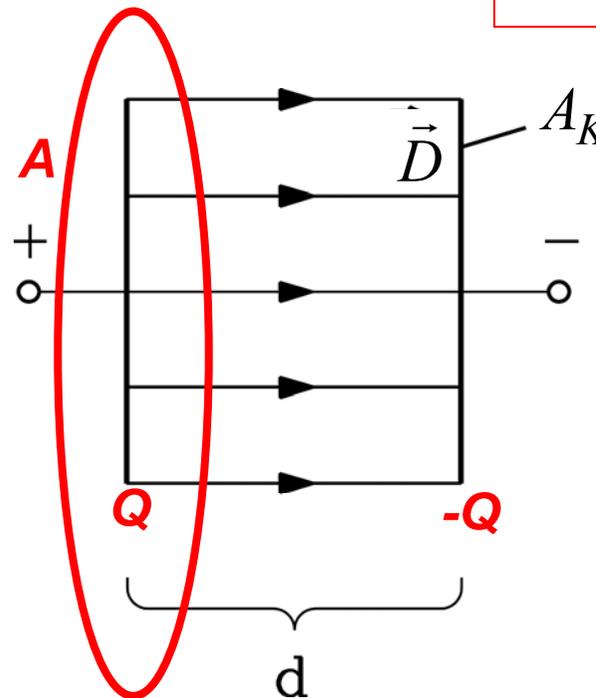
$D$ : dielektrische Verschiebung

Beispiel: Plattenkondensator

$$\Phi_e = \oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A}$$

$$\Phi_e = D \cdot A_K = Q$$

$$D = Q / A_K$$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Materialgesetze: Elektrische Leiter

OHM'sches Gesetz:

$$U = R \cdot I$$

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

Elektrischer Widerstand eines Leiters (Länge  $l$ , Querschnitt  $A$ ):  $R = l / (\kappa \cdot A)$

Elektrische Leitfähigkeit  $\kappa = 1/\rho$ : spezifischer elektrischer Widerstand

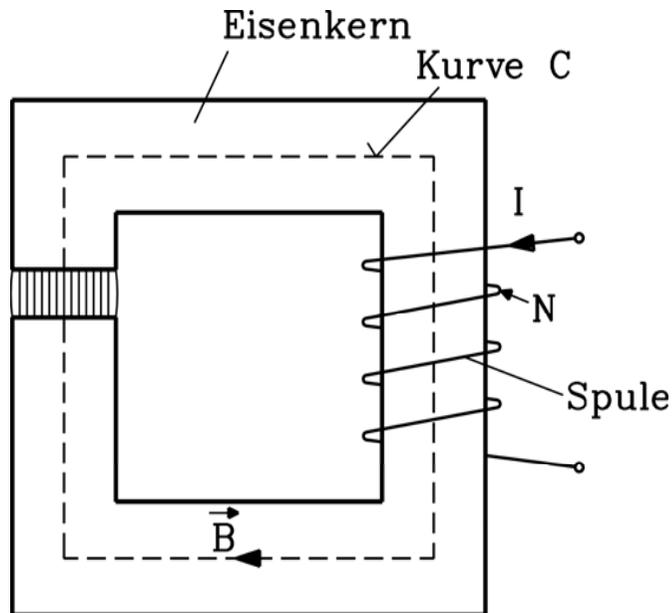
Widerstand  $R$  wegen  $\kappa(\vartheta)$  temperaturabhängig  $\rho_{\vartheta} = \rho_{20} (1 + \alpha_{\vartheta} (\vartheta - 20^{\circ}))$

- **Temperatureinfluss:** Kupfer:  $\rho_{20} = 1/57 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ ,  $\alpha_{\vartheta} = 0.0039 \text{ /K}$

	Kupfer	Rein-Aluminium	Rein-Eisen
$\kappa / \text{S/m} (\vartheta = 20^{\circ}\text{C})$	$57 \cdot 10^6$ (100%)	$34 \cdot 10^6$ (60%)	$10 \cdot 10^6$ (18%)
$\lambda / \text{W/(m}\cdot\text{K)} (50^{\circ}\text{C})$	380 (100%)	220 (58%)	48 (13%)

## Elektrische und thermische Leitfähigkeit von einigen Metallen

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung



## Materialgesetze: Magnetisierbare Stoffe

Im äußeren Feld der magnetischen Feldstärke  $H$  magnetisiert sich z. B. Eisen auf Grund des Ferromagnetismus und erzeugt die magnetische Polarisation  $J$ , die sich  $H$  überlagert zur resultierenden Flussdichte  $B$ .

Ohne magnetisierbares Material: z. B. Vakuum:  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$$

$$B = \mu_0 H + J = \mu_0 \mu_{rel} H$$

Bsp.: Ungesättigtes Eisen:  $\mu_{rel} = \text{ca. } 5000$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}$$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Beispiel: Magnetischer Eisenkreis

- Im **ungesättigten Eisen**:  $\mu \approx 5000\mu_0$ , in **Luft** ist  $\mu = \mu_0$
- Magnetfluss  $\Phi = B \cdot A$  ist zwischen Feldlinien **konstant**.  
A: Querschnitt des Eisens (hier: = Querschnitt am Luftspalt)
- Daher Flussdichte in Eisen und Luft gleich, aber  $H_{Fe}$  **sehr klein**

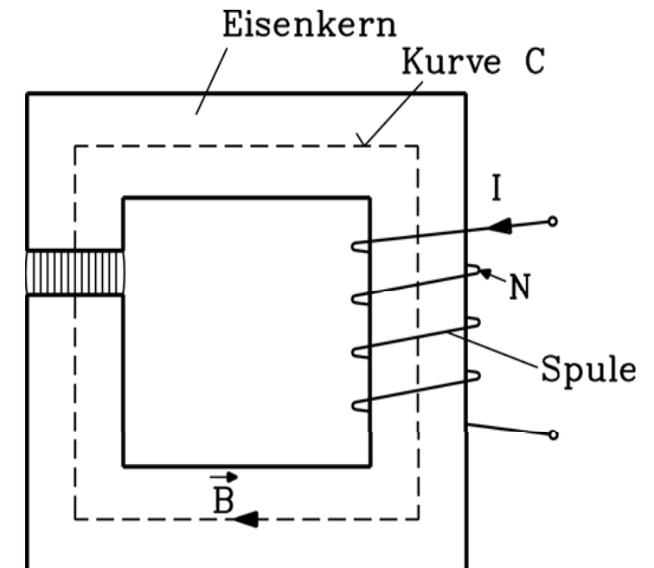
$$B_{Fe} = \frac{\Phi}{A} = B_{\delta} \quad H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} \ll H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0}$$

- **Durchflutungssatz:**

$$H_{Fe} \cdot s_{Fe} + H_{\delta} \cdot \delta = N \cdot I \quad \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} \cdot s_{Fe} + \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \delta = N \cdot I = V_{Fe} + V_{\delta}$$

- z. B.  $s_{Fe}/\delta = 100$ : daher  $V_{Fe}/V_{\delta} = 0.02 \sim 0$

**Nur die Luftspaltweite  $\delta$  muss magnetisiert werden:**



$$B_{\delta} \approx \mu_0 NI / \delta$$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Zahlenbeispiel: Magnetkreis

### ▪ Beispiel:

- ungesättigtes Eisen:  $\mu \gg \mu_0$
- Magnetfeld im Luftspalt soll  $B_\delta = 1 \text{ T}$  sein
- Luftspalt beträgt  $\delta = 3 \text{ mm}$

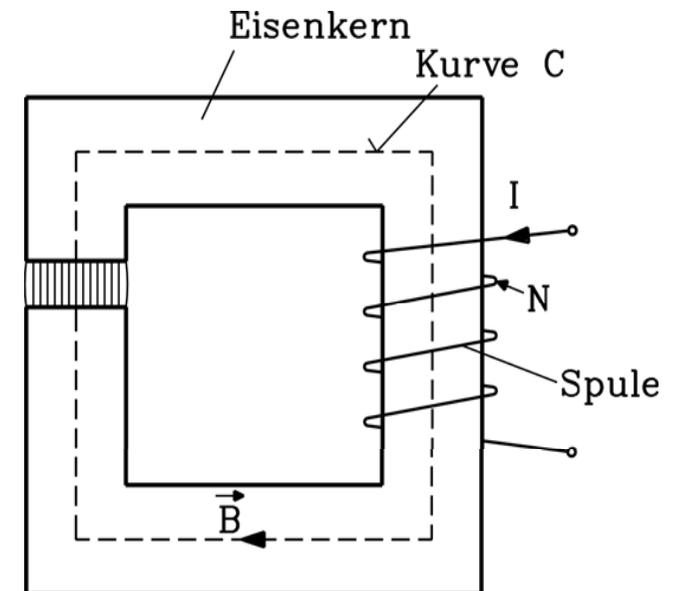
### ▪ Wie groß ist Erregerbedarf $N \cdot I$ ?

$$B_\delta = \mu_0 \cdot N \cdot I / \delta = 1 \text{ T} \quad \Rightarrow \quad N \cdot I = \underline{2390 \text{ A}}$$

### ▪ Auslegung der Erregerspule:

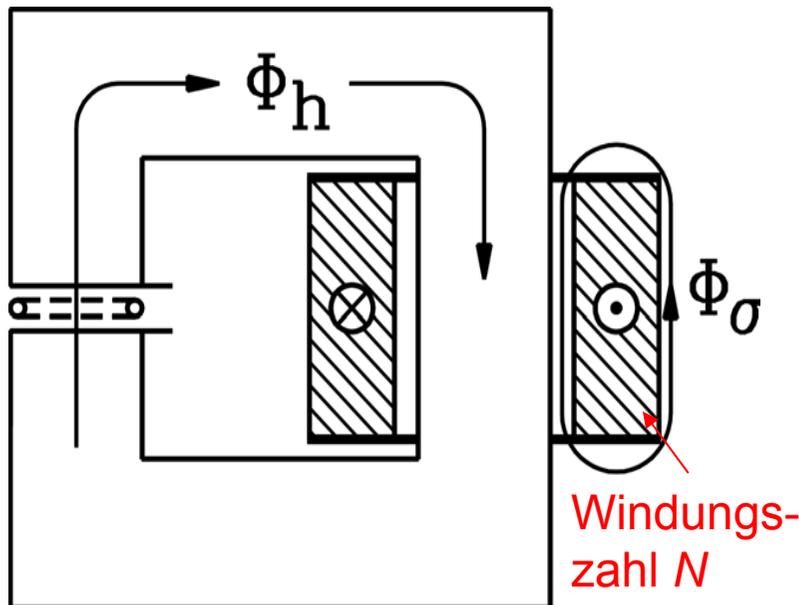
z. B.  $N = 100$  Windungen:  $I = 2390/100 = \underline{23.9 \text{ A}}$

oder  $N = 250$  Windungen:  $I = 2390/250 = \underline{9.56 \text{ A}}$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Beispiel: Haupt- und Streufluss bezüglich der Flussverkettung mit der Luftspaltspule



Bei Magnetkreisen mit Flussführung im Eisen ist der Fluss “gebündelt”.

Der Fluss ist in guter Näherung mit der gesamten Spule verkettet. Es kann zwischen **Hauptfluss  $\Phi_h$**  und **Streufluss  $\Phi_\sigma$**  unterschieden werden.

Streuziffer:

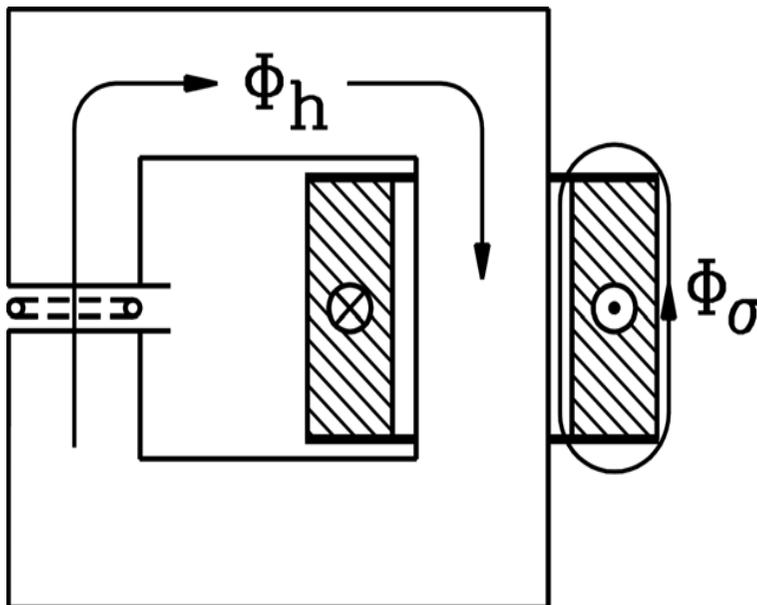
$$\sigma = \Phi_\sigma / \Phi_h$$

soll klein sein !

⇒ Hauptflussverkettung:  $\Psi_h = N \cdot \Phi_h$  , Streuflussverkettung:  $\Psi_\sigma = N \cdot \Phi_\sigma$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Selbstinduktivität



- Wechselstrom  $i$  in Erreger-Spule: Hauptfluss  $\Phi_h$  im Eisen und Streufluss  $\Phi_\sigma$  pulsieren mit Frequenz  $f$ .

- Spannungsinduktion in Erregerspule (**Selbstinduktion**):

$$u_{i,N} = -d\Psi_N(t)/dt = -N \cdot d\Phi_{h+\sigma}(t)/dt =$$

$$u_{i,N} = -L \cdot di/dt$$

- Mit  $\Phi_h = B_\delta \cdot A$  und  $B_\delta = \mu_0 \cdot N \cdot i / \delta$  folgt:

$$L = \frac{\Psi_N}{i} = \frac{N \cdot (\Phi_h + \Phi_\sigma)}{i} = L_h + L_\sigma$$

$$L_h = \frac{N \cdot \Phi_h}{i} = \frac{N \cdot (\mu_0 \cdot N \cdot i / \delta) \cdot A}{i} = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{\delta} = N^2 \cdot \Lambda_h$$

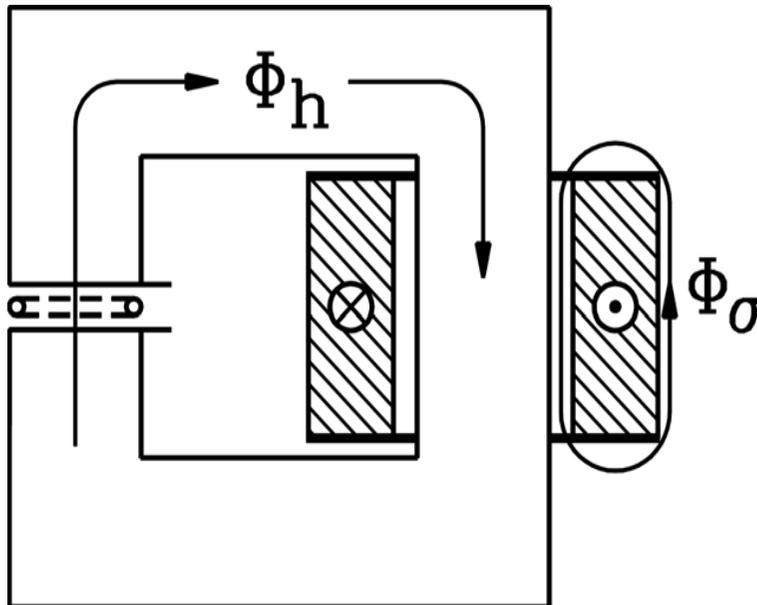
$$L_\sigma = N^2 \cdot \Lambda_\sigma$$

$$L_h = N^2 \cdot \Lambda_h$$

$$L_\sigma = N^2 \cdot \Lambda_\sigma$$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Gegeninduktivität



- Wechselstrom  $i$  in Erreger-Spule: Hauptfluss  $\Phi_h$  im Eisen und Streufluss  $\Phi_\sigma$  pulsieren mit Frequenz  $f$ .

- Spannungsinduktion in Luftspalt-Spule (**Gegeninduktion**):

$$u_{i,Ns} = -d\Psi_{Ns}(t)/dt = -N_s \cdot d\Phi_h(t)/dt =$$

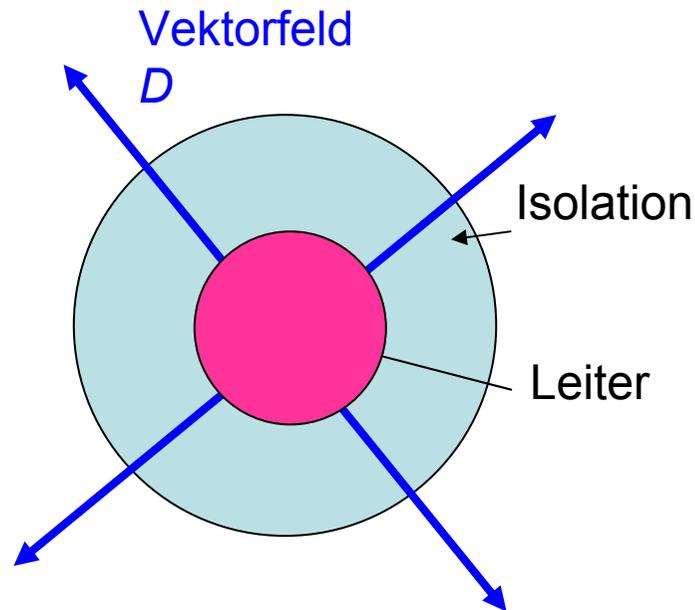
$$u_{i,Ns} = -M \cdot di/dt$$

- Mit  $\Phi_h = B_\delta \cdot A$  und  $B_\delta = \mu_0 \cdot N \cdot i / \delta$  folgt:

$$M = \frac{\Psi_{Ns}}{i} = \frac{N_s \cdot (\mu_0 \cdot N \cdot i / \delta) \cdot A}{i} = N_s \cdot N \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{\delta}$$

$$M = N_s \cdot N \cdot \Lambda_h$$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung



## Materialgesetze: Polarisierbare Stoffe

Im äußeren Feld der elektrischen Feldstärke  $E$  polarisiert sich z.B. der Isolierstoff PVC und erzeugt die elektrische Polarisation  $P$ , die sich  $E$  überlagert zur resultierenden dielektrischen Verschiebung  $D$ .

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

Ohne polarisierbares Material: z. B. Vakuum:  $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$

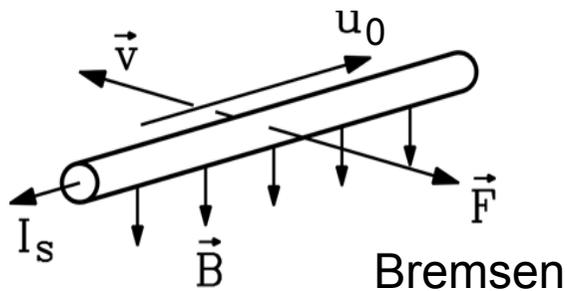
$$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$$

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 \varepsilon_{rel} E$$

Bsp.: PVC:  $\varepsilon_{rel} = \text{ca. } 4$

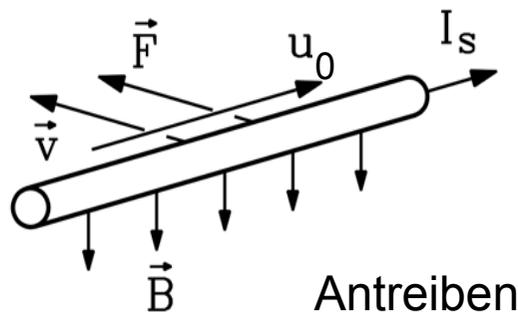
# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Die elektromagnetische Kraft (LORENTZ-Kraft)



- Strom  $I_s$  im Leiter im Magnetfeld  $B$

- **Kraftwirkung**  $F$  (LORENTZ-Kraft) maximal, wenn zwischen  $B$ - und Stromflussrichtung rechter Winkel.



$$\vec{F} = \int_0^l I_s (d\vec{s} \times \vec{B}) = \int_0^l I_s \cdot B \cdot ds = I_s \cdot B \cdot l \Rightarrow \boxed{F = N_s \cdot I_s \cdot B \cdot l}$$

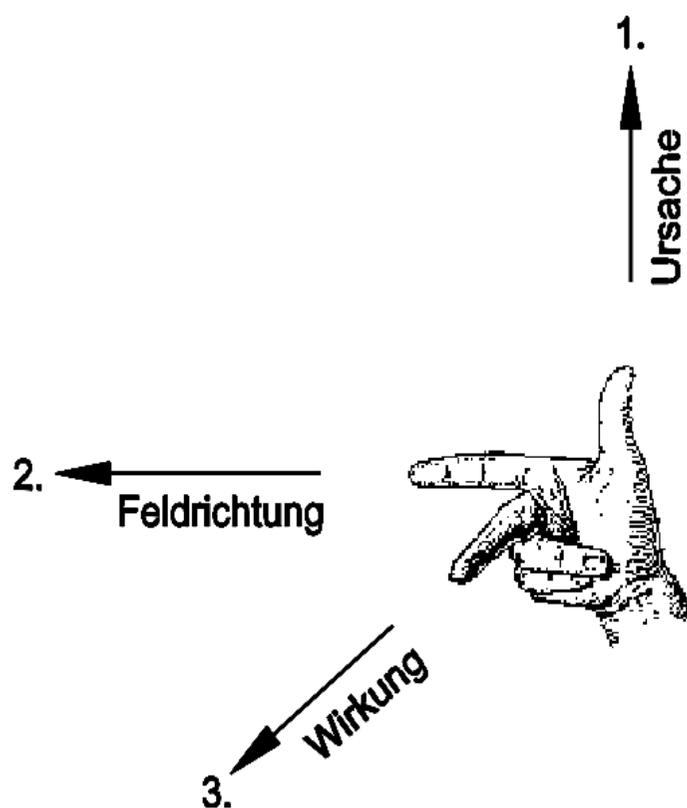
$$u + u_i = i \cdot R \Rightarrow u = R \cdot i + d\psi / dt = R \cdot i + u_0$$

$$i = 0 : u = u_0$$

$u_0$ : Induzierte Spannung als Leerlaufspannung bei  $i = 0$ , fallweise auch als „Quellspannung“ oder „innere Spannung“ (wie bei einer Batterie) bezeichnet

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Dreifingerregel der rechten Hand



Hält man die drei Finger der rechten Hand:

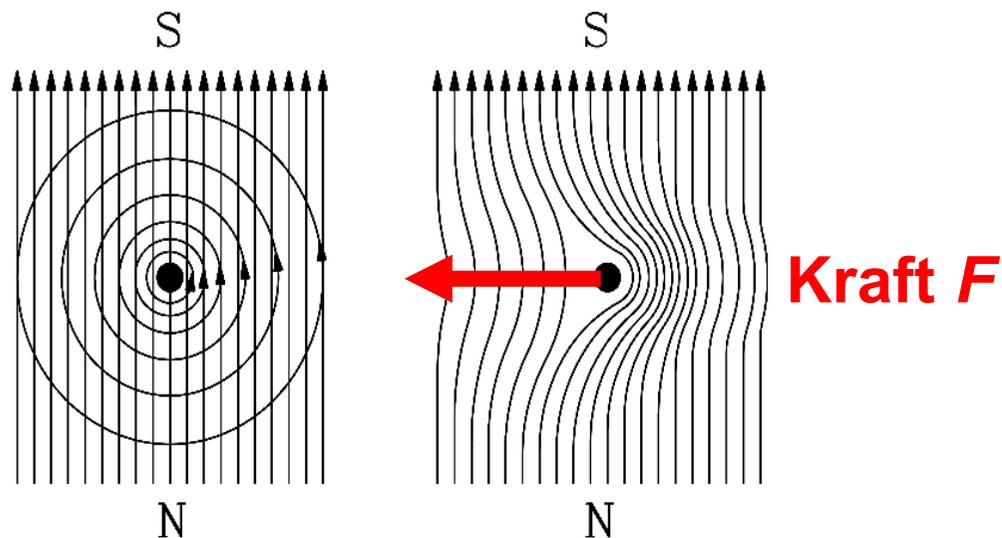
1. Daumen, 2. Zeigefinger, 3. Mittelfinger so, dass sie rechte Winkel miteinander bilden, und zeigt

- der 1. Finger in Richtung der Ursache (also hier in **Richtung des Stroms**),
- der 2. Finger in **Richtung der Feldlinien**, so gibt
- der 3. Finger die Richtung der Wirkung (also hier die **Kraft**) an.

Das magnetische Feld ist das Bindeglied, die Vermittlung, zwischen der Ursache und der Wirkung

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

**Beispiel: Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld: MAGNETISCHER (MAXWELL'scher Zug)**

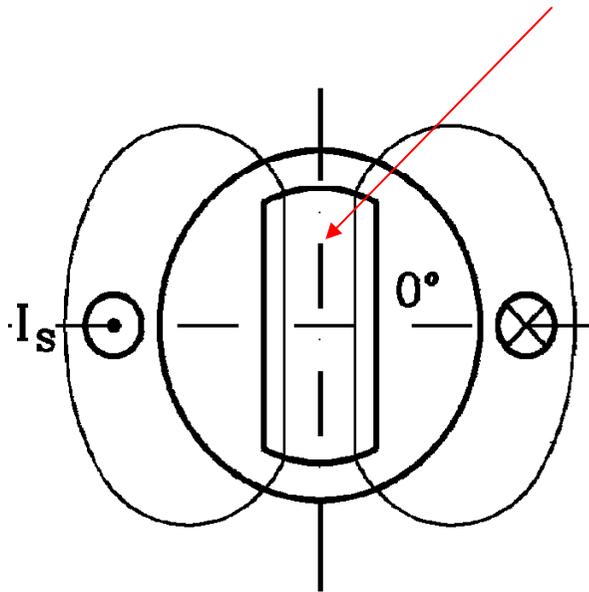


- Fremdfeld (Homogen-Feld) von unten nach oben gerichtet
- Strom im Leiter fließt auf Betrachter zu, erregt kreisförmiges Feld
- Überlagerung ergibt B - Feld links kleiner als rechts vom Leiter
- Feldlinien „**elastische Gummischnüre**“ (MAXWELL'scher Zug) wollen sich verkürzen => **Kraft  $F$  nach links auf den Leiter !**

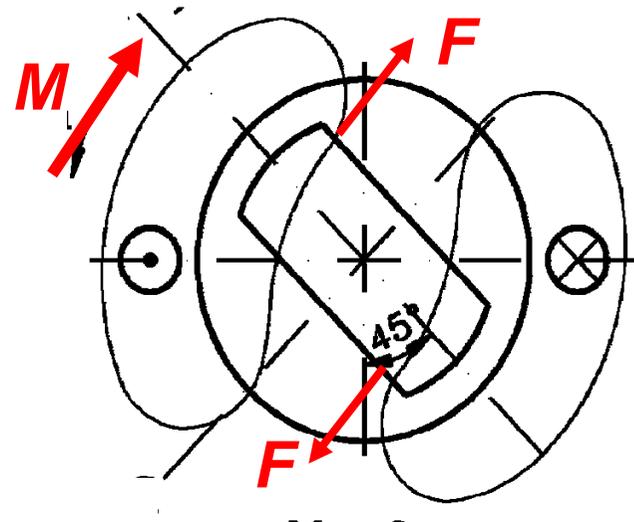
# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

Magnetkraft auf magnetisierbare Körper = **Reluktanzkraft**,  
berechenbar aus dem resultierenden **MAXWELL'schen Zug**

Beispiel: Magnetisierbares **Eisenstück** im Magnetfeld der Spule (Strom  $I_s$ ):



**Symmetrischer** magnetischer Zug  
auf Eisenstück: Resultierende  
Kraft und Drehmoment: NULL



**Asymmetrischer** magnetischer Zug  
auf Eisenstück: Resultierende  
Kraft  $F$  und Drehmoment  $M$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

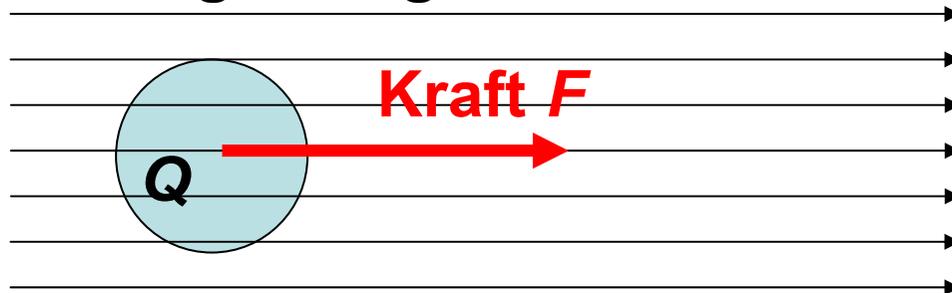
## Die elektrostatische Kraft (COULOMB-Kraft)

- Ladung  $Q$  im elektrischen Feld  $E$

- Kraftwirkung  $F$ :

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

Elektrische  
Ladungsmenge  $Q$

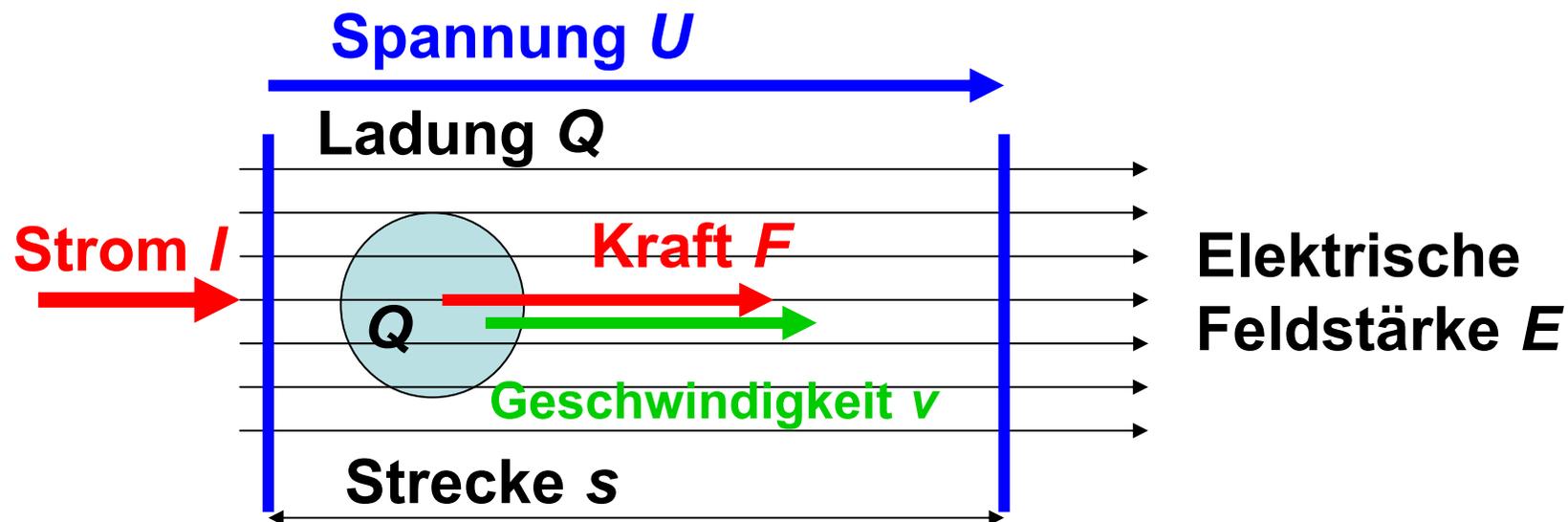


Elektrische  
Feldstärke  $E$

# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

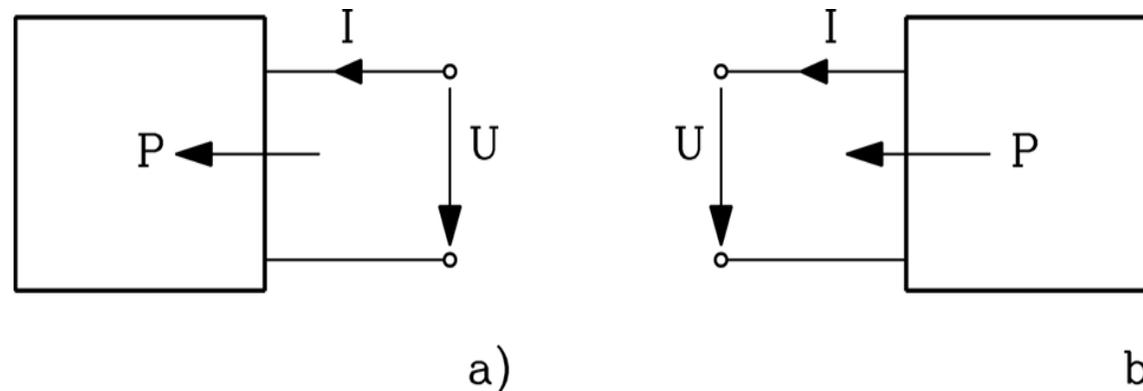
## Elektrische Leistung $P = I \cdot U$

- Strom  $I$  = Bewegte elektrische Ladung  $Q$  im elektrischen Feld  $E$
- Spannung  $U$  = elektrische Potentialdifferenz auf der Strecke  $s$  im Feld  $E$
- **Kraftwirkung**  $F = Q \cdot E$ , Geschwindigkeit:  $v = s/t$
- Leistung  $P = F \cdot v = (Q \cdot E) \cdot v = (Q \cdot E) \cdot (s/t) = (Q/t) \cdot (E \cdot s) = I \cdot U$



# 1. Grundgesetze der elektromechanischen Energiewandlung

## Zählpfeilsystem für Wirkleistungen



a) Zugeführte elektrische Wirkleistung  $P$  ist positiv: **Verbraucherzählpfeilsystem**

b) Abgegebene elektrische Wirkleistung  $P$  ist positiv: **Erzeugerzählpfeilsystem**

**Hier wird ausschließlich das VZS verwendet.**

Im **VZS** gilt:

- Bild a)  $P > 0$  : **Verbraucher** (z. B. Motor, Heizwiderstand, Laden v. Batterien,...)
- Bild b)  $P < 0$  : **Erzeuger** (z. B. Generator, Batterie, Brennstoffzelle,...)

# Übersicht: E-Maschinen für Hybrid-/E-Automobile



## - Permanentmagnet-Synchronmaschine:

A) Verteilte Wicklung, Oberflächenmagnete, kein Reluktanzmoment

B) Verteilte Wicklung, Vergrabene Magnete, Reluktanzmoment

C) Zahnspulenwicklung, Oberflächen-/Vergrabene Magnete, niedrigere Drehzahl

- Fremd-/Hybriderregte Synchronmaschine: Verteilte Wicklung, Läuferfeld verstellbar, Reluktanzmoment wirkt leider negativ

- Geschaltete Reluktanzmaschine: Zahnspulenwicklung, nur Reluktanzmoment, geringere Ausnützung, sehr kleiner Luftspalt

- Käfigläufer-Asynchronmaschine: Verteilte Wicklung, Läuferverluste = heißer Läufer, geringere Ausnützung, sehr kleiner Luftspalt



---

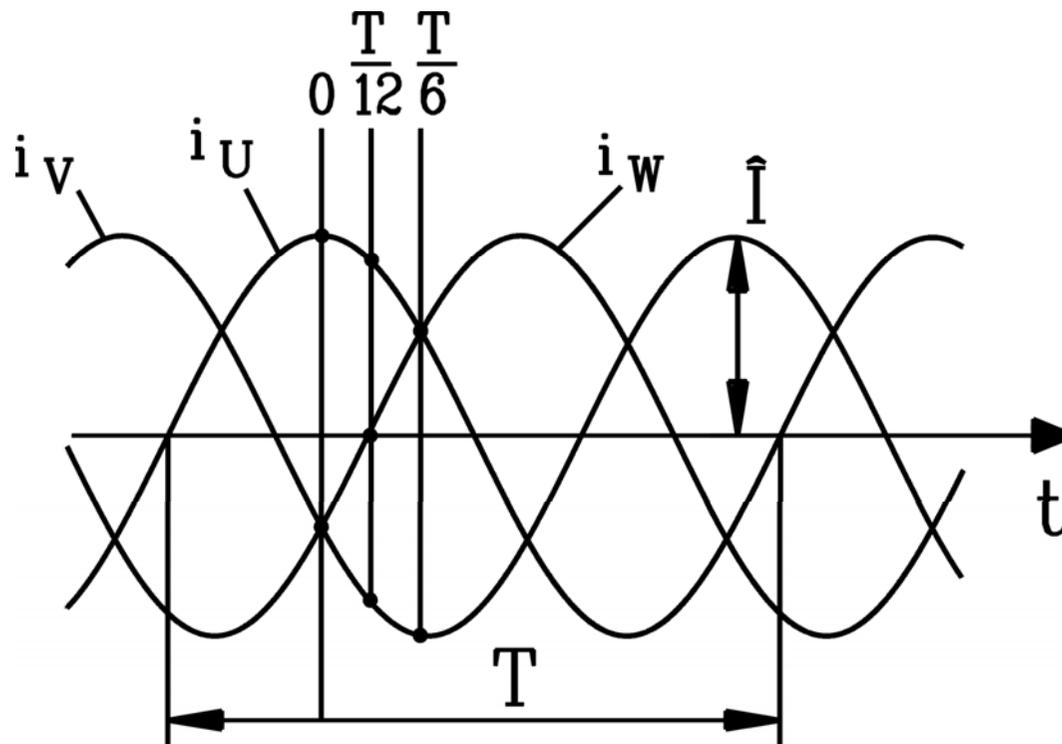
# Inhalt



## 2. Synchronmaschinen

## 2. Synchronmaschinen

### Dreiphasen-Wechselströme

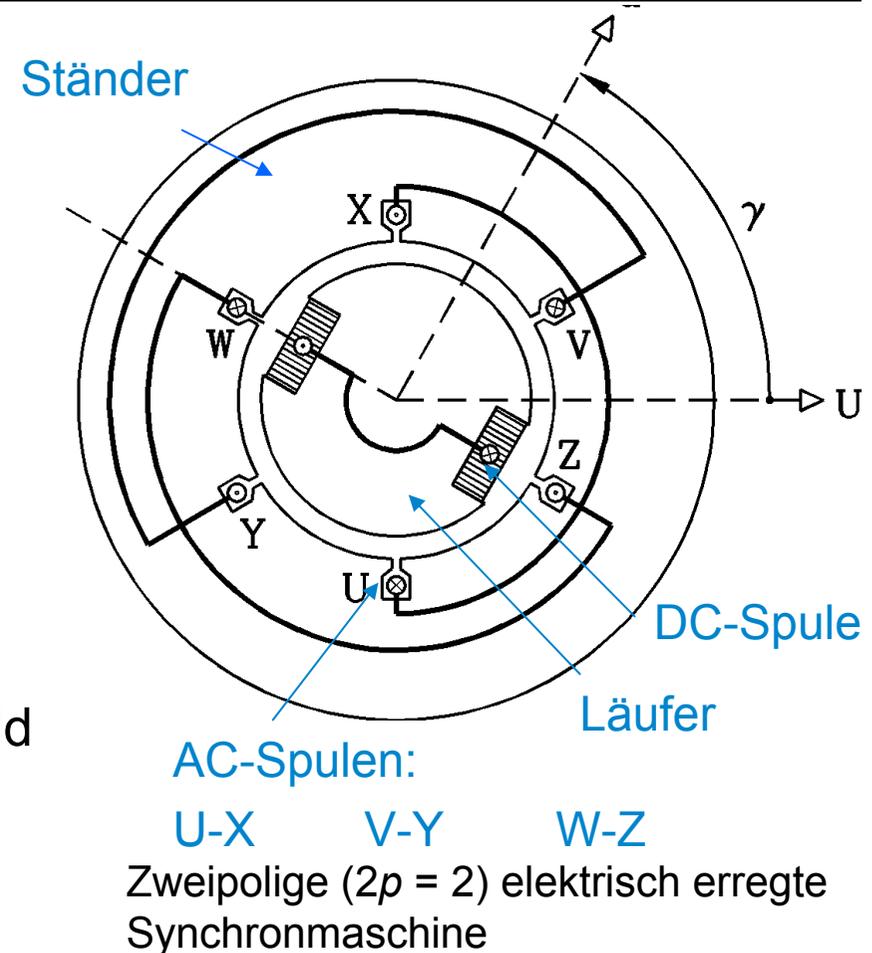


- Amplitude  $\hat{I}$
- Frequenz  $f = 1/T$
- Phasenfolge U, V, W  
od. U, W, V

über **Wechselrichter**  
einstellbar

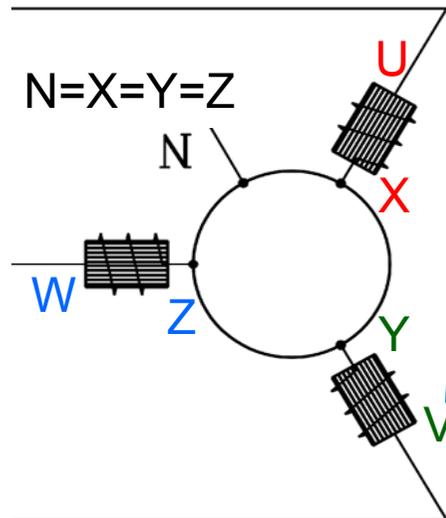
## 2. Synchronmaschinen

- **Läufer:** konstantes Magnetfeld
  - a) Permanentmagnete
  - b) Gleichstrom-Spulen  
(Zwei Schleifringe+Bürsten)
- **Ständer:** “Drehfeldwicklung”  
mit Wechselströmen:  
Erregen rotierendes Feld (Drehfeld)
- **LORENTZ-Kraft** vom Läufer-Magnetfeld  
auf Strom-Leiter der Ständerwicklung:  
Tangentialkraft  $\Rightarrow$  Drehmoment  $M_e$
- Läufer rotiert **SYNCHRON** mit dem Ständerdrehfeld

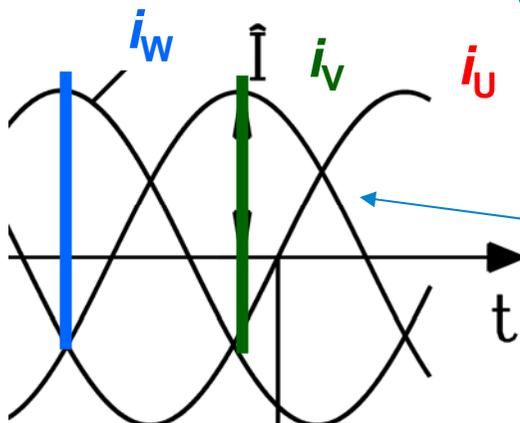
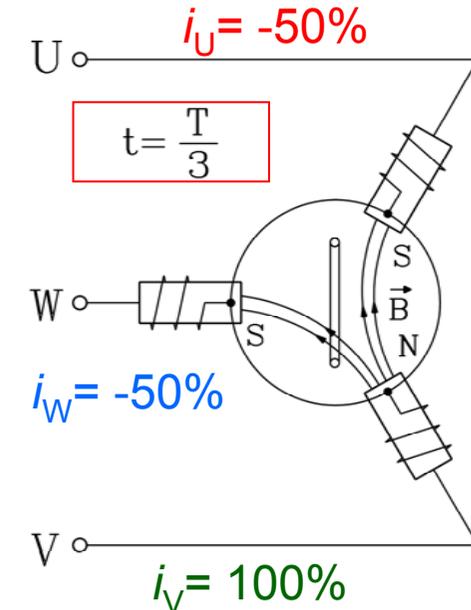
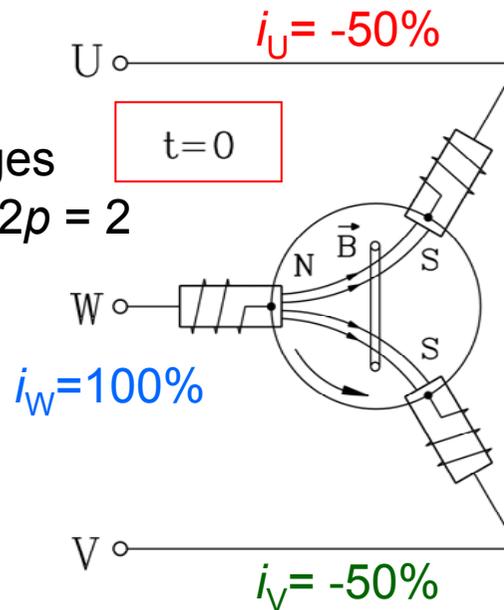


# 2. Synchronmaschinen

## Magnetisches Drehfeld:



**Beispiel:**  
Zweipoliges  
Drehfeld  $2p = 2$



**Nicola Tesla:**

- Drei räumlich versetzte Spulen U, V, W
- Drei zeitlich versetzte Wechselströme  $i_U, i_V, i_W$

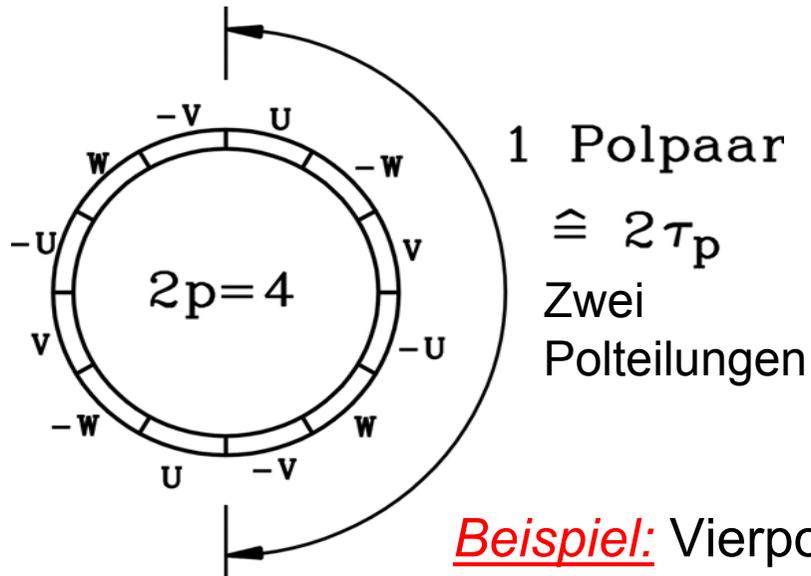
**Fazit:**

Magnetfeld dreht mit „Synchrondrehzahl“  $n_{syn} = f / p$



## 2. Synchronmaschinen

### Drehfrequenz des Drehfelds



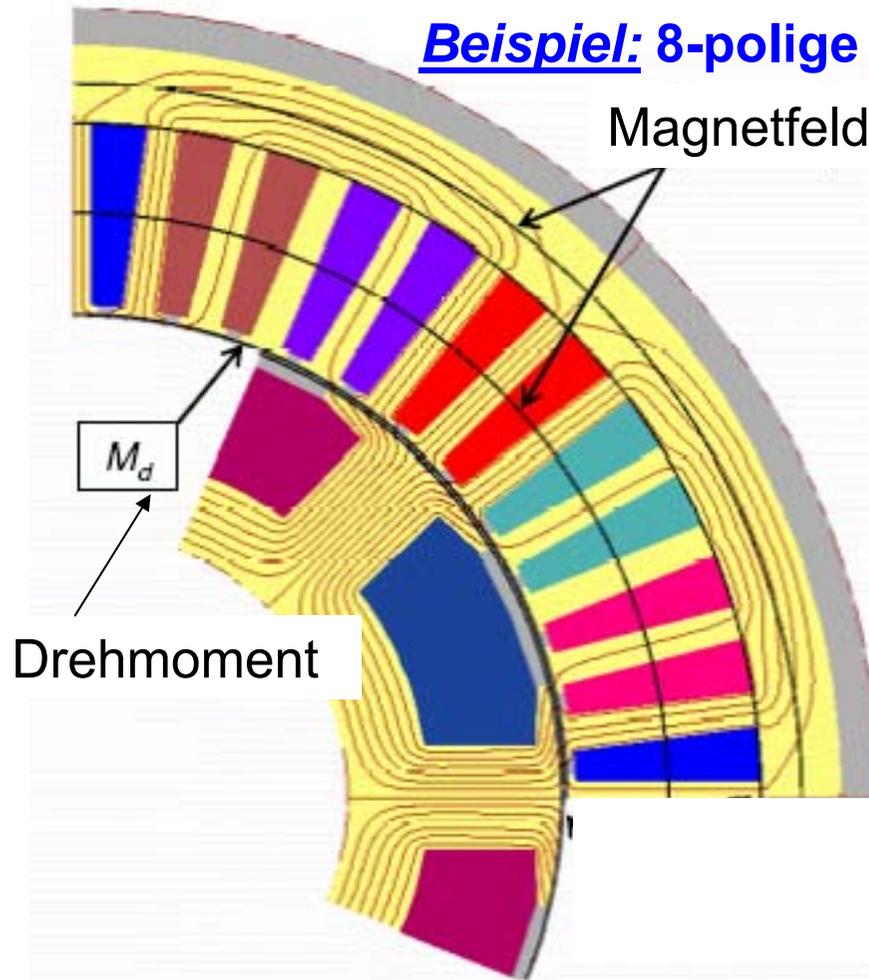
Synchrondrehzahl  $n_{syn}$  entspricht der Feldwellengeschwindigkeit im Luftspalt  $v_{syn}$

$$v_{syn} = 2f_s \tau_p$$

- Synchrondrehzahl folgt streng der Frequenz der Wicklungsströme:  
z. B.:  $2p = 4, f = 200 \text{ Hz}: n_{syn} = (200 / 2) 60 = 6000 / \text{min}$
- Bei **Tausch zweier Phasen** (z.B. U und V) dreht sich das Drehfeld in die **andere** Richtung = Drehzahlumkehr

## 2. Synchronmaschinen

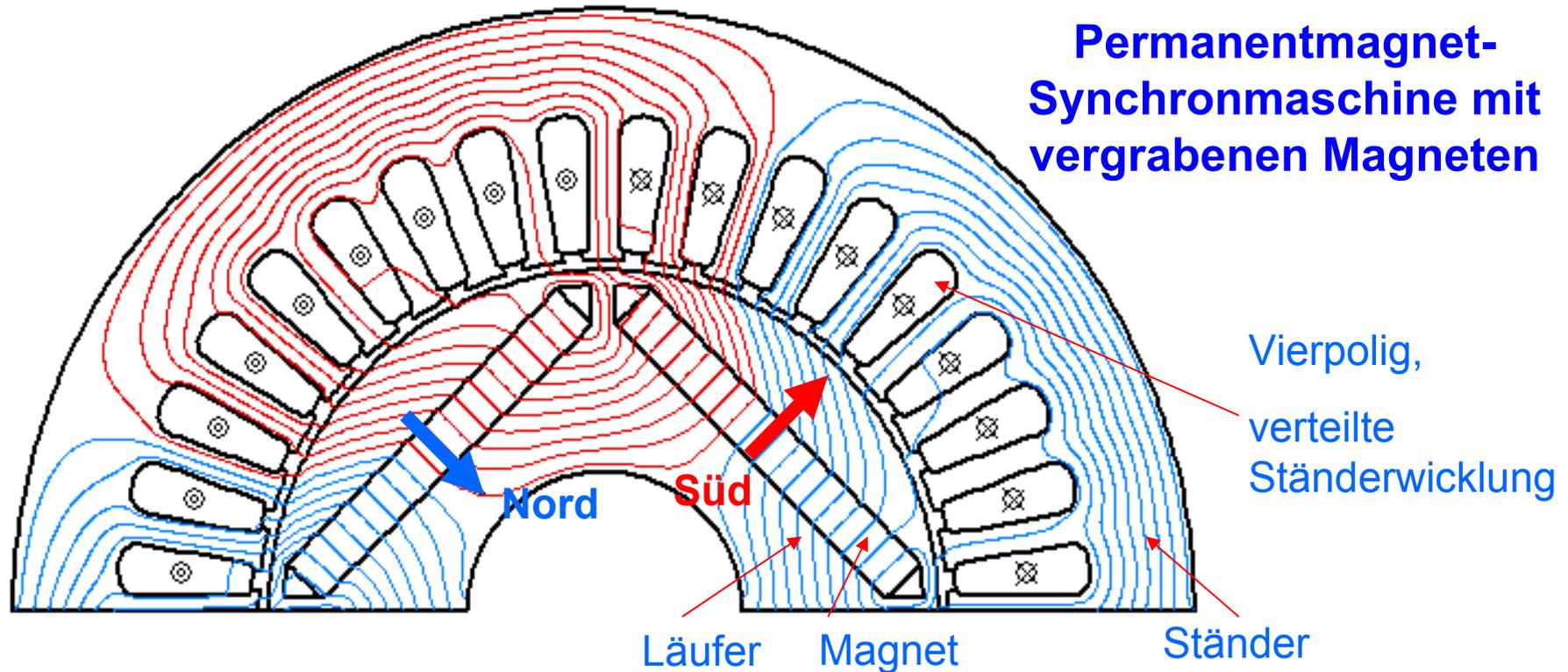
### Beispiel: 8-polige elektrisch erregte Synchronmaschine



- Zwei Schleifringe, Kohlebürsten:  
kleiner DC-Erregerstrom  $< 16\text{ A}$   
keine Funken
- Verteilte Ständerwicklung
- Läufermagnetfeld kann verringert oder erhöht werden
- Positive Reluktanz = magnetischer Widerstand in der Feldachse kleiner
- Wassermantelkühlung
- 60 kW, 3500/min
- max. 12000/min

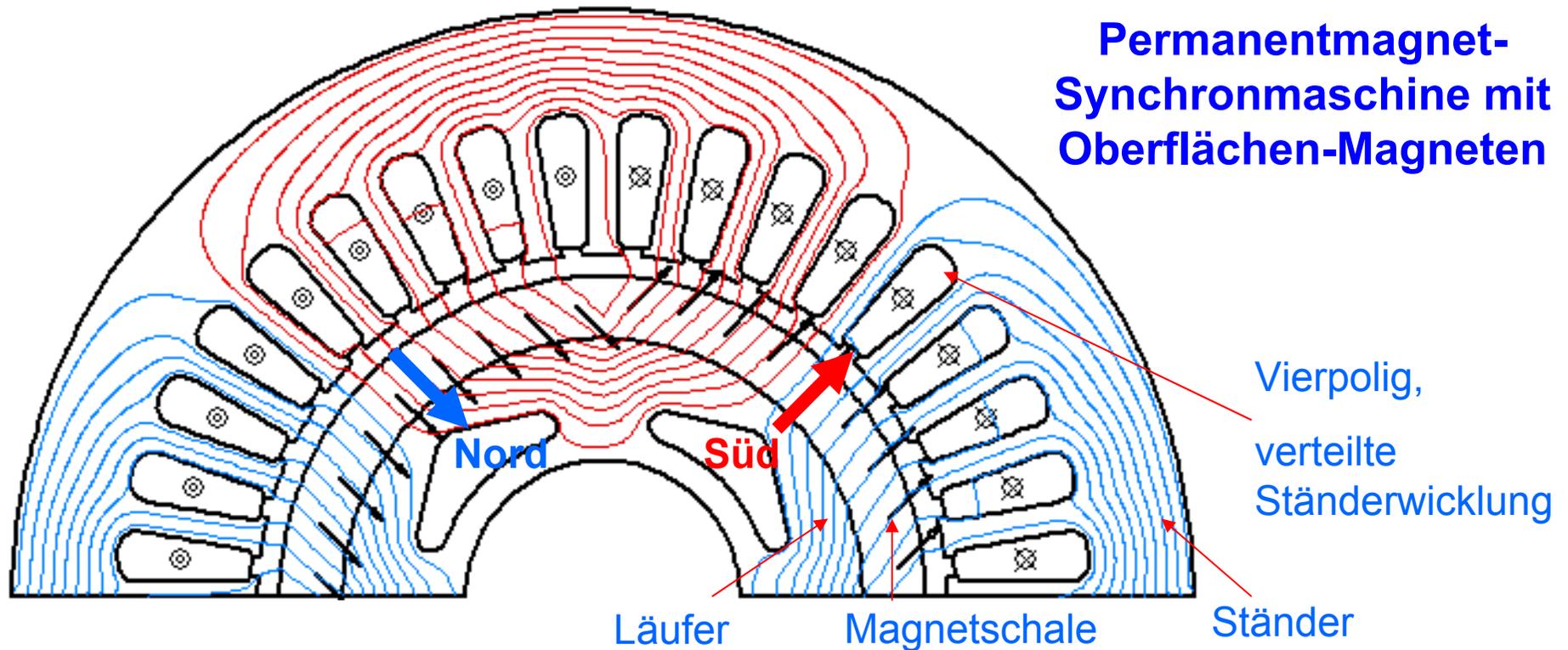
Quelle:  
Conti, Dr. Hackmann

## 2. Synchronmaschinen



- Negative Reluktanz = Magnetischer Widerstand in der Feldachse größer
- K(I)eine Läuferverluste, keine Schleifringe
- Läufermagnetfeld konstant, sinkt mit steigender Temperatur

## 2. Synchronmaschinen

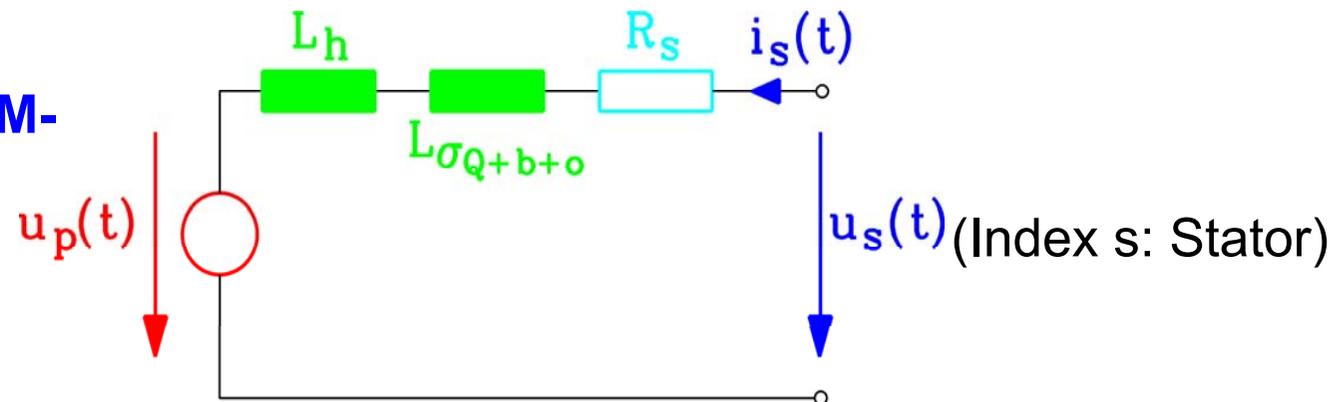


- Kein Reluktanzeffekt = Magnetischer Widerstand ist konstant am Umfang
- Läufermagnete müssen fixiert werden (nichtleitfähige Bandage)
- Höherer Bedarf an Magnetmaterial

## 2. Synchronmaschinen

- Spannungsgleichung je Strang:  $u_s(t) = R_s \cdot i_s(t) + L_d \frac{di_s(t)}{dt} + u_p(t)$
- Synchron-Induktivität: Statorfeld im Luftspalt h, Nut/Stirn Q, b:  $L_d = L_h + L_{\sigma Q+b+o}$
- Induzierte Spannung = "Polradspannung":  $u_p(t) \equiv u_i(t)$

**Ersatzschaltbild PM-Motor je Strang:**



**Stationärbetrieb:** Strom, Spannung periodisch. Drehzahl  $n = \text{konst.}$   
Strom-/Spannungsgrundschiwingung, Feldgrundwelle: komplexe  
Zeigerrechnung

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega L_d \underline{I}_s + \underline{U}_p$$

$$\underline{U}_p = j\omega \Psi_p / \sqrt{2}$$

## 2. Synchronmaschinen

### Zeigerdiagramm der PM-Synchronmaschine je Strang:

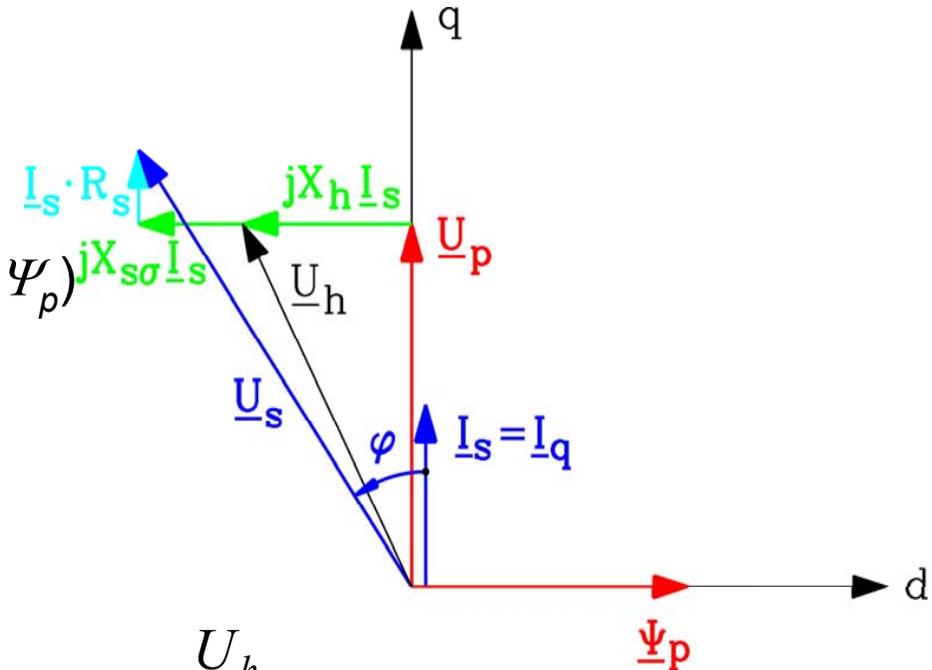
- Dem Leerlauffluss (Flussverkettung  $\Psi_p$ ) überlagert sich das Feld des Ständers ("Ankerrückwirkung") mit der Flussverkettung  $L_h I_s$ .

- Dem resultierenden Luftspaltfeld  $B_\delta$  entspricht die von ihm induzierte Hauptfeldspannung  $U_h$ .

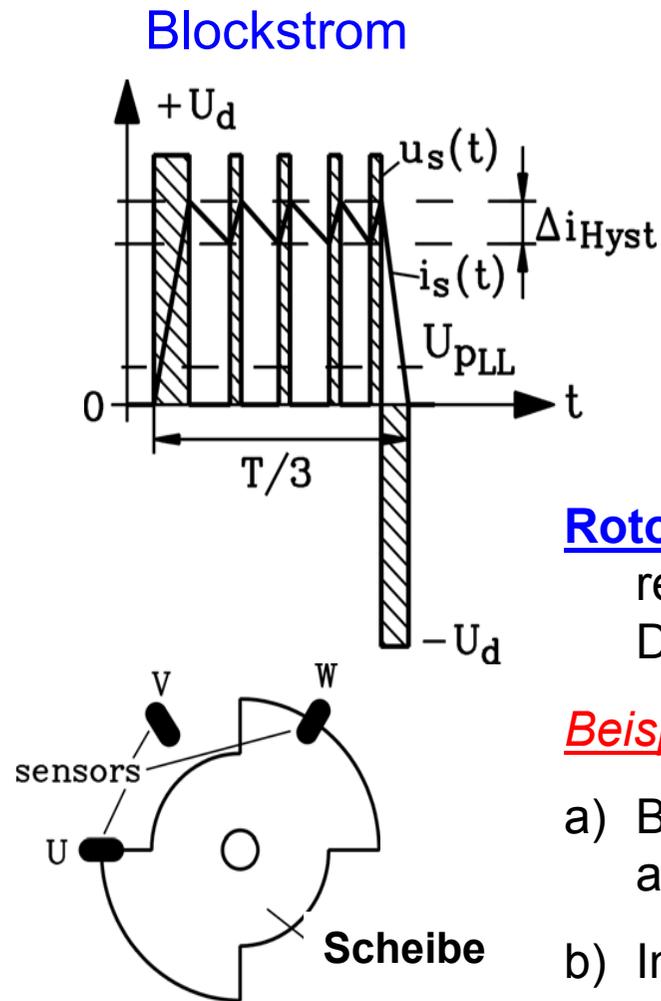
$$B_\delta = B_p \frac{U_h}{U_p}$$

- Daher ist die magnetische Flussdichte in den Zähnen bei Last höher als bei Leerlauf:

$$B_d \approx B_\delta \frac{\tau_Q}{b_d k_{Fe}}$$



## 2. Synchronmaschinen: Stromeinprägung über Pulsweitenmodulation der Gleichspannung

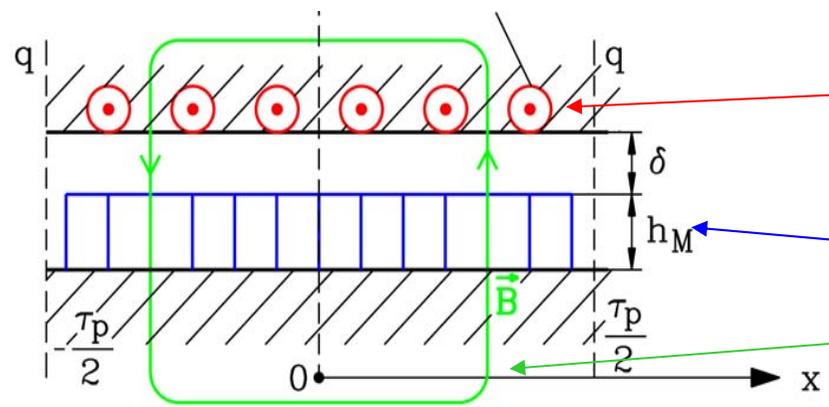


**Rotorlagegeber:** Bestimmt Phasenlage des Läuferfelds relativ zu der Ständerstromrichtung für maximales Drehmoment!

**Beispiel:**

- Blockstromspeisung, vierpoliger Rotor: Steuerscheibe als Lagegeber
- Inkrementalgeber für Sinusstromspeisung

## 2. Synchronmaschinen: Stromeinprägung und induzierte Spannung



Ständerwicklung als Strombelag

Oberflächenpermanentmagnete

Ständer-Magnetdrehfeld

$x$ : Umfangskoordinate,  $\tau_p$ : Polteilung  
 $h_M$ : Magnethöhe,  $\delta$ : Luftspalt

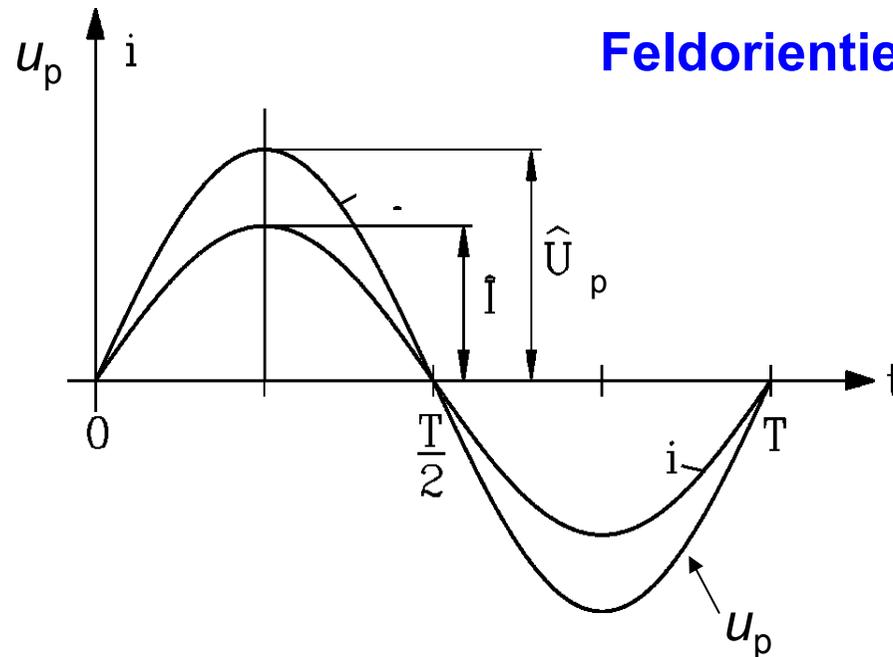
### Fazit:

- Für maximales Drehmoment  $M$ : Strompolarität einheitlich über Magnetpolarität
- Ständerfeld magnetisiert in Läuferpollücken ( $q$ -Achse)
- Strom ist „Querstrom“:  $I_q$
- Läufermagnetfeld induziert in Ständerwicklung „Polradspannung“  $U_p$
- $I_q$  und  $U_p$  je Strang sind in Phase = maximale „innere“ Leistung  $P$ !

$$P = 2\pi \cdot n_{syn} \cdot M = 3U_p I_q$$



## 2. Synchronmaschinen



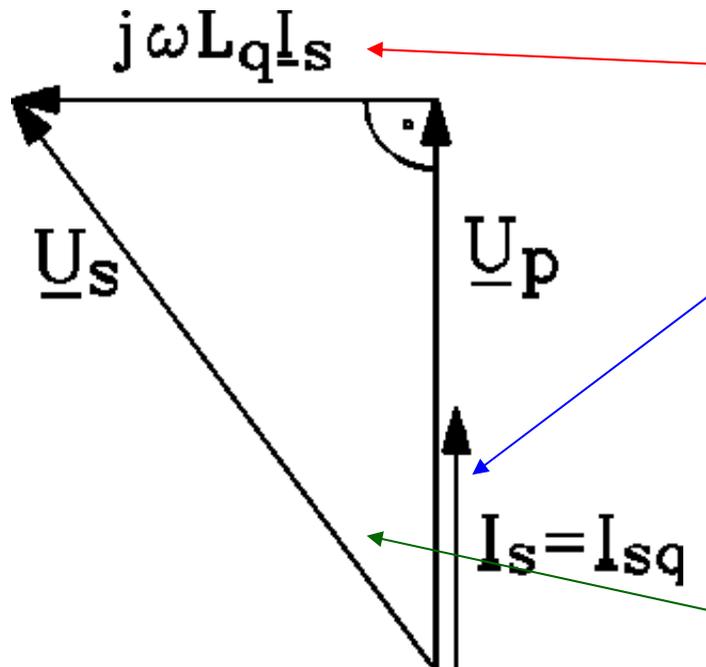
Sinusförmig eingepprägter Strom über Sinus-Hystereseband-Stromregler

Strom hat „feinen“ pulsrequenten Sägezahnverlauf auf Grund des taktenden Umrichters (im Bild nicht sichtbar)

- Strom **in Phase** mit der induzierten Spannung (Polradspannung)  $u_i = u_p$  über den Umrichter eingepprägert:  $i_s = i_q$  („**Querstrom**“)
- „**Kommutierung des Motorstroms**“: Die Nulldurchgänge des Motorstroms werden vom einprägenden Umrichter festgelegt, der als Referenz die Rotorposition (gemessen über einen Polradlagewinkel-Geber) verwendet

## 2. Synchronmaschinen

### Erforderliche Umrichterausgangsspannung



(Ständerstrangwiderstand vernachlässigt:  $R_s = 0$ )

- Ströme und Spannungen sinusförmig, daher als (rotierende) Zeiger dargestellt

- Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$

- Ständerdrehfeld induziert in Ständerwicklung **Selbstinduktionsspannung** (Selbstinduktivität  $L_q$ )

- Polradspannung und Strom **in Phase**

$$U_s = \sqrt{(\omega L_q I_q)^2 + U_p^2} \sim \omega \sim n_{syn}$$

- **Resultierende Spannung  $U_s$**  muss vom Umrichter eingespeist werden. Sie steigt proportional zur Drehzahl

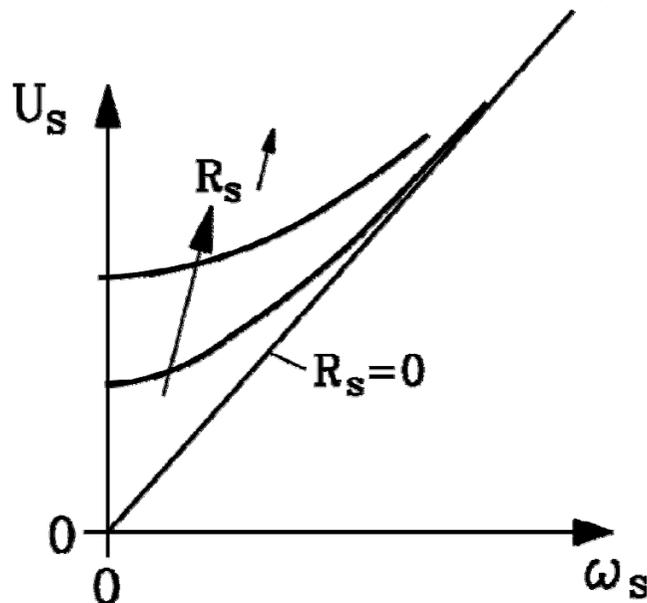
## 2. Synchronmaschinen: Einfluss des Ständerwiderstands $R_s$

- Spannungsfall am Ständerwiderstand darf **bei kleinen Kreisfrequenzen  $\omega_s$  nicht vernachlässigt** werden.

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_h \underline{I}_s + j\omega_s \Psi_p / \sqrt{2}$$

- **Beispiel:**  $f_{sN} = 50 \text{ Hz}$ ,  $U_{sN} = 230 \text{ V}$ :  $f_s = 50 \text{ Hz}$ :  $\frac{R_s}{\omega_s L_s} = \frac{0.06 \Omega}{3.0 \Omega} = 0.02$

**ACHTUNG:** Bei kleinem  $f_s$  ist  $R_s$  **nicht mehr** vernachlässigbar.

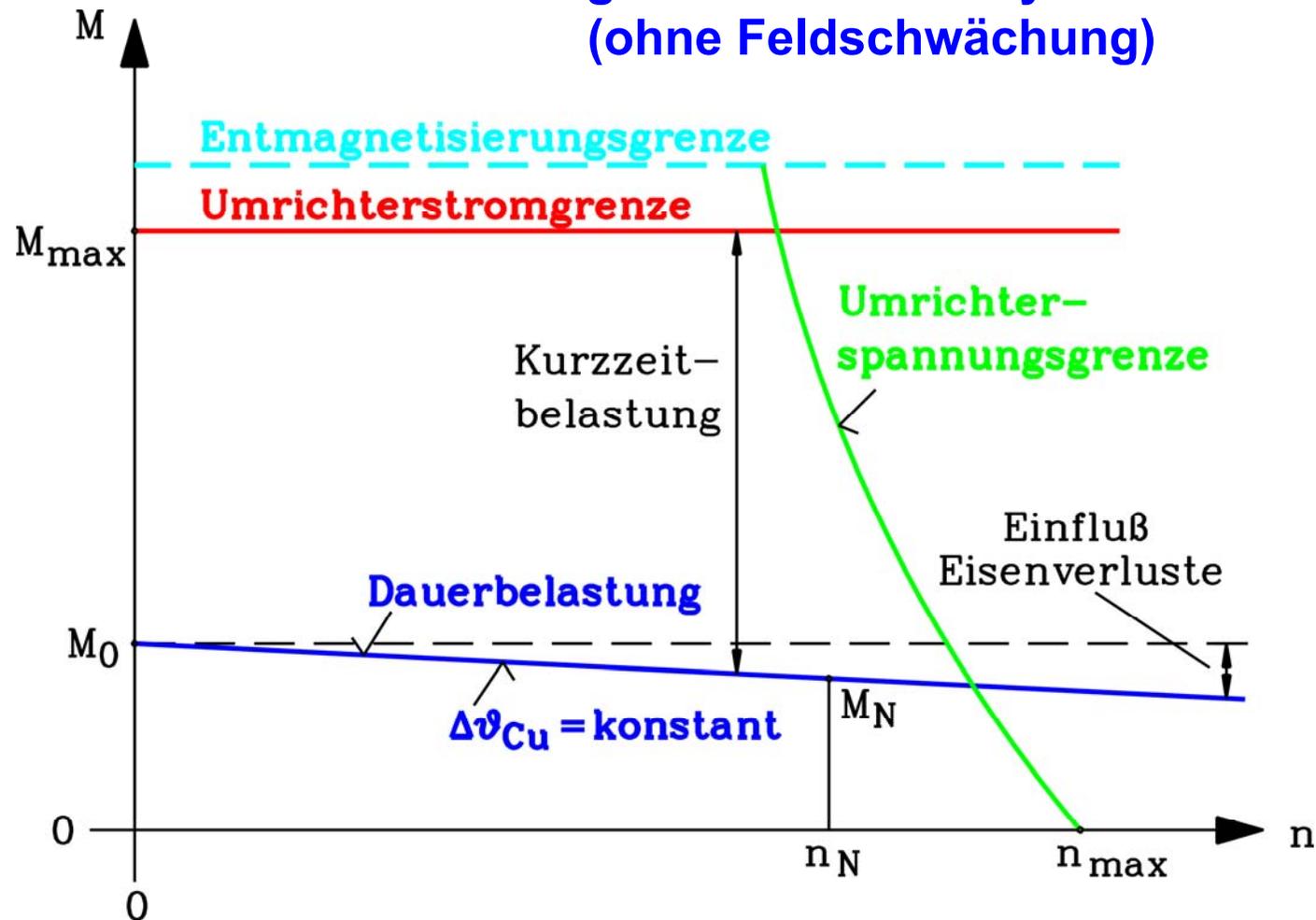


$$f_s = 5 \text{ Hz}: \frac{R_s}{\omega_s L_s} = \frac{6}{\frac{5}{300}} = \underline{\underline{0.2}}$$

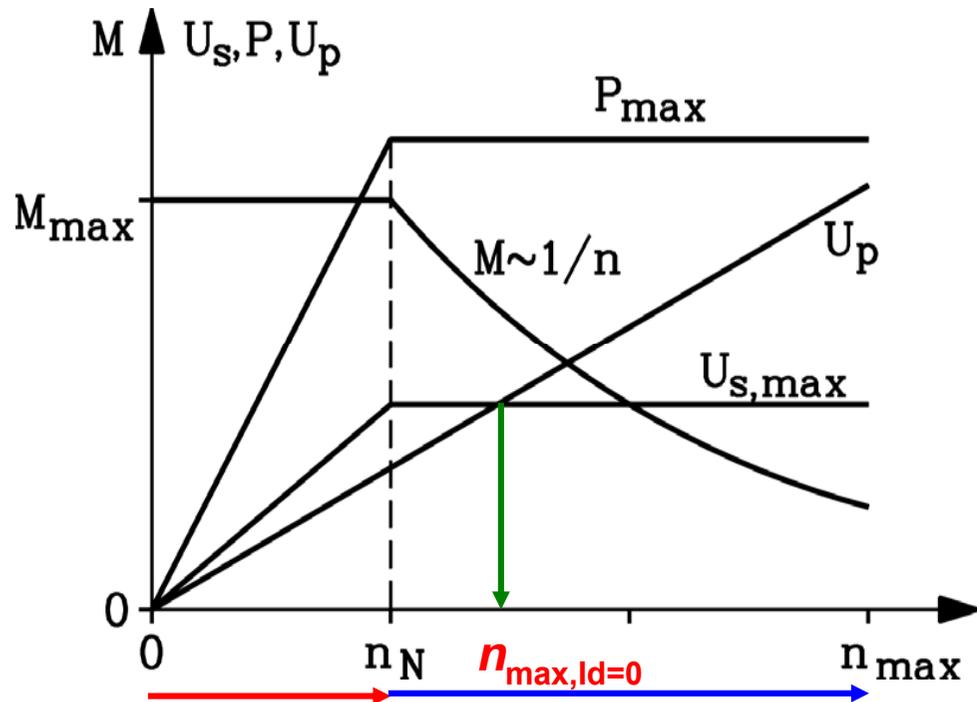
- Spannungsfall am Ständerwiderstand verringert bei eingprägter Strangspannung  $U_s$  die Hauptfeldspannung  $U_h$  und damit quadratisch das Kippmoment.
- Durch **Erhöhung von  $U_s$  um  $R_s I_s$**  muß  $U_h$  konstant gehalten werden.

## 2. Synchronmaschinen

### Betriebsgrenzkurven PM-Synchronmotor (ohne Feldschwächung)



## 2. Synchronmaschinen: Feldschwächung bei PM-Synchronmaschinen



**Grunddrehzahlbereich** **Feldschwächbereich**

Statt  $n_{\max,alt}$  (bei  $U_s = U_p$ ) wird ein höheres  $n_{\max}$  erreicht, aber bei verringertem Moment, das nicht mehr zu  $I_s$  proportional ist.

- Ab der **Nenn Drehzahl**  $n_N$  wird die Spannungsgrenze  $U_{s,max}$  erreicht.
- Durch Einprägen eines **negativen  $d$ -Stroms**: in der Ständerwicklung Gegenspannung zu  $U_p$  induziert, so dass  $U_s$  konstant bleibt.
- Der  $d$ -Strom **kein PM-Drehmoment, nur ein Reluktanzmoment!**
- Bei konstantem Gesamtstrom muss wegen des erforderlichen  $d$ -Stroms der  $q$ -Strom verringert werden, so dass das **Moment  $M$  kleiner wird** („Feldschwächbereich“).

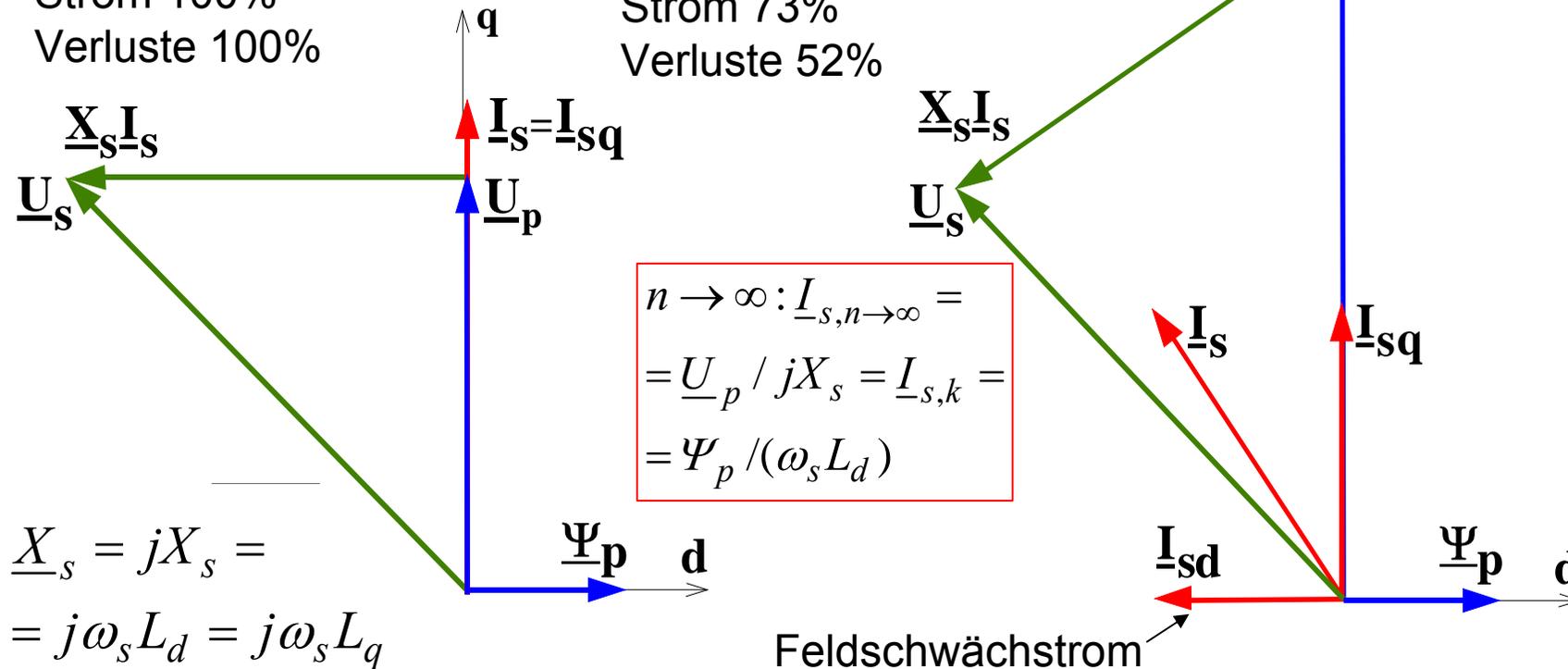
## 2. Synchronmaschinen - Vergleich: Ohne vs. Mit Feldschwächung



Ständerspannung  $U_s = \text{konst.} = \text{maximal!}$

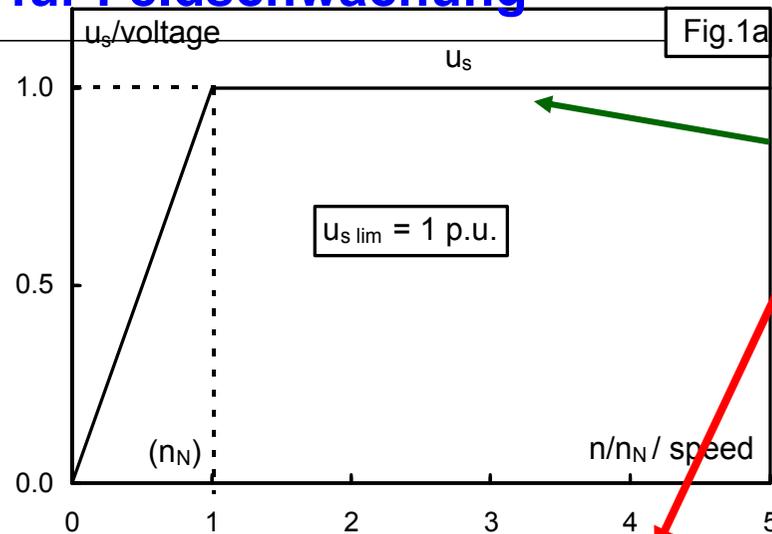
Leistung 100%  
Drehzahl 100%,  
Drehmoment 100%  
Strom 100%  
Verluste 100%

Leistung 100%  
Drehzahl 167%,  
Drehmoment 60%  
Strom 73%  
Verluste 52%



# 2. Synchronmaschinen

## Beispiel: Zwei unterschiedliche PM-Synchronmaschinen für Feldschwächung

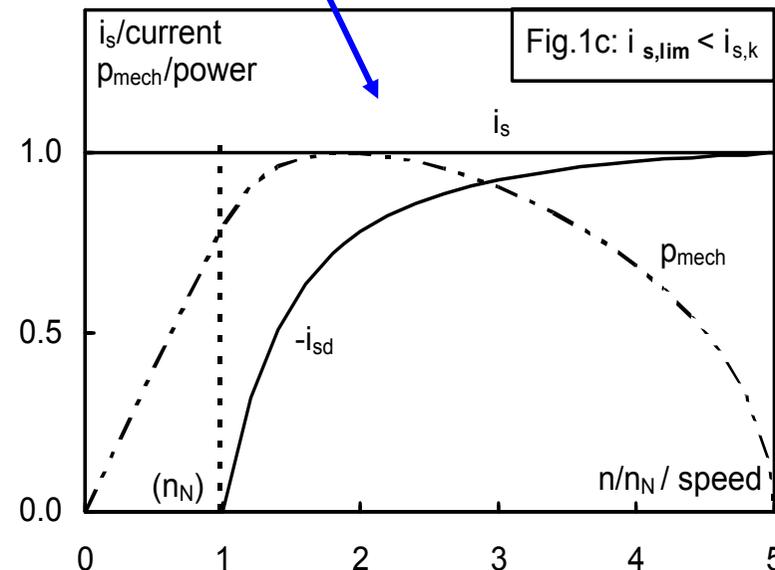
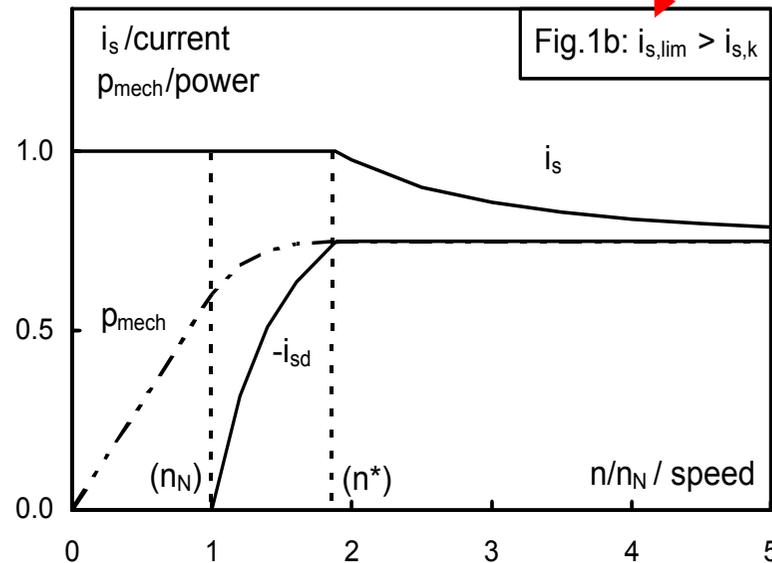


Umrichter Ausgangsspannung

Motor A: Umrichterstromgrenze  $i_{s,lim} > i_{s,k}$

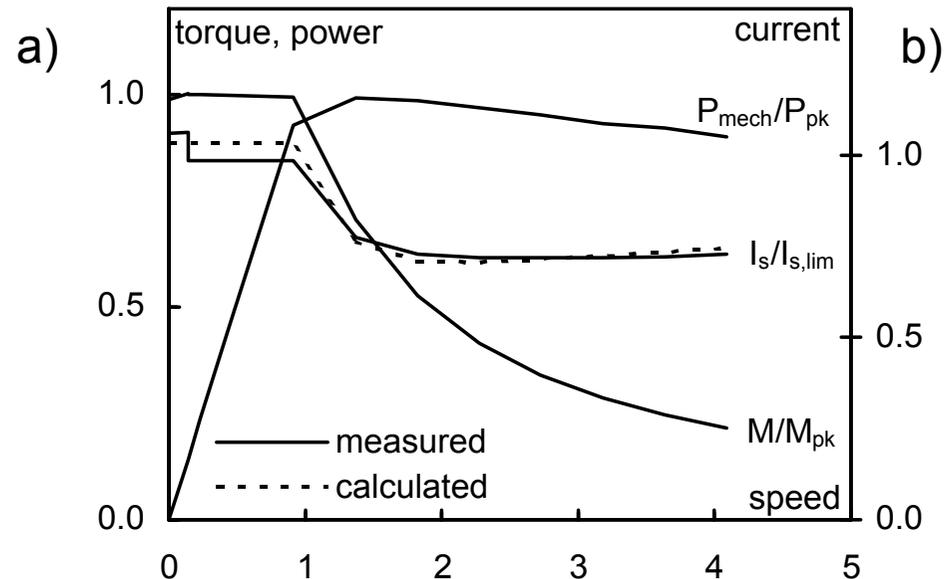
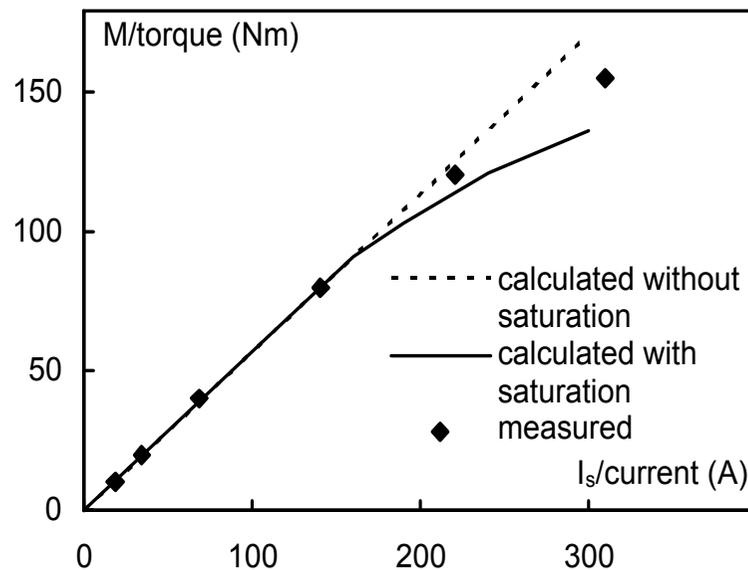
Motor B: Umrichterstromgrenze  $i_{s,lim} < i_{s,k}$

$i_{s,lim}$  = Umrichterstromgrenze



## 2. Synchronmaschinen

### Beispiel: PM-Synchronmotor für E-Auto-Antrieb



a) Drehmoment-Strom-Kurve bei kleiner Drehzahl (keine Feldschwächung)  
Nichtlinearität durch Eisensättigung bei hohem Strom

b) Gemessene Drehmoment-Drehzahl-Grenzkennlinie bei 132V Batteriespannung  
Stromzunahme wegen Feldschwächstrom

Quelle: Siemens AG

$$M_{pk} = 156Nm, P_{pk} = 35kW, I_{s,lim} = 315A \quad (I_{s,lim} = I_{s,max}: \text{Stromgrenze})$$

## 2. Synchronmaschinen

### Beispiel: PM-Synchronmaschine PSM, M3, Brusa, Nenndaten

Mechanische Eigenschaften	
Nutenzahl $Q$	36
Polzahl	6
Nuten je Strang und Pol $q$	2

Elektrische Eigenschaften	
Nennleistung [kW]	40
Nenndrehzahl [1/min]	4500
Nenndrehmoment [Nm]	85
Nennstrom [A], Strang	96
Nennspannung [V], Strang	164
$\cos \varphi$	0,885
Wirkungsgrad $\eta$ [%]	95,7
Verlustleistung [W]	1800



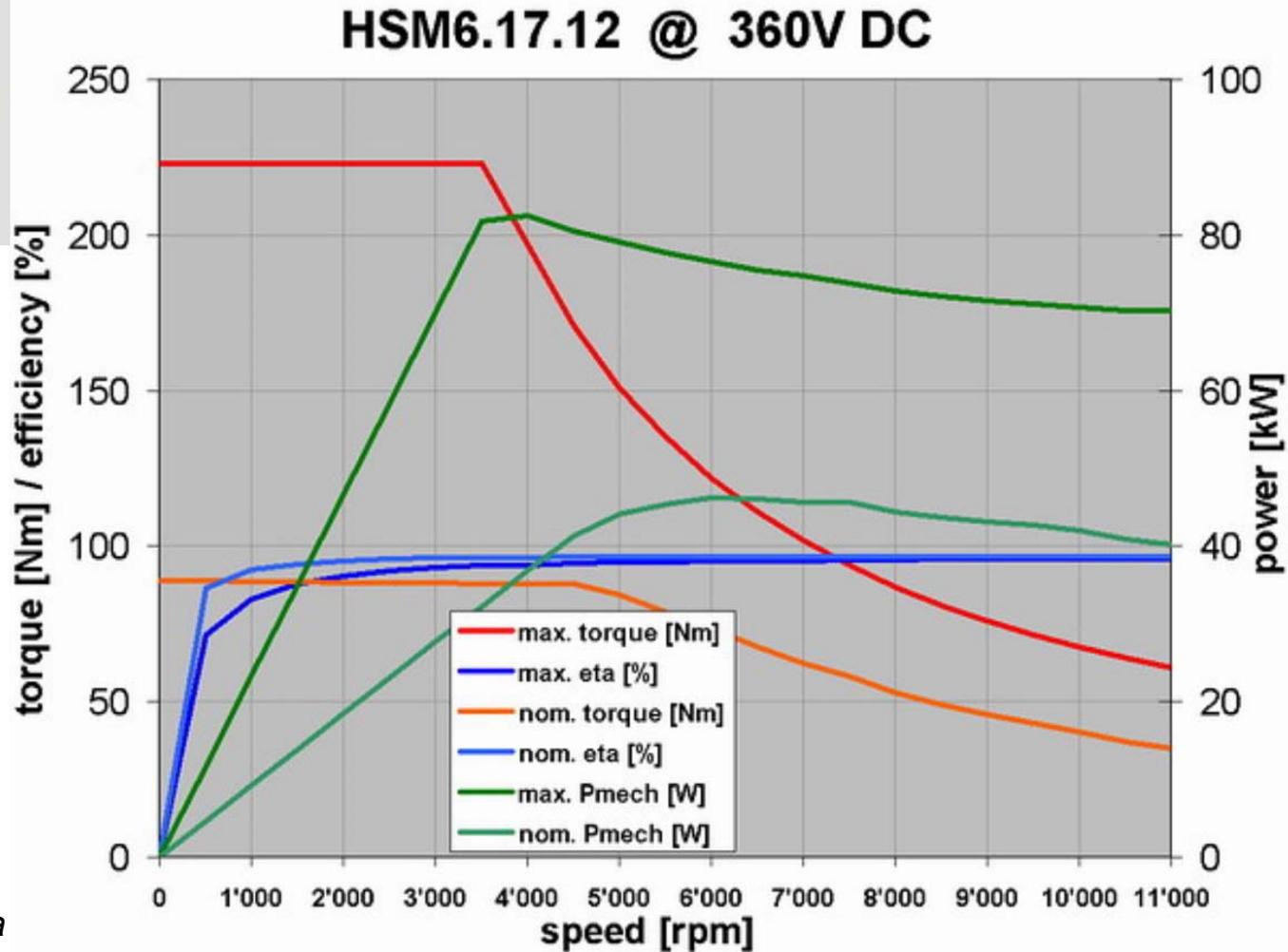
Quelle: Brusa

## 2. Synchronmaschinen

### Beispiel: PM-Synchronmaschine *Brusa* Drehmoment-Leistungskurven



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

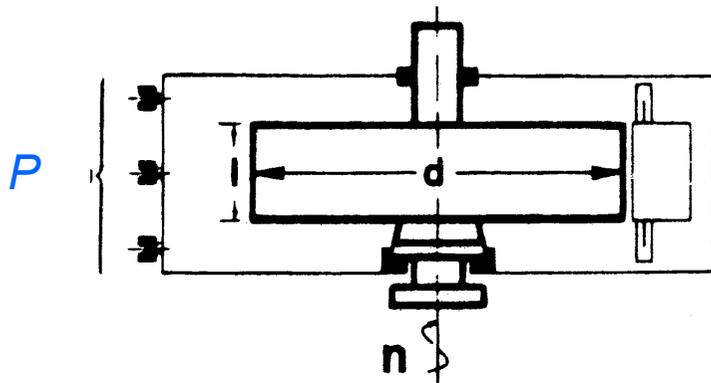


Quelle: Brusa



# Bauform: Scheibe vs. Zylinder

(Beispiel: Gleiche Leistung  $P$ )



## Scheibenbauform:

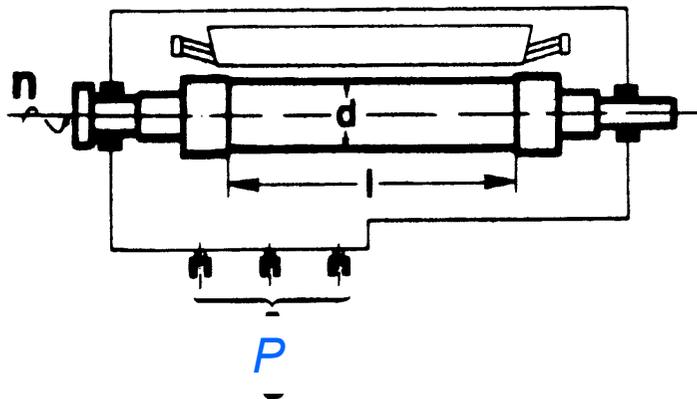
Niedrige Drehzahl  $n$

Großes Moment  $M$

Hohe Polzahl  $2p$

Großer Durchmesser  $d$

Kurze Axiallänge  $l$



## Zylinderbauform:

Hohe Drehzahl  $n$

Kleines Drehmoment  $M$

Niedrige Polzahl  $2p$

Kleiner Durchmesser  $d$

Große Axiallänge  $l$

$$P = 2\pi \cdot n \cdot M \sim d^2 \cdot l \cdot n$$

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

Fazit: Das Drehmoment bestimmt die Baugröße der E-Maschine!

# Läufer von Drehfeldmaschinen



**Synchronmaschine:**

**vierpoliger  
Permanentmagnet-Läufer,**

Oberflächenmagnete: VOR  
dem Aufpressen der Glas-  
faser-Hülse



**Asynchronmaschine:**

**Vierpoliger Kupferkäfig-Läufer mit  
Ovalstäben**

Kurzschlussring vor dem Anlöten

30 kW, 24000/min,  
90 mm lang, 90 mm Durchmesser

Quelle:

TU Darmstadt

# Beispiel: PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschinen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

(Quelle: Daimler)

## Technische Daten Elektrische Maschinen

	PSM M1	ASM M2
Bemessungsleistung $P_N$	20,5 kW	15 kW
Maximalleistung $P_{max}$	42 kW	35 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
Maximal-Drehmoment $M_{max}$	270 Nm	120 Nm
Außendurchmesser $d_{s,a}$	286 mm	150 mm
Eisenlänge $l_{fe}$	95 mm	180 mm
Kühlmitteldurchfluss	8 l/min	8 l/min
Kühlmittel-Vorlauf-temperatur	85 °C	85 °C
Bauweise	Scheibe	Zylinder

## PM-Synchronmaschine



## Käfigläufer-Asynchronmaschine



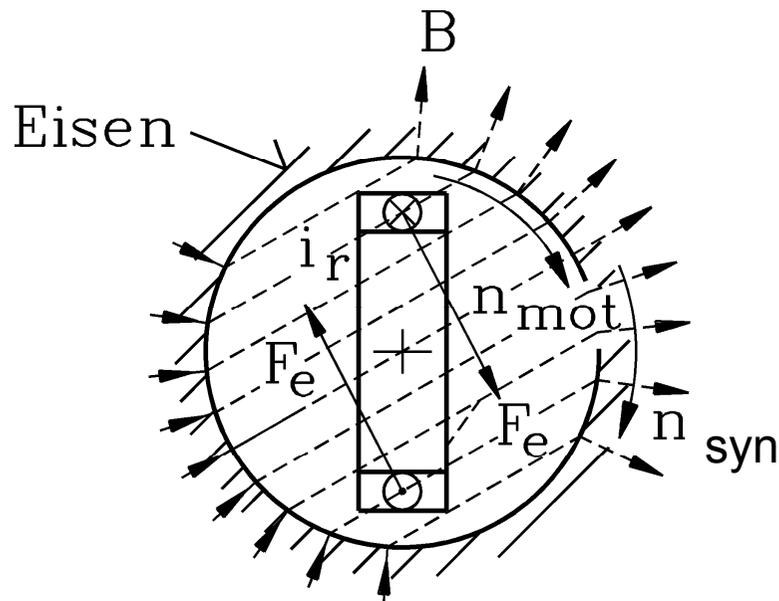
---

# Inhalt



## 3. Asynchronmaschinen

# 3. Asynchronmaschinen

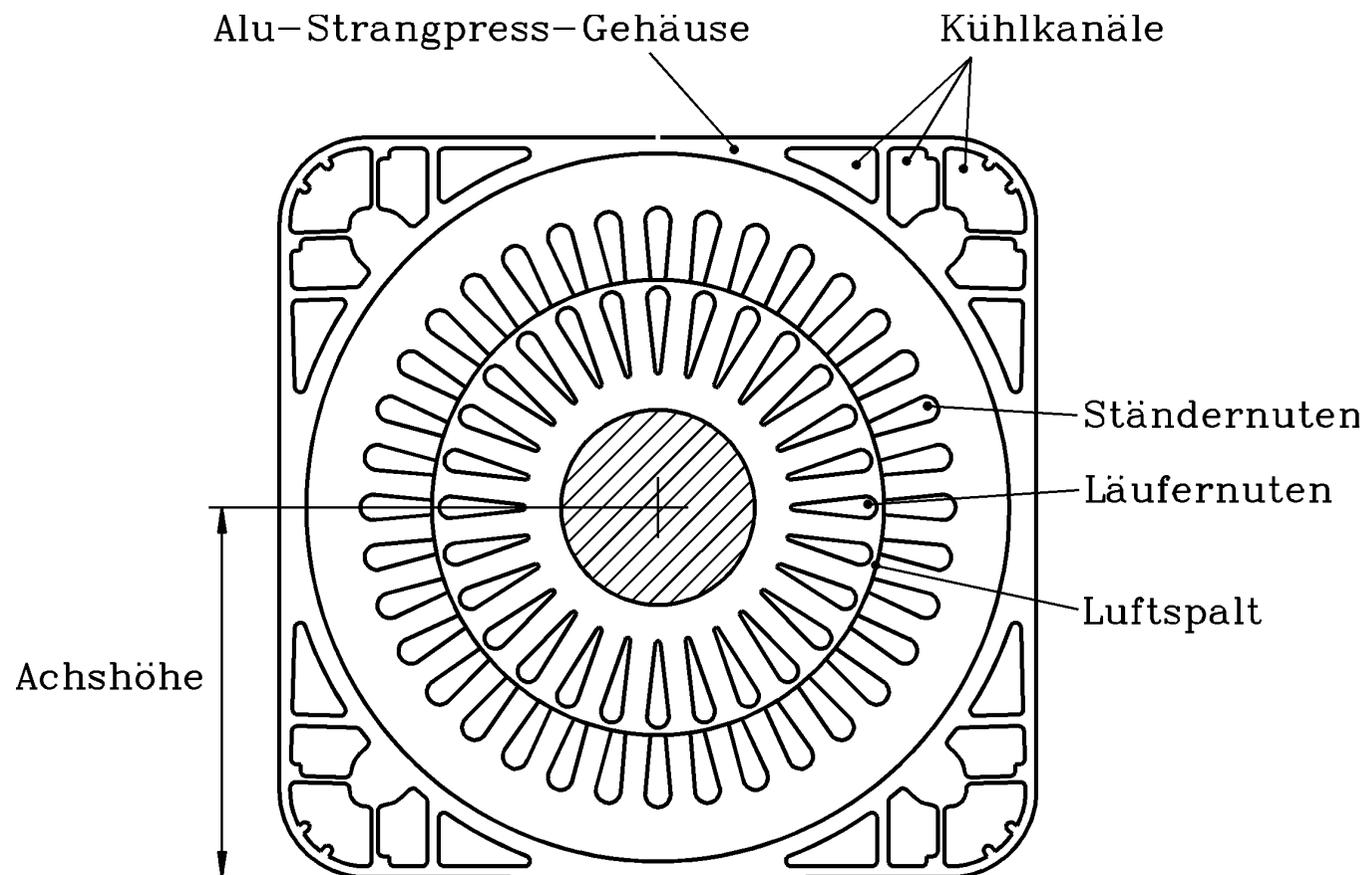


- Läufer trägt **Kurzschlusswindung**
- Läufer dreht langsamer als Ständer-Drehfeld  $B$ , erfährt **Feldänderung**:  $n_{mot} < n_{syn}$
- **FARADAY**'sches Induktionsgesetz: **Spannung  $u$**  in Kurzschlusswindung erzeugt

- Spannung  $u$  treibt **Kurzschlussstrom  $i_r$** . Strom  $i_r$  bildet mit  $B$  eine **LORENTZ-Kraft  $F_e$** , die den Läufer antreibt.

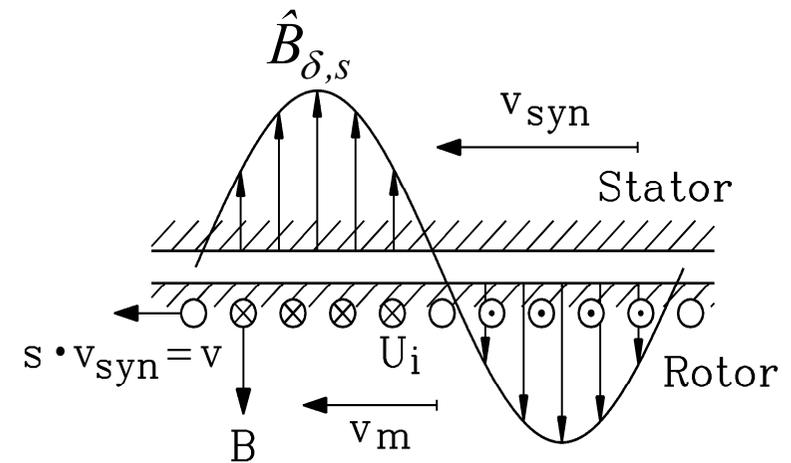
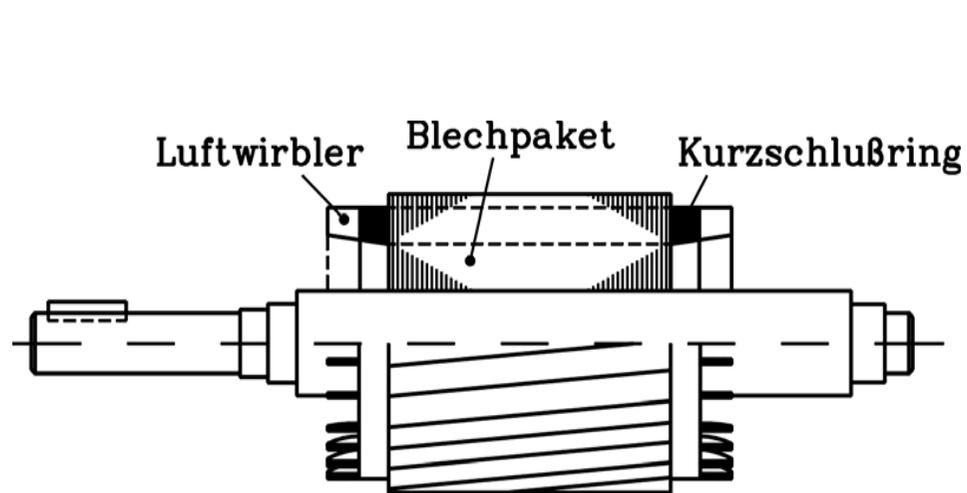
# 3. Asynchronmaschinen

## Querschnitt: Käfigläufer-Asynchronmotor



# 3. Asynchronmaschinen

## Asynchronmaschine mit Käfigläufer – Spannungsinduktion im Läufer



$$U_i \sim |\vec{v} \times \vec{B}|$$

# 3. Asynchronmaschinen

## Asynchronmaschine mit Käfigläufer – Spannungsinduktion im Läufer

- **Ständer-Grundwelle**  $\hat{B}_{\delta,s}$  dreht mit  $v_{syn} = 2f_s \tau_p$
- Läufer dreht mit  $v_m = 2p\tau_p \cdot n$
- Relativgeschwindigkeit:  $s \cdot v_{syn}$
- **s: Schlupf**  $s = (n_{syn} - n) / n_{syn}$  Synchrondrehzahl:  $n_{syn} = f_s / p$
- Zwei im Abstand  $\tau_p$  liegende Stäbe = "Läufermasche":

**Fluss**  $\Phi = (2/\pi) \cdot \tau_p l_{Fe} \hat{B}_{\delta,s}$

- **Maschenspannung** mit Frequenz  $f_r = sf_s$  induziert:  $\hat{U}_i = 2\pi \cdot sf_s \cdot (2/\pi) \tau_p l_{Fe} \hat{B}_{\delta,s}$
- **Je Stab: Stabspannung** ( $N_r = 1/2$ ):  $\hat{U}_{i,Stab} = \hat{U}_i / 2$

### 3. Asynchronmaschinen

## Gegeninduktivität der Asynchronmaschine zwischen Stator- und Rotorwicklung $M_{sr}$ und $M_{rs}$

$$\hat{U}_{i,Stab} = 2\pi f_r \cdot M_{sr} \cdot \hat{I}_s$$

Gegeninduktivität:  $M_{sr} = \mu_0 \cdot N_s \cdot k_{w,s} \cdot N_r \cdot \frac{m_s}{2} \cdot \lambda_h \cdot l_{Fe}$       $\lambda_h = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\tau_p}{p \cdot \delta}$

$k_w$ : Wicklungsfaktor (Kap. 5)

• **Läuferspannungsgleichung:**  $M_{sr} \frac{di_s}{dt} + (L_{rh} + L_{r\sigma}) \frac{di_r}{dt} + R_r i_r = 0$

• Über Ringe kurz geschlossene Läufermaschinen:

Stabströme  $i_r$ , erregen Läuferfeld  $\hat{B}_{\delta,r}$ , das in die Ständerwicklung über  $M_{rs}$  induziert.

• **Ständerspannungsgleichung:**  $M_{rs} \frac{di_r}{dt} + (L_{sh} + L_{s\sigma}) \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = u_s$

# 3. Asynchronmaschinen

## Die Transformatorwirkung der Asynchronmaschine

- Jeder Stab ist **eigener Wicklungsstrang**:

$N_r = 1/2$ , Strangzahl  $m_r = Q_r$  (Läuferstabzahl) Wicklungsfaktor  $k_{wr} = 1$ .

- Spannungs- und Stromübersetzungsverhältnis:

$$\ddot{u}_U = \frac{k_{ws} N_s}{k_{wr} N_r}$$

$$\ddot{u}_I = \frac{k_{ws} N_s m_s}{k_{wr} N_r m_r}$$

$$\ddot{u}_U \ddot{u}_I L_{rh} = \left( \frac{k_{w,s} N_s}{k_{w,r} N_r} \right)^2 \frac{m_s}{m_r} L_{rh} = L_{sh}$$

$$\ddot{u}_U \cdot M_{sr} = \frac{k_{ws} N_s}{k_{wr} N_r} \cdot M_{sr} = L_{sh}$$

$$\ddot{u}_I \cdot M_{rs} = \frac{k_{ws} N_s m_s}{k_{wr} N_r m_r} \cdot M_{rs} = L_{sh}$$

# 3. Asynchronmaschinen

- Übersetzungsverhältnisse für Strom und Spannung  $\ddot{u}_U, \ddot{u}_I$

$$\ddot{u}_I M_{rs} \frac{di_r}{\ddot{u}_I dt} + (L_{sh} + L_{s\sigma}) \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = u_s$$

$$\ddot{u}_U U_r = U'_r$$

$$\frac{I_r}{\ddot{u}_I} = \frac{I_{Stab}}{\ddot{u}_I} = I'_r$$

$$\ddot{u}_U M_{sr} \frac{di_s}{dt} + \ddot{u}_U \ddot{u}_I (L_{rh} + L_{r\sigma}) \frac{di_r}{\ddot{u}_I dt} + \ddot{u}_U \ddot{u}_I R_r \cdot \frac{i_r}{\ddot{u}_I} = 0$$

- Abkürzungen:

$$R'_r = \ddot{u}_U \ddot{u}_I R_r \quad L'_{r\sigma} = \ddot{u}_U \ddot{u}_I L_{r\sigma} \quad \ddot{u}_U M_{sr} = \ddot{u}_I M_{rs} = \ddot{u}_U \ddot{u}_I L_{rh} = \underline{\underline{L_h}}$$

$$L_h \frac{d\dot{i}'_r}{dt} + (L_h + L_{s\sigma}) \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = u_s \quad L_h \frac{di_s}{dt} + (L_h + L'_{r\sigma}) \frac{d\dot{i}'_r}{dt} + R'_r \cdot \dot{i}'_r = 0$$

- Strom-/Spannungsgrundschiwingung, Feldgrundwelle: **komplexe**

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

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

# 3. Asynchronmaschinen

## T-Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

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

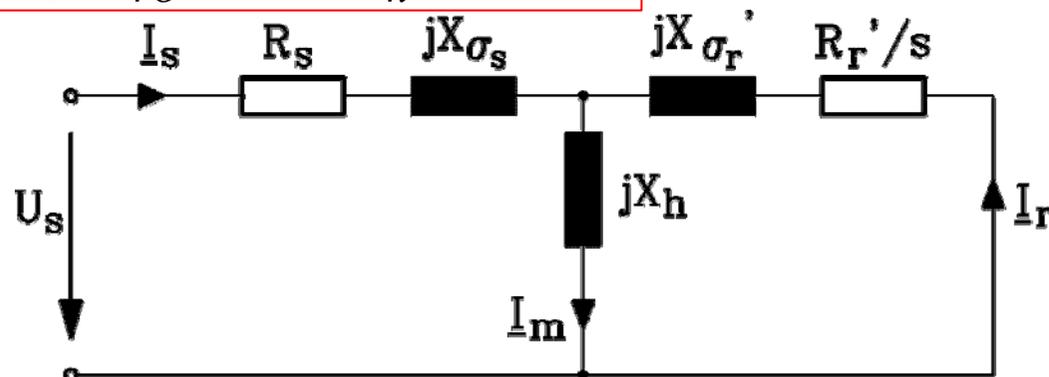
$$0 = j\omega_s L_h \underline{I}_s + j\omega_s L_h \underline{I}'_r + j\omega_s L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + (R'_r / s) \cdot \underline{I}'_r$$

- Komplexe Zeigerrechnung:  $\omega_s L = X$  Reaktanzen  $X$  mit STÄNDER-Frequenz !

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

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

- T-Ersatzschaltbild:



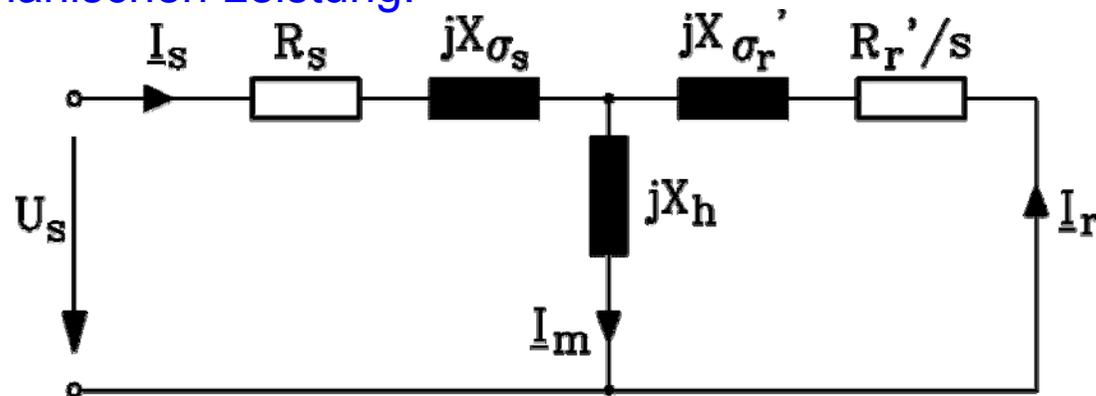
- Galvanische Kopplung zwischen Stator- und Rotorkreis ist in Realität nicht vorhanden: Es koppelt das Luftspaltfeld magnetisch!

### 3. Asynchronmaschinen: Ersatzschaltbildparameter

- Stator- und Rotorreaktanz je Strang:  $X_s = X_h + X_{s\sigma}$      $X'_r = X_h + X'_{r\sigma}$
- *BLONDEL*'sche Streuziffer:  $\sigma = 1 - \frac{X_h^2}{X_s X'_r}$

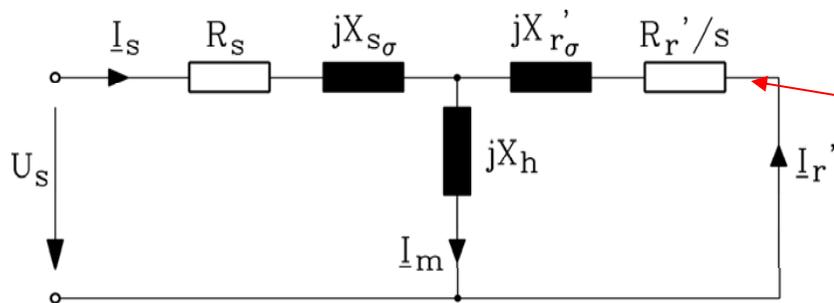
Keine Kopplung = nur Streufeld:  $\sigma = 1$ , Sehr gute Kopplung = kein Streufeld:  $\sigma = 0$

- Fiktiver Magnetisierungsstrom für die Erregung des resultierenden Luftspaltfelds aus Summe von Ständer- und Läuferfeld:  $\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_r$
- Fiktiver Läuferwiderstand je Strang  $R'_r / s$  für die Berechnung der Läuferverluste UND der mechanischen Leistung.



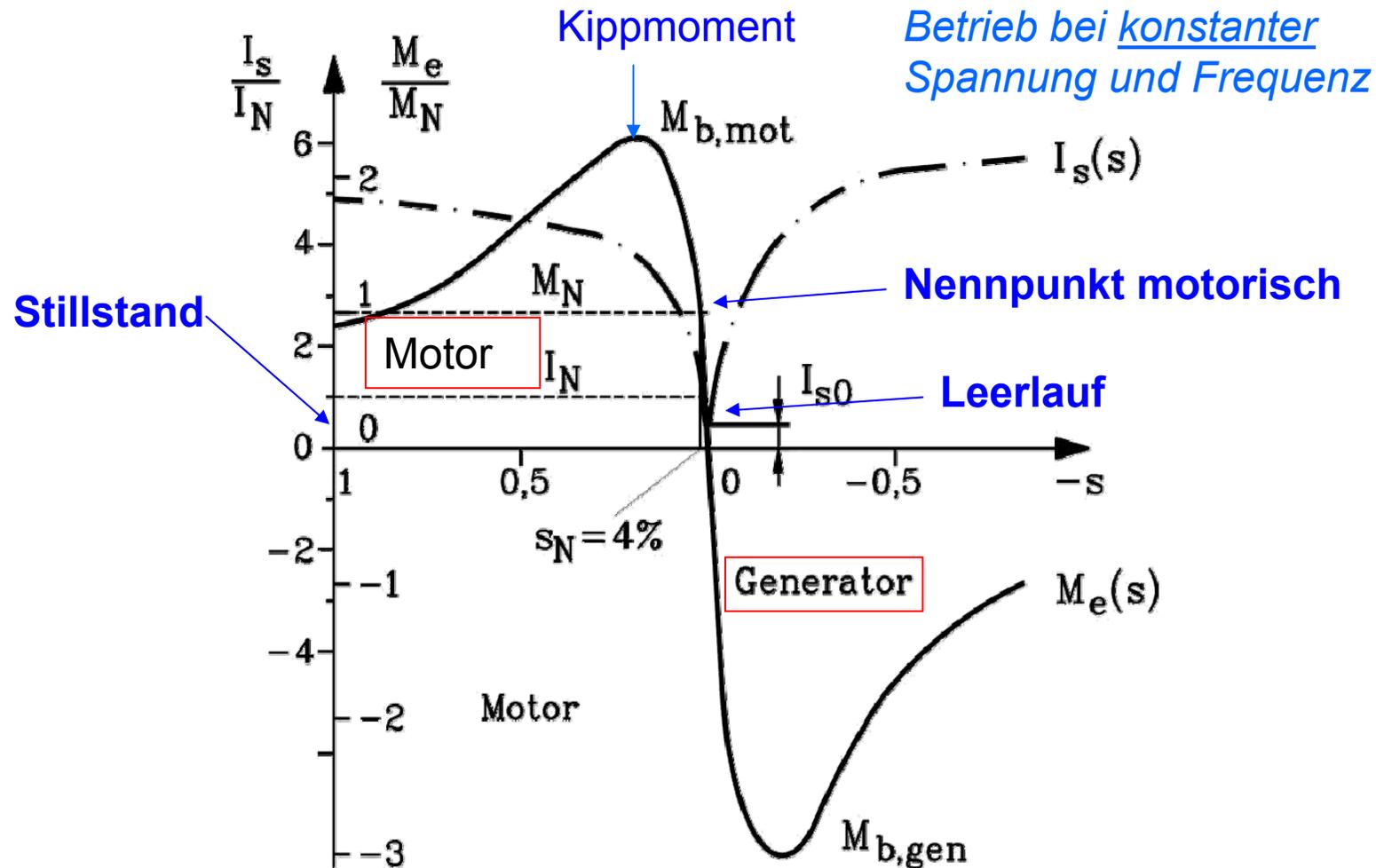
# 3. Asynchronmaschinen

- Zugeführte **ele. Leistung**  $P_{e,in} = 3U_s I_s \cos\varphi$
- **Stromwärme in Ständerwicklung**  $P_{Cu,s} = 3R_s I_s^2$
- **Luftspaltleistung:**  $P_\delta = P_{e,in} - P_{Cu,s} = 3 \cdot (R'_r / s) \cdot I_r'^2$
- **Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung:**  $P_{Cu,r} = Q_r R_r I_r'^2 = 3R'_r I_r'^2 = sP_\delta$
- Abgegebene **mechanische Leistung:**  $P_{m,out} = P_\delta - P_{Cu,r} = (1-s)P_\delta$
- **Drehmoment:**  $P_m = M_e \Omega_m = (1-s)P_\delta$
- **Drehmoment: Aus der Drehfeldleistung:**  $M_e = \frac{1-s}{1-s} \cdot \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}}$



$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{m_s R'_r I_r'^2}{s \cdot \Omega_{syn}}$$

### 3. Asynchronmaschine: Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Strom-Kennlinie



# 3. Asynchronmaschinen

## Asynchronmaschine mit Umrichterspeisung

- **Frequenzumrichter** stellt Drehspannungssystem mit variabler Frequenz  $f_s$  und variabler Amplitude  $U_s$  zur Verfügung. Daher ist Synchrondrehzahl veränderbar. Die Asynchronmaschine wird **kontinuierlich drehzahlveränderbar**.

- **Drehrichtungsumkehr** erfolgt durch elektronischen Phasentausch. Änderung des **Energieflusses** erfolgt durch Vergrößern/Verkleinern des Phasenwinkels :

$$\varphi > \pi/2, \varphi < \pi/2$$

- Spannungsamplitude  $U_s$  muß proportional zu  $f_s$  verändert werden, damit der **Fluss in der Maschine stets konstant bleibt** (und damit das Drehmoment bei gleichem Strom).

# 3. Asynchronmaschinen

## Asynchronmaschine mit Umrichterspeisung

Für  $R_s = 0$ : 
$$\underline{U}_s = j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

$$\frac{\underline{U}_s}{\omega_s} = jL_{s\sigma} \underline{I}_s + jL_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) = j(\hat{\Psi}_{s\sigma} + \hat{\Psi}_h) / \sqrt{2} = j\hat{\Psi}_s / \sqrt{2} = konst.$$

Steuergesetz für den Umrichter:

$$U_s \sim \omega_s$$

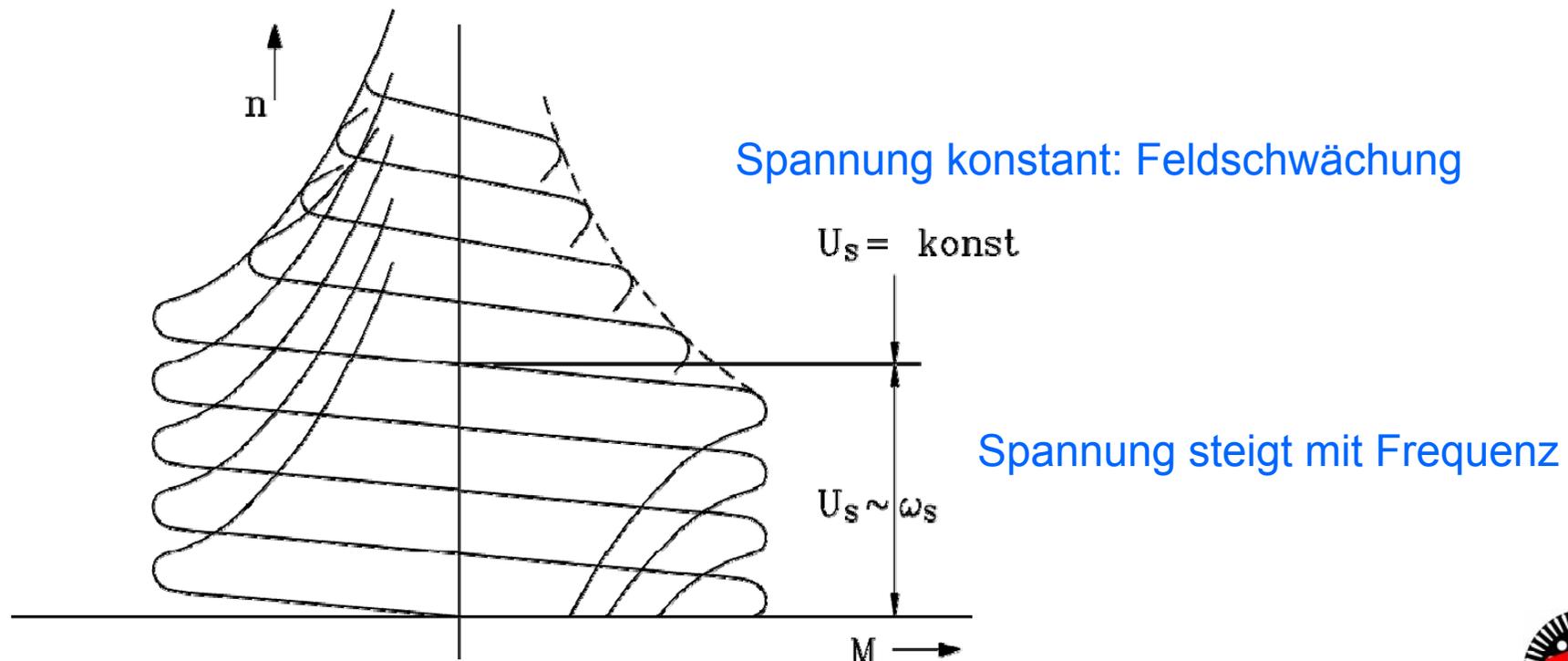
• Schlupf:  $s = f_r / f_s = \omega_r / \omega_s \Rightarrow \Omega_m = \frac{\omega_s}{p} - \frac{\omega_r}{p}$

Kurve  $M_e(n) = M_e(\Omega_m)$  ist als **Kurve**  $M_e(\omega_r)$  für unterschiedliches  $\omega_s$  **parallel verschoben**.

# 3. Asynchronmaschinen

## Betrieb bei veränderlicher Spannung und Frequenz

- Umrichterspannung steigt linear mit Frequenz und Drehzahl!
- Ab maximaler Umrichterspannung  $U_{s,max}$  sinkt selbsttätig bei weiterer Drehzahl-erhöhung das Magnetfeld („automatische“ Feldschwächung).
- Kippmoment sinkt invers mit **Quadrat der Frequenz** !



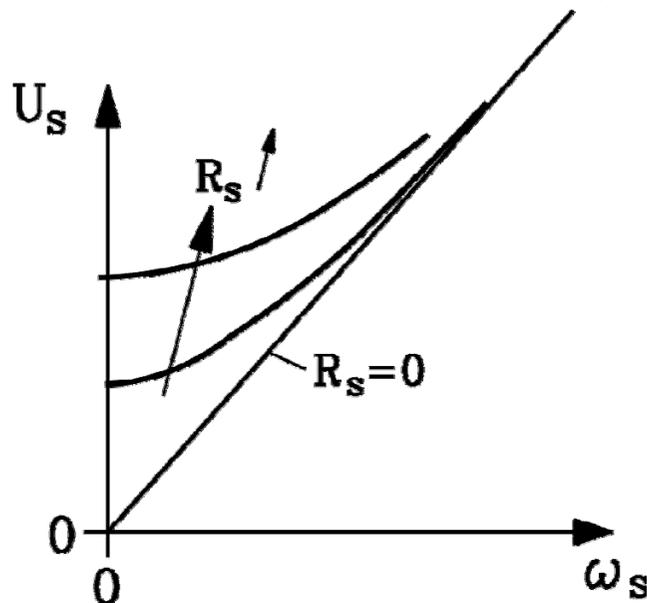
### 3. Asynchronmaschinen: Einfluss des Ständerwiderstands $R_s$

- Spannungsfall am Ständerwiderstand darf **bei kleinen Kreisfrequenzen  $\omega_s$  nicht vernachlässigt** werden.

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

- **Beispiel:**  $f_{sN} = 50 \text{ Hz}$ ,  $U_{sN} = 230 \text{ V}$ :  $f_s = 50 \text{ Hz}: \frac{R_s}{\omega_s L_s} = \frac{0.06 \Omega}{3.0 \Omega} = 0.02$

**ACHTUNG:** Bei kleinem  $f_s$  ist  $R_s$  **nicht mehr** vernachlässigbar.



$$f_s = 5 \text{ Hz}: \frac{R_s}{\omega_s L_s} = \frac{6}{\frac{5}{50} \cdot 300} = \underline{\underline{0.2}}$$

- Spannungsfall am Ständerwiderstand verringert bei eingprägter Strangspannung  $U_s$  die Hauptfeldspannung  $U_h$  und damit quadratisch das Kippmoment.
- Durch **Erhöhung von  $U_s$  um  $R_s I_s$**  muß  $U_h$  konstant gehalten werden.

---

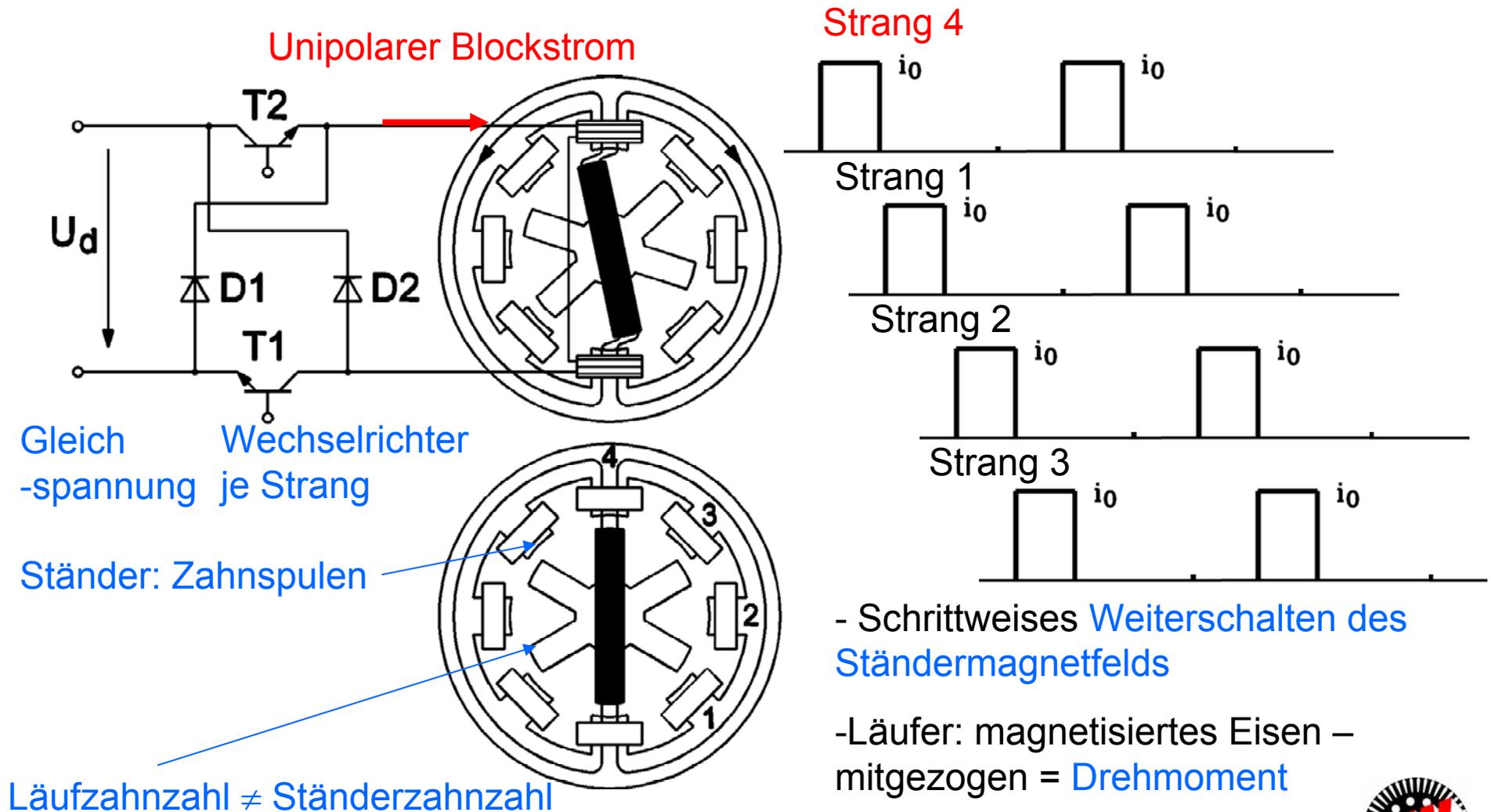
# Inhalt



## 4. Geschaltete Reluktanzmaschinen

# 4. Geschaltete Reluktanzmaschine

Beispiel: viersträngiger Ständer, zweipoliger Motor



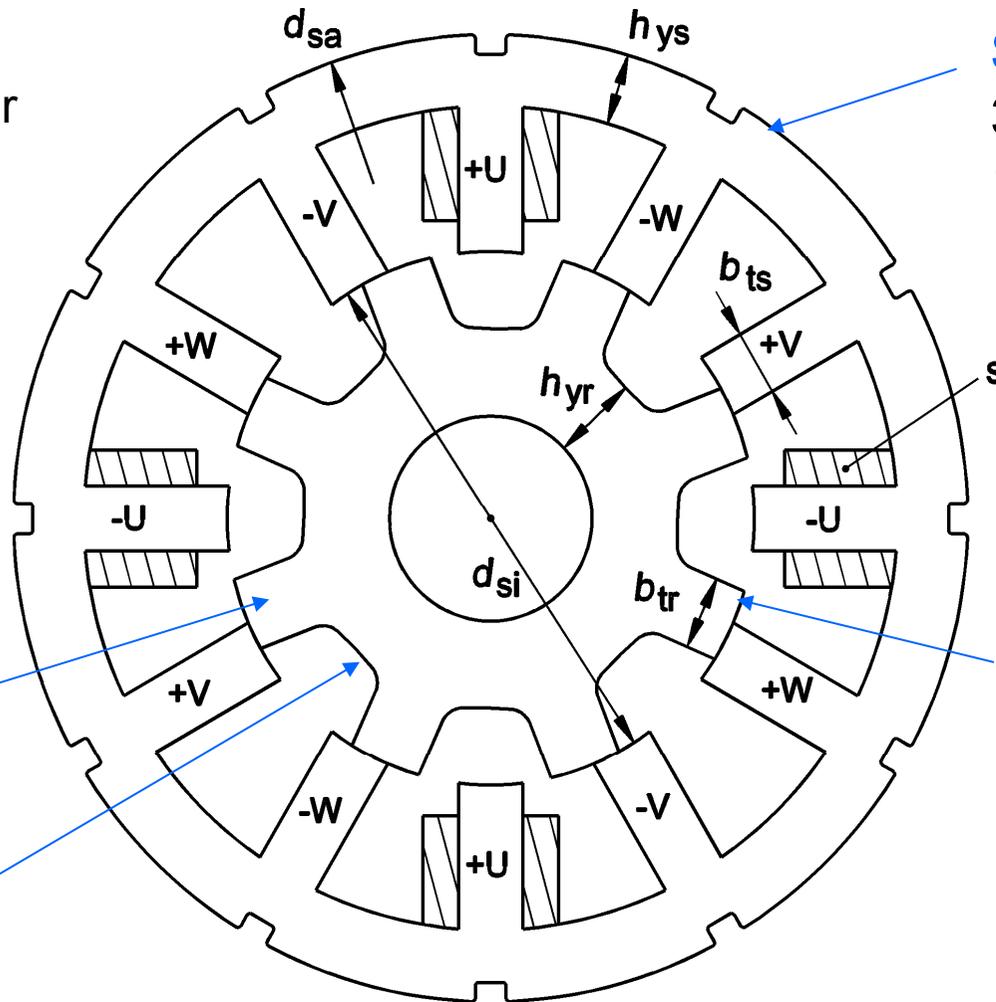
# 4. Geschaltete Reluktanzmaschine

Beispiel: dreisträngiger Ständer, vierpoliger Motor



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Reluktanz =  
magnetischer  
Widerstand!



Ständer:  
3 Stränge U, V, W  
12 Zähne

Eisen: **kleine**  
Reluktanz

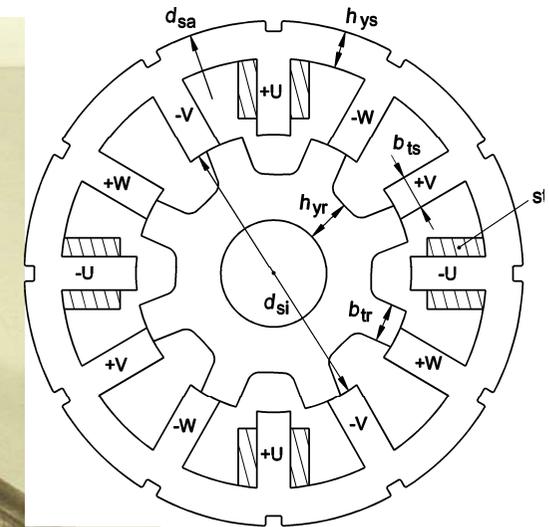
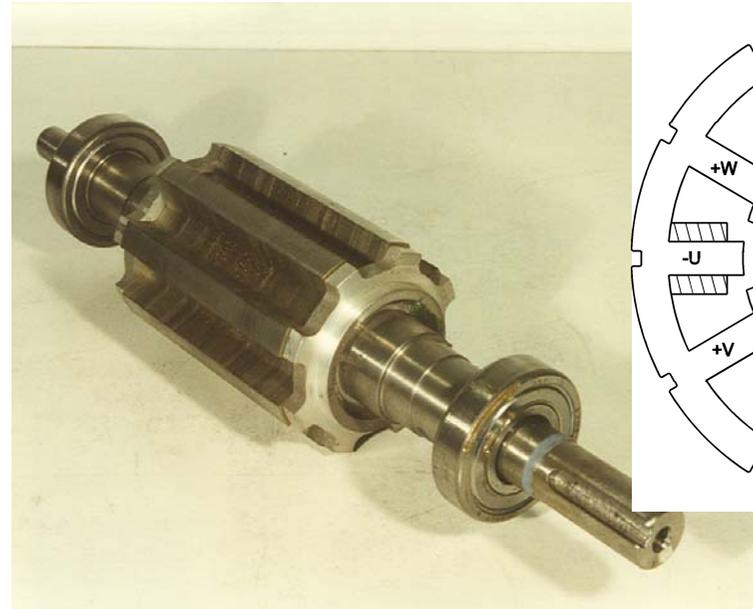
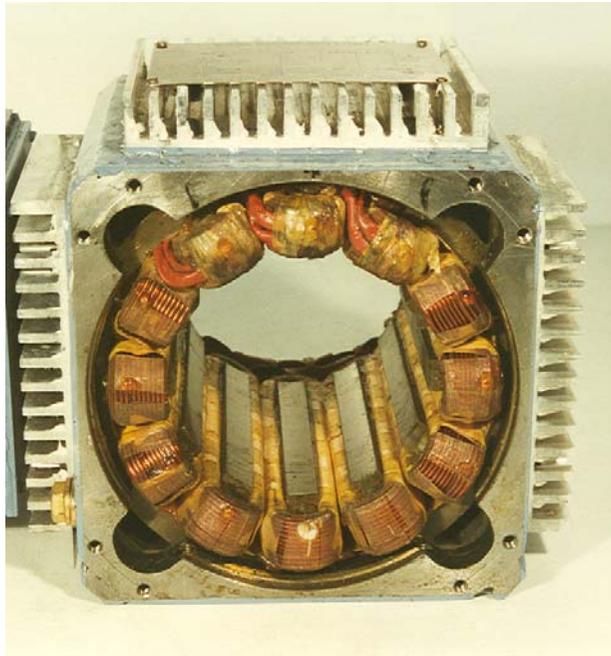
Luft: **hohe**  
Reluktanz

Läufer:  
8 Zähne  
robust (nur Eisen)



# 4. Geschaltete Reluktanzmaschine

Beispiel: dreisträngiger Ständer, vierpoliger Motor



Ständer: 3 Stränge, 12 Zähne    Läufer: 8 Zähne

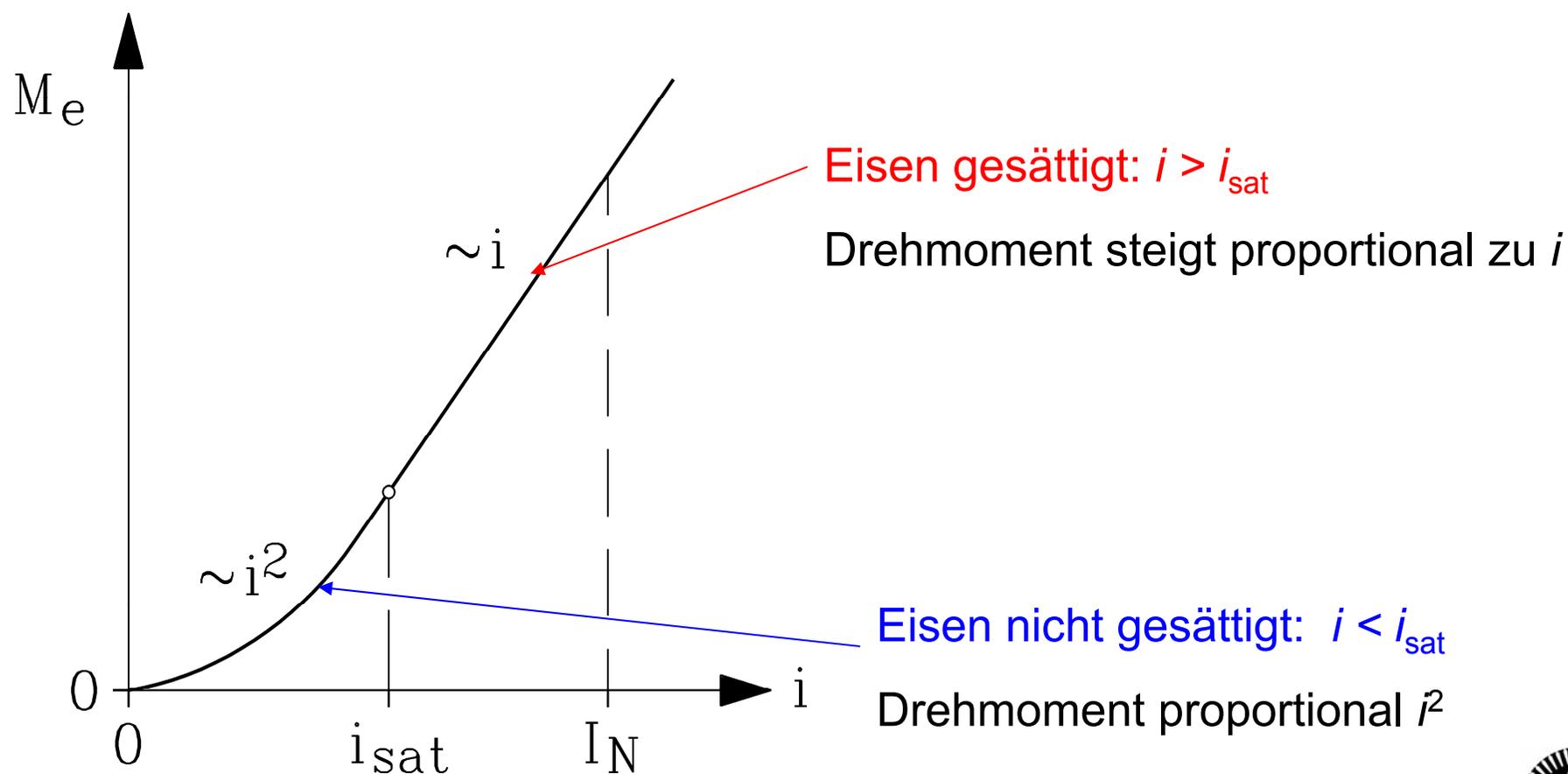
Beispiel: Nenndrehzahl: 1500/min, max.: 6000/min

Rotorlagegeber: Drehzahl sehr gleichförmig

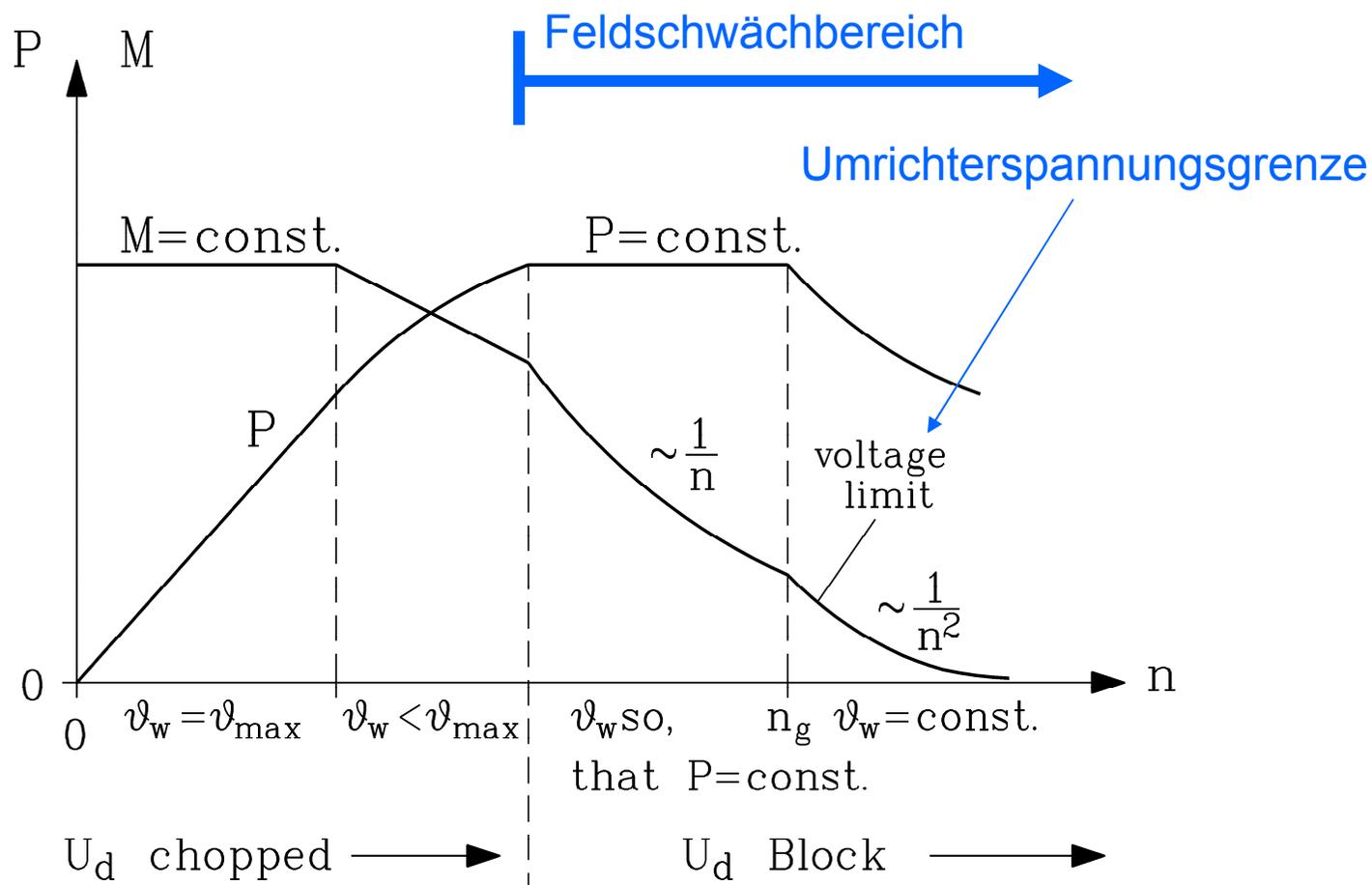
Quelle:  
SICME, Italien

## 4. Geschaltete Reluktanzmaschine – Drehmoment vs. Strom bei niedriger Drehzahl

Fazit: Hohe Überlastfähigkeit beim Anfahren !



# 4. Geschaltete Reluktanzmaschine – Grenzkurven Drehmoment und Leistung vs. Drehzahl



# Zusammenfassung – Vergleich unterschiedlicher E-Motorkonzepte



E-Maschine	ASM	PSM	SRM
Momentendichte	+/-	++	+
Wirkungsgrad	+/-	++	+/-
Masse	+	++	+
Stand der Technik	++	+	+/-
Wechselrichter	+	+/-	-
Kosten Maschine	+/-	-	+
Kosten System	+/-	+/-	-
Fertigung	+	-	++
Geräusch	+	++	-

**ASM:** Asynchronmaschine

**PSM:** Permanentmagnet-Synchronmaschine,

**SRM:** Geschaltete Reluktanzmaschine

Quelle:

TSA / DDr. Neudorfer



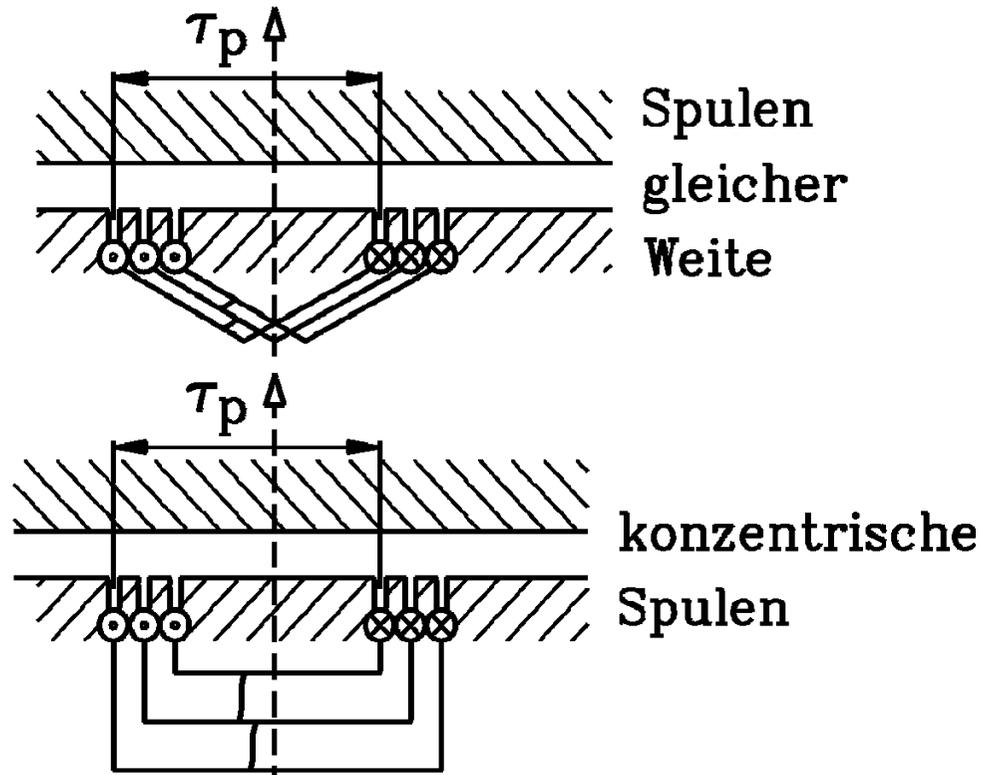
---

# Inhalt

## 5. Drehfeldwicklungen



# 5. Drehfeldwicklungen

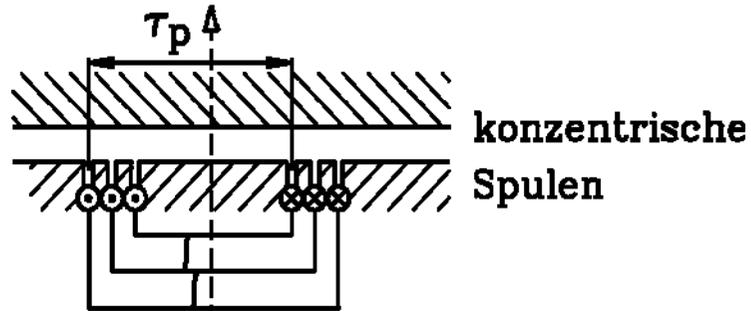
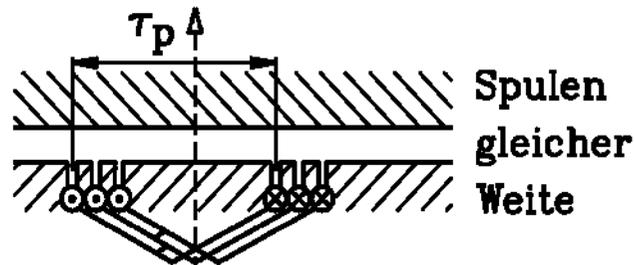
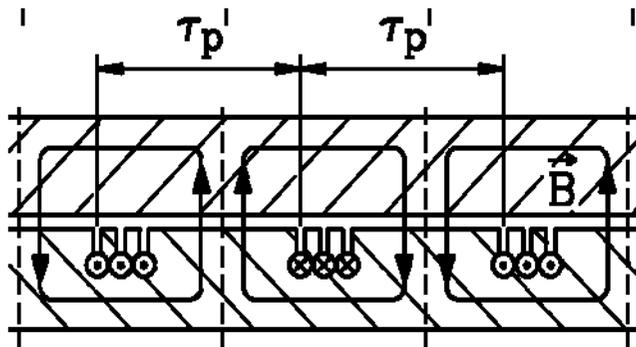


Spulen am Umfang verteilt = verteilte Wicklung

Spulen erregen Drehfeld = Drehfeldwicklung

# 5. Drehfeldwicklungen

## Einschichtwicklungen



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

### Beispiel:

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

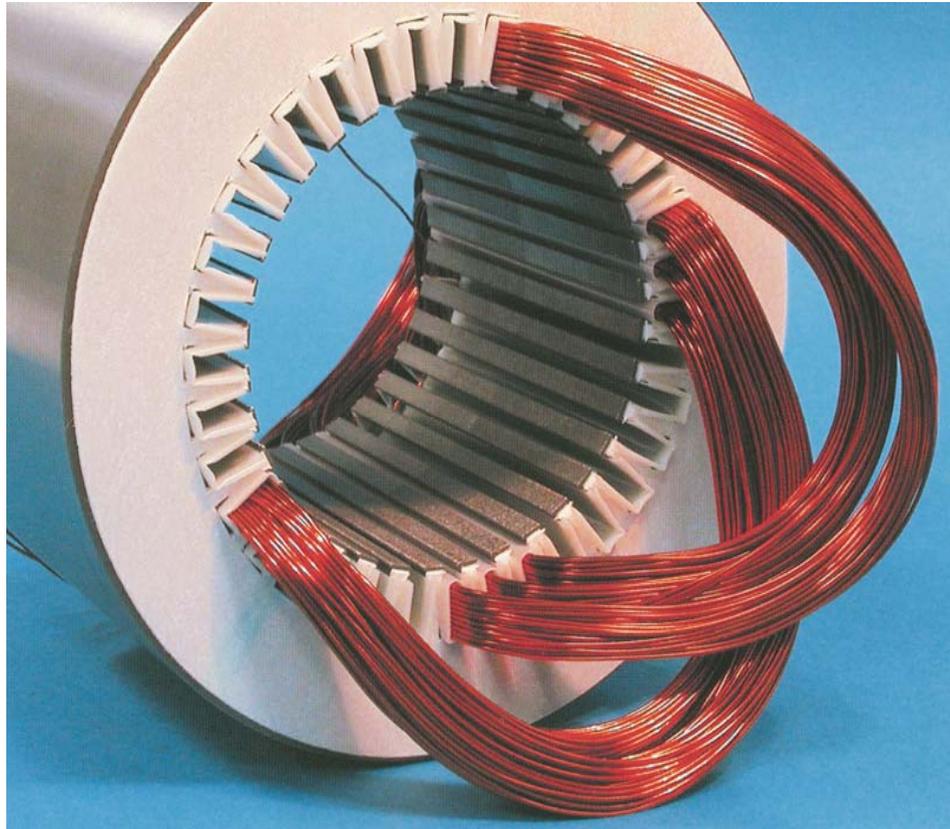
Nutenzahl:  $Q = m \cdot 2p \cdot q = 3 \cdot 12 \cdot 3 = \underline{108}$

**Problem bei Einschichtwicklungen:** Im Wickelkopf Kreuzungspunkte, da alle Spulen in der gleichen Ebene liegen.

Daher müssen die Stirnverbindungen von einigen Spulen in zweite Ebene hoch

gebogen werden: **"Zwei-Etagen-Wicklung"**

# 5. Drehfeldwicklungen



## Einschichtwicklung - Einlegebeispiel

Geteilter Wickelkopf:

$$q = 2 \times 3 = 6$$

2 Spulengruppen –  
kurzer Wickelkopf

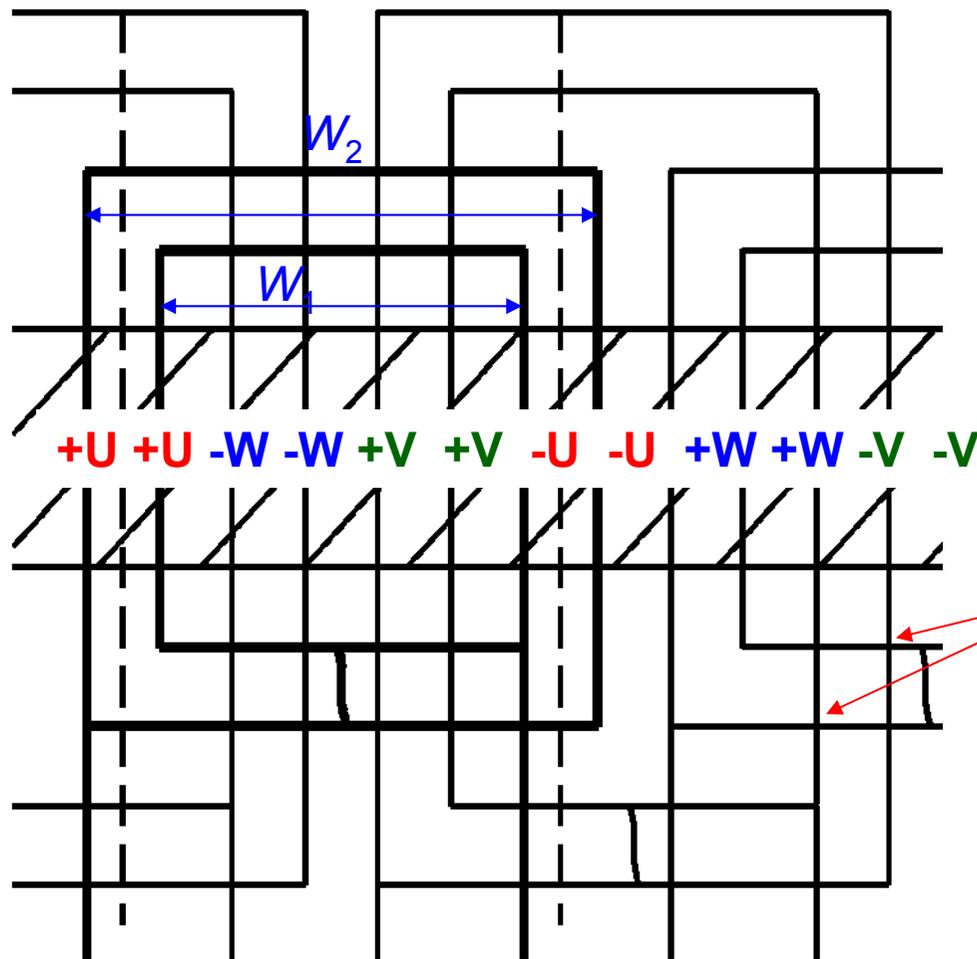
Quelle: Fa. Krempe

### **Einlegebeispiel:**

Runddrahtspulen, konzentrisch,  $q = 3$  Spulen je Gruppe, zweipolig  
36 Nuten, dreisträngige Wicklung  $m = 3$ , Nutzahl  $Q = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 3 \cdot 6 = 36$

# 5. Drehfeldwicklungen

## Einschichtwicklung: Ein Polpaar

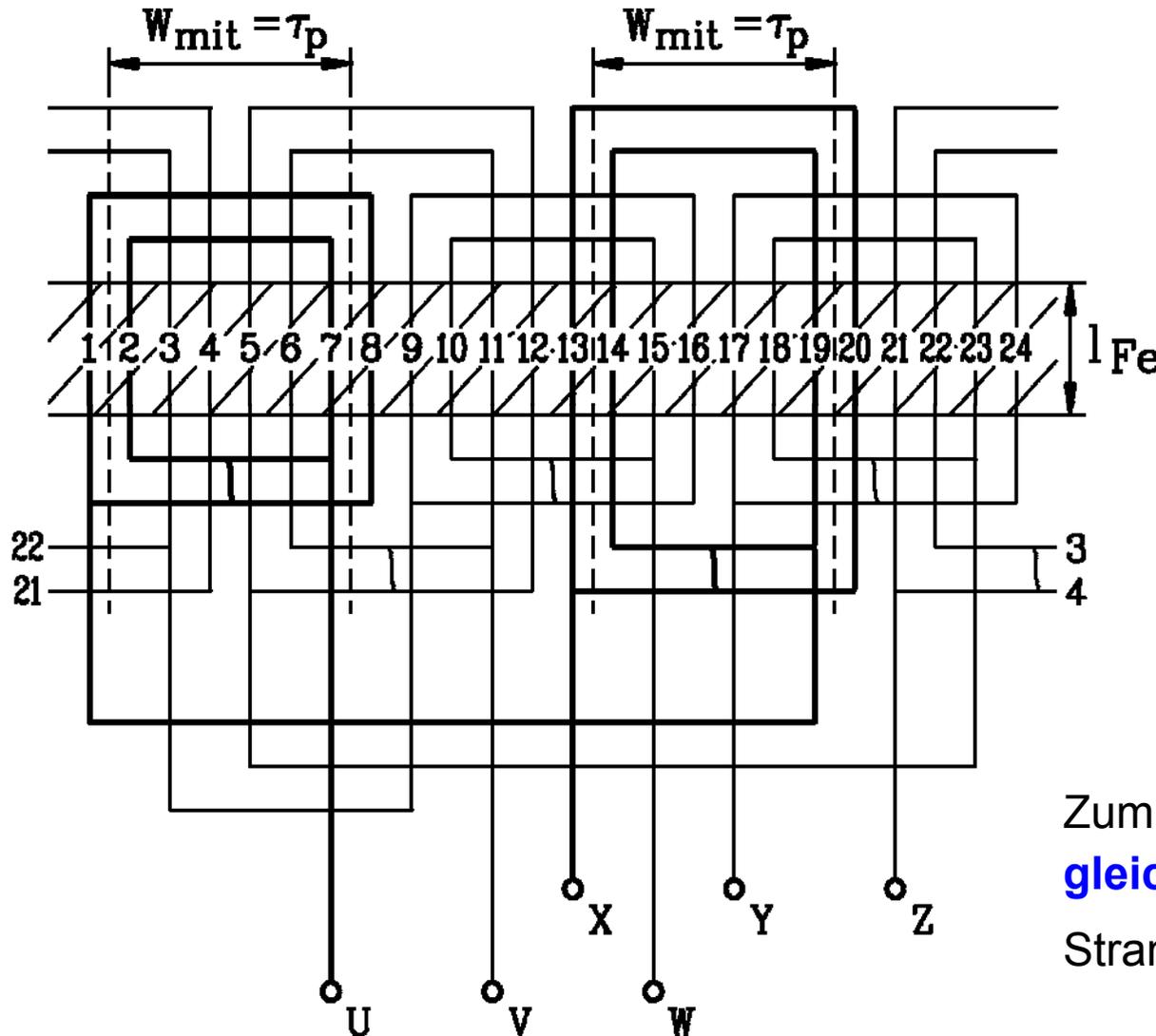


Abgewickelte Darstellung,  
 $m = 3, q = 2$

- **konzentrische Spulen**
- Spulen unterschiedlicher Weite:  
 $W_1 < W_2$
- Mittlere Spulenweite:  
 $W_{\text{mit}} = (W_1 + W_2)/2$
- $W_{\text{mit}} = \text{Polteilung } \tau_p$

**Problem:** Kreuzungspunkte,  
daher: Hochbiegen

# 5. Drehfeldwicklungen



Einschichtwicklung mit kurzen und langen Spulen: Abgewickelte Darstellung, vierpolige Maschine:  $2p = 4$ ,  $m = 3$ ,  $q = 2$ ,  $Q = 24$

Spulen mit den **längeren** Stirnverbindungen müssen **hoch** gebogen werden (= „2. Etage“). Dann aber:

Zumindest vier Pole erforderlich für **gleiche Gesamtwindungslänge** je Strang.

## 5. Drehfeldwicklungen: Drehstromspeisung

- DREI Wicklungsstränge U, V, W mit Hin- und Rückleiter angeordnet = **sechs Zonen** mit der 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  $4\tau_p/3$ .
- Wicklungsstränge U, V, W mit zeitlich um jeweils  $T/3$  **phasenversetzten Wechselströmen**  $i_U(t)$ ,  $i_V(t)$ ,  $i_W(t)$  (**= DREHSTROMSYSTEM**) gespeist.

$$i_U(t) = \hat{I} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$i_V(t) = \hat{I} \cos\left(\omega t + \frac{\omega \cdot T}{3} + \varphi\right)$$

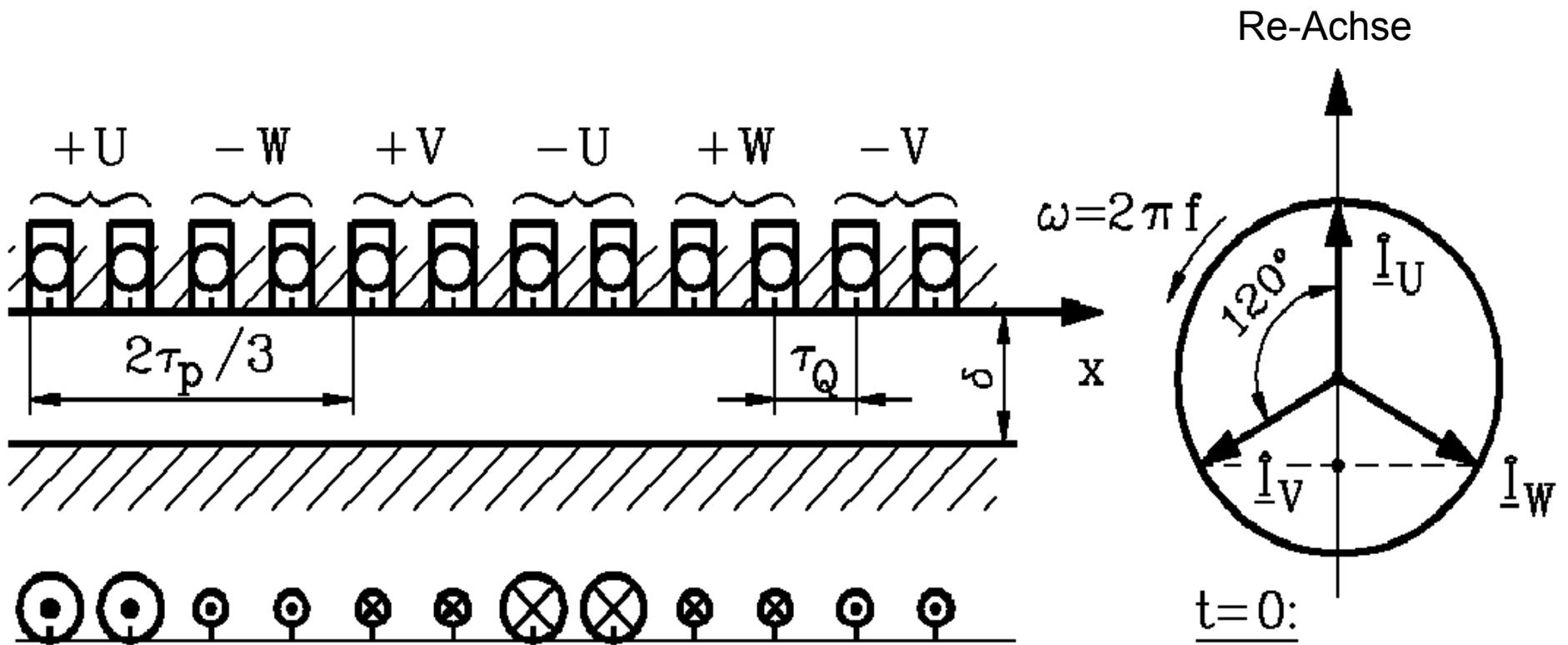
$$i_W(t) = \hat{I} \cos\left(\omega t + \frac{\omega \cdot 2T}{3} + \varphi\right)$$

- Verwendung der **komplexen Wechselstromrechnung**:

$$i(t) = \operatorname{Re}\left\{\underline{I} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}\right\} = \operatorname{Re}\left\{I \cdot e^{j\varphi} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}\right\} = \hat{I} \cos(\omega t + \varphi) \quad \Rightarrow \quad \underline{I} = I \cdot e^{j\varphi}$$

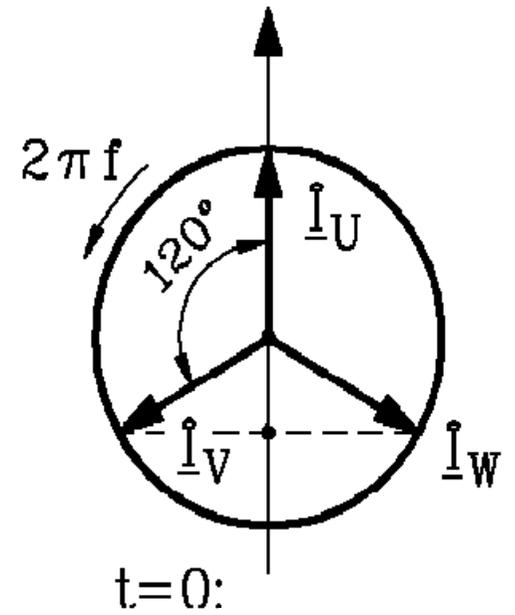
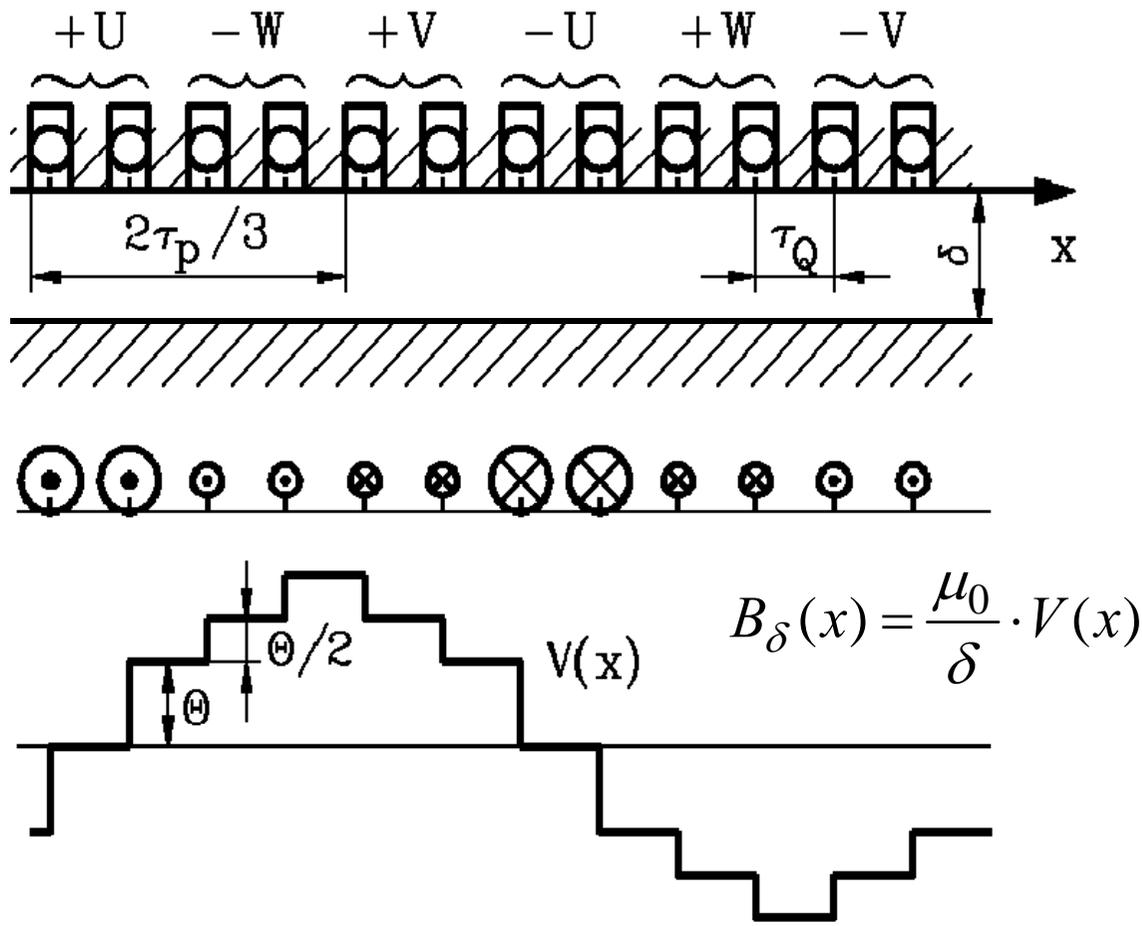
# 5. Drehfeldwicklungen

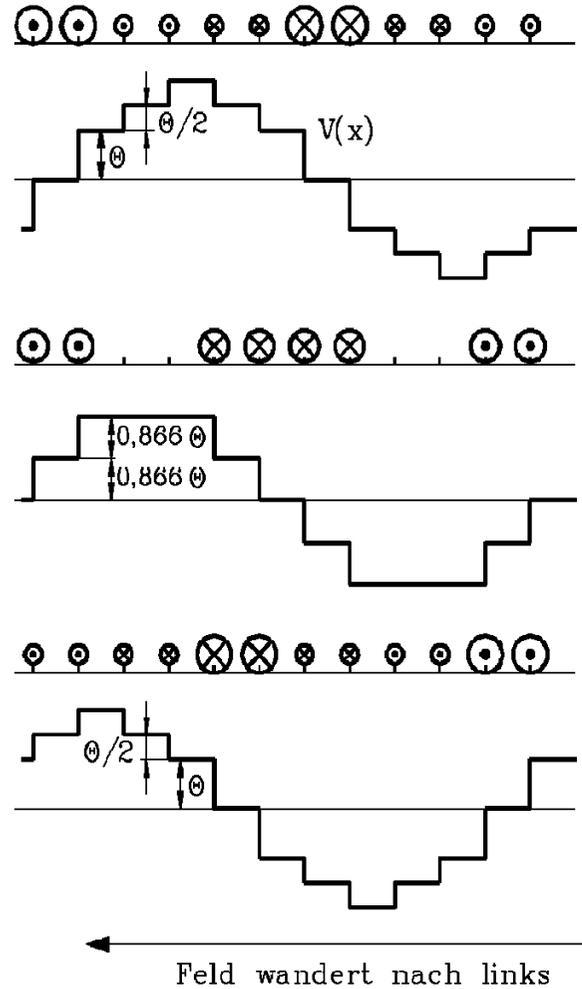
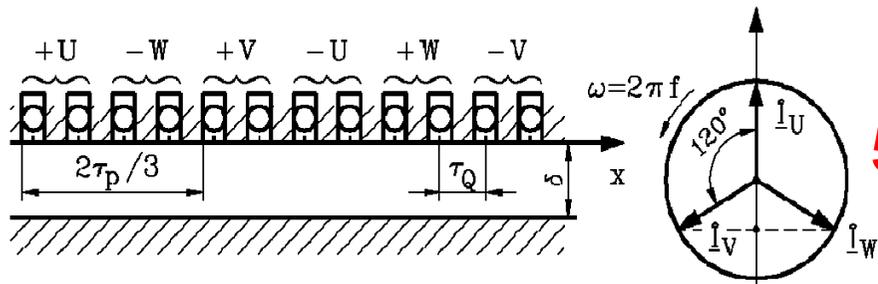
**Bsp.:** Dreisträngige Einschicht-Wicklung,  $q = 2$   
Stromverteilung in der Wicklung zum Zeitpunkt  $t = 0$



# 5. Drehfeldwicklungen

## Strom- und Luftspaltfeldverteilung in der Wicklung zum Zeitpunkt $t = 0$





⊙ positive Zählrichtung

# 5. Drehfeldwicklungen



## Magnetisches Drehfeld

- Mit fortschreitender Zeit wandert die „Feldtreppe“ nach links.
- Nach der Zeit  $T$  ist die Strecke  $2\tau_p$  zurückgelegt.
- Wandergeschwindigkeit = **Synchrone Geschwindigkeit**

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

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

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

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



# 5. Drehfeldwicklungen

- **Geradlinig bewegter Läufer**, z.B. Antrieb einer Magnetschwebbahn

- Reisegeschwindigkeit *TRANSRAPID*

$$\tau_p = 258 \text{ mm}, f = 270 \text{ Hz (Ausgangsfrequenz des Umrichters)}$$
$$v_{syn} = 2f\tau_p = 2 \cdot 270 \cdot 0.258 = \underline{139.3} \text{ m/s} = \underline{501.6} \text{ km/h}$$

- **Rotierender Läufer (= Rotor) bei  $f = 50 \text{ Hz}$ :**

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

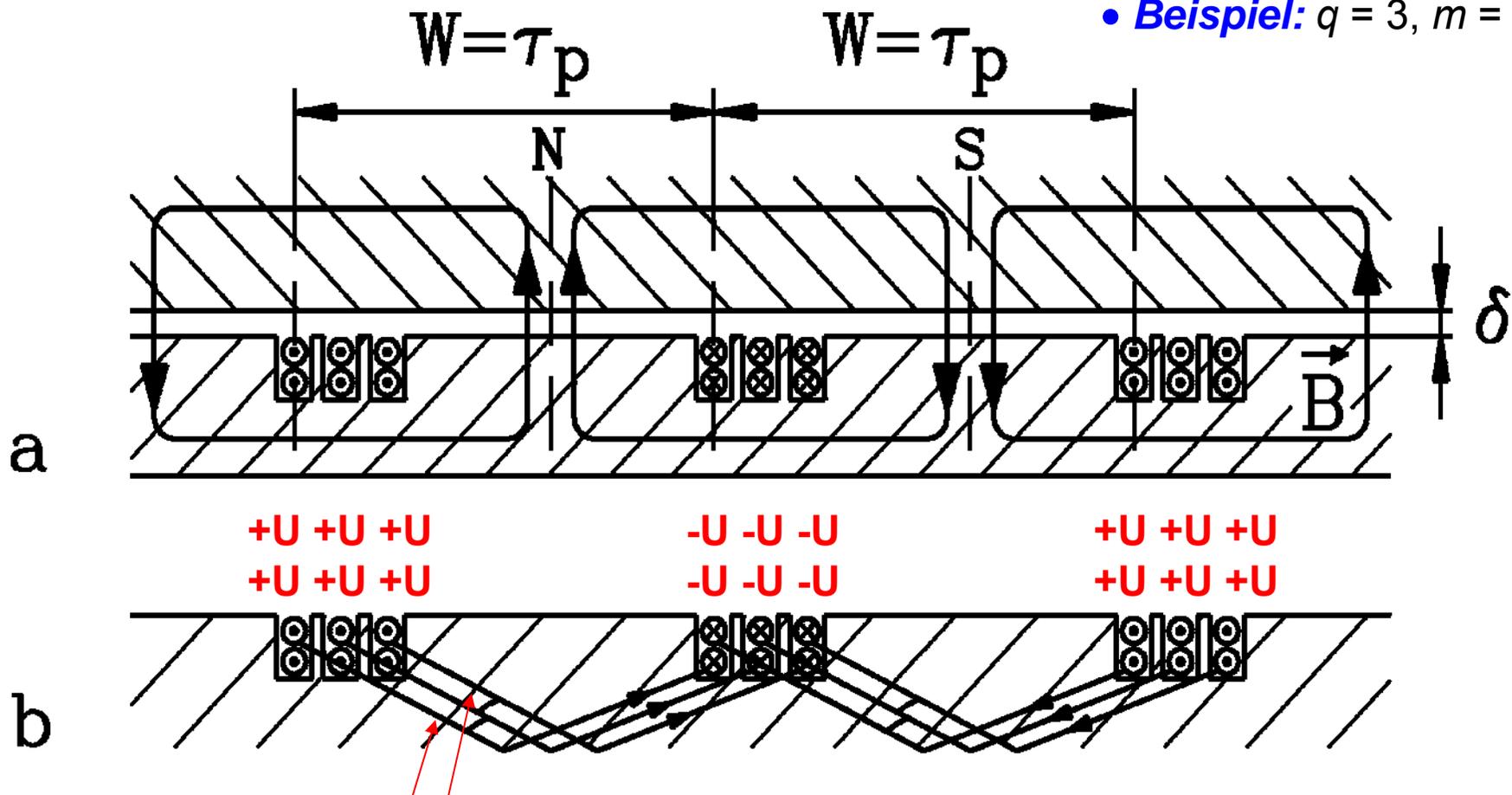
Sechzigpoliger Wasserkraftgenerator ( $2p = 60$ ):  $n_{syn} = \underline{100}/\text{min}$

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

- **Richtungsumkehr des Drehfelds** durch Tausch zweier Phasenanschlüsse

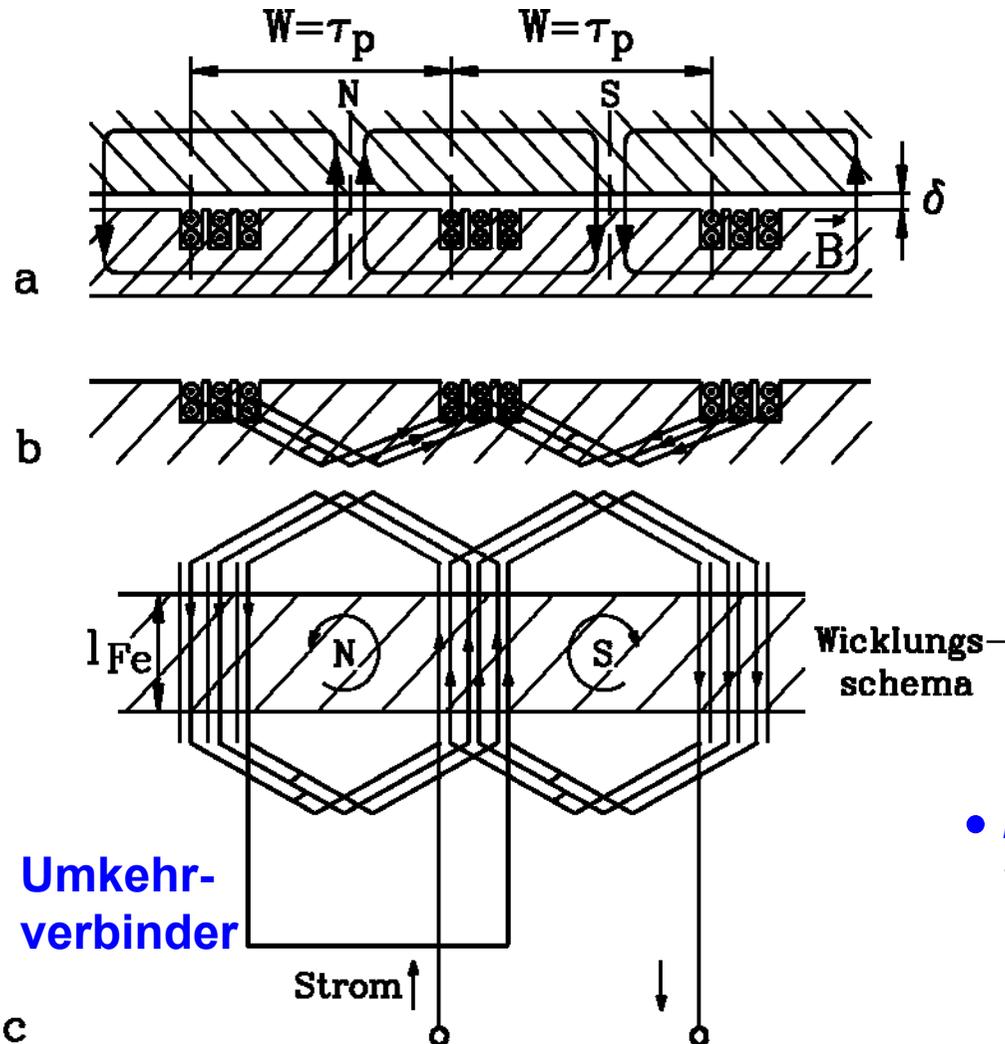
# 5. Drehfeldwicklungen: Zweischichtwicklungen

• *Beispiel:*  $q = 3, m = 3$



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

# 5. Drehfeldwicklungen: Zweischichtwicklungen



## Zweischichtwicklungen

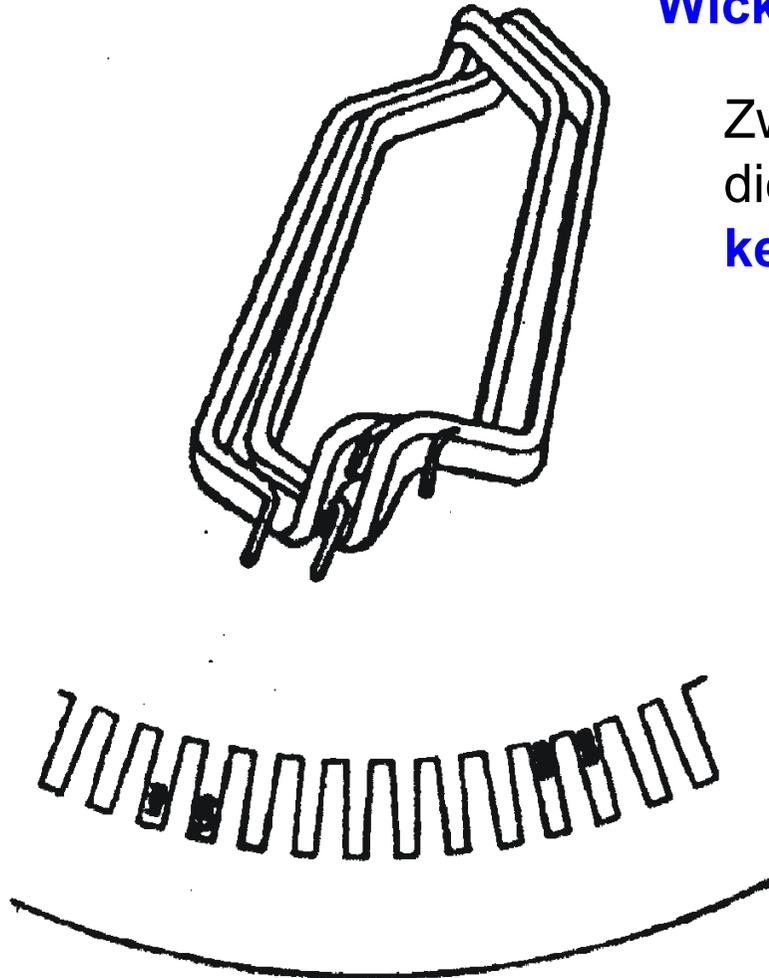
- Bei größeren Leistungen ca. ab 500 kW: Spulenleiter aus **Profilkupfer**
- Spulen **gleicher Weite**
- **Zweischichtwicklung:** Je Nut zwei Spulenseiten übereinander
- Nord- und Südpol werden von **zwei** Spulengruppen erzeugt.
- Wickelsinn der Spulengruppe im S-Pol-Bereich umgekehrt zu jener im N-Pol-Bereich: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

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

## 5. Drehfeldwicklungen: Zweischichtwicklungen

### Wickelkopf von Zweischichtwicklungen

Zwei Formspulen vor dem Einlegen in die Nuten des Blechpakets: Es gibt **keine** Kreuzungspunkte im Wickelkopf.



Quelle:  
*Andritz Hydro,  
Austria*

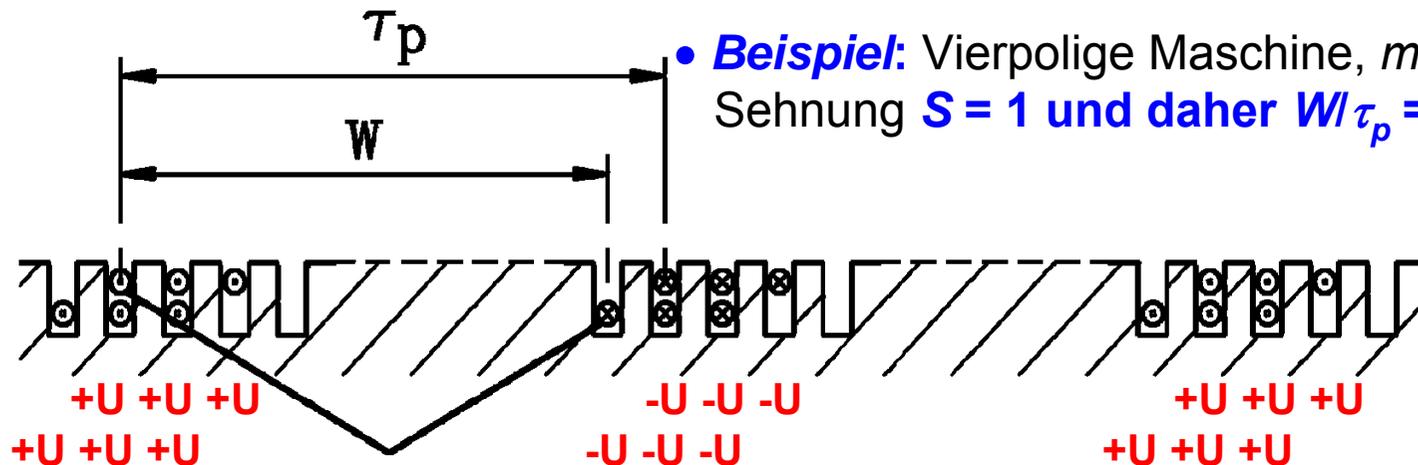
## 5. Drehfeldwicklungen: Zweischichtwicklungen

### Sehnung von Spulen $W < \tau_p$

- Bei **Zweischichtwicklung**: **gesehnte Spulenausführung** möglich
- **Sehnung** = Verkürzung der Spulenweite  $W$  in Nutteilungseinheiten  $S$

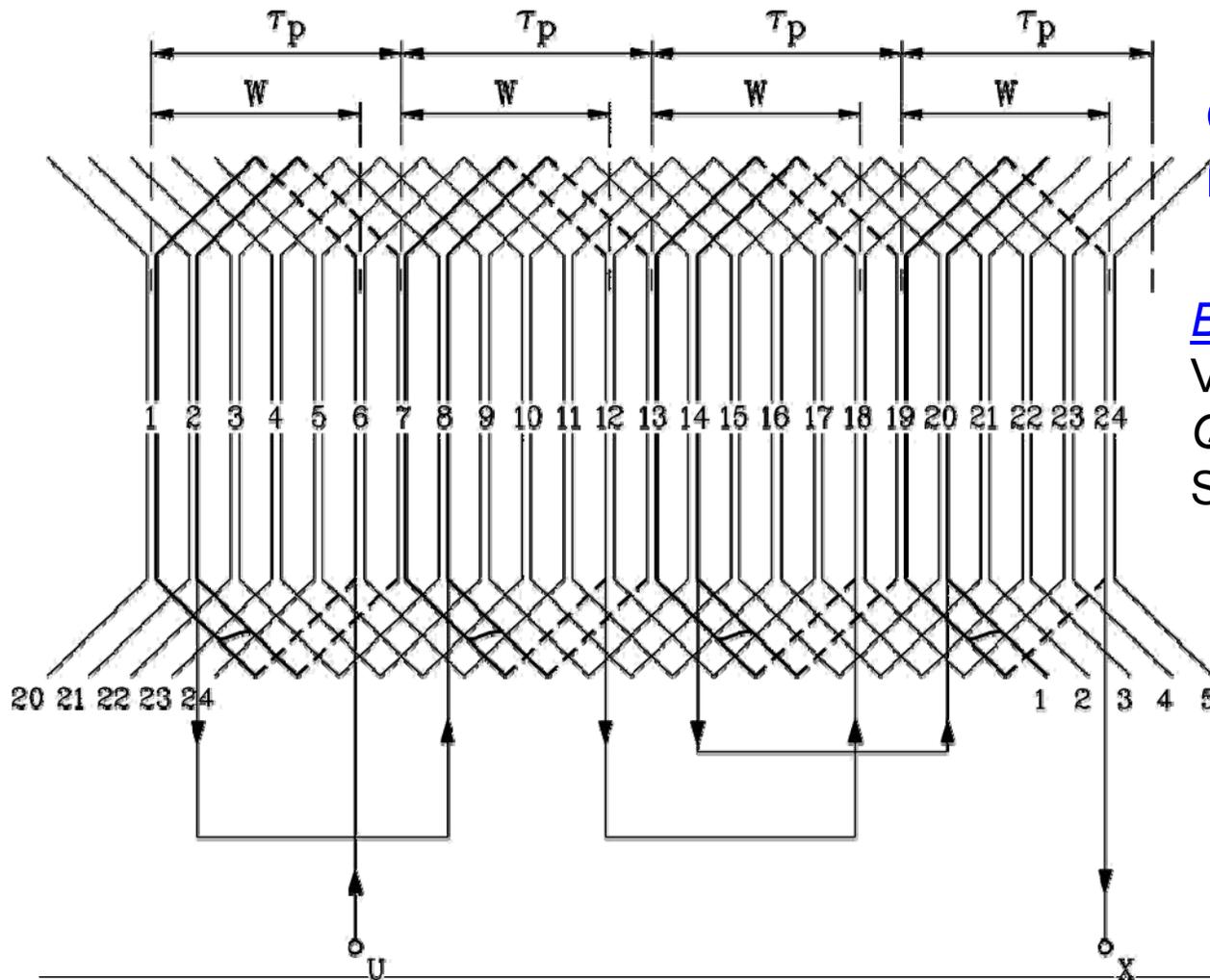
$$W = \tau_p \cdot \frac{m \cdot q - S}{m \cdot q} = \tau_p \cdot \frac{Y_Q}{m \cdot q}$$

$S$  ganzzahlig



- Durch **Sehnung**:  
Bessere Anpassung der "Feldtreppen"-Kurve an Sinusform

# 5. Drehfeldwicklungen: Zweischichtwicklungen



**Gesehnte Zweischicht-  
Drehstromwicklung**

Beispiel:

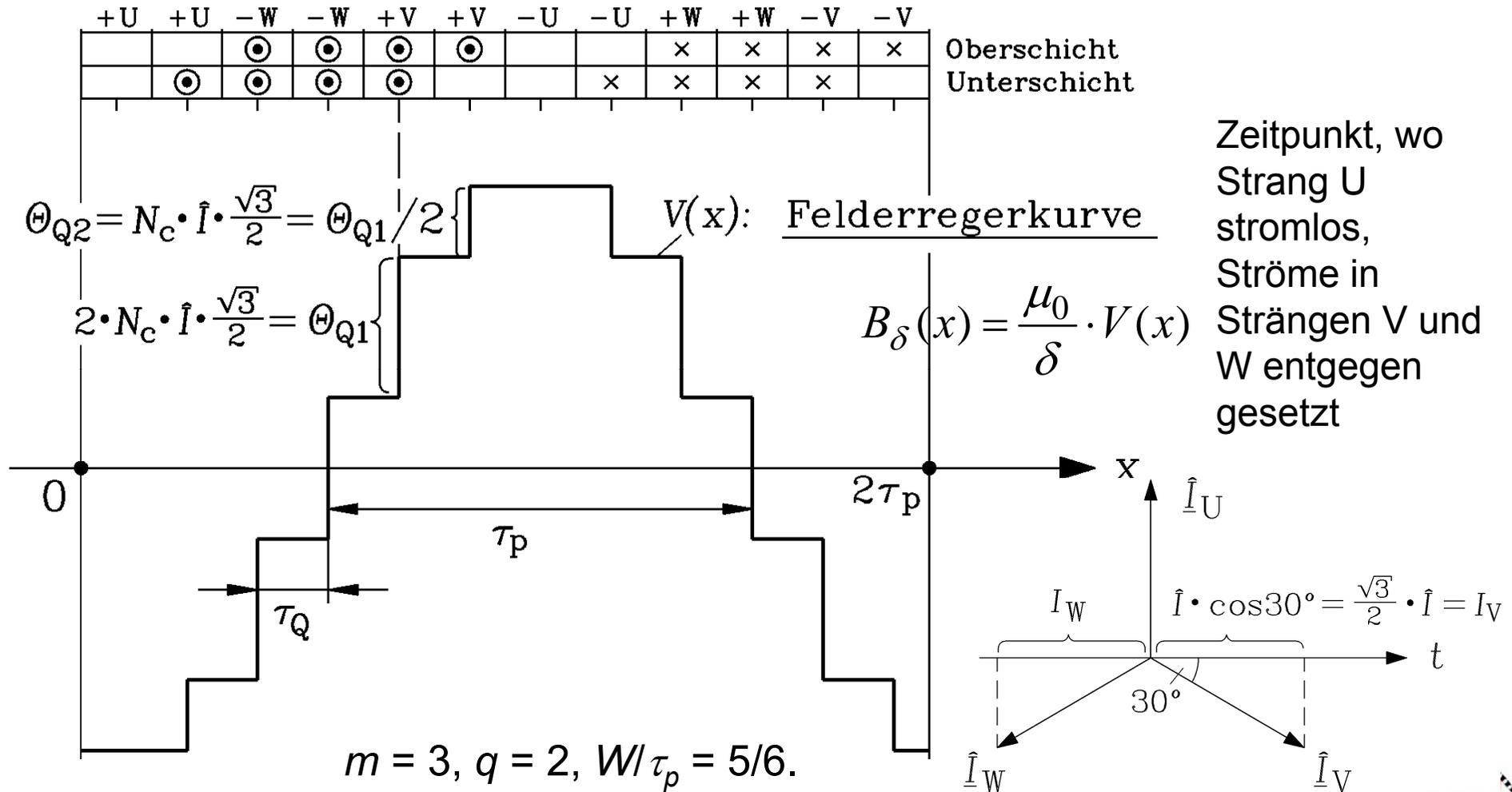
Vierpolige Maschine,  $m = 3$ ,

$Q = 24$ ,  $q = 2$ :

Sehnung  $W/\tau_p = 5/6$ .



# 5. Drehfeldwicklungen: 5/6-gesehnte Zweischichtwicklungen



# 5. Drehfeldwicklungen

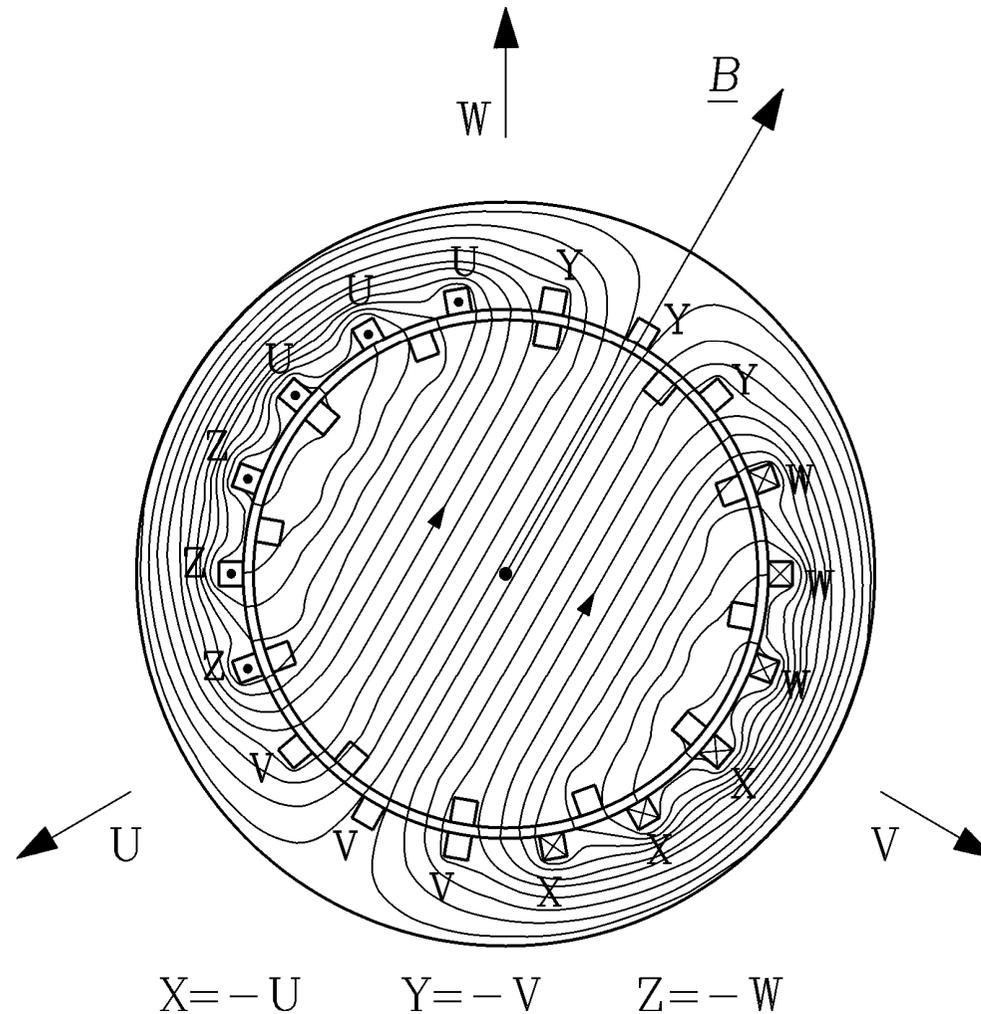
## Feldbild: idealisiert ohne große Nuten

Asynchronmaschine,  
zweipolig,  $m = 3$ ,  $q = 3$ ,  
Einschichtwicklung

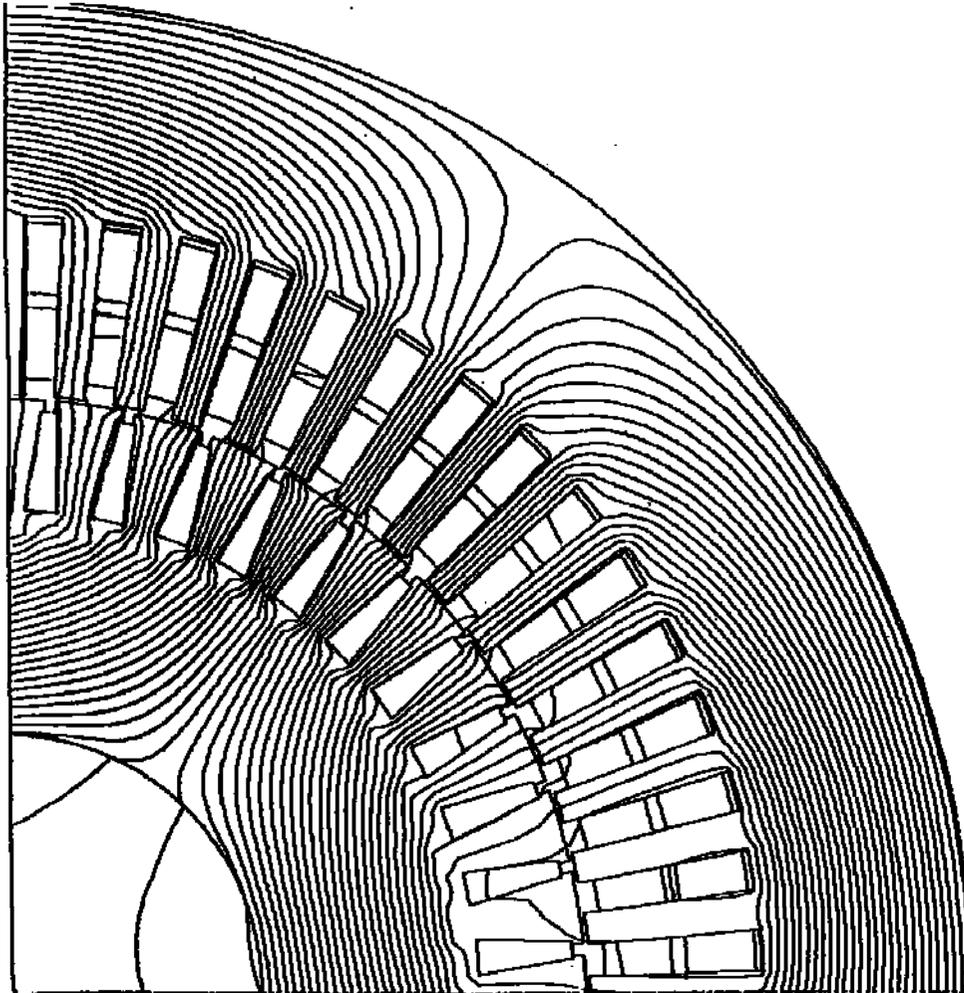
Läufer stromlos,

Zeitpunkt, wo Strang V  
stromlos,

Ströme in Strängen U und W  
entgegen gesetzt



# 5. Drehfeldwicklungen



## Feldbild: mit realen Nuten

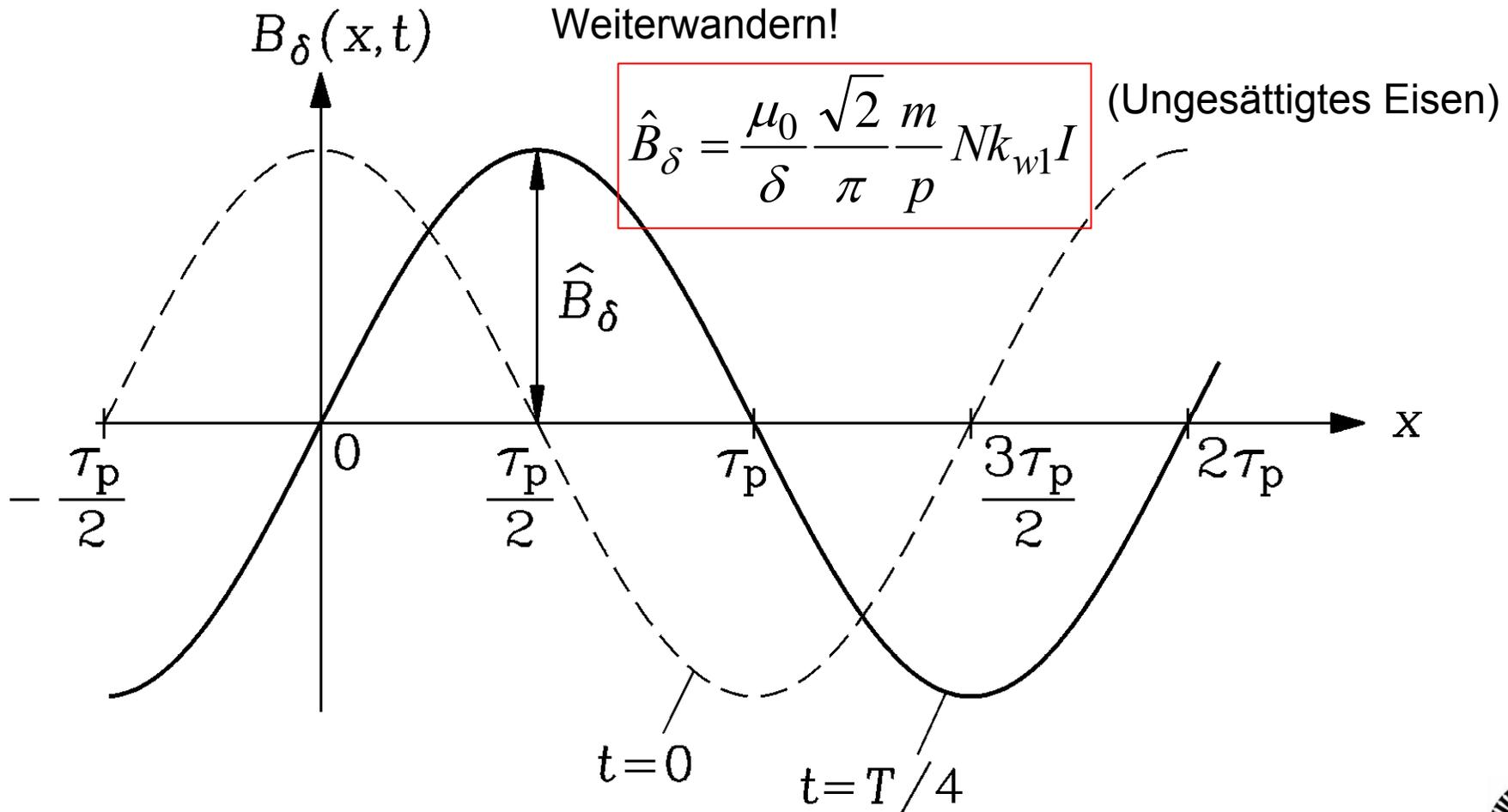
Asynchronmaschine,  
vierpolig,  $m = 3$ ,  $q = 5$ ,  
Zweischichtwicklung

Sehnung  $12/15 = 4/5 = 0.8$

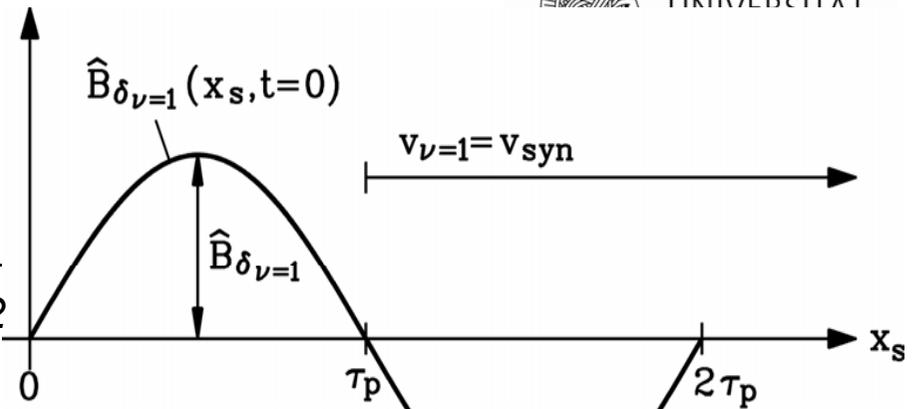
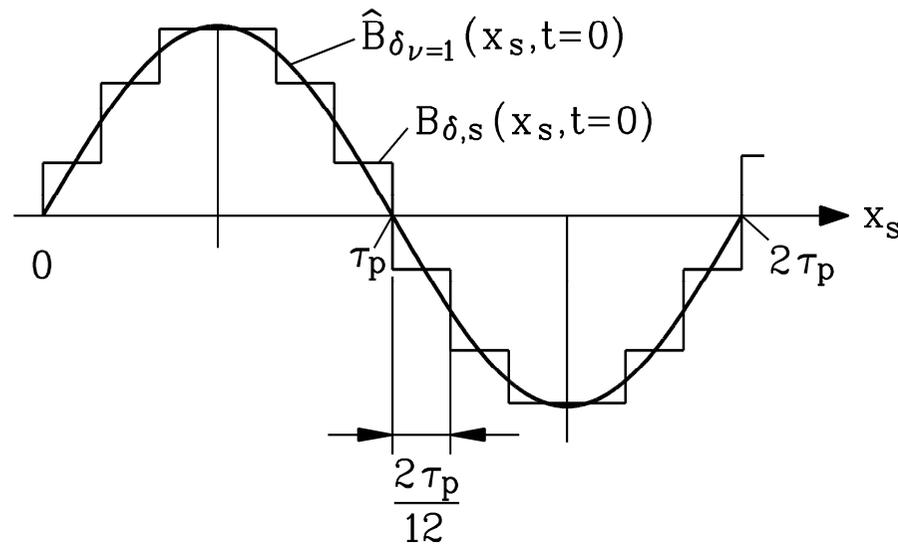
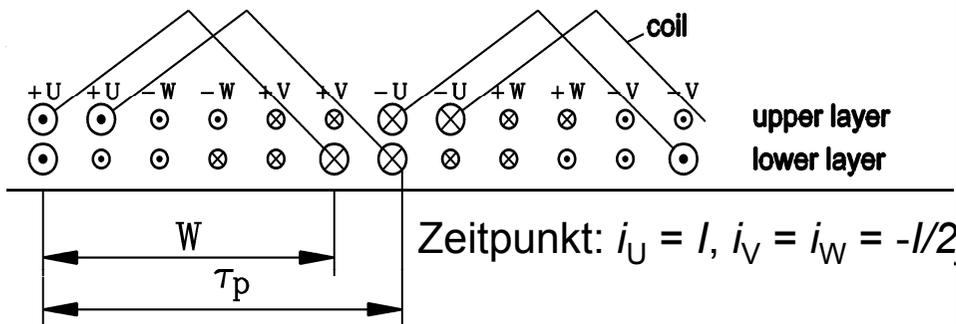
Läufer stromlos

# 5. Drehfeldwicklungen

**Feldgrundwelle:** Ändert ihre Form nicht beim Weiterwandern!



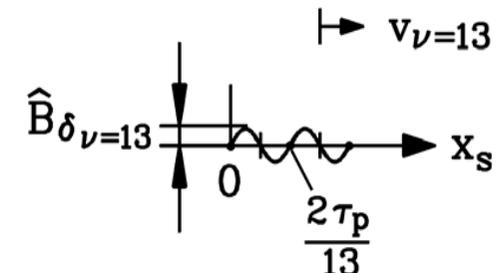
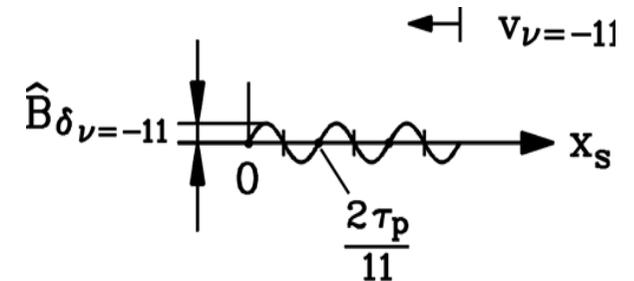
# 5. Drehfeldwicklungen



Beispiel:

$$m = 3, q = 2$$

Sehnung 5/6



FOURIER-Zerlegung: Grundwelle und Oberwellen:

- Oberwellen: Amplitude, Wellenlänge, Geschwindigkeit sinken mit steigender Ordnungszahl  $\nu$

# 5. Drehfeldwicklungen

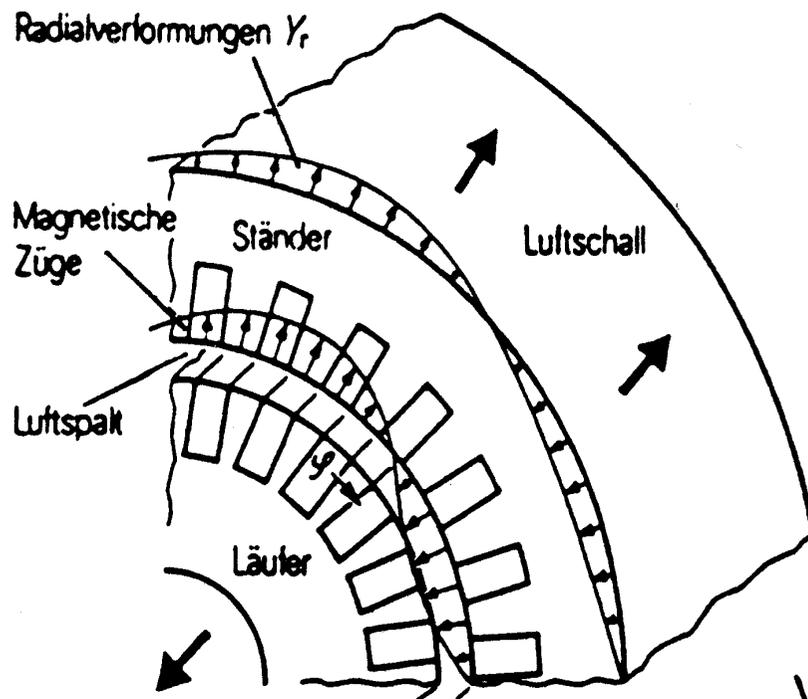
## Fourier-Analyse der Stator-Feldtreppe - Zahlenbeispiel

Dreiphasig, vierpolig, Zweischichtwicklung:  $q = 2$ ,  $W/\tau_p = 5/6$ ,  $Q_s = 24$  Statornuten

	<i>Wellen-Amplituden</i>	<i>Wicklungsfaktor</i>	<i>Wellengeschwindigkeit bei <math>f_s = 50</math> Hz</i>
$\nu$	$ B_{\delta\nu} / B_{\delta 1} $ (%)	$k_{w,\nu}$	$v_\nu$ (m/s)
1	100	0.933	6.28
-5	1.4	0.067	- 1.26
7	1.0	-0.067	0.9
-11	<u>9.1</u>	<u>-0.933</u>	- 0.6
13	<u>7.7</u>	<u>0.933</u>	0.5
-17	0.4	0.067	- 0.37
19	0.38	-0.067	0.33

## 5. Drehfeldwicklungen

Die Oberwellen induzieren schädliche Wirbelströme in leitfähigen Läuferteilen, verursachen mit den Läuferfeldoberwellen zusätzliche Pulsationsmomente (Tangentialkräfte) und über zusätzliche Radialkräfte magnetische Geräusche.



### Elektromagnetisches Geräusch

- Statorblechpaket: Eisenring (Zähne als Zusatzmasse).
- Stator weniger steif als der Rotor, wird durch die Radialkraftwellen verformt.
- Eisenoberfläche des Stators schwingt mit der durch die Radialkräfte angeregten Frequenz  $f_{\text{Ton}}$  und komprimiert die Umgebungsluft: Es entsteht eine Schallwelle mit der Tonfrequenz  $f_{\text{Ton}}$ .
- Ebenso schwingt das Fundament (Körperschall).

---

# Inhalt

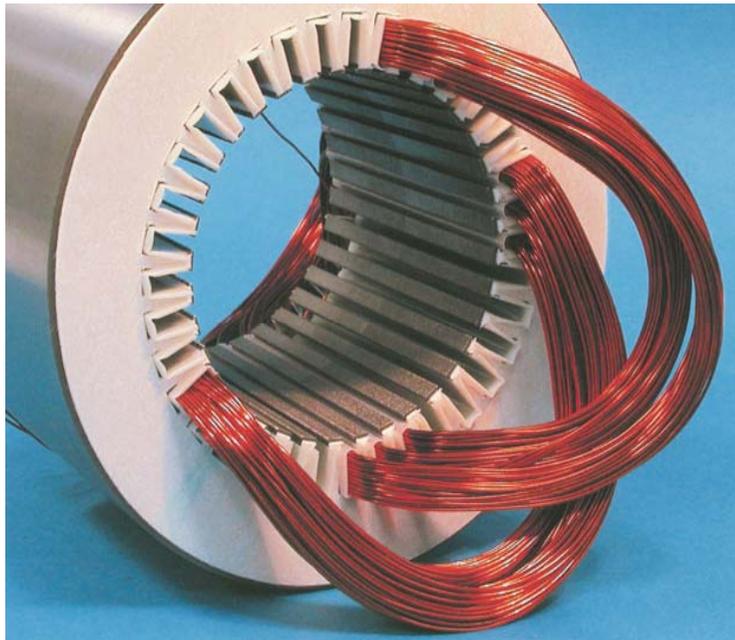
---

## 6. Zahnspulenwicklungen



# Ständer von Drehfeldmaschinen

Verteilte Drehfeld-Wicklung  $2p = 2$  konzentrierte Zahnspulenwicklung  $2p = 16$



**Zweipoliger Ständer**  
Runddraht-Einziehwicklung

Quelle:  
Krempel



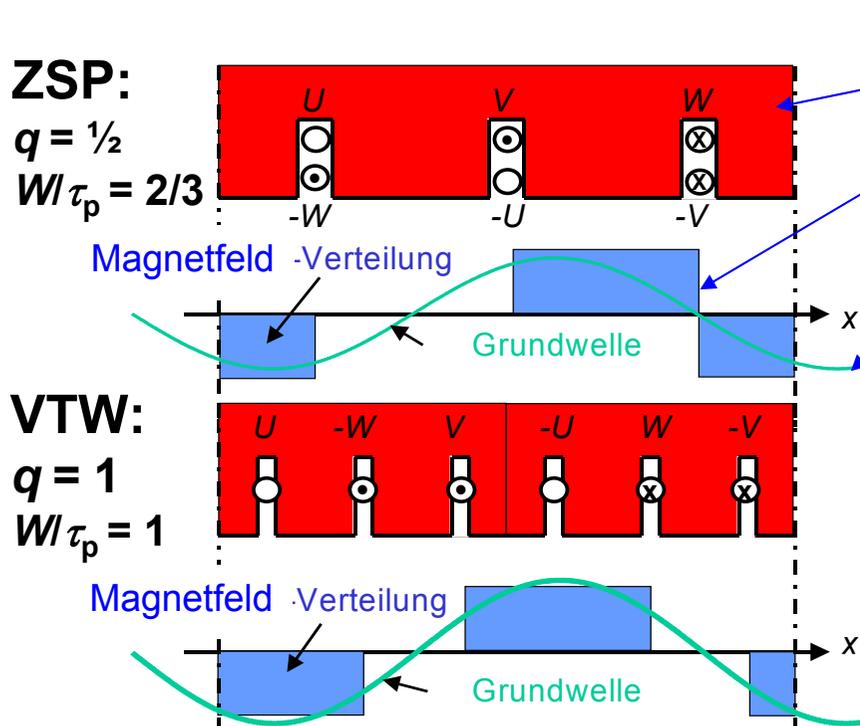
Zahnspule  
als einfache  
Aufsteckspule



Quelle: TU Darmstadt



# 6. Zahnspulenwicklung: Vergleich zur „verteilten“ Drehfeldwicklung



Ständer-Drehfeldverteilung für den  
Zeitpunkt:  $i_U = 0, i_V = -i_W = I$

Strangzahl  $m = 3$

**Stator mit Nuten**

**Magnetische Feldverteilung**

**Sinus-Grundwelle des Drehfelds**

**ZSP: Zahnspulenwicklung:**

Billig, robust, aber stark  
nichtsinusförmiges Magnetfeld: Nur  
bei

- PM-Synchronmaschinen
- Bei rel. niedriger Drehzahl
- Bei hoher Polzahl sinnvoll

**VTW: Verteilte Drehfeldwicklung:**

Sinusförmiges Feld, aber  
Wicklungskreuzungen, Wickelköpfe

# 6. Zahnspulenwicklung

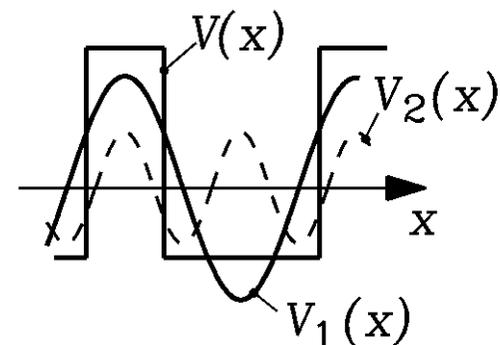
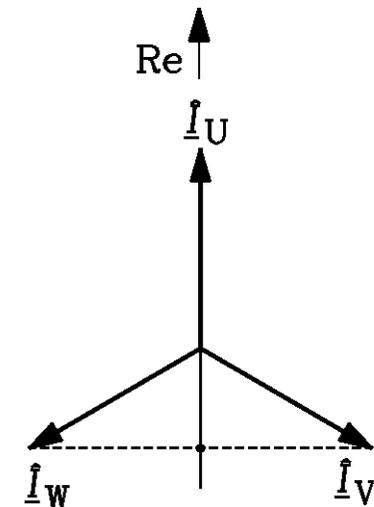
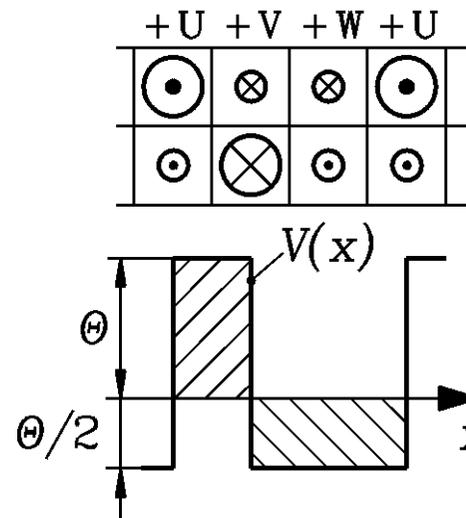
Feldverteilung weicht stark von der Sinusform ab = viele Oberwellen

## Beispiel:

$$m = 3, q = \frac{1}{2}$$

Drei Zahnspulen auf zwei Läufer-  
PM-Pole

PM-Läufer erzeugt mit der  
Ständerfeldgrundwelle  $B_{\delta 1} \sim V_1$   
das konstante Drehmoment



## Beispiel:

$$I_U = 100\%, \\ I_V = I_W = -50\%$$

# 6. Zahnspulenwicklung

Feldverteilung weicht stark von der Sinusform ab = viele Oberwellen und eine Unterwelle

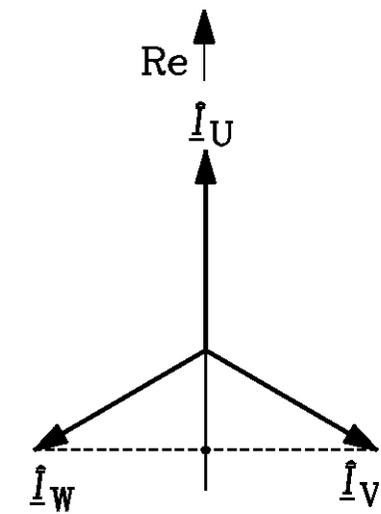
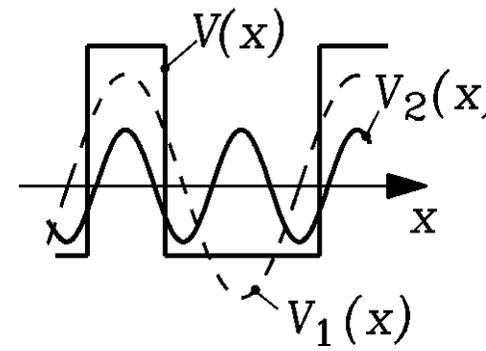
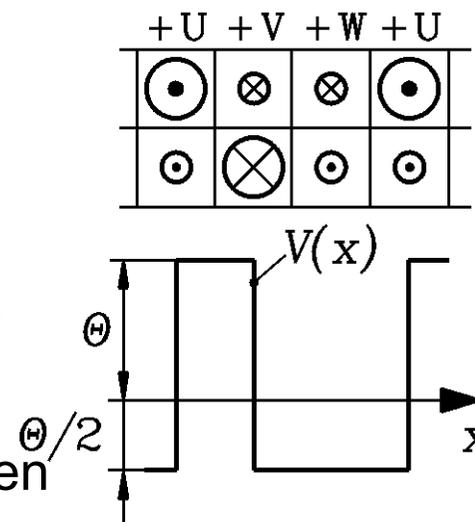
**Beispiel:**

$m = 3, q = 1/4$

Drei Zahnspulen auf vier Läufer-PM-Pole = 1 „Urschema“

PM-Läufer erzeugt mit der zweiten Ständerfeldoberwelle  $B_{\delta 2} \sim V_2$  das konstante Drehmoment

Die Ständerwelle  $B_{\delta 1} \sim V_1$  wirkt als störende Unterwelle



**Beispiel:**

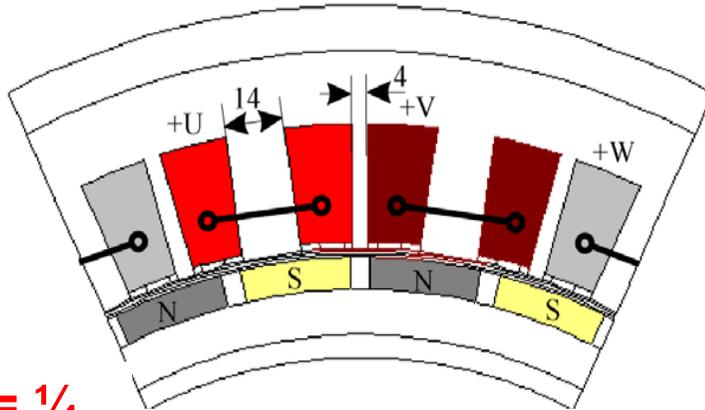
$I_U = 100\%$ ,  
 $I_V = I_W = -50\%$



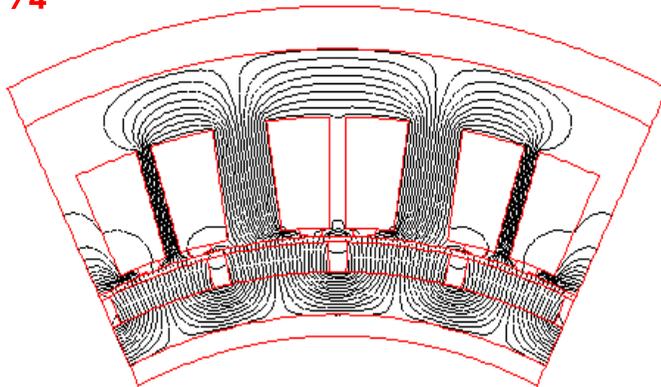
# 6. Zahnspulenwicklung

## Beispiel: Konzentrierte Wicklungen – 2 Polpaare dargestellt

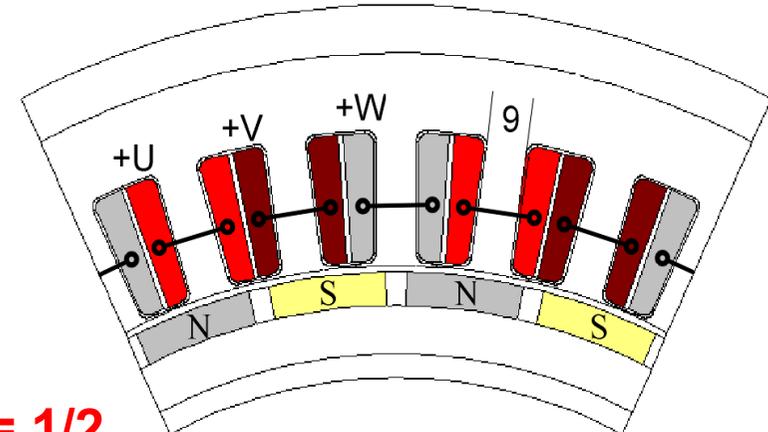
Urschema vierpolig



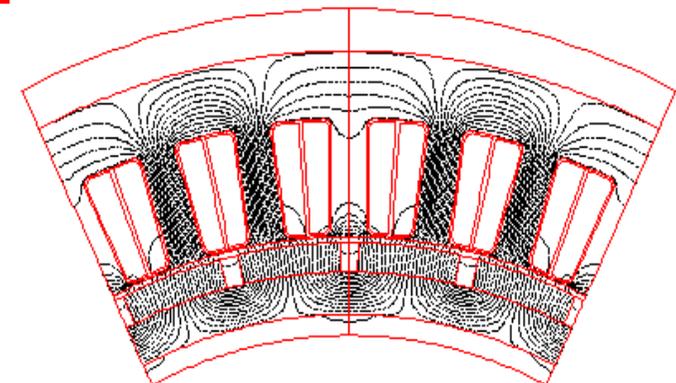
$$q = 1/4$$



Urschema zweipolig



$$q = 1/2$$

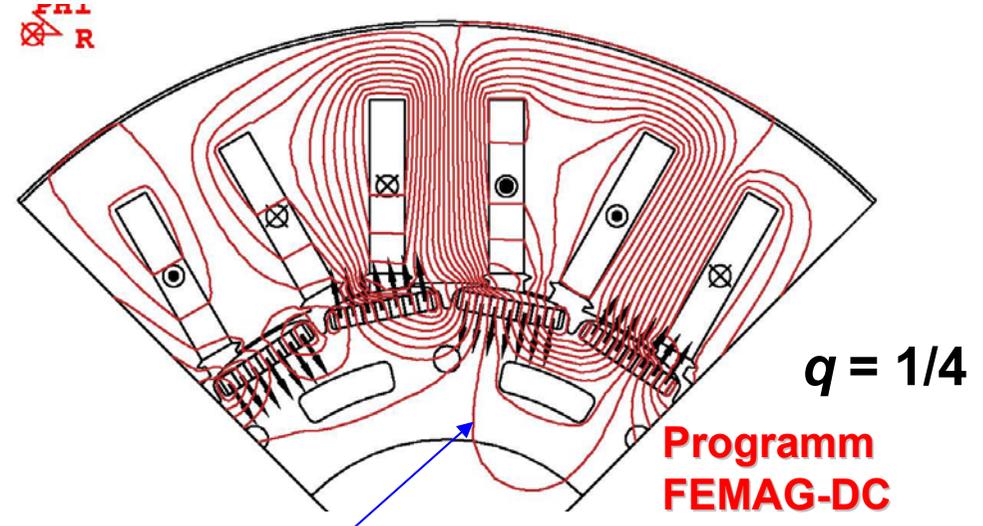
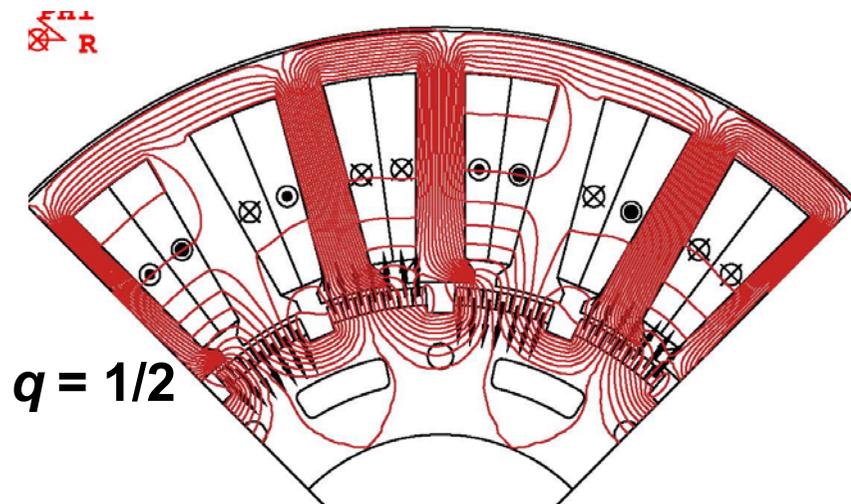


Rotor-  
Leerlaufeld

**Langwellige Unterwelle:** ergibt GROSSE „Oberwellenstreuinduktivität“

# 6. Zahnspulenwicklung

Beispiel: 16-poligen Motoren  $q = 1/2$  &  $1/4$



**Langwellige Unterwelle:** induziert den Läufer: Wirbelströme in den Magneten und im Rotorblechpaket

Gemessener **Wirkungsgrad**

93.7% / 95.3 %

92.8 % / 93.3 %

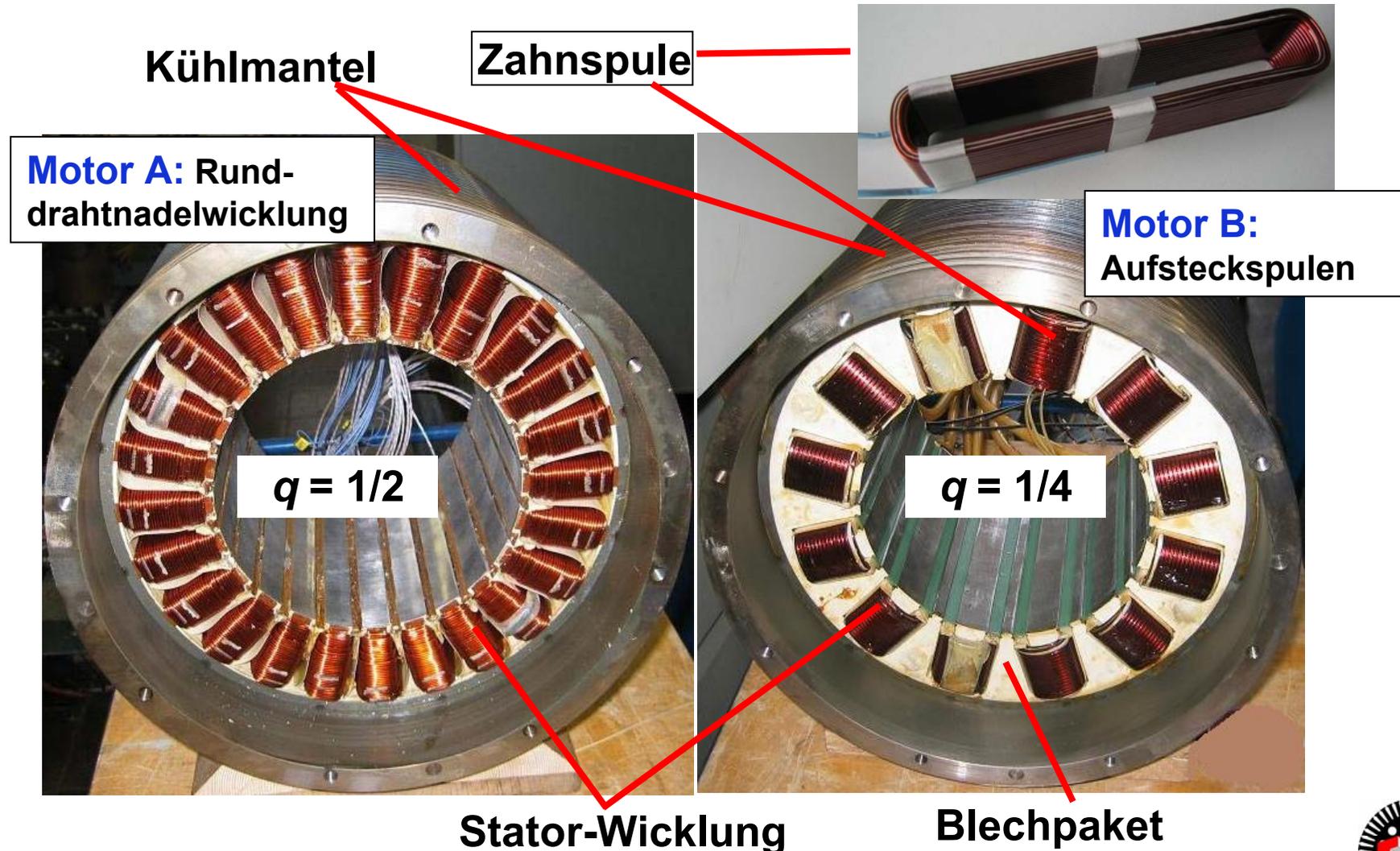
45 kW 1000 / 3000/min

1000 / 3000/min

Gemess. Magnettemperatur 87°C

115°C

# 6. Zahnspulenwicklung: Kurze Wickelköpfe – minimierte Stromwärmeverluste



## 6. Zahnspulenwicklung



- Außenläufer-PM-Synchronmaschine

- Zahnspulen mit Zwischenzähnen auf Innenstator (Zahnspuleneinschichtwicklung)

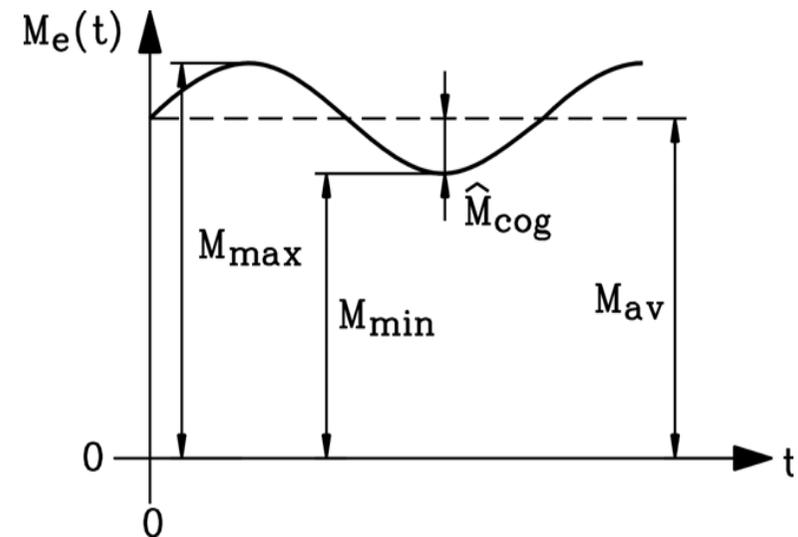
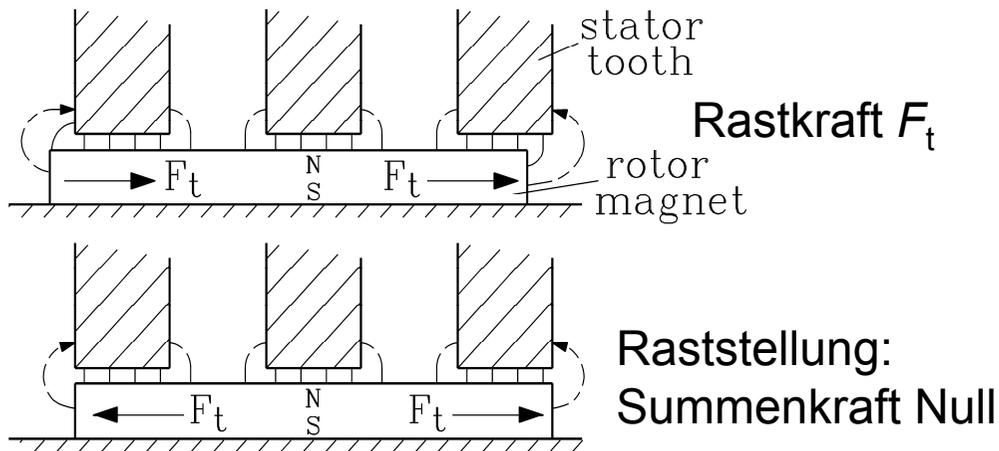
- Zwischenzähne unbewickelt

- **Axial kurze Maschine:** Sehr kurze Wickelköpfe – sehr kompakt:  
**Kleinere Stromwärmeverluste als bei verteilter Drehfeldwicklung**

- Permanentmagnete auf Außenläuferglocke

Quelle: ZF/Dr. Müller, Fichtel & Sachs

# Rastmoment $M_{cog}$ & Pulsationsmoment bei Last



**Ganzlochwicklung:**

**Rastmomentfrequenz:**  $f_Q = n \cdot Q_s$

$Q_s$ : Statornutzahl

Rastmoment: bei Leerlauf:  $I_s = 0$

$$\hat{w}_{M0} \sim 0.5\% \dots 1\%$$

**Pulsationsmoment:**

Momentenwelligkeit bei Last  $I_s > 0$

$$\hat{w}_M = \frac{\hat{M}_{cog}}{M_{av}} = \frac{(M_{max} - M_{min}) / 2}{(M_{max} + M_{min}) / 2}$$

## 6. Zahnspulenwicklung: KANN RASTMOMENT VERRINGERN!



### Verteilte Drehfeldwicklung

Beispiel:  $q = 1$

$Q_s = 24$  Statornuten,  $2p = 8$  Rotorpole:

$Q_s/p = 24/4 = 6$  nicht teilerfremd:

Kleinstes gemeinsames Vielfaches: 24

Rastmoment **ist ohne Schrägung nicht klein!**

**Rastmoment mit  $24 \cdot n$  tritt auf!**

### Konzentrierte Zahnspulenwicklung

Beispiel:  $q = 3/8$

$Q_s = 9$  Statornuten,  $2p = 8$  Rotorpole:

$Q_s/p = 9/4$ : Teilerfremd:

Kleinstes gemeinsames Vielfaches: 72

Rastmoment **ist sehr klein auch ohne Schrägung**, ABER es ist nicht Null!

**Rastmoment mit  $18 \cdot n$  tritt auf!**

Vorsicht:

9 Nuten = magnetische Asymmetrie bzgl. 8 Pole:  
Magnetische Radialkraft mit 2-, , 4-, 6-facher ...  
Statorfrequenz als „Rüttelkraft“



# 6. Zahnspulenwicklung

Nur in Verbindung mit PM- oder Reluktanzläufern



## Vorteile:

Kurze Wickelköpfe, bewirkt bei axial kurzen Maschinen deutlich geringere Stromwärme

Einfache Fertigungstechnik, keine Kreuzungen der Spulen im Wickelkopf, höhere Spannungsfestigkeit

Läuferpolzahl und Ständernutzzahl haben als kleinstes gemeinsames Vielfaches deutlich größere Zahlen als bei verteilter Wicklung. Daher ist das magnetische Rastmoment i. a. deutlich kleiner

## Nachteile:

Ständerfeld hat mehr Oberwellen, tw. auch Unterwellen. Gefahr von erhöhten Zusatzverlusten im Läufer, Gefahr von erhöhter magnetischer Geräuschanregung

Höherer Ober-/Unterwellen = höhere Ständerinduktivität. Umrichterscheinleistung steigt im Bemessungspunkt, aber Motor ist gut feldschwächbar, da Ständerfeld gegen Läufermagnete besser wirkt



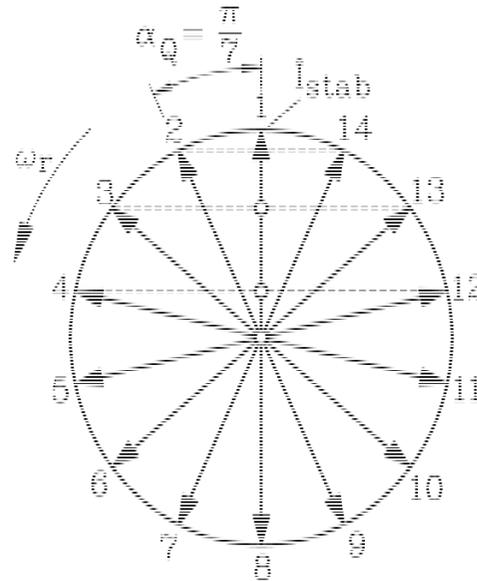
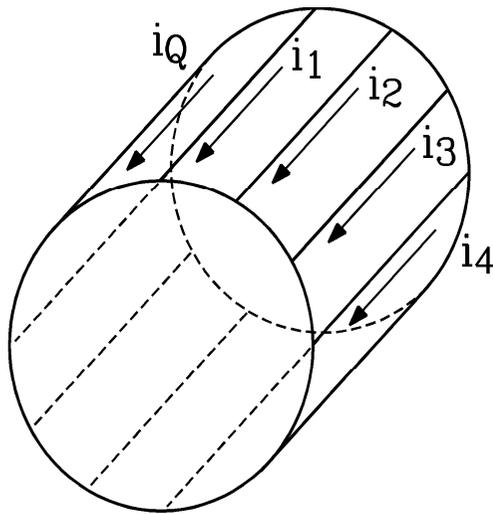
---

# Inhalt

## 7. Käfigwicklungen



# 7. Käfigwicklungen



## Beispiel:

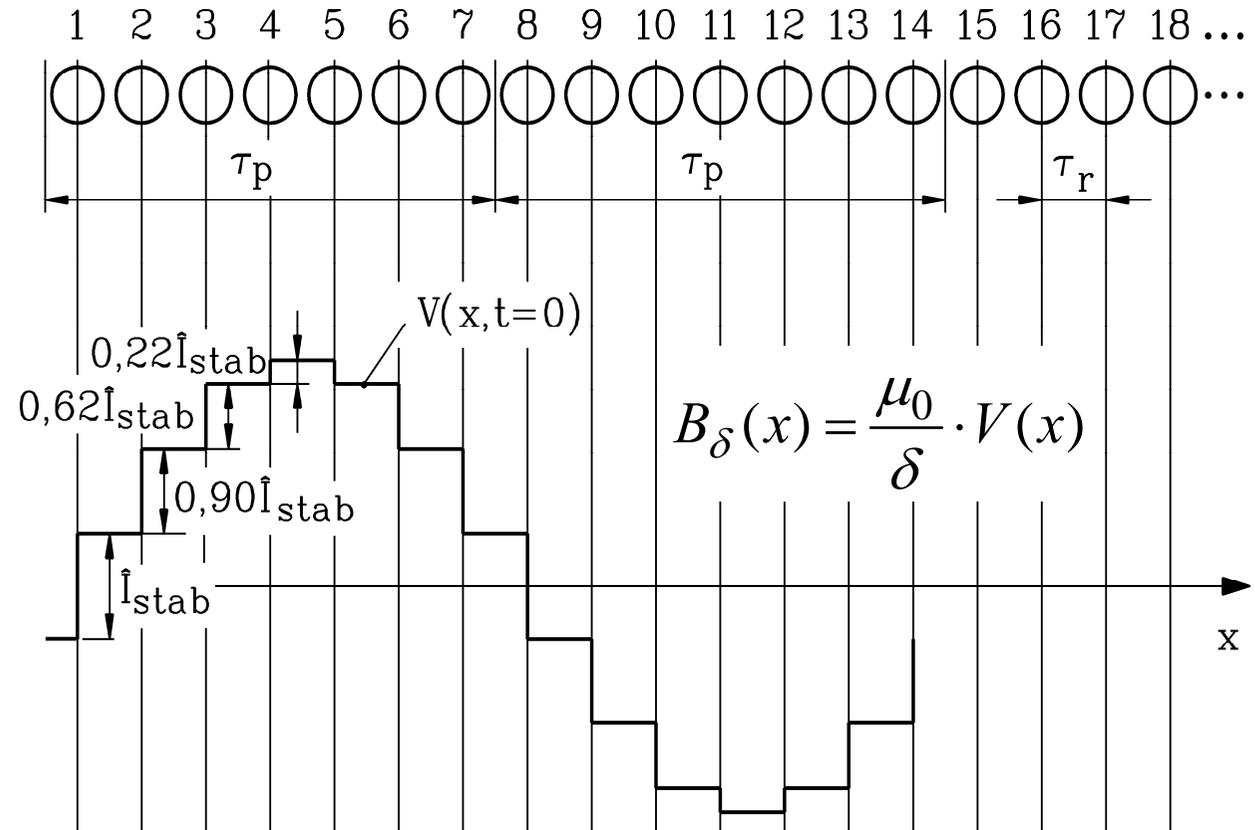
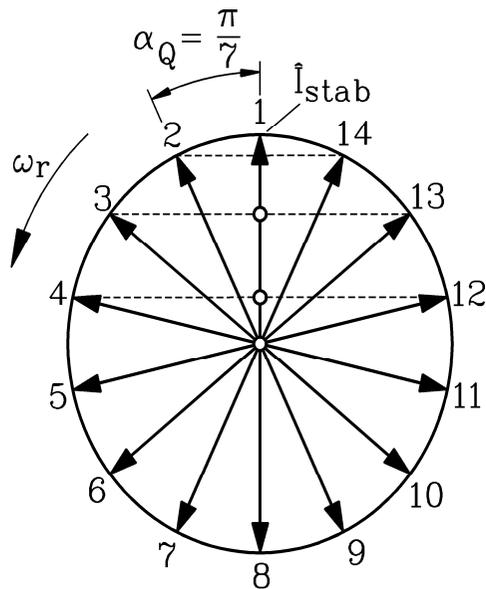
$Q_r = 28$  Stäben,  $2p = 4$ :  
Stabstromsystem wiederholt sich  
nach  $Q_r/p = 14$  Stäben,  
Phasenverschiebung  
(**Nutenwinkel**)  $\alpha_Q = 2\pi p/Q_r = \pi/7$ .

**Läufer-Kurzschlusskäfig:**  $Q_r$  leitfähige Stäbe (Kupfer, Aluminium) in  $Q_r$  Nuten, die stirnseitig durch je einen leitfähigen Ring kurz geschlossen sind.

**Symmetrisches Drehstromsystem:** In jedem Stab ein gegenüber dem Nachbarstab phasenversetzter Sinusstrom (**Stabstrom**). Jeder Stab ist ein **eigener Strang** (Strangzahl  $Q_r$ )

# 7. Käfigwicklungen:

## Käfigfeld ist besser sinusförmig als Ständerfeld

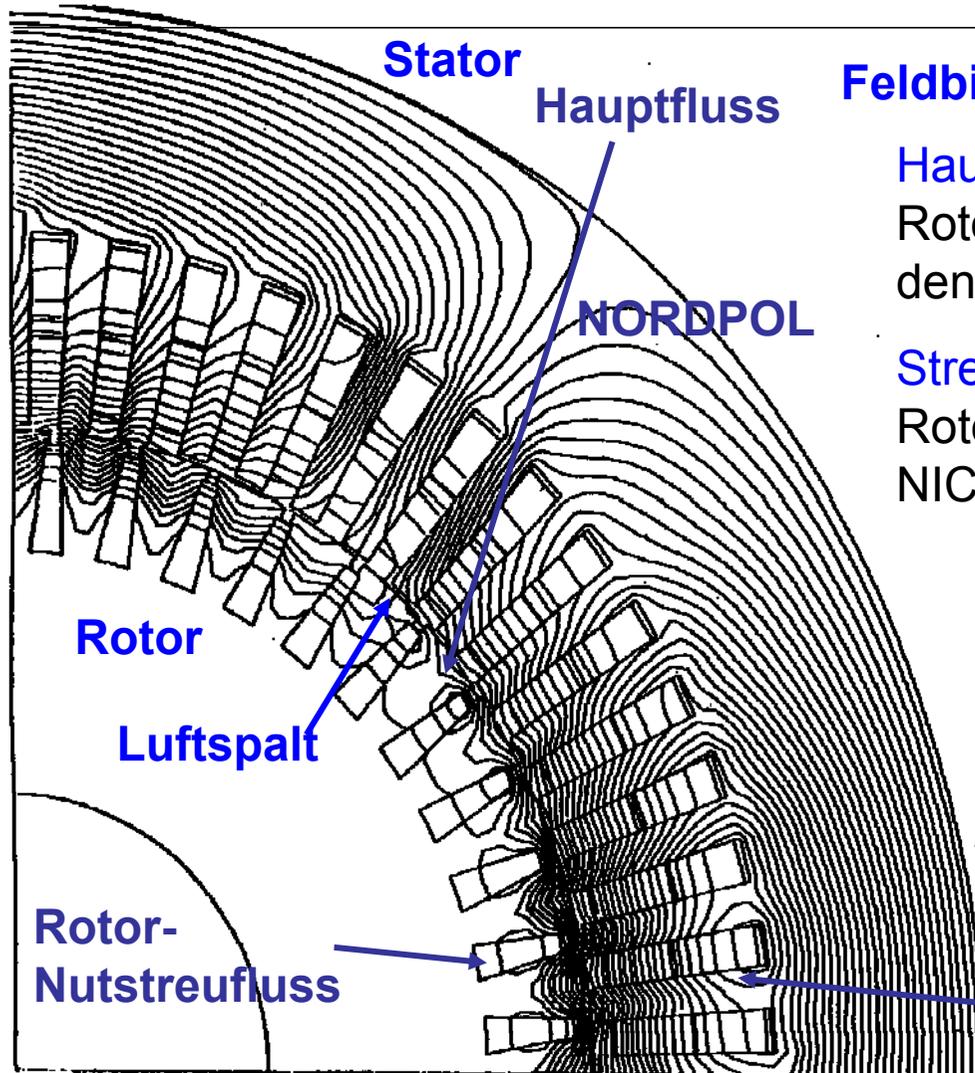


### Beispiel:

$Q_r = 28$  Stäben,  $2p = 4$ : Stabstromsystem wiederholt sich nach  $Q_r/p = 14$  Stäben, Phasenverschiebung (**Nutenwinkel**)  $\alpha_Q = 2\pi p/Q_r = \pi/7$ .

# 7. Käfigwicklungen:

Käfigfeld wird von Ständer-Grund- und Oberwellen induziert



## Feldbild: Käfigläufer-Asynchronmaschine

**Hauptfluss:** Verkettet Stator- mit Rotorwicklung; Feldlinien gehen daher über den Luftspalt

**Streufluss:** Ist nur mit Stator- oder Rotorwicklung verkettet, Feldlinien gehen NICHT über den Luftspalt

### Beispiel:

#### Vierpoliger Keilstabläufer:

#### Feldbild bei Läuferstillstand ( $n = 0$ )

- Läuferfrequenz = Ständerfrequenz
- Läuferstrom ist NAHEZU gegenphasig zum Ständerstrom

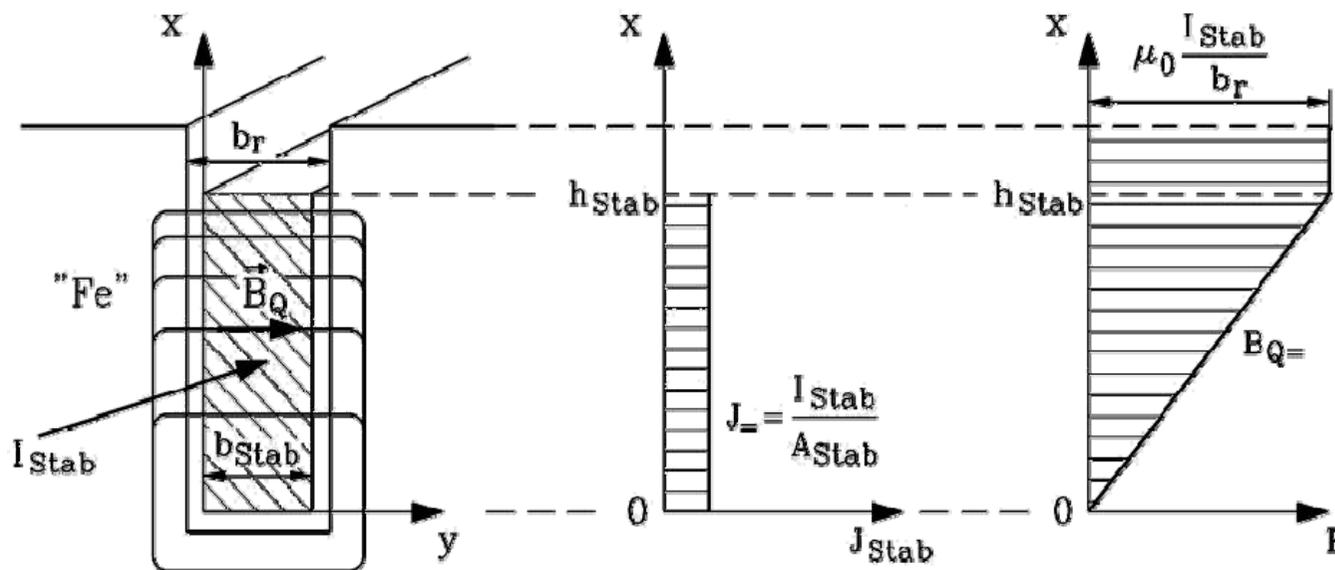
Stator-  
Nutstreiffluss



# 7. Käfigwicklungen

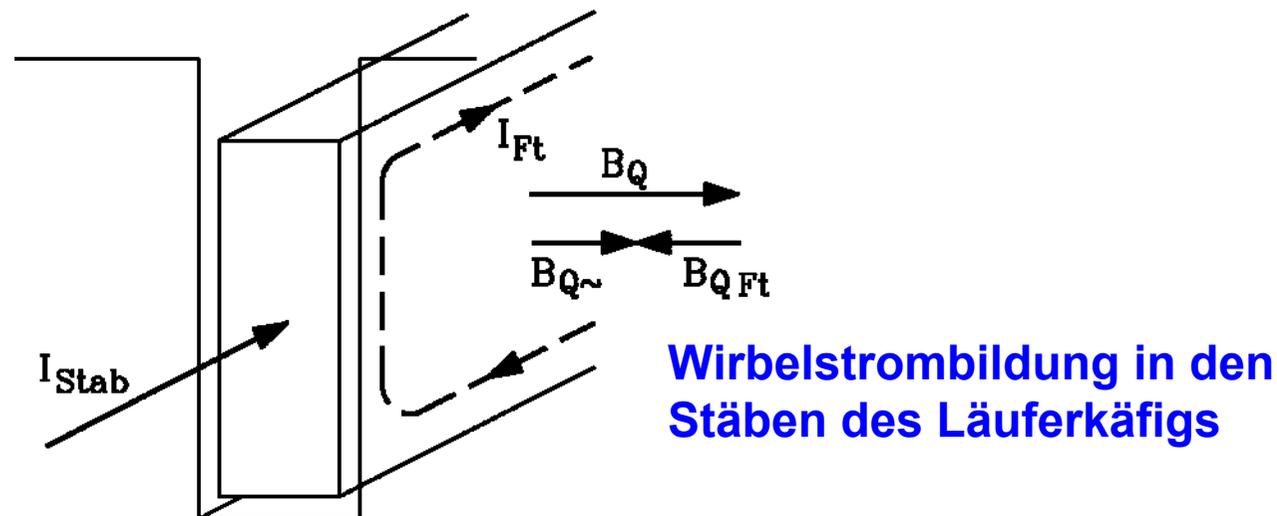
## Nutstreufeld in den Läufernuten

- Läuferströme viel größer als Ständerströme: großer Stabquerschnitt
- Wenn die Stromdichte  $J_{Stab} = I_{Stab} / A_{Stab}$  gleichmäßig über dem Stab verteilt ist, so nimmt das **Nutstreufeld**, das **quer** zur Nutachse gerichtet ist, **linear** mit der Stabhöhe  $x$  **zu**.



# 7. Käfigwicklungen

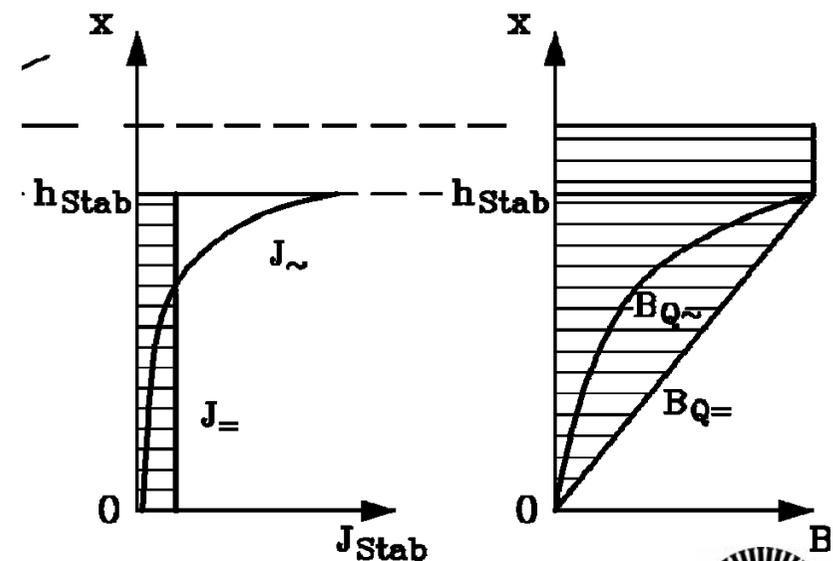
- **Nutquerfeld  $B_Q$**  pulsiert mit Läuferfrequenz & durchsetzt die Stab-Breitseite
- Stab bildet "massive Kurzschlusschleife". **FARADAY'sches Induktionsgesetz:**  $B_Q$  induziert Spannung  $u_i = -d\Phi/dt$ , die einen **Wirbelstrom  $I_{Ft}$**  im Stab treibt.
- Dessen **Eigenfeld  $B_{QFt}$**  ist dem ihn verursachenden Nutenquerfeld entgegen gerichtet (**LENZ'sche Regel**).
- Daher fließt der **Wirbelstrom  $I_{Ft}$**  im oberen Stabbereich IN Richtung des Stabstroms  $I_{Stab}$ , im unteren Stabbereich aber ENTGEGEN dem Stabstrom.



# 7. Käfigwicklungen

## Stromverdrängung im Läuferstab

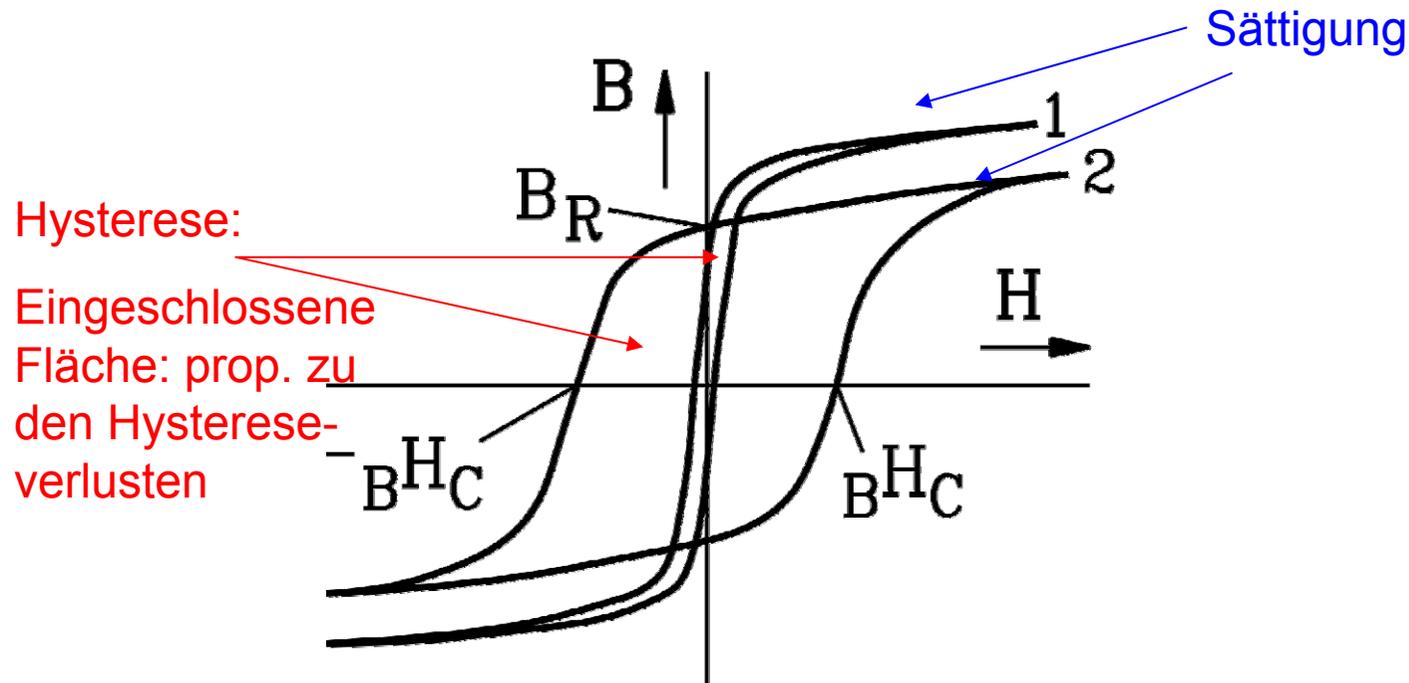
- Durch  $I_{Ft}$  ist die Stromdichteverteilung im oberen Stabbereich höher als im unteren (**Stromverdrängung zur Staboberkante, Haut- oder Skineffekt**): erhöhte Stromwärmeverluste!
- Das **resultierende** Nutstreufeld  $B_{Q\sim}$  wird wegen  $B_{QFt}$  **verringert**: Läuferinduktivität sinkt.
- **Stromverdrängung** steigt mit
  - höherer Läuferfrequenz  $f_r$ ,
  - höherer elektrischer Stab-Leitfähigkeit  $\kappa$ ,
  - größerer Stabhöhe  $h_{Stab}$
  - höherer Permeabilität  $\mu$  des Leiters(Kupfer und Alu haben aber nur  $\mu = \mu_0$  !)



# Inhalt

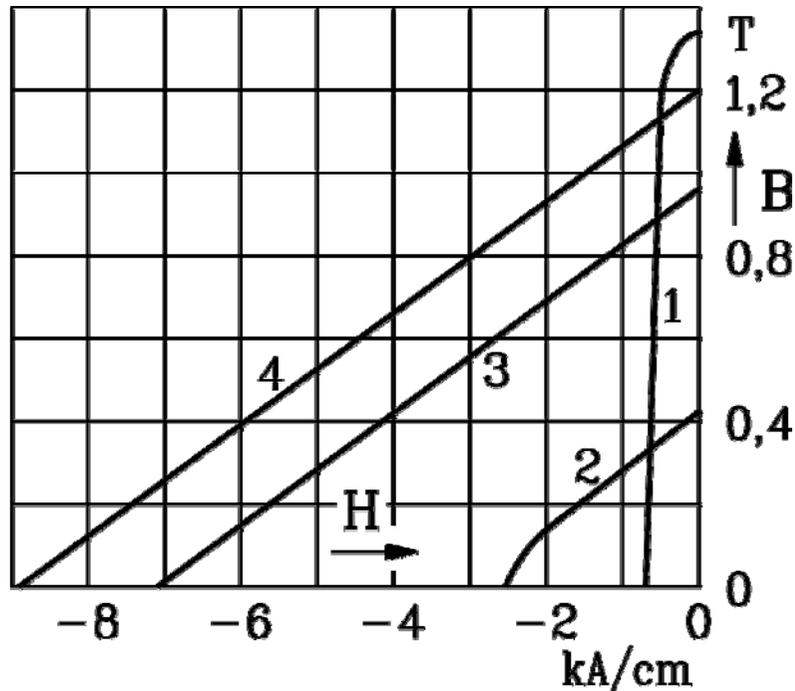
## 8. Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe

## 8. Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe



- **Weichmagnetische Werkstoffe (1):** Eisen, Nickel, Kobalt:  $B_R$  und  $B^H_C$  klein: für den Einsatz in magnetischen Wechselfeldern
- **Hartmagnetische Werkstoffe (2):** = Permanentmagnetwerkstoffe:  $B_R$  und  $B^H_C$  groß: für den Einsatz zur Erzeugung magnetischer Gleichfelder

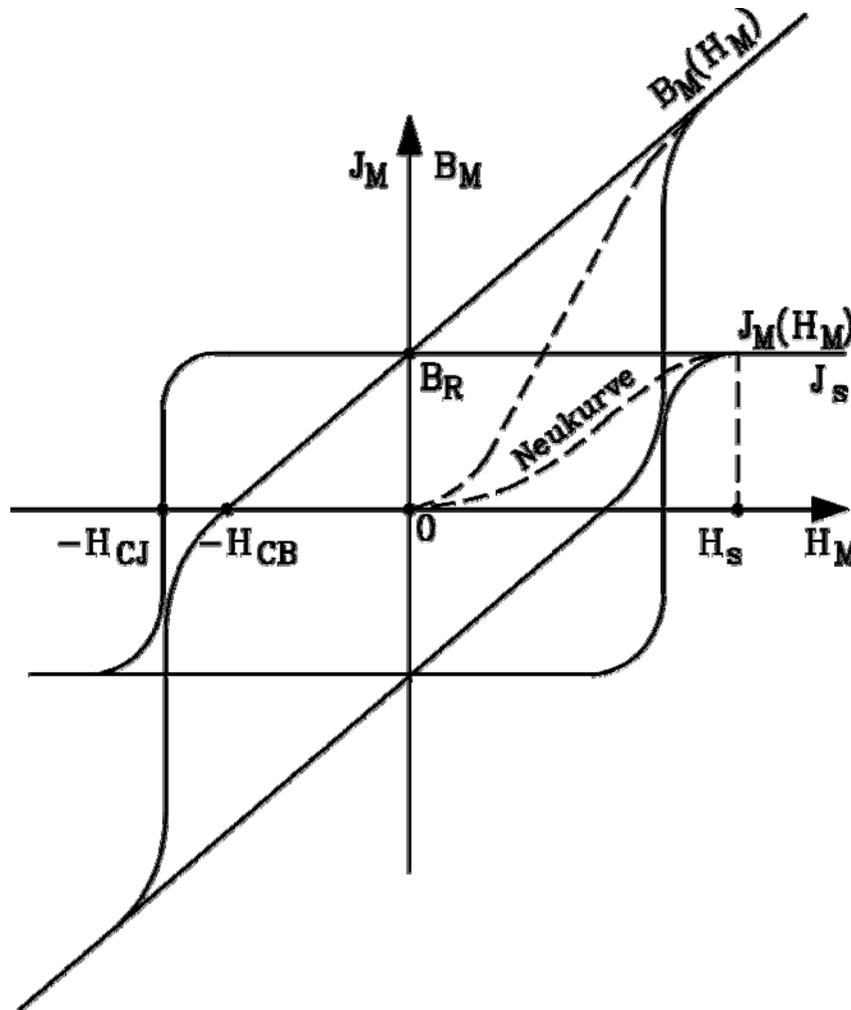
## 8. Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe



- $B_R$ : Remanenz-Flussdichte
- ${}_B H_C$ : Koerzitivfeldstärke der  $B(H)$ -Kennlinie
- Werkstoffkennlinie  $B(H)$ : statische "Hysterese"-Schleife (hier bei 20°C im 2. Quadranten dargestellt)

1. **Aluminium-Nickel-Kobalt-Magnete** (AlNiCo):  $B_R$  groß,  ${}_B H_C$  klein
2. **Ferrite** (z.B. Barium-Ferrit) mit deutlich niedrigerem  $B_R$ , aber erhöhtem  ${}_B H_C$
3. **Selten-Erd-Magnete Samarium-Kobalt**: hohes  $B_R$ ,  ${}_B H_C$ , wenig Temperatureinfluss
4. **Selten-Erd-Magnete Neodym-Eisen-Bor**: sehr hohes  $B_R$ ,  ${}_B H_C$ , sinkend mit steigender Temperatur

# 8. Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe

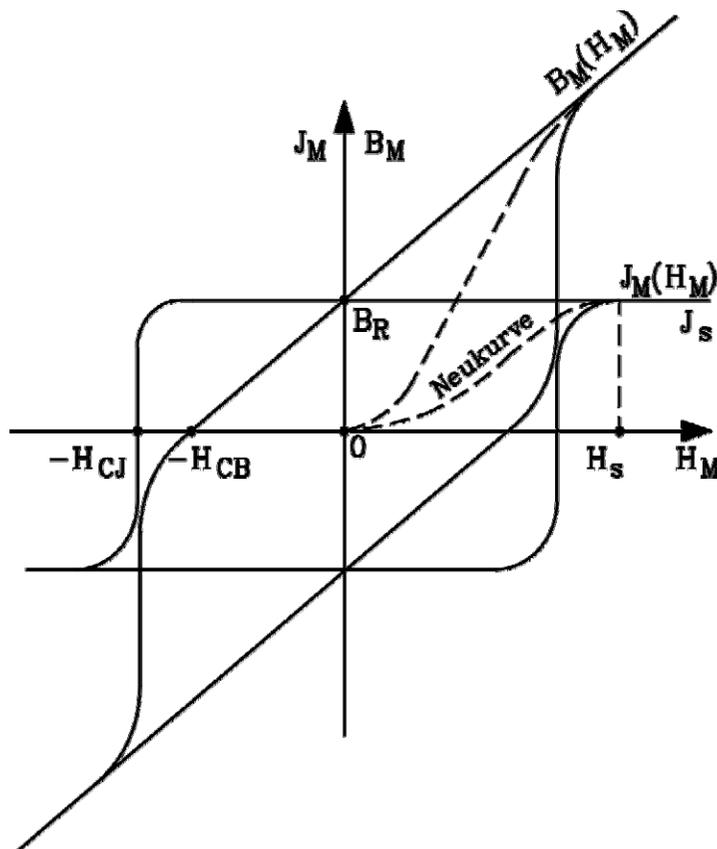


$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{H}_M + \vec{J}_M$$

Die  $B_M(H_M)$ -Kennlinie entsteht aus  $J_M(H_M)$ -Kennlinie durch Addition von  $B_M = \mu_0 H_M$  und ist daher im zweiten Quadranten **nahezu linear**:

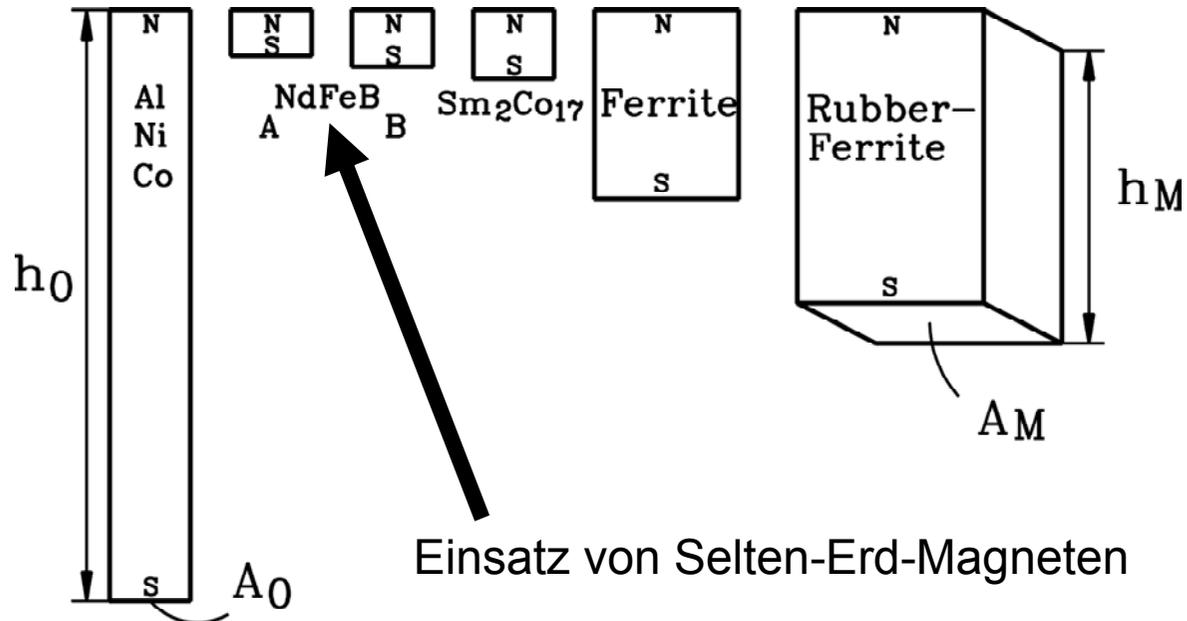
$$B_M = B_R + \mu_M H_M, \quad \mu_M = ca. 1.05 \mu_0$$

# 8. Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe



- PM-Eigenfeld: **magnetische Polarisation  $J_M$** , die sich dem äußeren Fremd-Feld  $H_M$  überlagert zur resultierenden Flussdichte  $B_M$ : 
$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{H}_M + \vec{J}_M$$
- Selten-Erd-Magnete sind für eine hohe Sättigungspolarisation  $\pm J_s$  entwickelt.
- Nach Abschalten des äußeren Felds verbleibt die **Remanenzflussdichte**  $B_R = J_M(H_M = 0) = J_R$ .
- Zwei **Koerzitivfeldstärken**  $H_C$  :
  - a) Bei  $-H_{CB}$  ist die resultierende äußere magnetische Flussdichte  $B_M$  Null.
  - b) Bei  $-H_{CJ}$  ist die magnetische Polarisation  $J_M$  im Magneten Null.

# 8. Permanentmagnete, weichmagnetische Werkstoffe

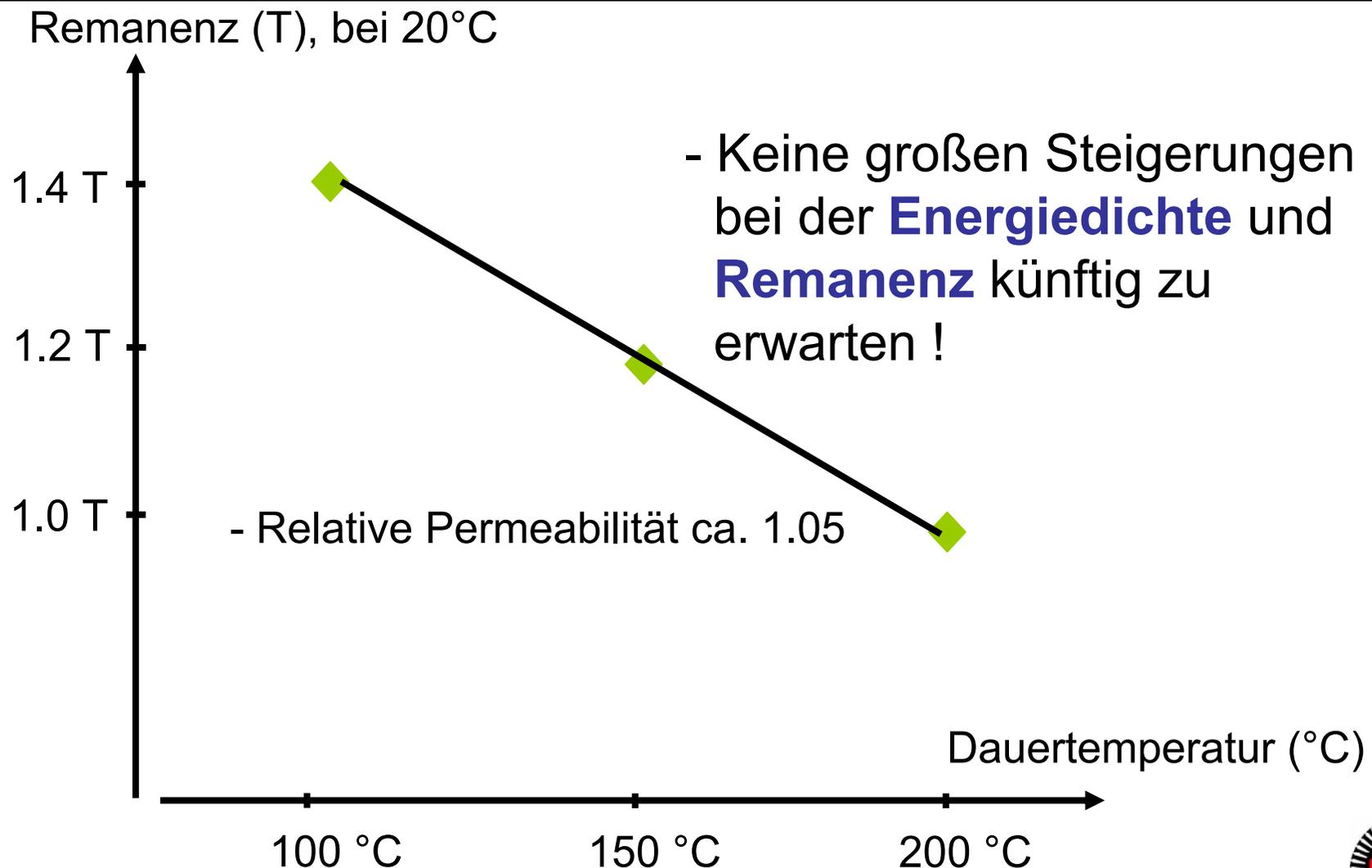


## Benötigtes Magnetvolumen für

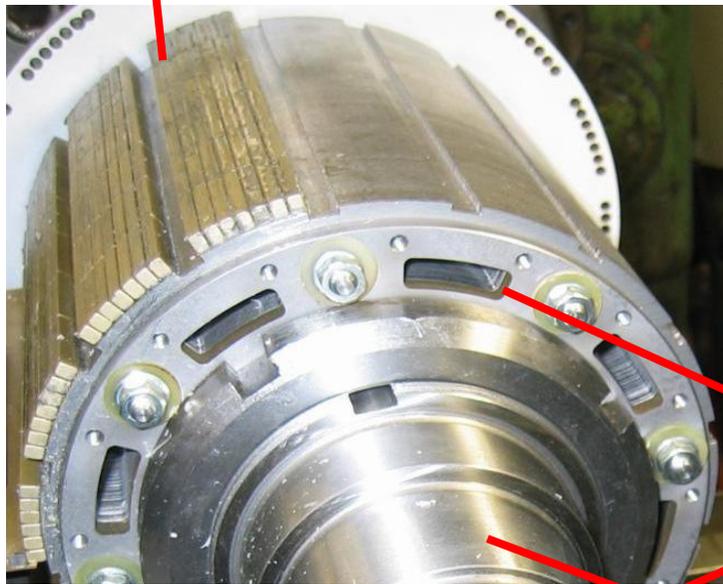
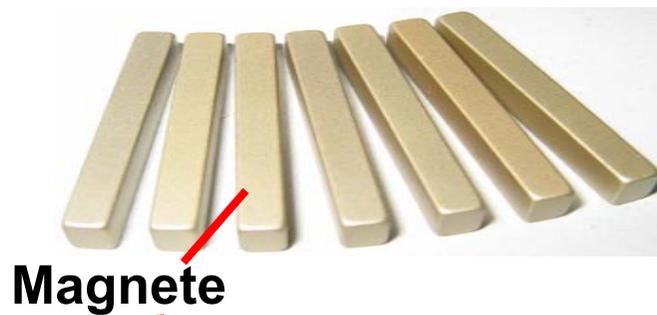
- gleichen Magnetfluss
- gleiche Entmagnetisierfestigkeit

## Höchste Energiedichte bei Neodymium-Eisen-Bor-Magneten

## 8. Permanentmagnete: Typische Grenzen für NdFeB-Magnete



## 8. Permanentmagnete: Kleine Magnetverlusten: Segmentierte Magnete



**Welle**

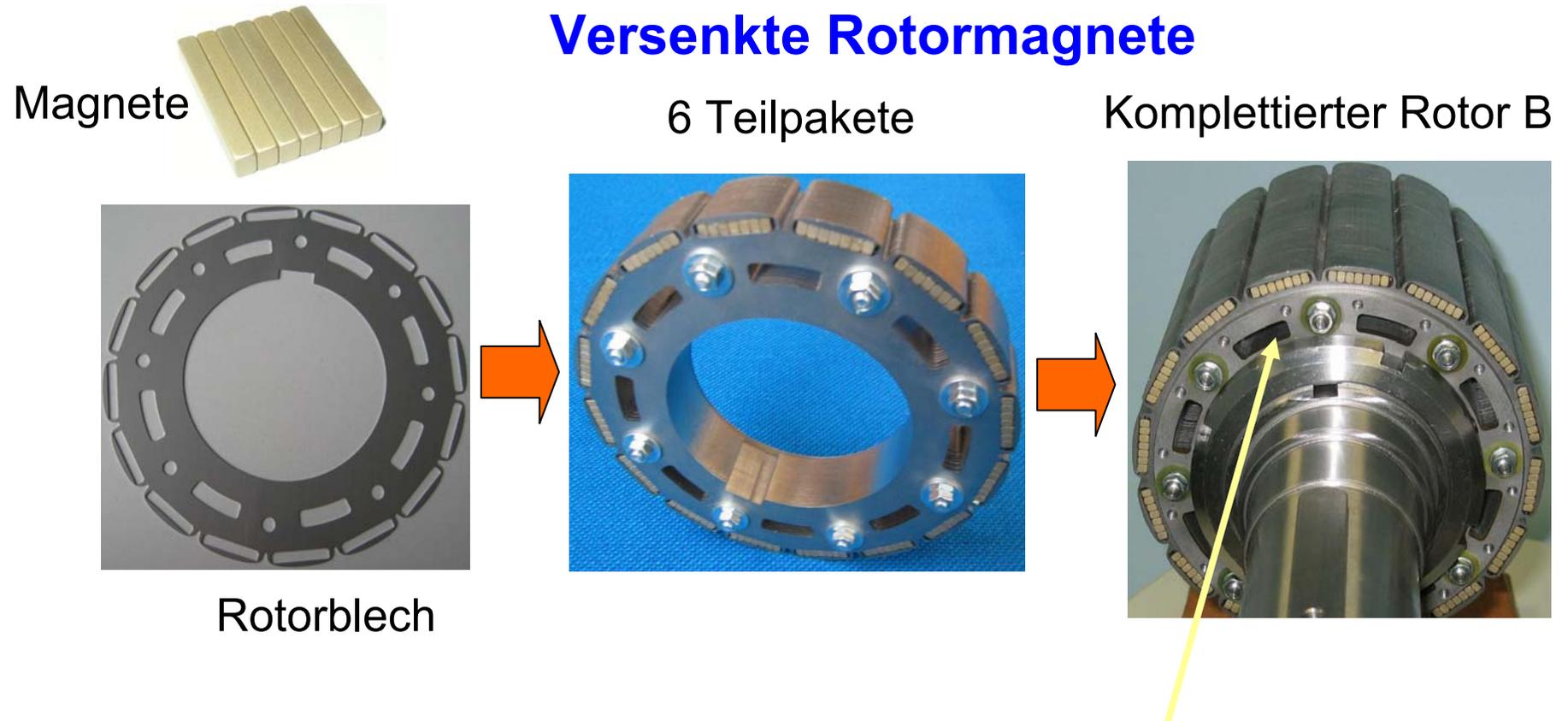


**Oberflächenmagnete**

**Kohlefaserbandage**

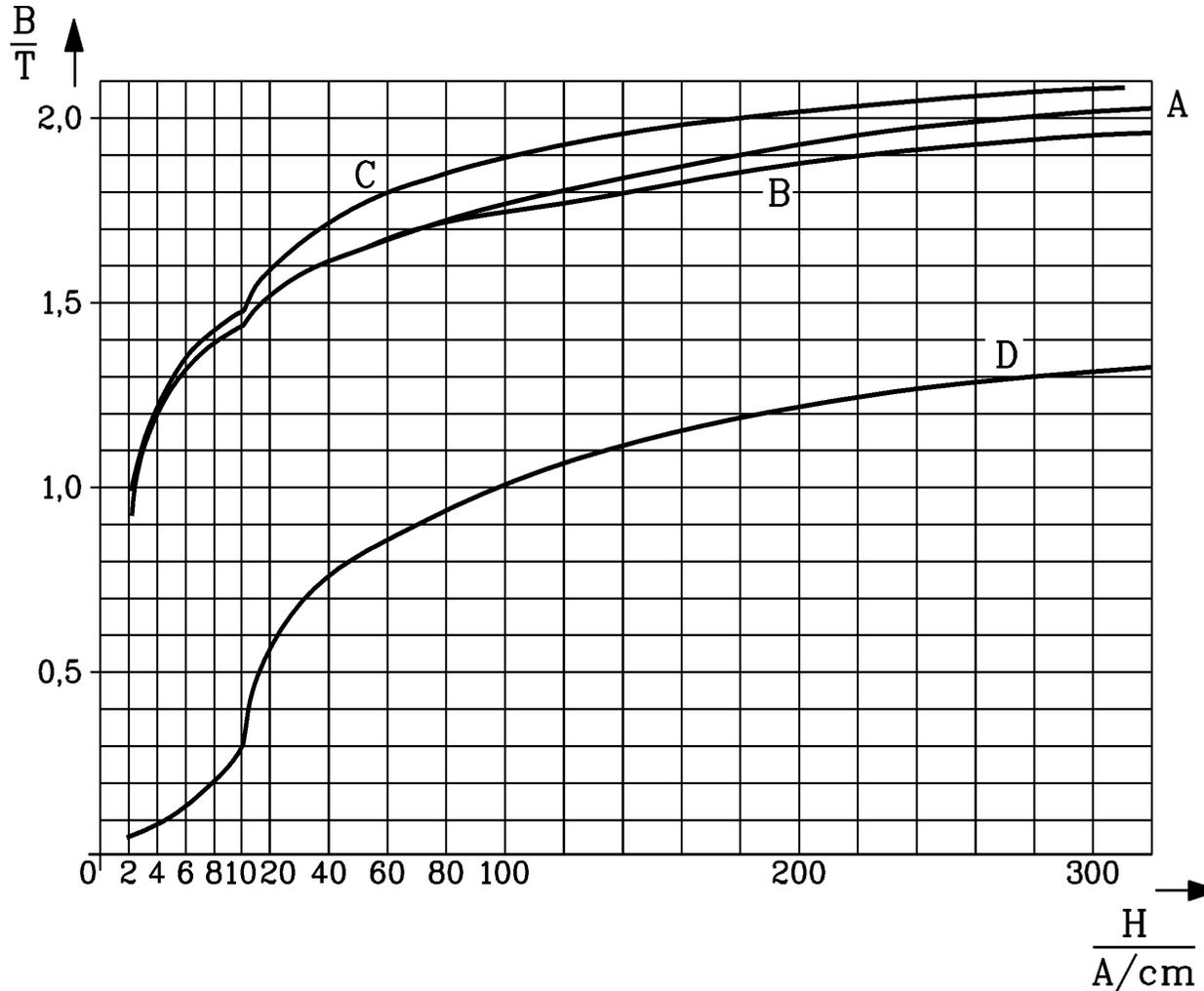
**Rotorblechpaket**

## 8. Permanentmagnete: Keine Bandage – versenkte Magnete



Interner Luftkreislauf

# 8. Weichmagnetische Werkstoffe



Schmale Hystereseschleife nicht dargestellt

**A, B:** Dynamobleche mit Si zur Widerstandserhöhung gegen Wirbelströme

**C:** Unsiliziertes Eisenblech

**D:** Gusseisen

# 8. Weichmagnetische Werkstoffe

## Hystereseverluste

**Hystereseverluste** pro Volumen des ferromagnetischen Materials durch pulsierendes Magnetfeld wird durch Fläche der Hystereseschleife  $B(H)$  ausgedrückt:  $A_{Hy}$

$$W_{Hy}/V = A_{Hy}(\hat{B}) \sim B_R \cdot B H_C \sim \text{ca. } \hat{B}^2$$

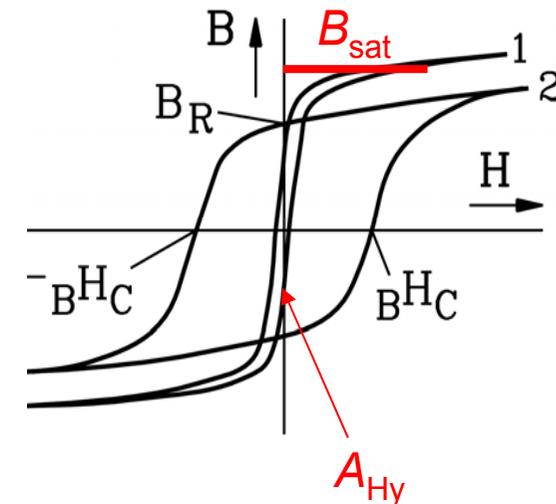
$$B(t) = \hat{B} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

**Hystereseverluste = Leistung = (Energie) x (Frequenz):**

$$P_{Hy}/V = f \cdot A_{Hy} \sim \text{ca. } \hat{B}^2 \cdot f$$

**Hystereseverluste** im rotierenden Feld sind **größer** als im pulsierenden Feld, solange die Flussdichte kleiner als die Sättigungsflussdichte  $B_{sat}$  ist. Darüber verschwindet der Einfluss rotierender Hysterese!

$$P_{Hy,rot} = k_{rot}(\hat{B}) \cdot f \cdot A_{Hy}(\hat{B}) \quad k_{rot}(\hat{B} = 1.5\text{T}) \cong 1.5 \quad k_{rot}(\hat{B} = 2.5\text{T}) \cong 0$$



# 8. Weichmagnetische Werkstoffe

## Resultierende Ummagnetisierungsverluste

**Wirbelstrom-** (*Foucault*:  $F_t$ ) und **Hystereseverluste** ( $H_y$ ) im geblechten Eisenkörper, gemessen im *EPSTEIN*-Rahmen: kein rotierendes, sondern nur pulsierendes Feld

Ummagnetisierungsverluste bei 50 Hz, 1 T, pro kg Masse:

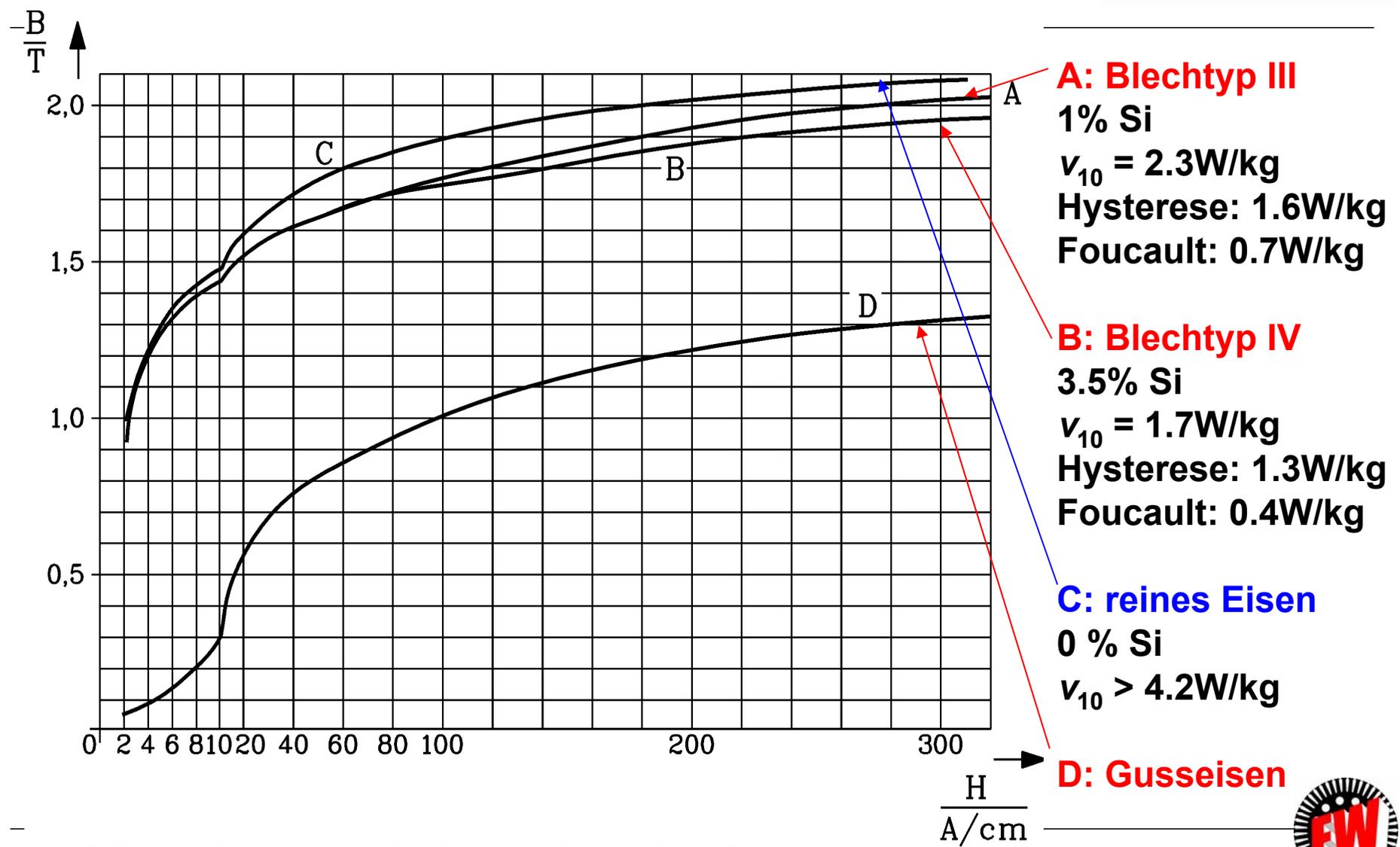
$$v_{10} = p_{Hy} \cdot (f / 50) + p_{Ft} \cdot (f / 50)^2 \cdot (b_{sh} / 0.5)^2$$

Blechdicke $b_{sh} = 0.5 \text{ mm}$	Si	$v_{10}$	Hystereseverluste	Wirbelstromverluste
	%	W/kg	W/kg	W/kg
Reines Eisen	0	$\approx 4.2$	*)	*)
Blechtyp III	1	2.3	1.6	0.7
Blechtyp IV	3.5	1.7	1.3	0.4

\*) nicht spezifiziert, typisch ca. 70% Anteil der Hystereseverluste

# 8. Weichmagnetische Werkstoffe

## Resultierende Ummagnetisierungsverluste

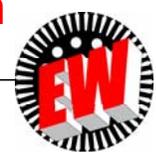


**A: Blechtyp III**  
 1% Si  
 $v_{10} = 2.3W/kg$   
 Hysterese: 1.6W/kg  
 Foucault: 0.7W/kg

**B: Blechtyp IV**  
 3.5% Si  
 $v_{10} = 1.7W/kg$   
 Hysterese: 1.3W/kg  
 Foucault: 0.4W/kg

**C: reines Eisen**  
 0 % Si  
 $v_{10} > 4.2W/kg$

**D: Gusseisen**



---

# Inhalt

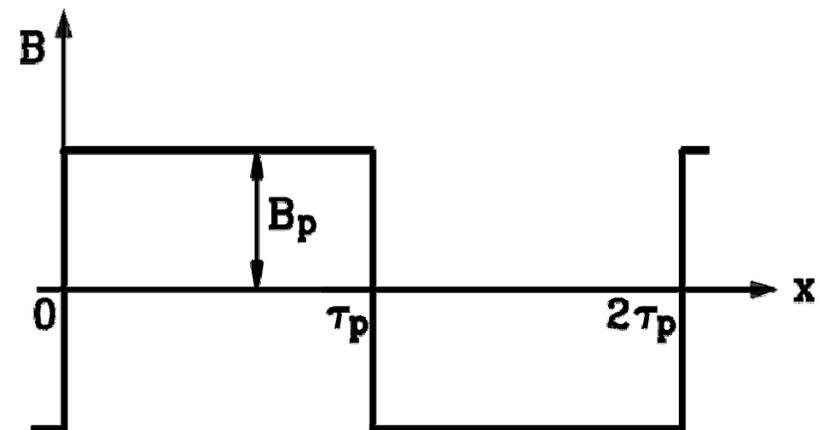
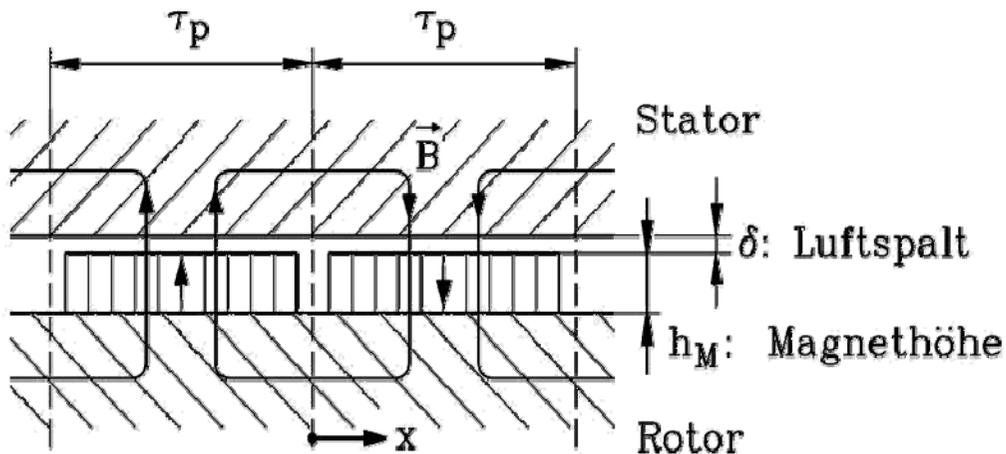


## 9. Magnetkreisberechnung

# 9. Magnetkreisberechnung

## PM-Synchronmaschinen: Luftspaltflussdichte $B_p$

Beispiel: Synchron-Läufer mit Oberflächenmagneten: Läufer-Luftspaltfeld bei stromlosem Ständer



Permanent-Magnet-Kennlinie im 2. Quadranten:  $B_M \cong B_R + \mu_0 H_M$

Ampere'scher Durchflutungssatz entlang Feldlinie C:  $2(H_\delta \delta + H_M h_M) = \Theta = 0$

Fluss pro Pol:  $\Phi = B_M A_M = B_\delta A_\delta$

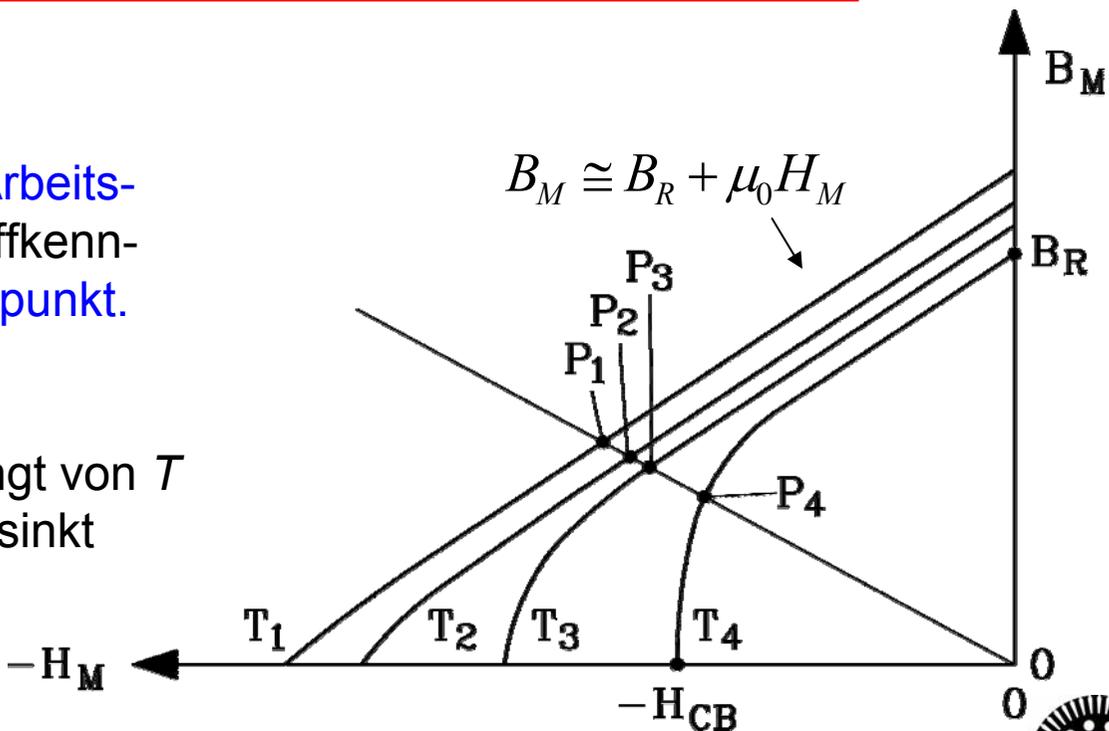
Eisen unendlich permeabel  
angenommen!

# 9. Magnetkreisberechnung

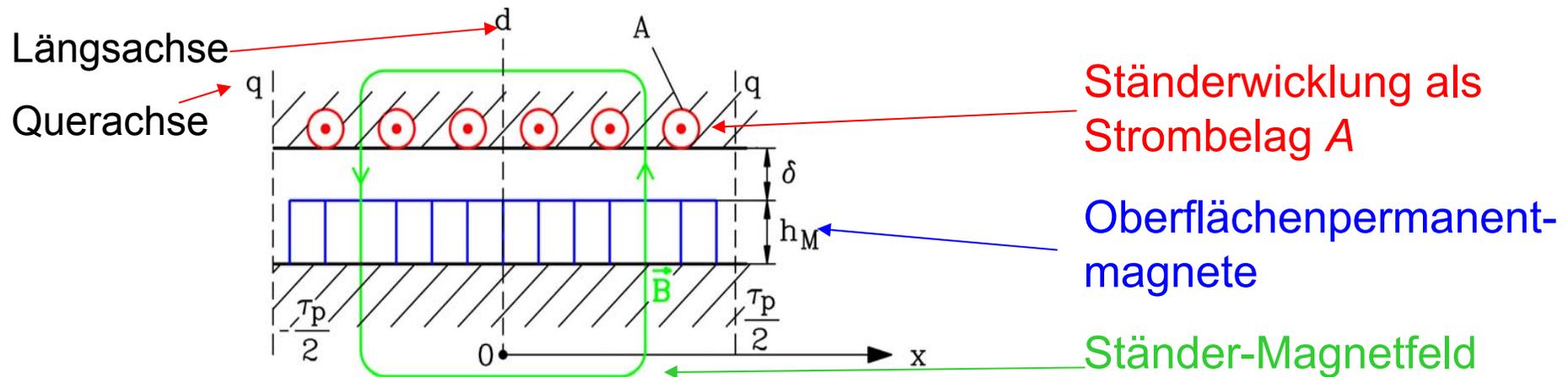
$$\left. \begin{aligned} 2(H_\delta \delta + H_M h_M) &= \Theta = 0 \\ \Phi &= B_M A_M = B_\delta A_\delta \end{aligned} \right\} \text{magnetische Arbeitsgerade } B_M(H_M) \text{ bei } A_M = A_\delta$$

$$B_p = B_\delta = \mu_0 H_\delta = -\mu_0 \frac{h_M}{\delta} H_M = B_M$$

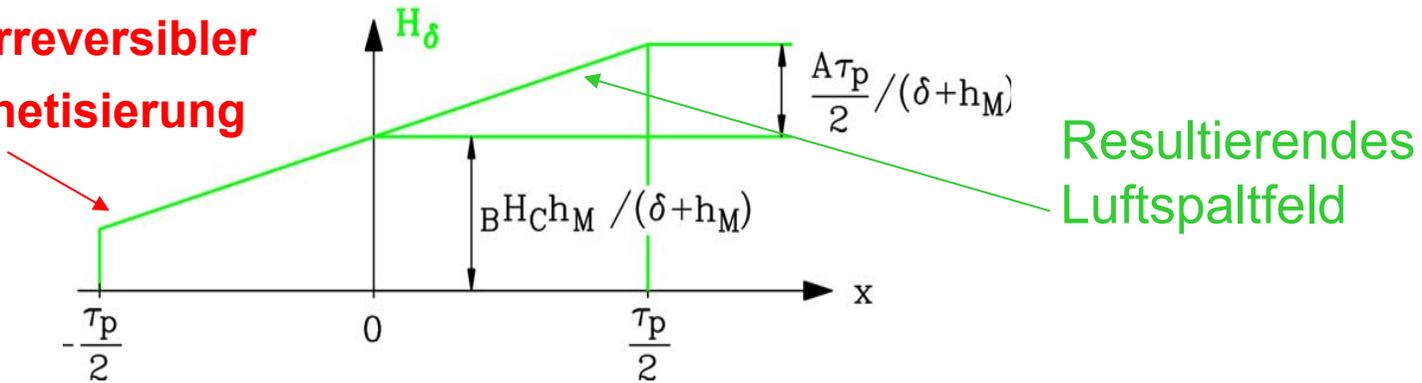
- Ermittlung des magnetischen Arbeitspunkts  $P$ :  
Eintragen der magnetischen "Arbeitsgerade" in die  $B_M(H_M)$ -Werkstoffkennlinie: Schnittpunkt  $P$  ist Arbeitspunkt.
- Temperatureinfluss  $T$ :  
 $B_M(H_M)$ -Werkstoffkennlinie hängt von  $T$  ab. Mit steigender Temperatur sinkt Magnetfluss:  
Temperatur  $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ .



# 9. Magnetkreisberechnung: QUERBESTROMUNG



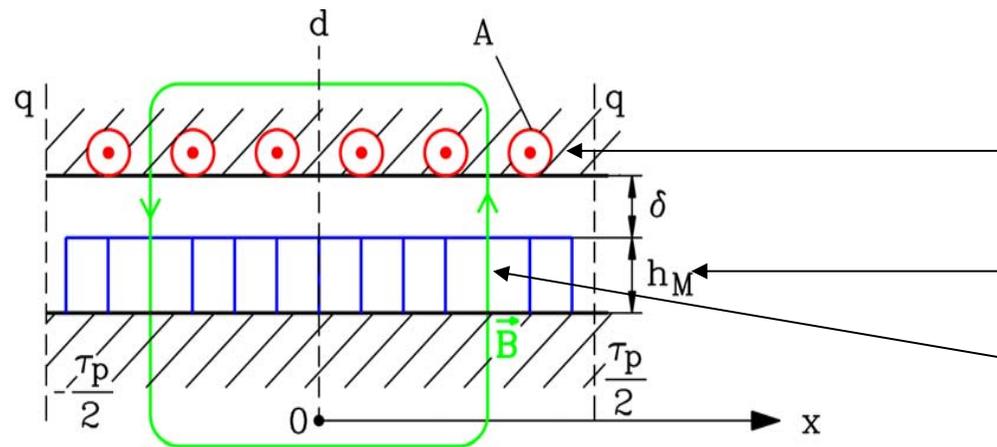
**Gefahr irreversibler Entmagnetisierung**



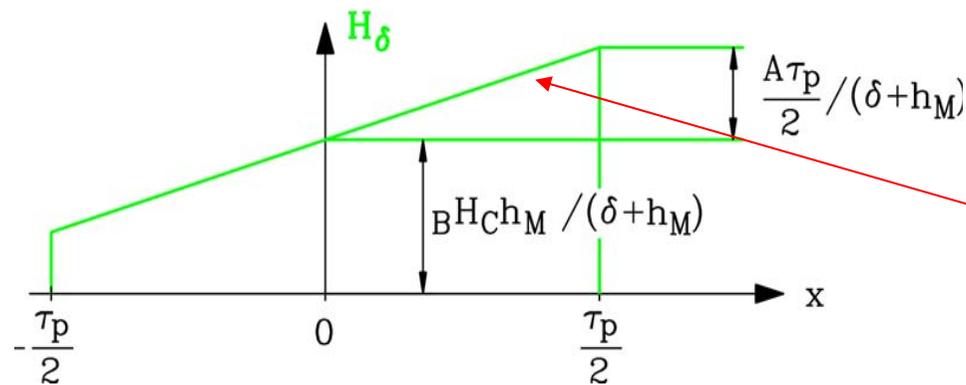
**$I_q$ -Bestromung:** Luftspaltmagnetfeld aus PM-Läuferfeld und Ständerdrehfeld



# 9. Magnetkreisberechnung: ÜBERLAST BEI QUERBESTROMUNG

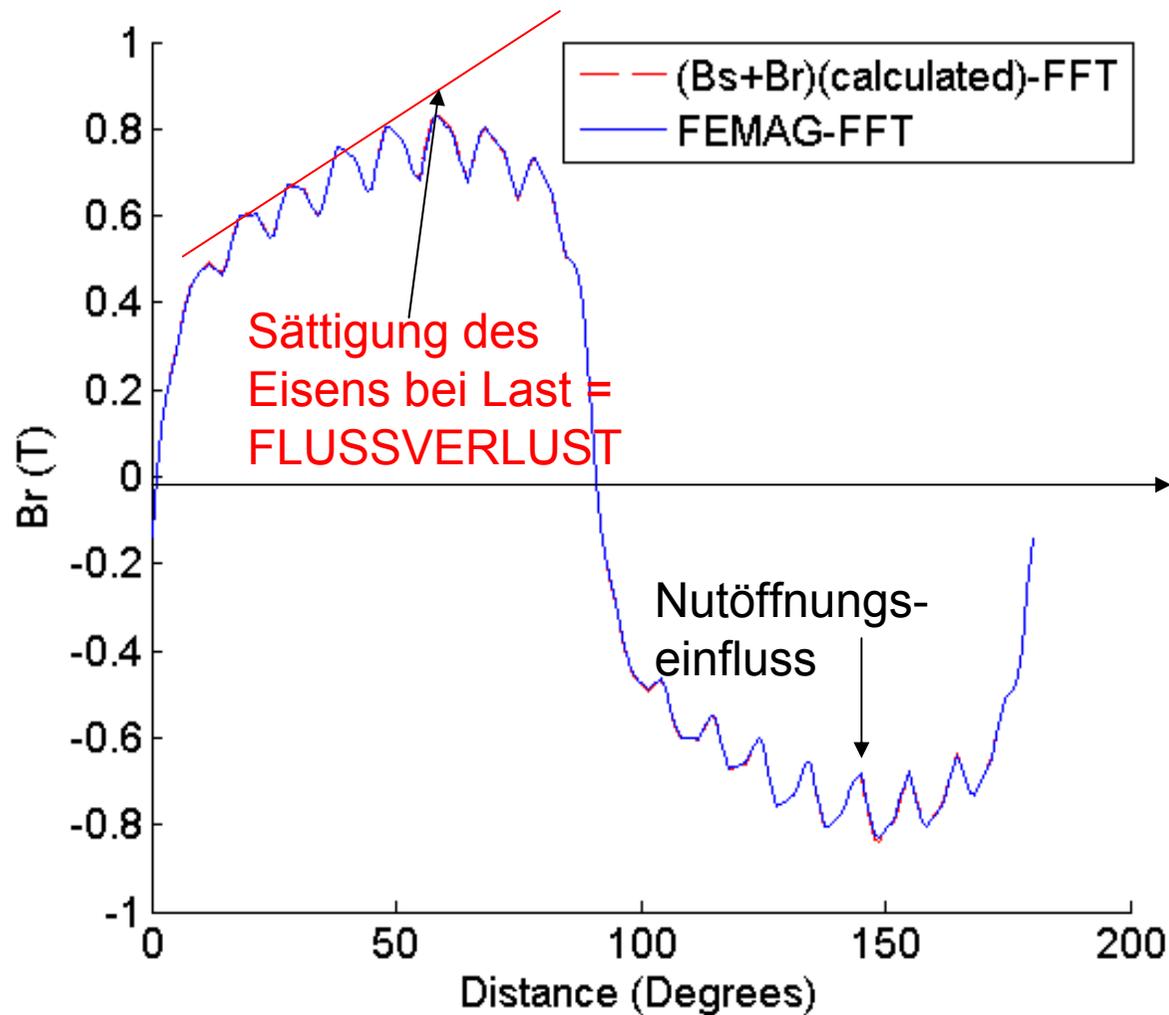


Ständerwicklung: Strombelag  $A$   
 Oberflächenpermanentmagnete  
 Ständer-Magnetfeld



Hohe Flussdichte durch  
 Überlagerung von Ständer- und  
 Läuferfeld:  
 Lastabhängige Sättigung =  
„Ankerrückwirkung“

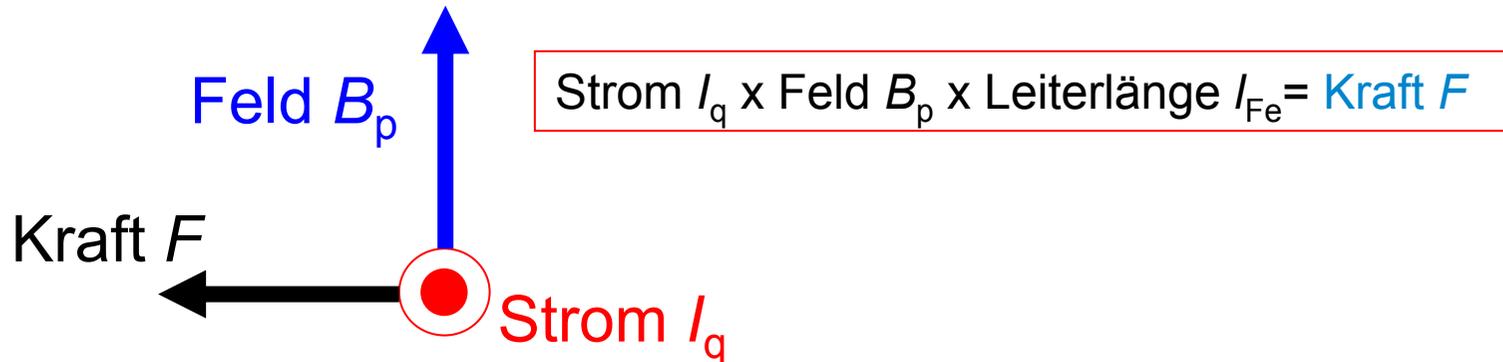
# 9. Magnetkreisberechnung: ÜBERLAST BEI QUERBESTROMUNG



## Oberflächenmagnete, 9 Nuten pro Pol

- Luftspaltflussdichte in Luftspaltmitte dargestellt
- Ein Polpaar =  $180^\circ$
- Voll-Last, FE-Rechnung (FEMAG)

# 9. Magnetkreisberechnung: DREHMOMENT BEI QUERBESTROMUNG



Kraft  $F$  x Leiterzahl  $z$  x Hebelarm  $d/2$  = Moment  $M_e$

$$M_e = p \cdot m \cdot \frac{\Psi_p}{\sqrt{2}} I_q$$

$m = 3$ : Strangzahl,  $2p$ : Polzahl  
 $\Psi_p$ : PM-Statorflussverkettung (peak)

Ohne Eisensättigung: Fluss ist konstant:

**Drehmomentkonstante  $k_T$ :** Einheit: Nm/A  $M_e = k_T I_q$   $k_T \sim B_p$

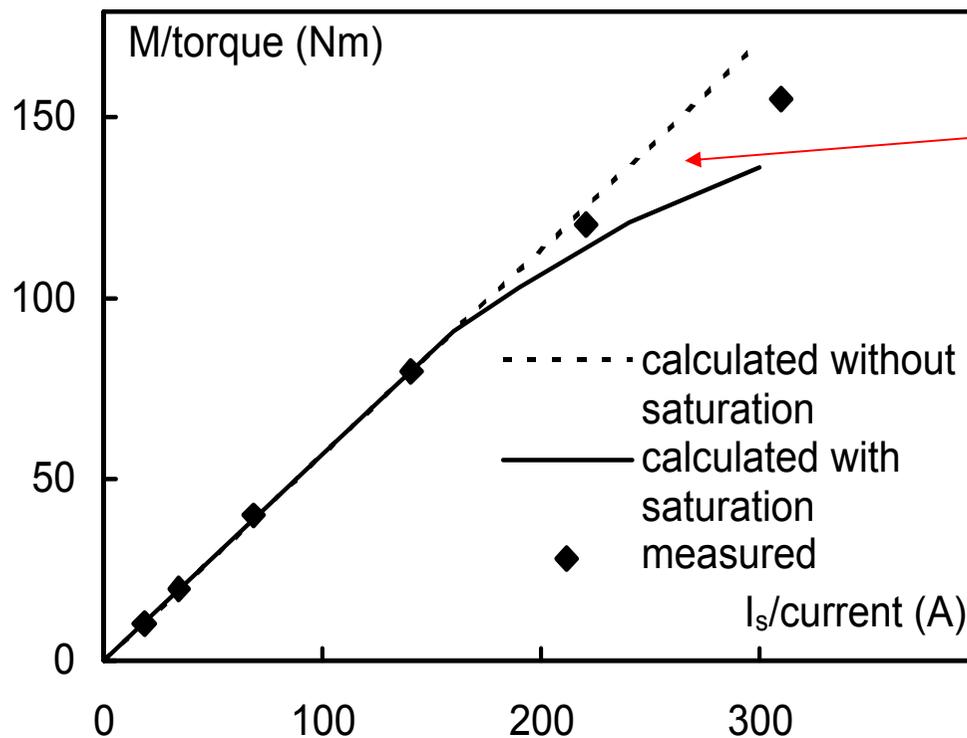
# 9. Magnetkreisberechnung: DREHMOMENT BEI LASTABHÄNGIGER SÄTTIGUNG

Beispiel: 6-poliger PM-Synchronmotor

E-Auto Hauptantrieb

$$M_{pk} = 156Nm, P_{pk} = 35kW, I_{s,lim} = 315A$$

~~$$M_e = k_T I_q \quad k_T \sim B_p$$~~



- Sättigung durch Anker-rückwirkung
- Drehmomentkonstante  $k_T$  nicht mehr gültig
- Progressive Eisensättigung bei hoher Belastung

Quelle:  
Fa. Siemens, Bad Neustadt/Saale

---

# Inhalt



## 10. Verluste, Erwärmung, Kühlung

# 10. Verluste

## Verlustgruppen der PM-Synchron-Maschine



### 1. Ständer:

**1.a) Stromwärmeverluste** inklusive Stromüberschwingungen (Ordnungszahl  $k > 1$ )

$$P_{Cu} = \sum_{k=1}^{\infty} P_{Cu,k} \quad \text{mit } P_{Cu,k} = 3RI_k^2$$

(gegebenenfalls mit Stromverdrängungseinfluss)

**1.b) Ummagnetisierungsverluste im Ständerblechpaket** (Zähne und Joch)

$$P_{Fe,s} = P_{Fe,d} + P_{Fe,ys}$$

### 2. Läufer:

**2.a) Wirbelstromverluste in den Magneten**  $P_M$

**2.b) Ummagnetisierungsverluste im Läuferblechpaket**  $P_{Fe,r}$

(2a/b: Oberschwingungs-/Oberwelleneinfluss)

**2.c) Reibungsverluste:** Lager- und Luftreibung  $P_{bg+fr}$



# 10. Verluste

## Verlustgruppen der Asynchron-Maschine

### 1. Ständer:

**1.a) Stromwärmeverluste** inklusive Stromüberschwingungen (Ordnungszahl  $k > 1$ )

$$P_{Cu,s} = \sum_{k=1}^{\infty} P_{Cu,s,k} \quad \text{mit} \quad P_{Cu,s,k} = 3RI_{s,k}^2$$

(gegebenenfalls mit Stromverdrängungseinfluss)

**1.b) Ummagnetisierungsverluste im Ständerblechpaket** (Zähne und Joch)

$$P_{Fe,s} = P_{Fe,d} + P_{Fe,ys}$$

**1.c) Zusatzverluste**  $P_{z,s}$

### 2. Läufer:

**2.a) Schlupfverluste** (i. a. mit Stromverdrängungseinfluss)

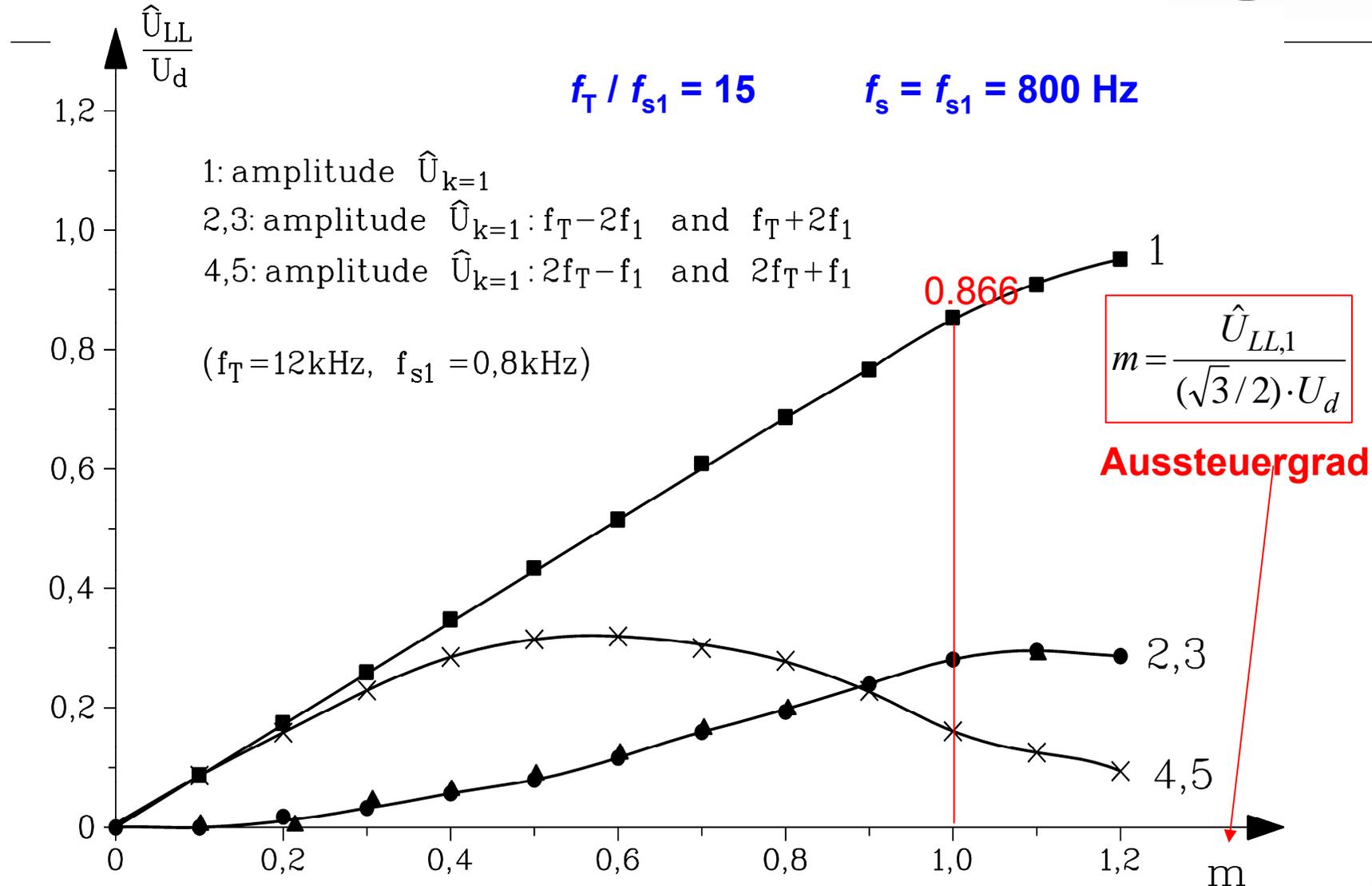
**2.b) Zusatzverluste durch Rotoroberströme, Oberwellen und Grundwellen von Ständer-Oberströmen**  $P_{z,r}$  ( $2a/b$ : Oberschwingungs-/Oberwelleneinfluss)

**2.c) Reibungsverluste:** Lager- und Luftreibung  $P_{bg+fr}$



# 10. Dominante Spannungsharmonische/Umrichterspeisung

## Bsp.: "Synchroner" PWM-Taktung

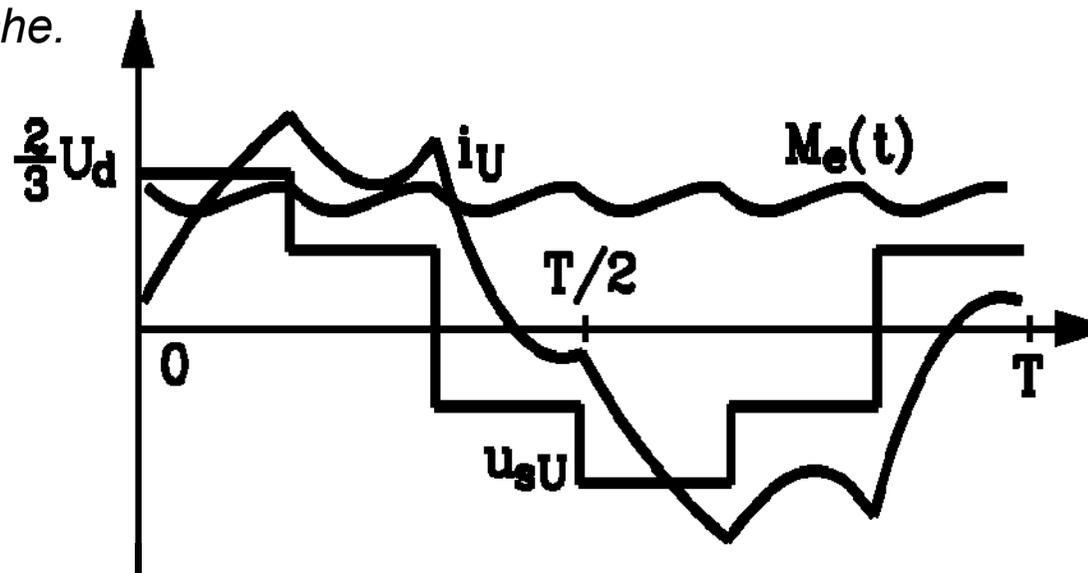


## 10. Verluste

### Stromaufnahme der Asynchron-Maschine

#### Beispiel: Stromüberschwingungen bei Blocktaktung, Asynchronmaschine

- Die Stromüberschwingungen sinken wesentlich rascher mit steigender Ordnungszahl als die Spannungsüberschwingungen, weil die Streuinduktivität den Stromverlauf "glättet".
- Die Stromüberschwingungen verursachen zusätzliche Stromwärme in Ständer- UND Käfig-Wicklung, zusätzliche Pulsationsmomente und ggf. zusätzliche magnetische Geräusche.



# 10. Verluste

## Stromaufnahme der Asynchron-Maschine



# Verlustgruppen bei PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschinen

PM-Synchron-Maschine	Käfigläufer-Asynchron-Maschine
Stator-Stromwärmeverluste	Stator-Stromwärmeverluste
Ummagnetisierungsverluste	Ummagnetisierungsverluste
	Rotor-Stromwärmeverluste
Verluste in den Magneten und Läufer	Zusatzverluste bei Sinusstrombetrieb
Ventilations- u. Lagerreibungsverluste	Ventilations- u. Lagerreibungsverluste
WR-Zusatzverluste	WR-Zusatzverluste



## 10. Verluste

### Beispiel: PM-Synchronmotor Verluste



#### Nenndaten:

6-poliger PM-Synchronmotor,  $M_N = 95.5 \text{ Nm}$ ,  $n_N = 2200/\text{min}$ ,  $P_N = 22 \text{ kW}$   
 $f_N = 110 \text{ Hz}$ ,  $L_d = 0.186 \text{ mH}$ ,  $L_q = 0.219 \text{ mH}$ ,  $R_{s, 20^\circ\text{C}} / R_{s, 155^\circ\text{C}} = 10.5/16.0 \text{ m}\Omega$   
 $\Psi_p = 98 \text{ mVs (20}^\circ\text{C)}$ ,  $P_{\text{Fe0}} = 248 \text{ W}$ ,  $P_{\text{adN}} = 110 \text{ W}$ ,  $P_{\text{ad,inv}} = 56 \text{ W}$ ,  $M_{\text{fr}} = 0.05 \text{ Nm}$   
 $I_{\text{sN}} = 174 \text{ A}$ ,  $U_{\text{sN}} = 50 \text{ V}$ , Motormasse 45 kg, Flüssigkeitsmantelkühlung

Stromwärmeverluste, 155°C: **1453 W**

Ummagnetisierungsverluste: **270 W**

Reibungsverluste: **11.5 W**

Zusatzverluste: **110 W**

Zusatzverluste durch Stromwelligkeit: **56 W**

**Motorgesamtverluste: 1900 W**

$$\cos \varphi_s = 0.916$$

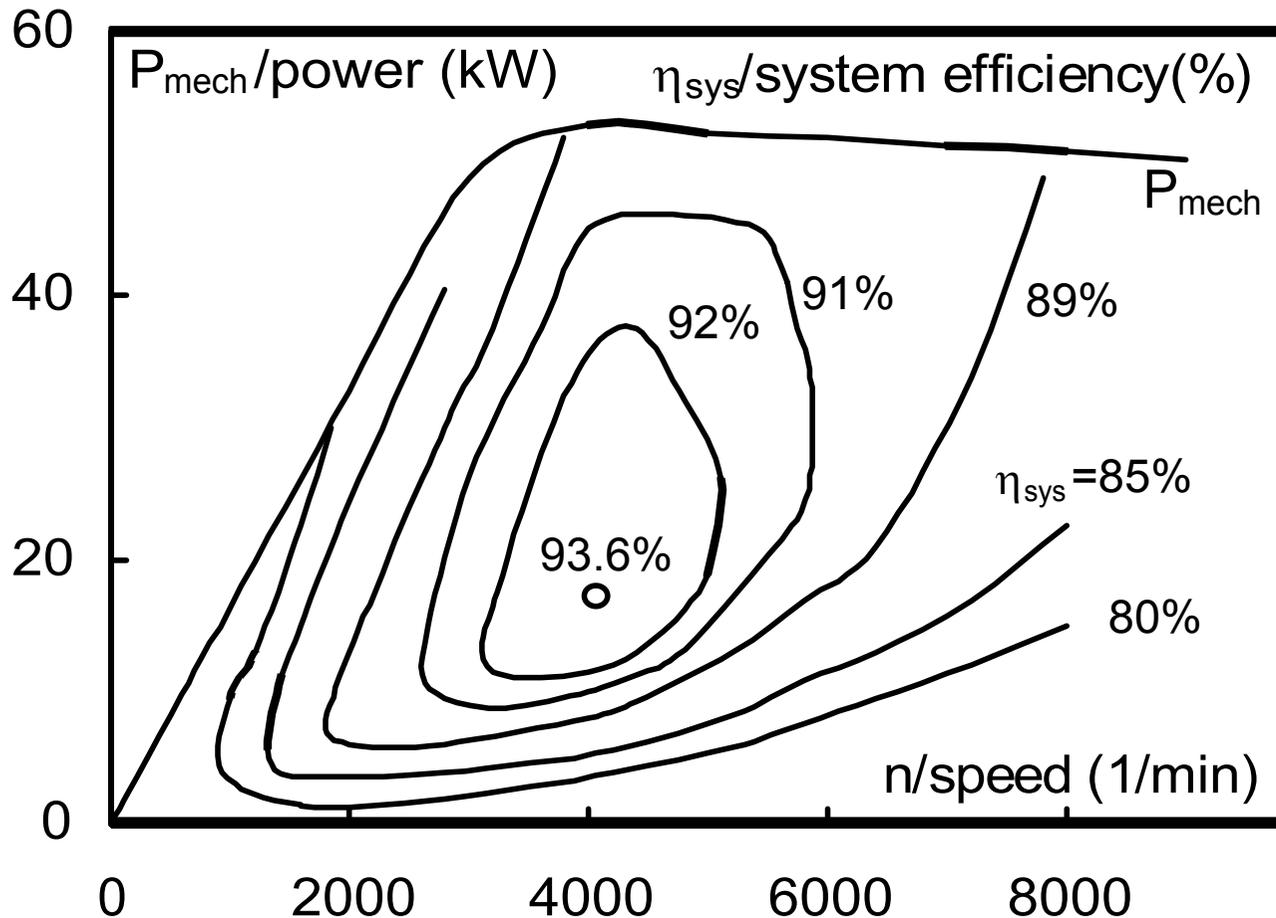
**Motorwirkungsgrad: 92.05%**



# 10. Verluste

## PM-Synchronmotor + Wechselrichter: Wirkungsgradfeld

Gemessene Motorabgabeleistung und Systemwirkungsgrad (PM-Synchronmotor + Wechselrichter) bei 190V Zwischenkreisspannung = Batteriespannung



Quelle: Siemens AG



# 10. Verluste

## Verluste im Wechselrichter (WR)

### ▪ Technische Daten IGBT-WR

Maximalstrom $I_{max}$	250 A
Zwischenkreisspannung $U_{DC}$	110 - 370 V
Schaltfrequenz $f_{Schalt}$	8 kHz
Masse $m_{WR}$	10 kg
Kühlmitteldurchfluss $\dot{V}$	8 l/min
Kühlmittel-Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL}$	85 °C
Zwischenkreiskondensator $C_{ZK}$	2 mF
Zwischenkreiswiderstand $R_{ZK}$	1 mΩ

Quelle: Conti Temic

Typischer Vollastwirkungsgrad: 97%

Wechselrichter



### ▪ Verlustgruppen

Verluste	IGBT	Diode
<b>Statische Verluste</b>		
Durchlass-Verluste $P_D$	x	x
Sperr-Verluste $P_{Sperr}$	(X)	(X)
<b>Schaltverluste</b>		
Anschalt-Verluste $P_{ON}$	x	(x)
Ausschalt-Verluste $P_{OFF}$	x	X
<b>Ansteuer-Verluste <math>P_{Steuer}</math></b>	x	x



# 10. Verluste

## Beispiel: Verlustrechnung im Wechselrichter



$$m = 1, \cos\varphi_s = 0.8, U_d = 480 \text{ V}, f_T = 12 \text{ kHz}, I_{s1} = 100 \text{ A}, U_{s1} = 170 \text{ V}$$

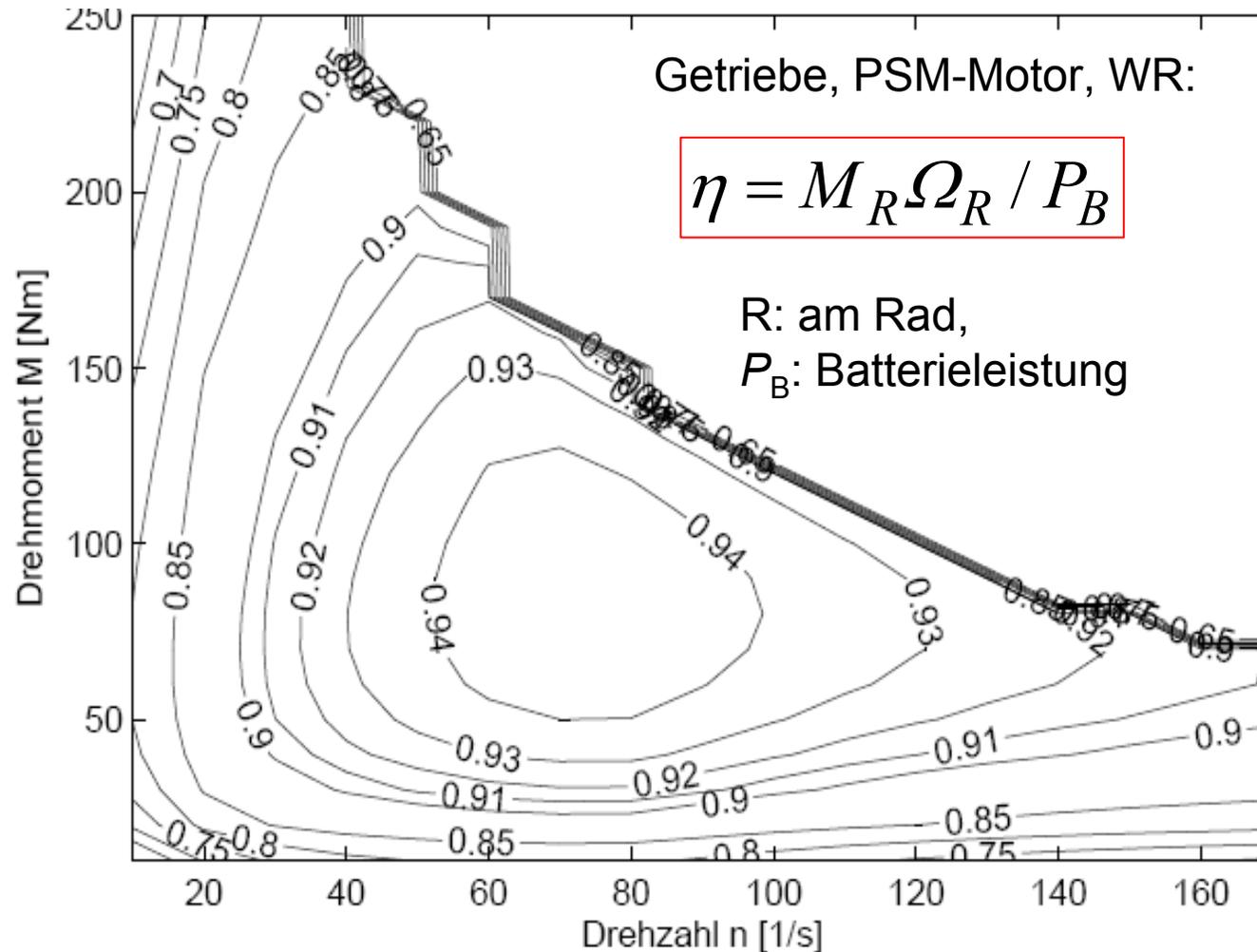
$$\text{Ausgangs-Grundschwingungsleistung: } P_e = 3U_{s1}I_{s1} \cos\varphi_{s1} = 40.8 \text{ kW}$$

Verlustkomponente	Verlustleistung [W]
Transistor-Durchlassverluste	38.8 W
Transistor-Schaltverluste	36.3 W
Dioden-Durchlassverluste	8.7 W
Dioden-Schaltverluste	27.6 W
Summe pro Transistor-Dioden-Paar	111.4 W
Summe über alle 6 Paare	668.4 W
Wirkungsgrad [%]	98.27

$$\text{Umrichterwirkungsgrad: } \eta_{inv} = P_e / (P_e + P_{d,inv})$$



# 10. Verluste: Beispiel: E-Auto (PSM-Motor M3) Wirkungsgrad-Kennfeld gerechnet



# 10. Verluste: Beispiel: Asynchronmaschine mit Wechselrichter (gemessen)

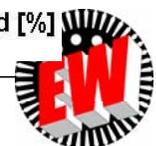
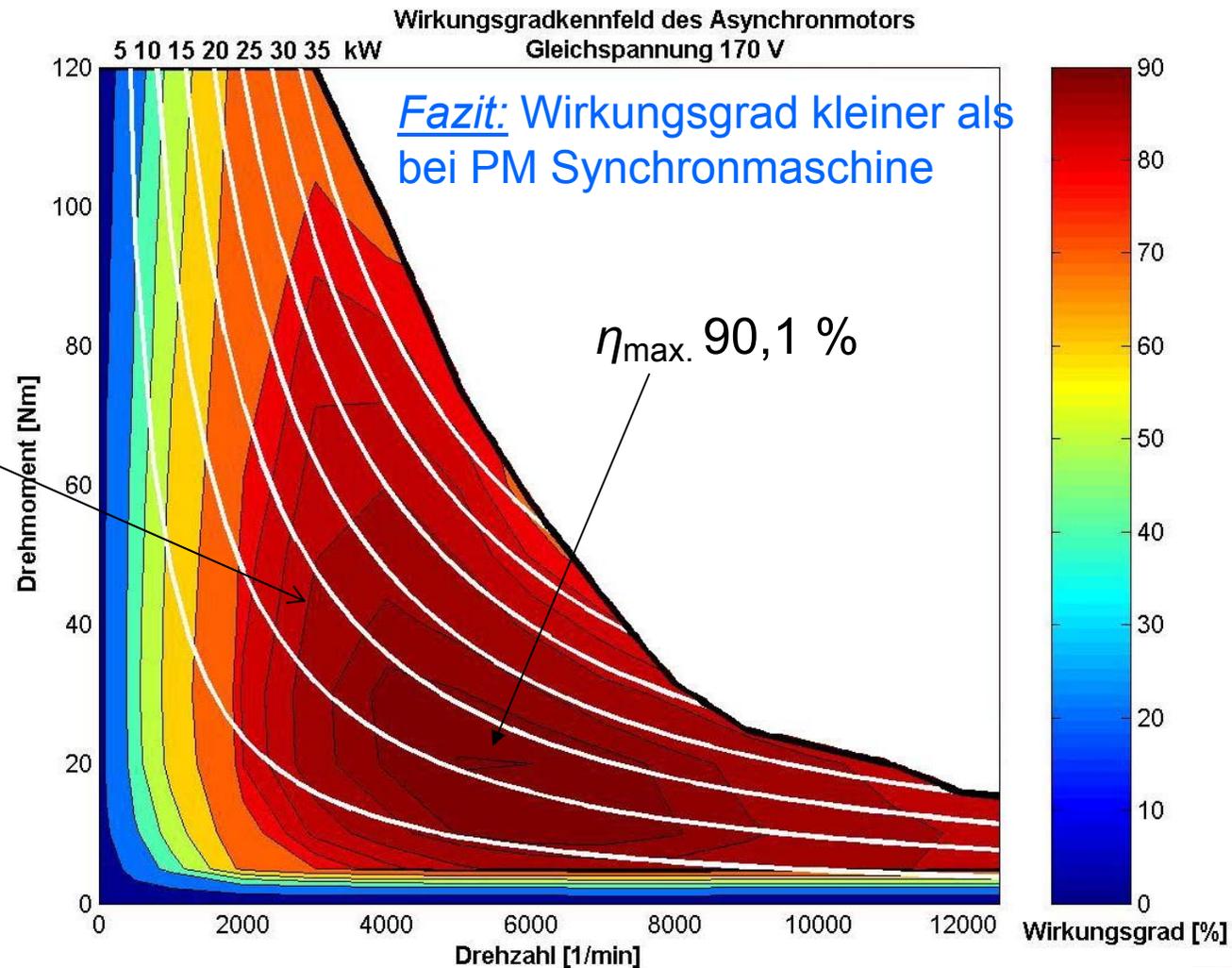


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Motor:  
ASM M2**

$\eta_{\max.} 88,5\%$   
Bei  
 $2800\text{min}^{-1}$ ,  $50\text{ Nm}$

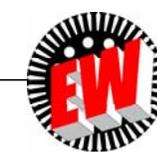
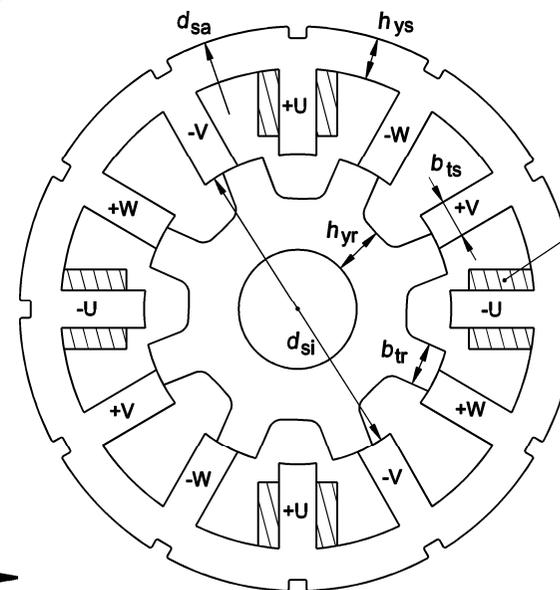
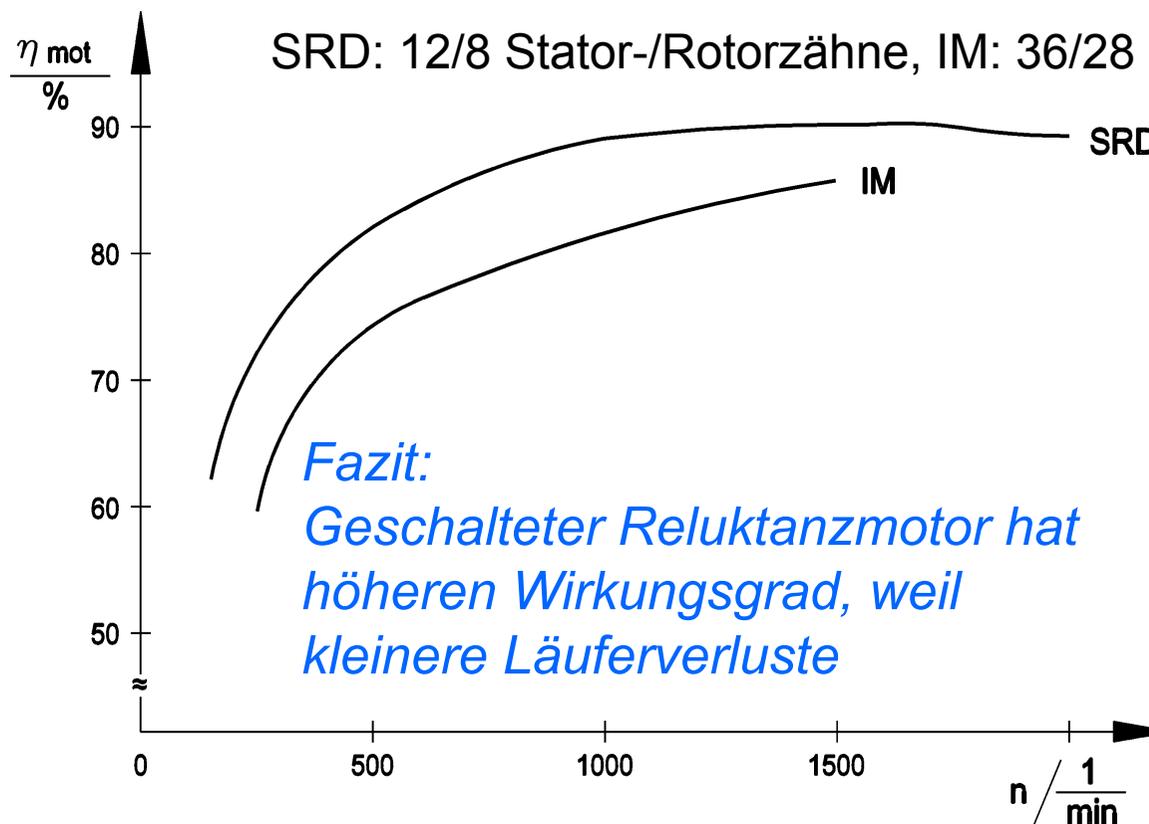
Quelle: Daimler,  
TSA/DDr. Neudorfer



# 10. Verluste: Beispiel: Wirkungsgrad: Geschaltete Reluktanzmaschine vs. Asynchronmaschine

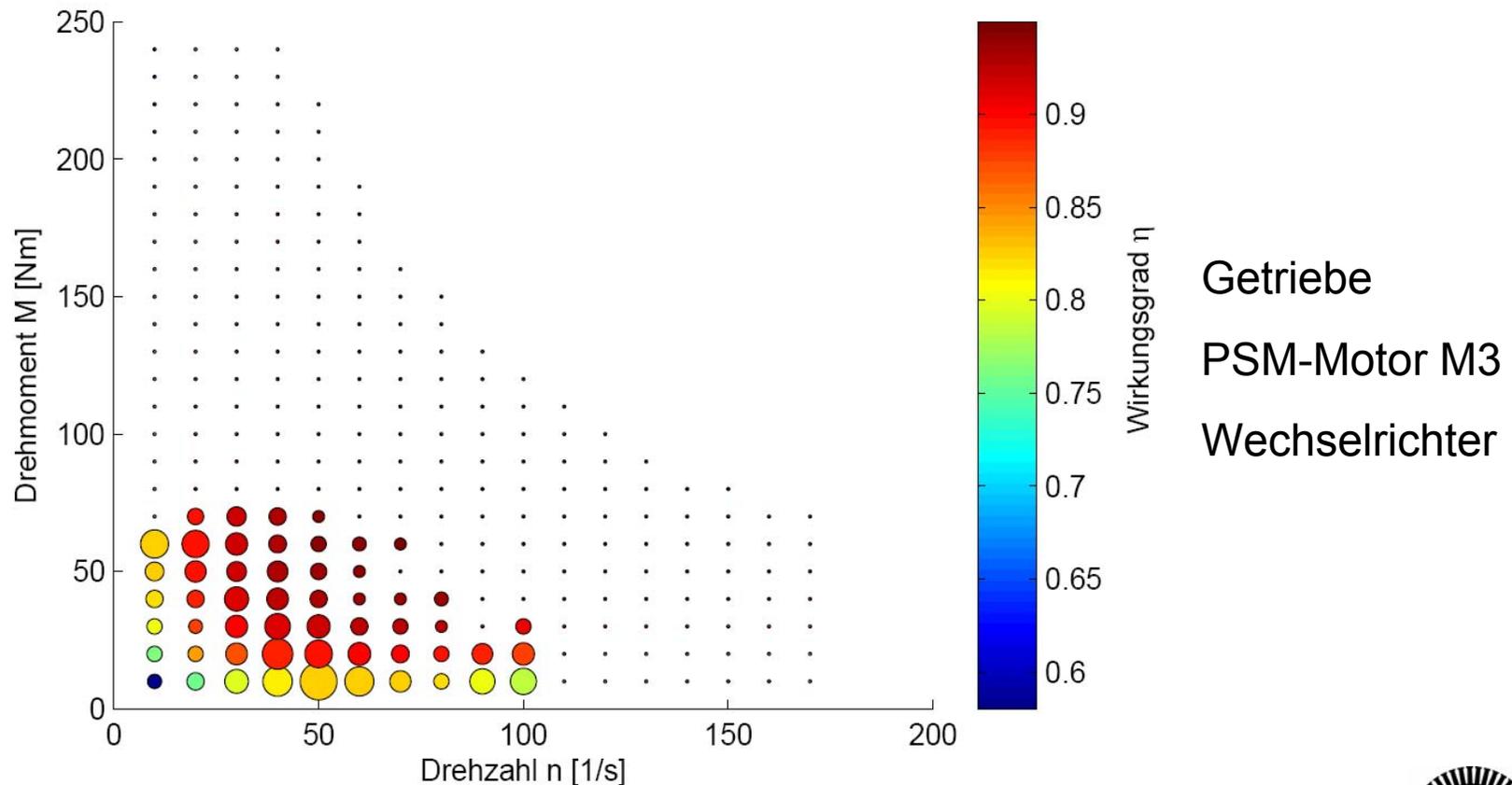


Vergleich: Geschalteter Reluktanzmotor (SRD) mit umrichter gespeistem Norm-Asynchronmotor (IM): gleiche Außenabmessung & Oberflächenkühlung, gleiches Drehmoment 54 Nm, vierpolig, 3-phasig: 54 Nm, 100 K Wicklungserwärmung



# 10. Verluste: Beispiel: E-Auto: Häufigkeit der vorkommenden Wirkungsgrade im FTP-72 Zyklus

- Fläche der Punkte = Maß für Aufenthaltshäufigkeit
- Farbverlauf = Maß für Wirkungsgrad

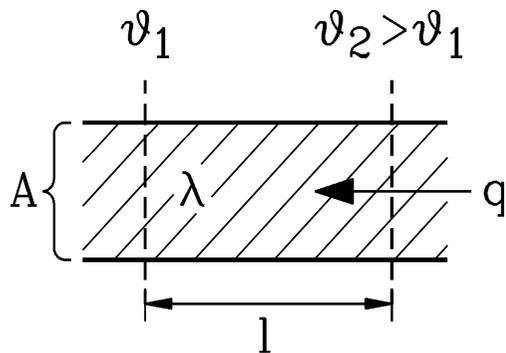


# 10. Erwärmung: Wärmewiderstände – Wärmeleitung

*Wärmewiderstand:*  $\Delta\vartheta = R_{th} P_{th}$

Elektrische Stromdichte  $J$  entspricht **Wärmestromdichte**  $q = P_{th}/A$

Gesetz der Wärmeleitung: **Fourier**  $\frac{P_{th}}{A} = \lambda_{th} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) / l$   $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$

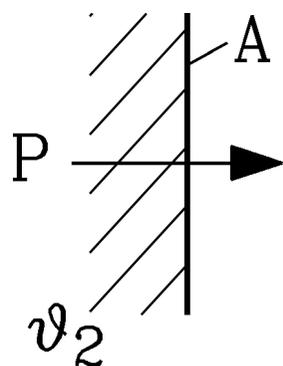


$$R_{th} = \frac{l}{\lambda_{th} A}$$

<b>Material</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda_{th}</math> W/(m·K)</b>
<b>Luft: 20° / 50° / 100°C, 1 bar</b>	<b>0.024 / 0.028 / 0.031</b>
<b>Kupfer</b>	<b>380</b>
<b>Eisen</b>	<b>80</b>
<b>Eisenblechpaket: In Blechrichtung Quer zur Blechrichtung</b>	<b>20 ... 60 0.5 ... 1.2</b>
<b>Isolationsmaterial</b>	<b>0.2</b>
<b>Epoxidharz</b>	<b>1</b>

# 10. Erwärmung: Konvektion

**Wärmeübergangszahl  $\alpha$**  beschreibt den Wärmeübergang von der heißen Oberfläche in das Kühlmedium durch Wärmetransport ("Konvektion")



$$v_1 < v_2$$

$$\frac{P_{th}}{A} = \alpha \cdot \Delta\vartheta$$

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha A}$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$$

<b>Kühlmittelbewegung (Luft)</b>	<b><math>\alpha</math> in <math>W/(m^2K)</math>, <math>v</math> in <math>m/s</math></b>
Nahezu unbewegte Luft ( $v = 0 \dots 0.5 \text{ m/s}$ )	8
Bewegte Luft über blanker Metalloberfläche	$\alpha = 15v^{2/3}$
Bewegte Luft über isolierten Spulen	$\alpha = 8v^{3/4}$



# 10. Erwärmung: Strahlung

**Wärmestrahlung** benötigt kein Medium für den Wärmetransport:

- Abgestrahlte Wärmeleistung  $P_{th}$  von der Heißeite ( $T_1$ ) zur Kaltseite ( $T_2 < T_1$ ) mit der Oberfläche  $A$
- $T_1$  ,  $T_2$  als absolute Temperaturwerte in K
- **Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann:**

$$\frac{P_{th}}{A} = c_s (T_1^4 - T_2^4)$$

# 10. Erwärmung: Strahlung

## Beispiel:

-Strahlungskonstante: “grauer Körper”:  $c_s = 5 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

-Temperaturdifferenz:  $\Delta\vartheta = 80 \text{ K}$ ,

-Umgebungstemperatur  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$T_2 = 20 + 273.15 = 293.15 \text{ K}$$

$$T_1 = T_2 + \Delta\vartheta = 293.15 + 80 = 373.15 \text{ K}$$

-Wärmestromdichte:  $q = \frac{P_{th}}{A} = c_s (T_1^4 - T_2^4) = 5 \cdot 10^{-8} \cdot (373.15^4 - 293.15^4) = \underline{\underline{600.1 \text{ W} / \text{m}^2}}$

-Wie groß ist die **äquivalente Wärmeübergangszahl für Konvektion** bei gleichem Wärmestrom ?

$$\alpha = \frac{P_{th}}{A \cdot \Delta\vartheta} = \frac{q}{\Delta\vartheta} = \frac{600.1}{80} = \underline{\underline{7.5 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})}}$$

-**Fazit:** Die Bedeutung der Strahlung ist bei forcierter Kühlung klein!

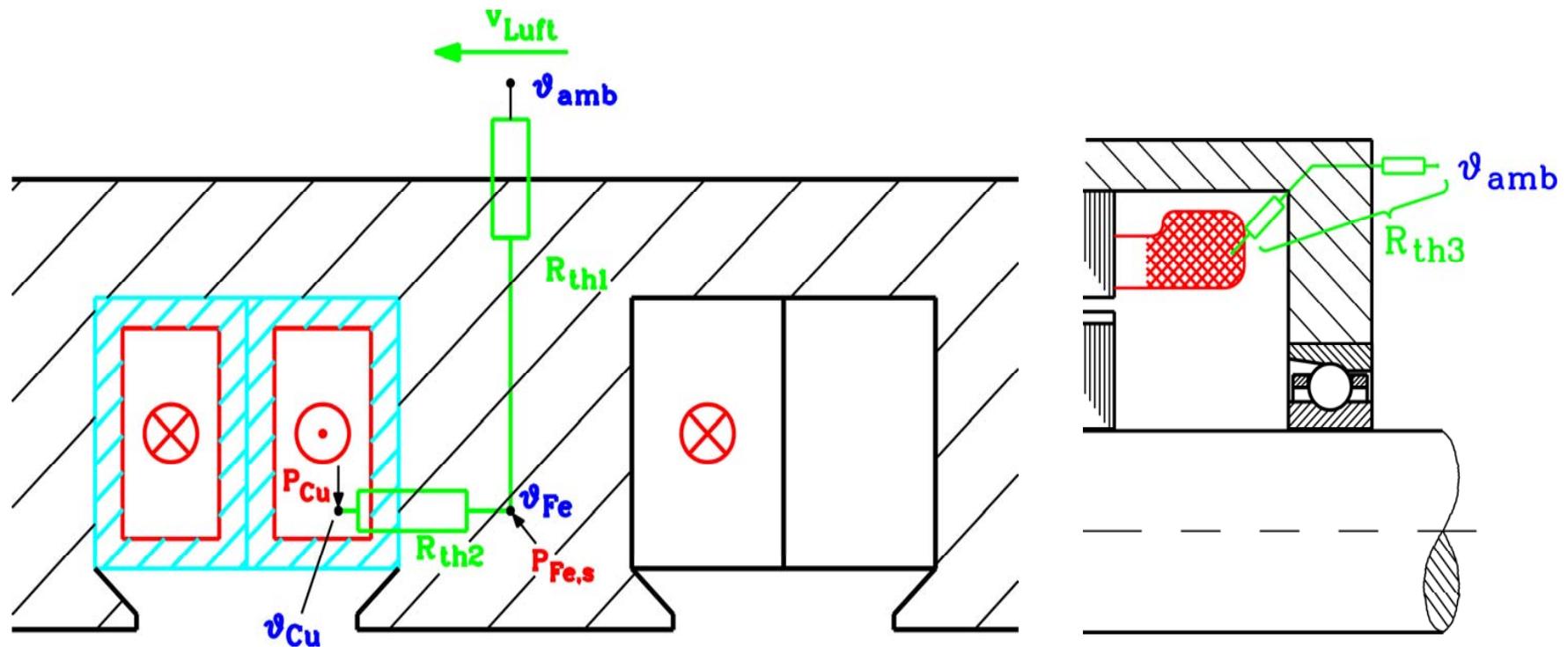
# 10. Erwärmung: Wärmespeicherung – Aufheizen und Abkühlen

Gespeicherte Wärmeenergie:  $mc \frac{d\Delta\vartheta}{dt} = P_{th}$

<b>Material</b>	<b>Spezifische Wärmekapazität <math>c</math> Ws/(kg·K)</b>	<b>Massendichte <math>\gamma</math> kg/m<sup>3</sup></b>
Luft (bei konstantem Druck)	1009	1.226 (at 25 °C)
Kupfer	388.5	8900
Eisen	502	7850
Epoxidharz	1320 ... 1450	1500

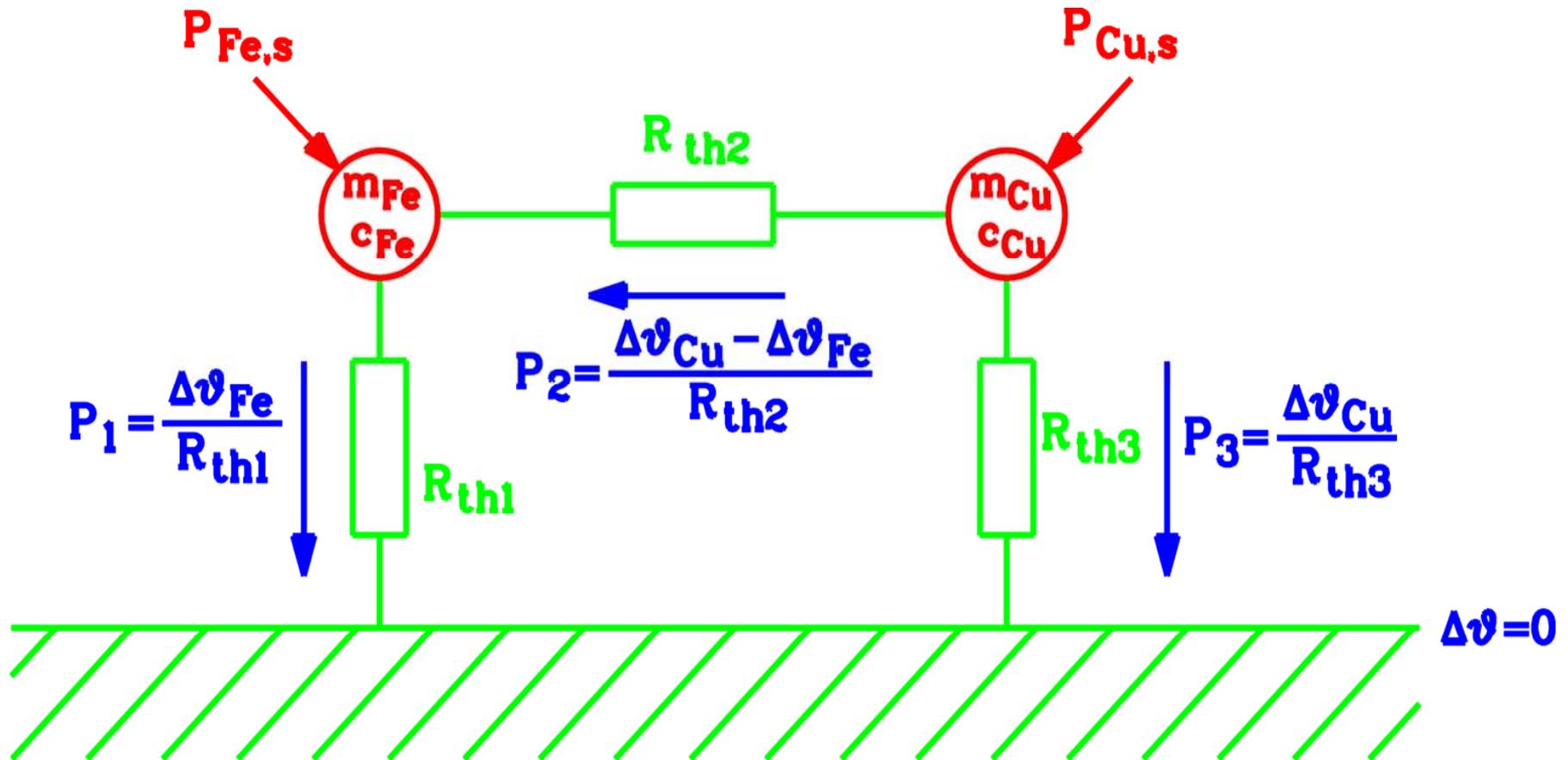
# 10. Erwärmung: Wärmequellennetzwerk

Vereinfachtes Wärmequellennetz – Keine Rotorverluste, keine Wärmestrom aus dem Rotor



Nur Stromwärme- und Ummagnetisierungsverluste im Stator

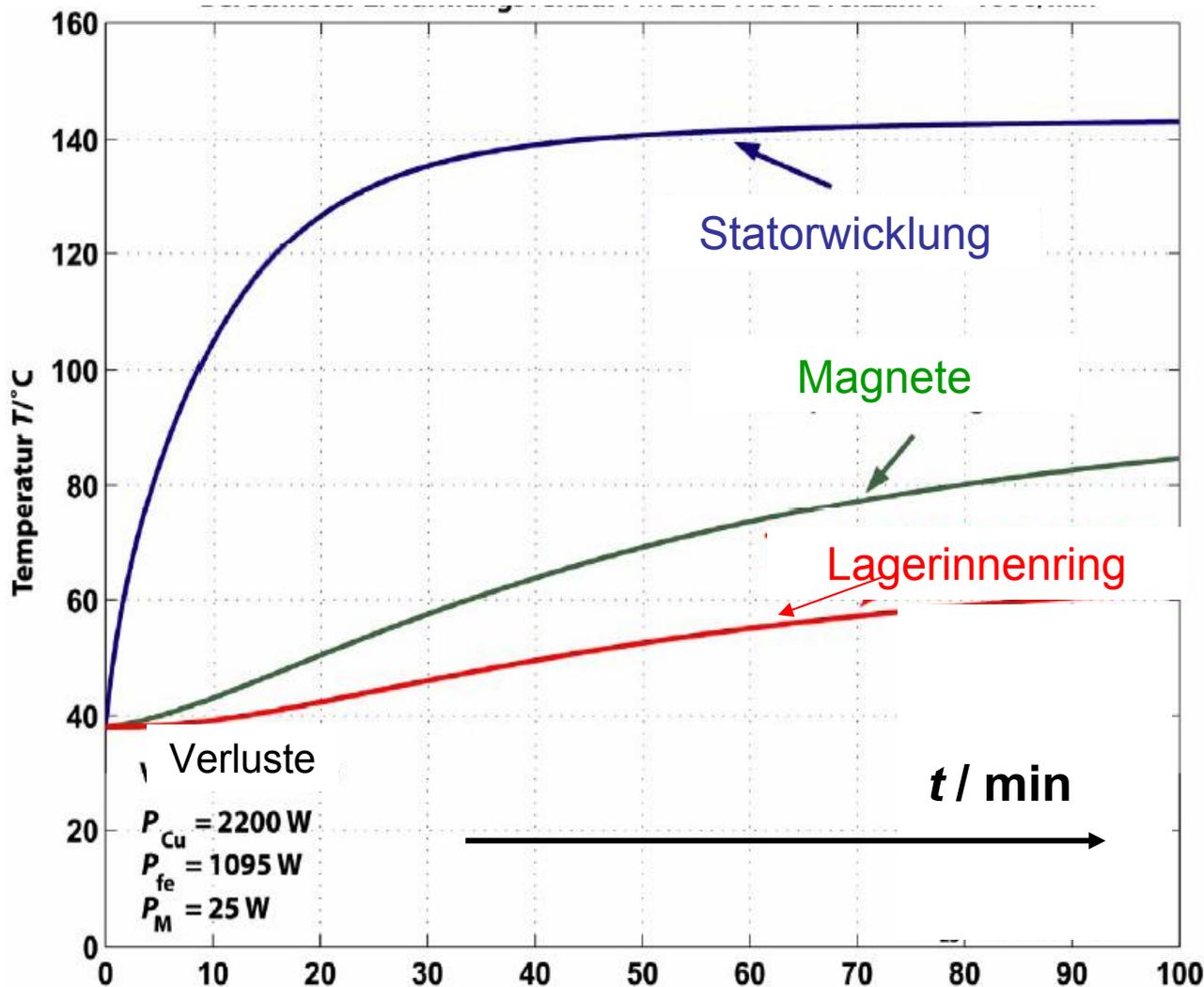
# 10. Erwärmung: Wärmequellennetzwerk



Nur Stromwärme- und Ummagnetisierungsverluste im Stator

# 10. Erwärmung:

## Beispiel: Berechnete Temperaturanstiege in 7 Knoten



16-poliger PM-Synchronmotor A, Oberflächenmagnete, konzentrierte Wicklung,  $q = \frac{1}{2}$ , Flüssigkeitsmantelkühlung, 45 kW, 1000/min

### Wärmewiderstände:

$$\begin{aligned} R_G &= 0.001 \text{ K/W} \\ R_B &= 0.0233 \text{ K/W} \\ R_W &= 0.0128 \text{ K/W} \\ R_{\text{RS}} &= 0.26 \text{ K/W} \\ R_R &= 0.031 \text{ K/W} \\ R_L &= 0.238 \text{ K/W} \\ R_{\text{We}} &= 0.219 \text{ K/W} \\ R_{\text{LS}} &= 0,0299 \text{ K/W} \end{aligned}$$

# 10. Kühlung:

## Kühlungsvarianten

- Kühlmedium meist **Luft**

<b>Selbstkühlung</b>	<b>Eigenkühlung</b>	<b>Fremdkühlung</b>
kein Lüfter	Wellenlüfter	Fremdlüfter
robust	Standard	Lüftermotor
geringe Motorausnützung, <i>n</i> -abhängig	Drehzahlabhängige Motorausnützung	Drehzahlunabhängige Motorausnützung
z. B.: PM-Servo- Motoren	z. B. Norm- Asynchronmotoren	z. B. Hochwertige <i>n</i> - variable Antriebe

# 10. Kühlung:

## Kühlungsvarianten

Oberflächenkühlung	Innenkühlung
indirekte Kühlung	direkte Kühlung
geringere Motorausnützung	erhöhte Motorausnützung
keine Verschmutzung der Wicklung	Verschmutzungsgefahr der Wicklung
hohe Schutzart	niedrige Schutzart (außer bei Rohranschluss)

- **Alternativ zu Luft:**

- Indirekte Flüssigkeitskühlung (Wasser, Öl): Gehäusemantelkühlung, selten Wellenkühlung

- Direkte Flüssigkeitskühlung: Sprühölkühlung (Wickelköpfe), hohlgebohrte Leiter (teuer)

# 10. Kühlung:

## Bezeichnung der Kühlarten: (Norm IEC 60034-6)

IC<sub>xy</sub>: International Cooling

x: 1. Ziffer: beschreibt die Art des Kühlmittelumlaufs

y: 2. Ziffer: beschreibt die Art des Antriebs für die Bewegung des Kühlmittels

### Beispiele:

IC01: Motor ist offen (Innenkühlung),

Wellen-Lüfter (Eigenkühlung)

IC06: Motor ist offen (Innenkühlung),  
(Fremdkühlung)

angebauter Fremdlüfter

IC41: Motor geschlossen (Oberflächenkühlg.)

Wellen-Lüfter (Eigenkühlung)

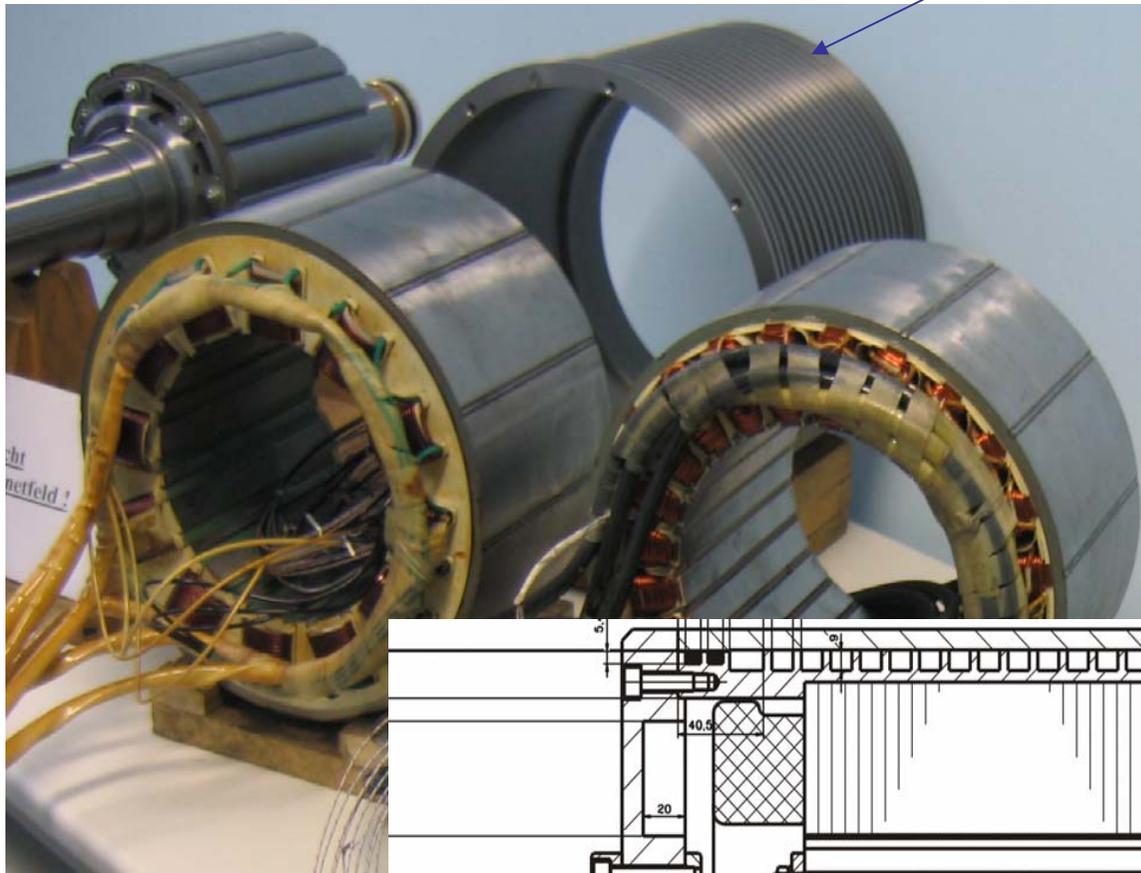
IC86: Motor mit aufgebautem Wärmetauscher  
(Fremdkühlung)

angebauter Fremdlüfter

# 10. Kühlung:

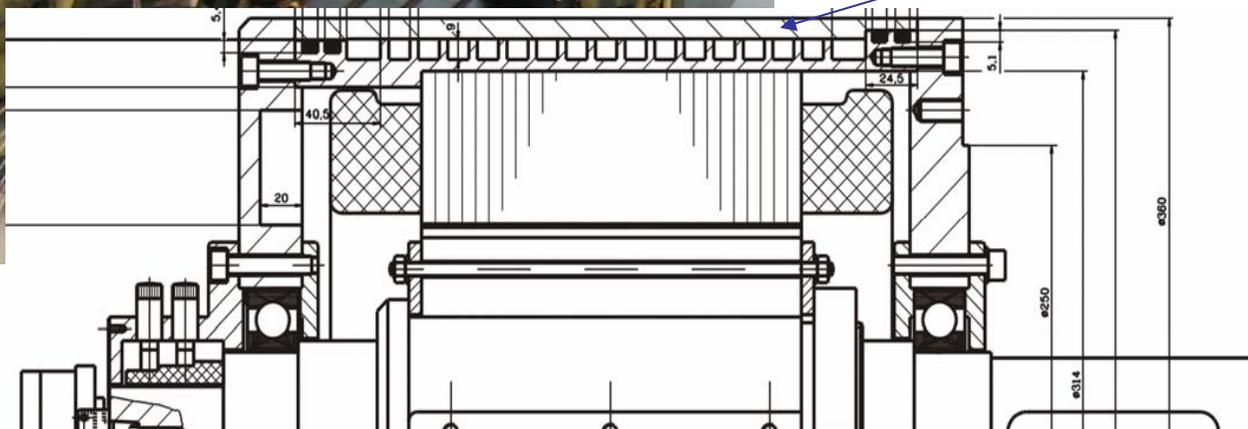
## Beispiel: Wassermantelkühlung

Spiralwasserkanal



- Spiralwasserkanal im Statorgehäuse
- Geschlossene Maschine mit intensiver Stator Kühlung
- Gut bei PM-Synchronmaschinen, da die Rotorverluste klein sind.

Spiralwasserkanal



---

# Inhalt

## 11. Sensorik



# 11. Sensorik

- **Temperatursensoren (kontinuierlich: Pt100, KTY):** Überwachung der Ständerwicklung und ggf. für Rotor temperaturmodell z. B. für feldorientierten Betrieb der Asynchronmaschine (meist nur in einem Strang aus Kostengründen: Problem bei Speisung mit Frequenz „Null“: Gefahr der Überlastung eines Strangs, in dem nicht gemessen wird). Fallweise nur Grenzwertwächter: Heissleiter, Kaltleiter, Bimetall-Relais.
- **Rotorlagegeber:** Kommutierung der Ströme bei PM-Synchronmaschinen und geschalteten Reluktanzmaschinen für den läuferorientierten Betrieb
- **Drehzahlmessung:** Für feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine auch bei kleinen Drehzahlen
- Rotorlagegeber und Drehzahlmesser entfallen bei der „sensorlosen“ Regelung
- **Strommessung** im Umrichter für den geregelten Betrieb (bei Sternschaltung „2 aus 3“ gemessen)
- Grundschriftungs-Spannungs“berechnung“ aus den Pulsmusterdaten und Grundschriftungs-Frequenz-Berechnung

# 11. Sensorik



## - Rotorlagegeber:

Resolver: Magnetische Winkellagemessung über zwei um 90 Grad versetzte Spulensystem

Inkrementalgeber (meist optisch): benötigt Nullspur für Suche der Ausgangslage nach dem Einschalten

Absolutwertgeber (meist optisch): selten (teurer), erkennt Läuferposition sofort nach dem Einschalten

Magnetische Inkremental-Lagegeber mit PM-Läufer oder mit ferromagnetischem Zahnrad

## - Drehzahlmessung:

Meist aus inkrementeller Lagemessung berechnet

Fallweise auch bürstenlose Tachos im Einsatz



---

# Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

---



**Danke für Ihre Aufmerksamkeit !**



# Literatur zu: Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Vorlesungsskript, TU Darmstadt, 2009, mit Aufgabensammlung und Lösungen**

**Binder, A.: Motor development for electrical drive systems (englisch), Vorlesungsskript, TU Darmstadt, 2009, mit Aufgabensammlung und Lösungen**

## ***Einführende Werke:***

**Fischer, R.: Elektrische Maschinen, Hanser, München, 12. Auflage, 2004**

**Brosch, P.: Moderne Stromrichterantriebe – Leistungselektronik und Maschinen, Vogel-Verlag, 3. Auflage 1998**

**Giersch, H.-U.; Harthus, H.; Vogelsang, N.: Elektrische Maschinen, Teubner, Stuttgart, 4. Auflage, 1998**

## ***Vertiefende Literatur:***

**Müller, G.; Ponick, B.: Elektrische Maschinen – Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 9. Aufl., 2006**

**Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Grundlagen, Springer, Berlin 2000**

**Kleinrath, H.: Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen, Springer-Verlag, Wien, 1980**

