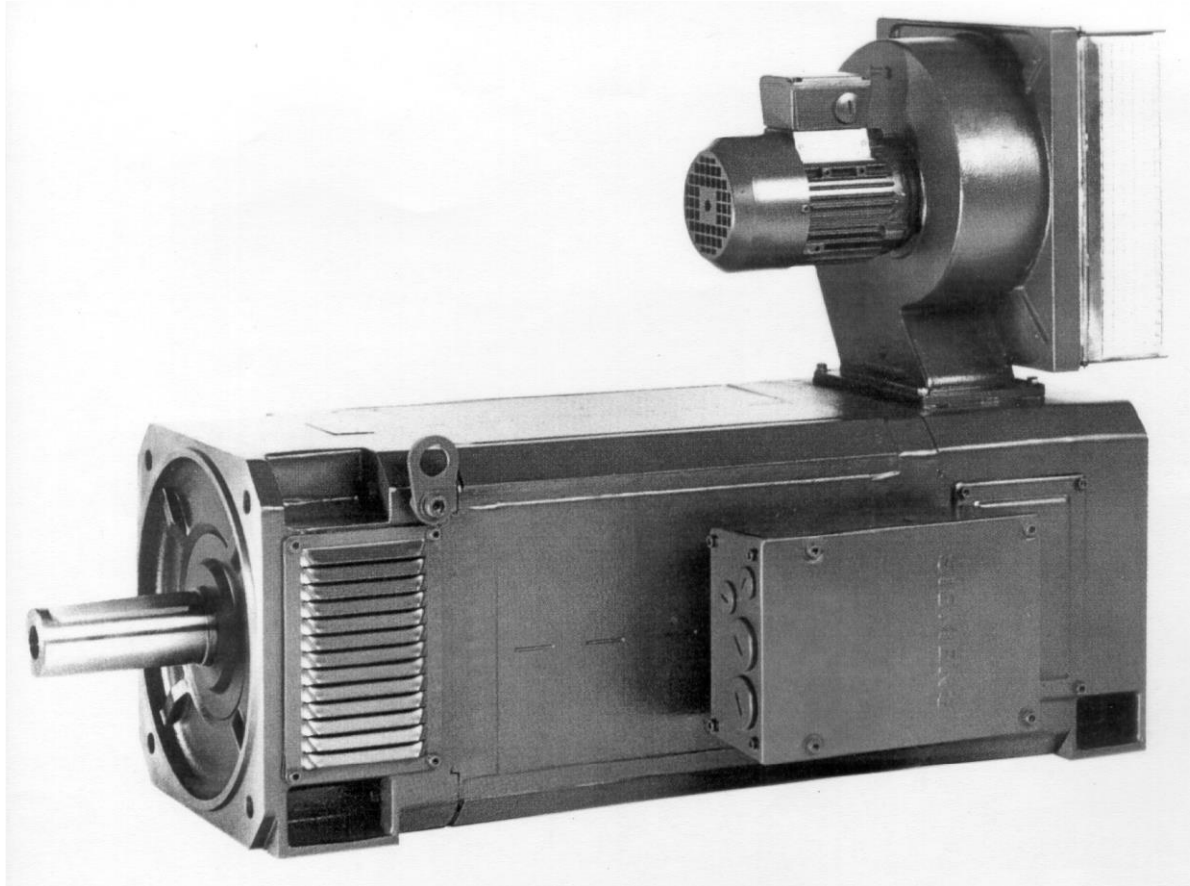


## Vorlesungsinhalt

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

# 10. Gleichstromantriebe



Quelle: Siemens AG

## 10. Gleichstromantriebe

- 10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine
- 10.2 Ankerwicklungen
- 10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment
- 10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung
- 10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole
- 10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine
- 10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb
- 10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine

# Einsatzgebiete von Gleichstrommaschinen mit Stromrichterspeisung

## Drehzahlveränderbare Antriebe z. B. mit geregelter Drehzahl:

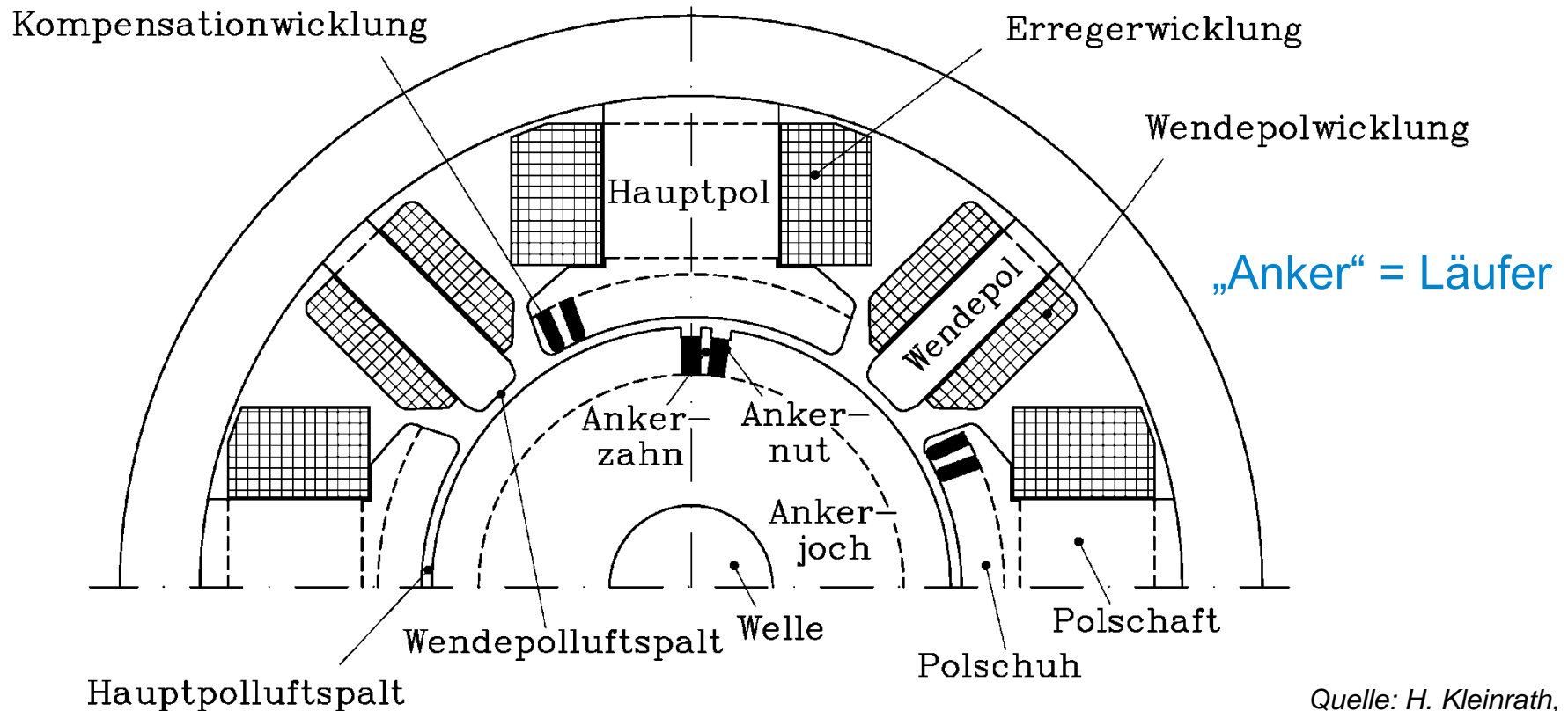
- **in der Industrie** z. B. in Walzwerken, Prüfständen, Kranen, für Drahtziehen, Stanzen, Kunststoffspritzguss, Folienrecken,...
- **in der Traktion** als U-Bahn-, Straßenbahn- und Vollbahnmotoren, in E-Autos,
- **in Schiffen** als U-Boot-Antriebe,

## Drehzahlveränderbare Kleinmotoren:

- als **permanentmagneterregter Kleinmotor** in Automobilen (Fensterheber, Sitzversteller,..), als Tachogeneratoren,... (DC-Betrieb)
- als **ele. erregter Universalmotor** in vielen Haushaltsgeräten (AC-Betrieb).



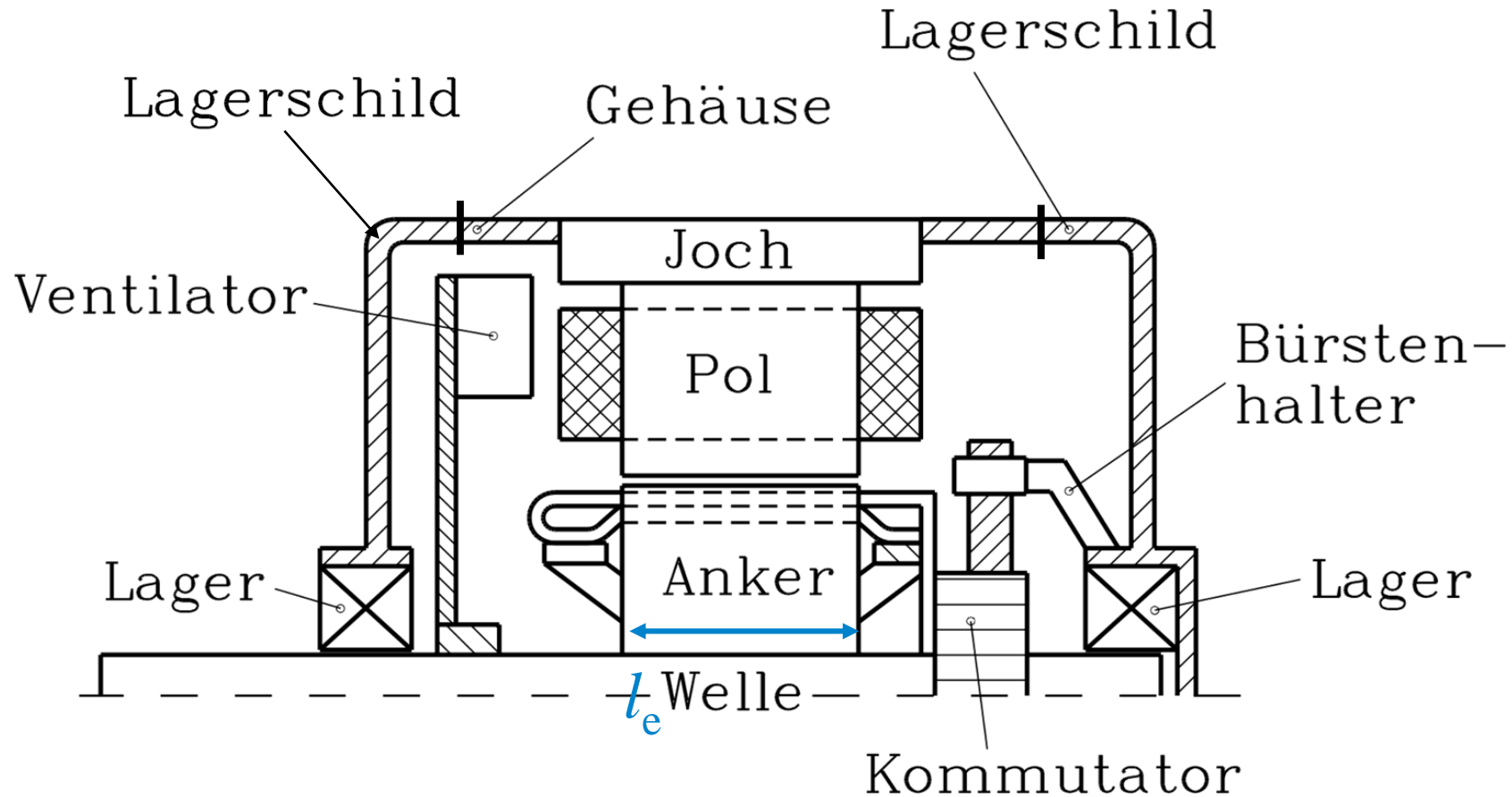
# Vierpolige Gleichstrommaschine – Querschnitt



Quelle: H. Kleinrath,  
Studententext

**Elektrische Felderregung: N - S - N - S („Quadrupol-Feld“)**

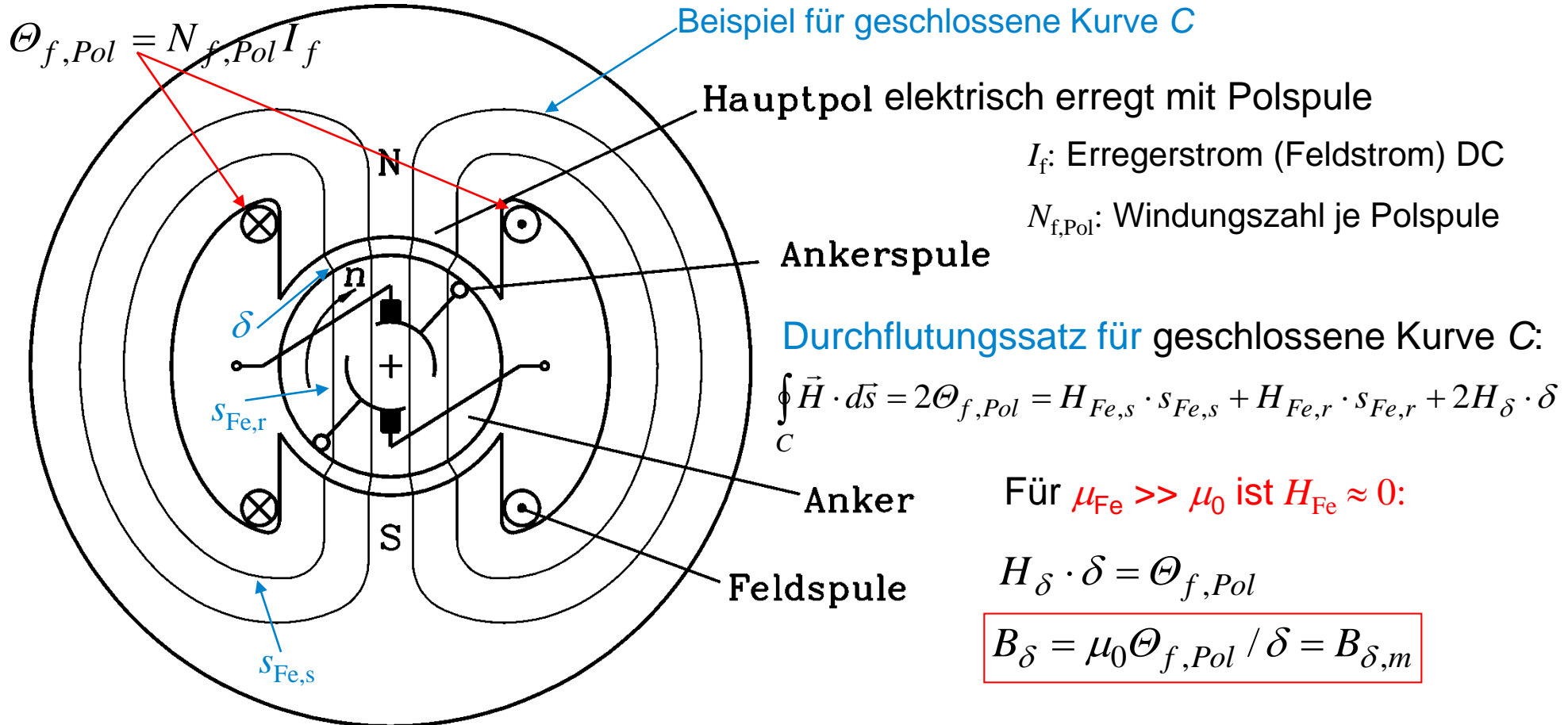
# Gleichstrommaschine – Längsschnitt



Kommutator wird auch „Kollektor“ genannt!

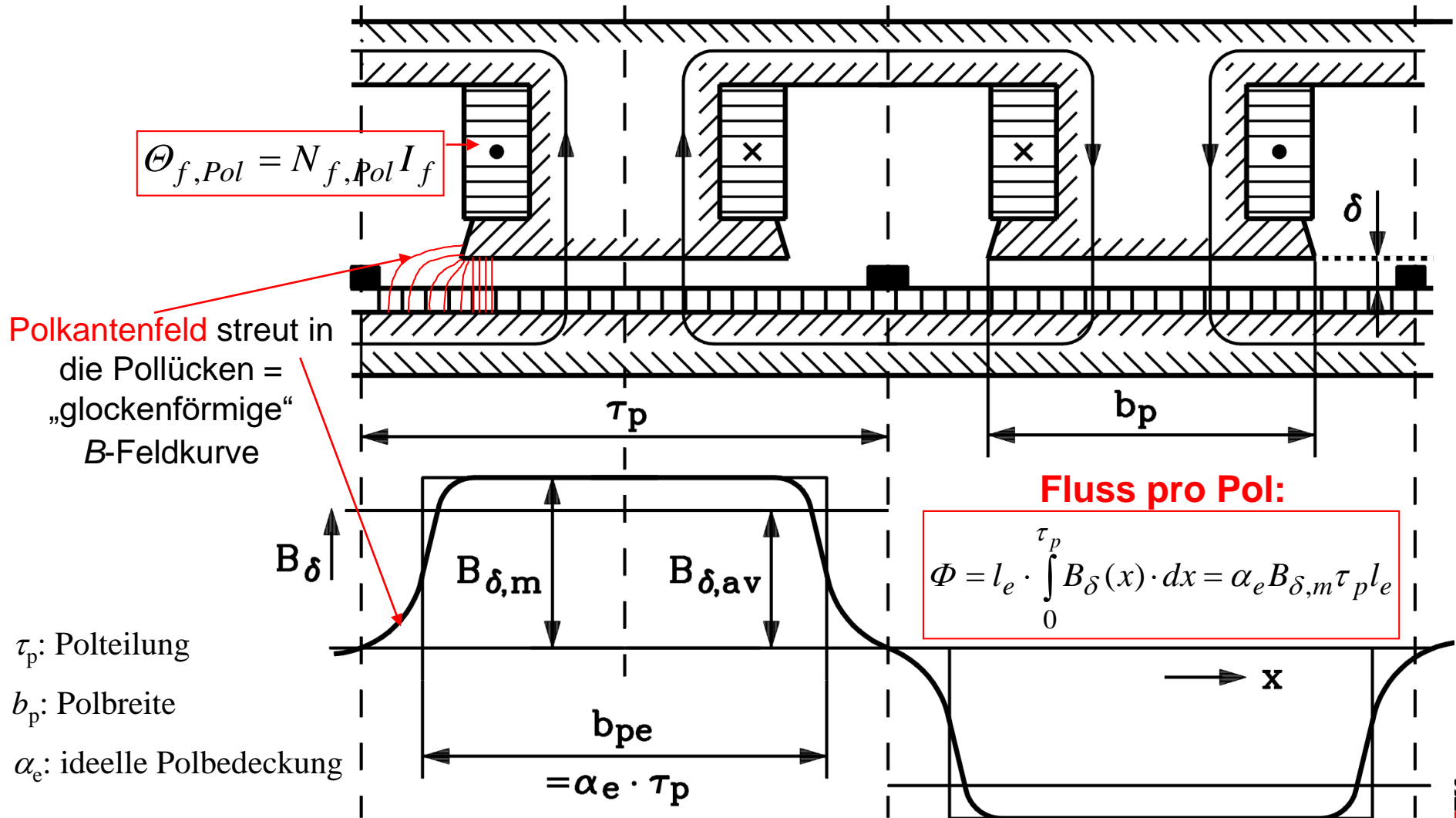
Quelle: H. Kleinrath,  
Studententext

# Zweipoliges Erregerfeld der Gleichstrommaschine

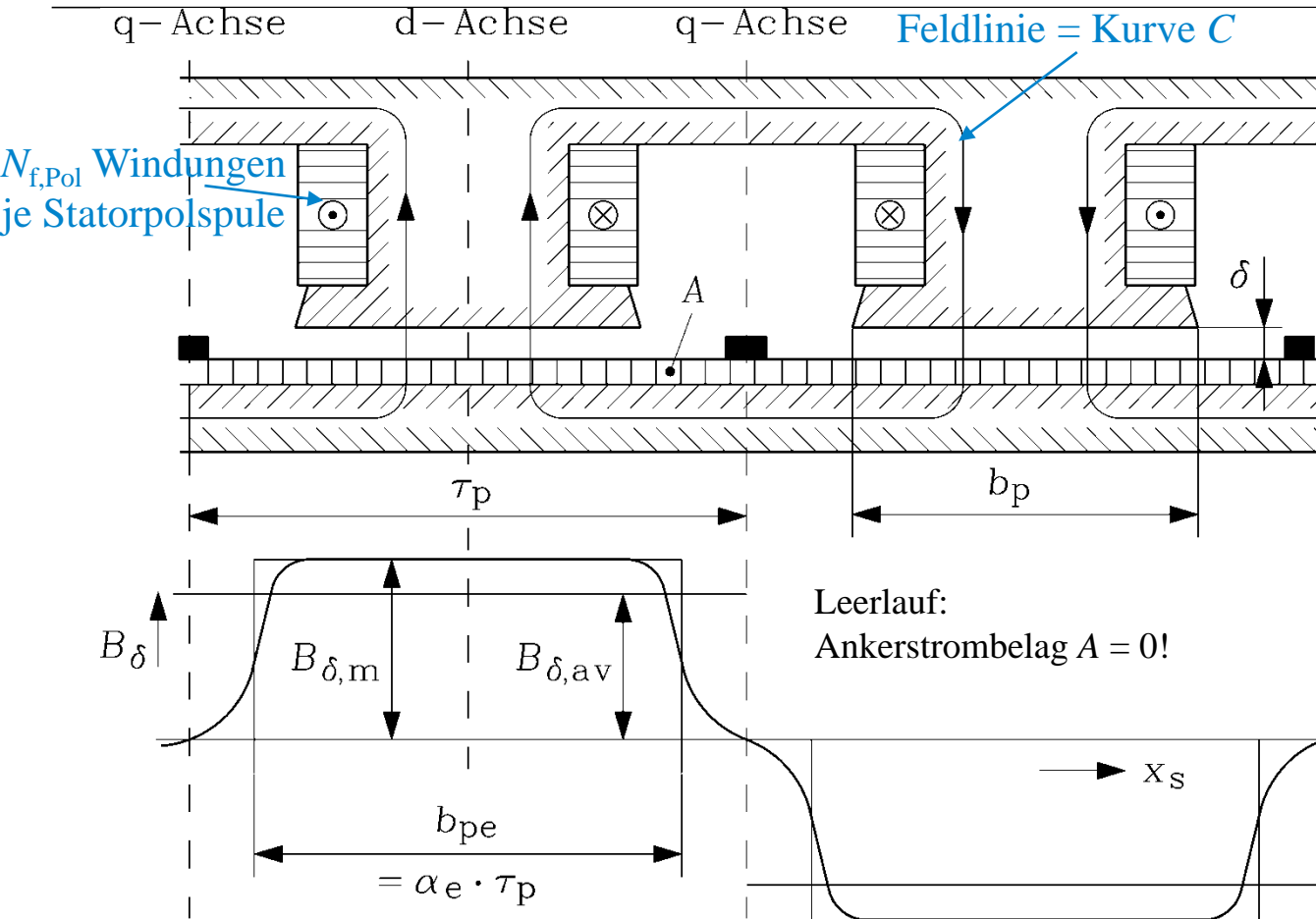


- Zwei Hauptpole ( $2p = 2$ ,  $p$ : Polpaarzahl) erregen Luftspaltfeld  $B_\delta(x)$ , eine Ankerspule rotiert mit Drehzahl  $n$ , zwei Kohlebürsten (+, -) als Anschlüsse

# Luftspaltfeldverteilung unter den Hauptpolen



# Elektrische Statorfelderregung



Ständerfeld im Luftspalt, elektrisch erregt  
durch Gleichstrom  $I_f$

Durchflutungssatz (Kurve C):

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta = 2N_{f,Pol}I_f$$

Eisenpermeabilität sehr groß  
(„schwach“ gesättigt):

$$\mu_{Fe} \gg \mu_0 : H_{Fe} \ll H_{\delta}$$

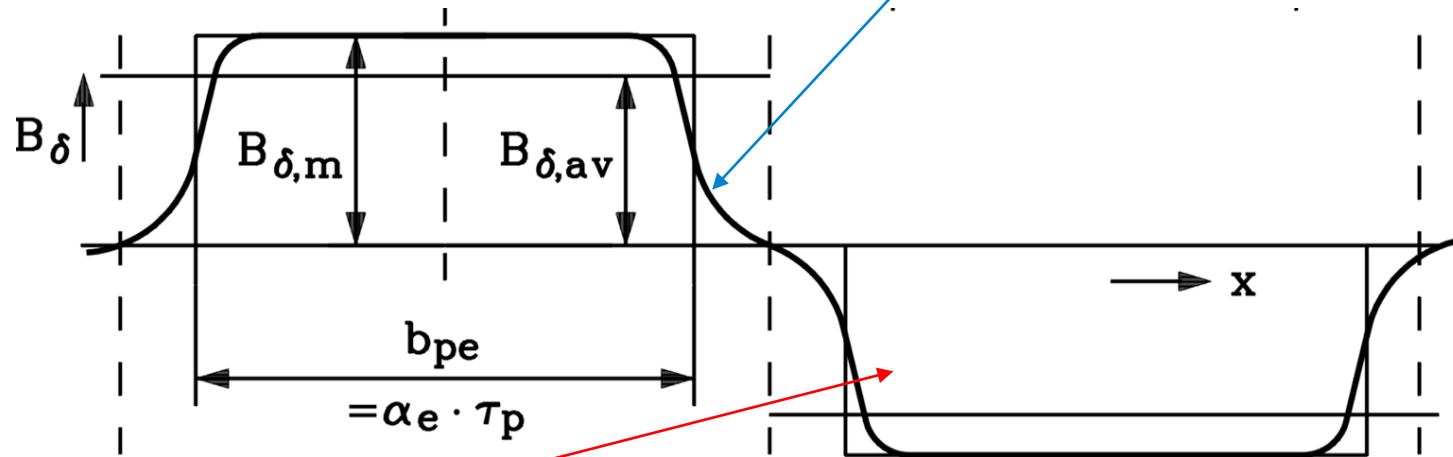
$$2H_{\delta}(x) \cdot \delta(x) = 2N_{f,Pol}I_f$$

$$H_{\delta,m} = \frac{N_{f,Pol}I_f}{\delta}$$

$$B_{\delta,m} = \mu_0 \frac{N_{f,Pol}I_f}{\delta}$$

# Magnetischer Statorfluss pro Pol

Radialkomponente der Flussdichte im Luftspalt



**Polfluss:**  $\underline{\Phi} = l_e \cdot \int_0^{\tau_p} B_\delta(x) \cdot dx = \underline{\alpha_e \cdot \tau_p \cdot l_e \cdot B_{\delta,m}} = b_{pe} \cdot l_e \cdot B_{\delta,m} = \tau_p \cdot l_e \cdot B_{\delta,av}$

Polbreite:  $b_p$

äquivalente Polbreite:  $b_{pe} = \alpha_e \cdot \tau_p$

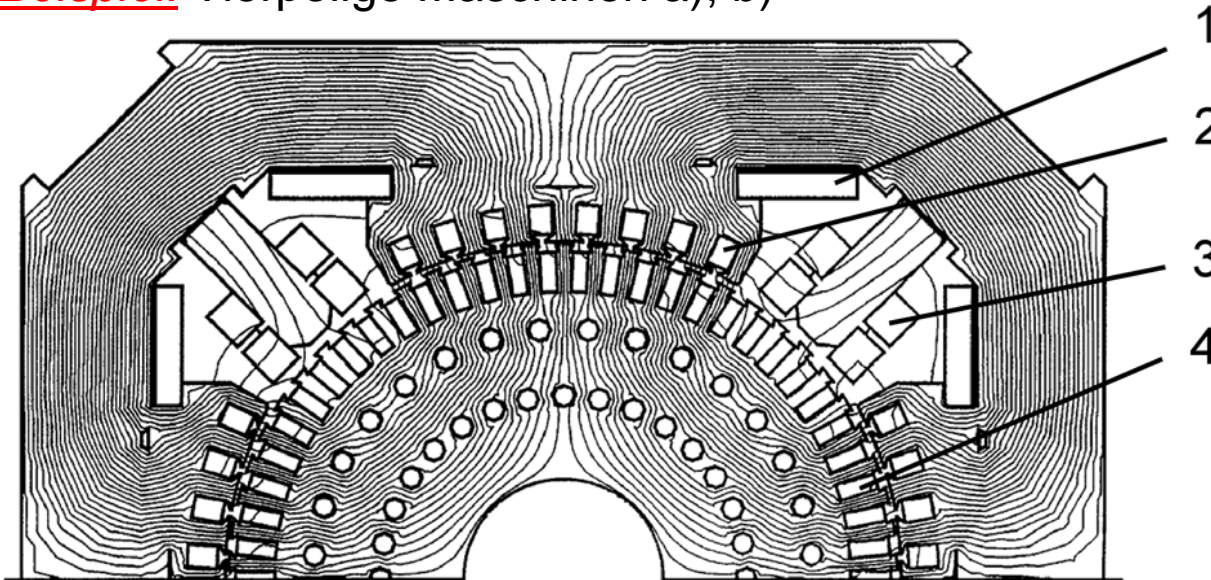
ideelle Polbedeckung:  $\alpha_e$

mittlere Flussdichte:  $B_{\delta,av} = \alpha_e \cdot B_{\delta,m}$

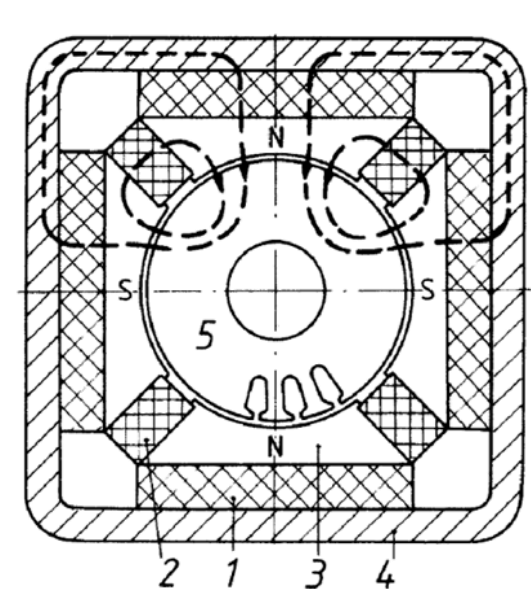
maximale Flussdichte:  $B_{\delta,m}$

# Gleichstrommaschine – Felderregungsarten

**Beispiel:** Vierpolige Maschinen a), b)



Quelle: ABB, Schweden



Quelle: Siemens AG

## a) Elektrische Felderregung

1: Feldspulen, 2: Kompensationswicklung

3: Wendepolwicklung, 4: Ankerwicklung

## b) Permanentmagneterregung

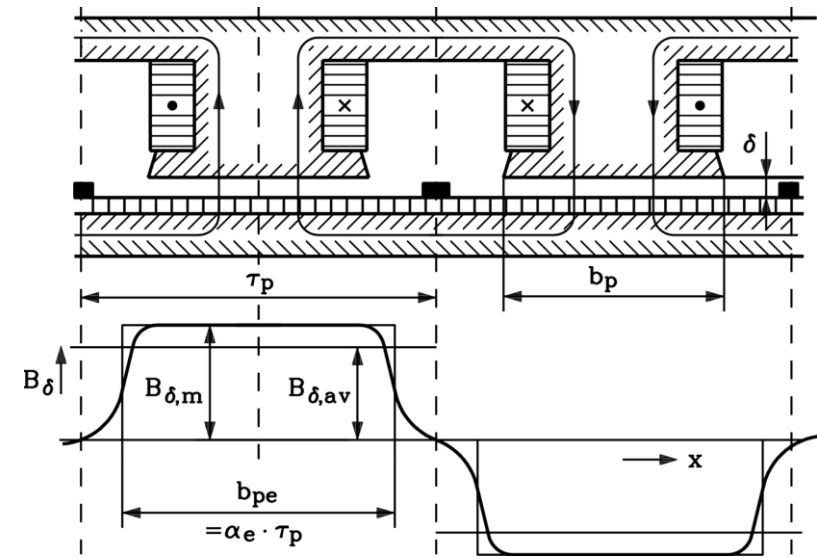
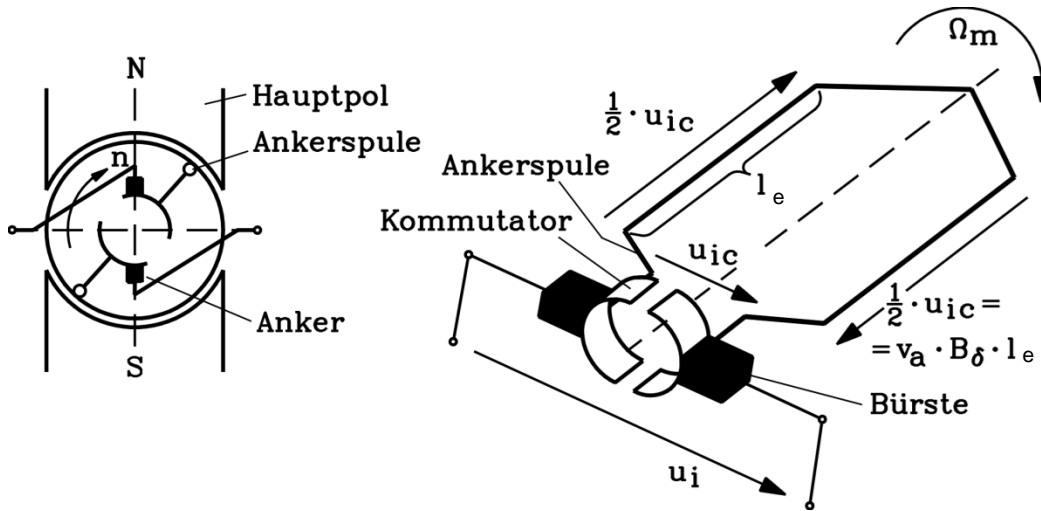
1, 2: Ferrit-Feldmagnete, 3: Polschuhblech,

4: Gehäuse als Jochrückschluss

5: Anker (Rotor)



# Gleichstrommaschine – Prinzipielle Funktionsweise



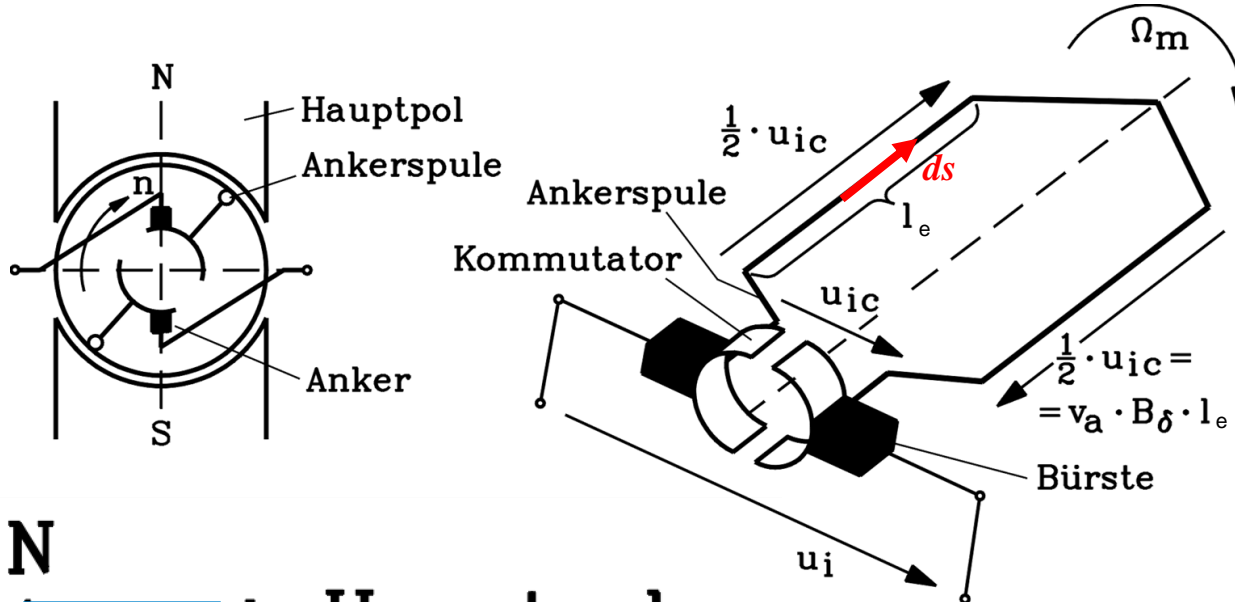
Ständerfeld im Luftspalt, elektrisch erregt

- Rotierende Läuferpule im Ständerfeld mit mechanischem Gleichrichter (Kommutator)
- In jede der bewegten Spulenseiten (Spulen-Windungszahl  $N_c$ , Länge  $l_e$ , Drehzahl  $n$ ) wird durch **Bewegungsinduktion** eine **Wechselspannung**  $u_{i,c}$  induziert:

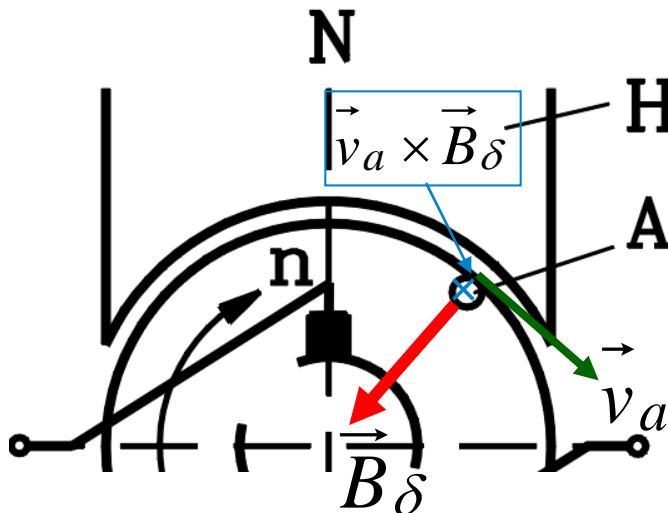
Spannungsamplitude  $\hat{U}_{i,c} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,m} \cdot N_c \cdot l_e$



# Bewegungsinduktion in eine Ankerspule



*Beispiel:*  $N_c = 1$

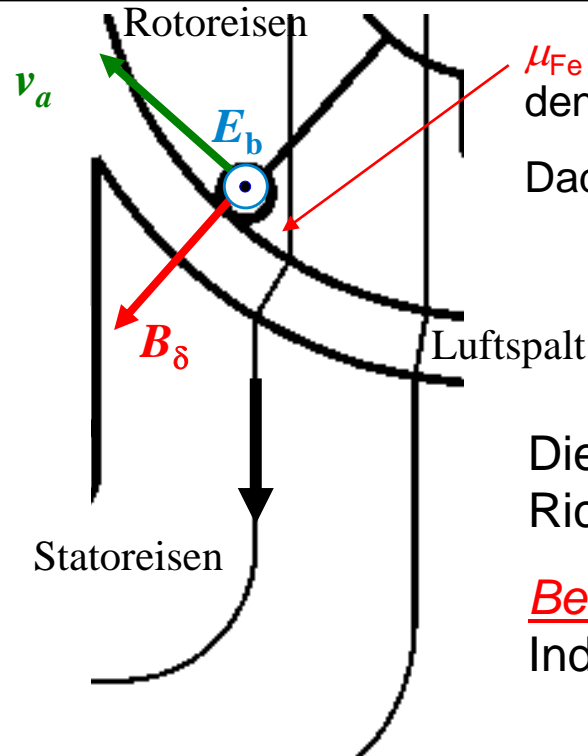


$$\vec{E}_b = \vec{v}_a \times \vec{B}_\delta$$

$$U_{ic} = 2 \int_0^{l_e} \vec{E}_b \cdot d\vec{s} = 2 \int_0^{l_e} (\vec{v}_a \times \vec{B}_\delta) \cdot d\vec{s} = 2 \cdot v_a \cdot B_\delta \cdot l_e$$

$$\vec{v}_a \perp \vec{B}_\delta \perp d\vec{s}$$

# Spannungsinduktion in bewegten Leiter



$\mu_{Fe} \gg \mu_0$ : B-Feldlinien treten (nahezu) senkrecht aus dem Eisen in den Luftspalt = radiale Feldrichtung.

Dadurch sind  $v_a$  und  $B_\delta$  senkrecht zueinander gerichtet

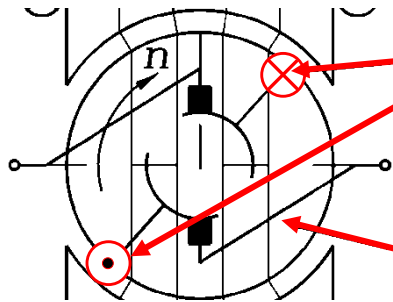
$$\vec{E}_b = \vec{v}_a \times \vec{B}_\delta \quad \vec{E}_b = v_a \cdot B_\delta \cdot \vec{e}_z$$

Die bewegungsinduzierte Feldstärke  $E_b$  ist in axiale Richtung (z-Achse) gerichtet!

**Beispiel:**  $N_c = 1$ :

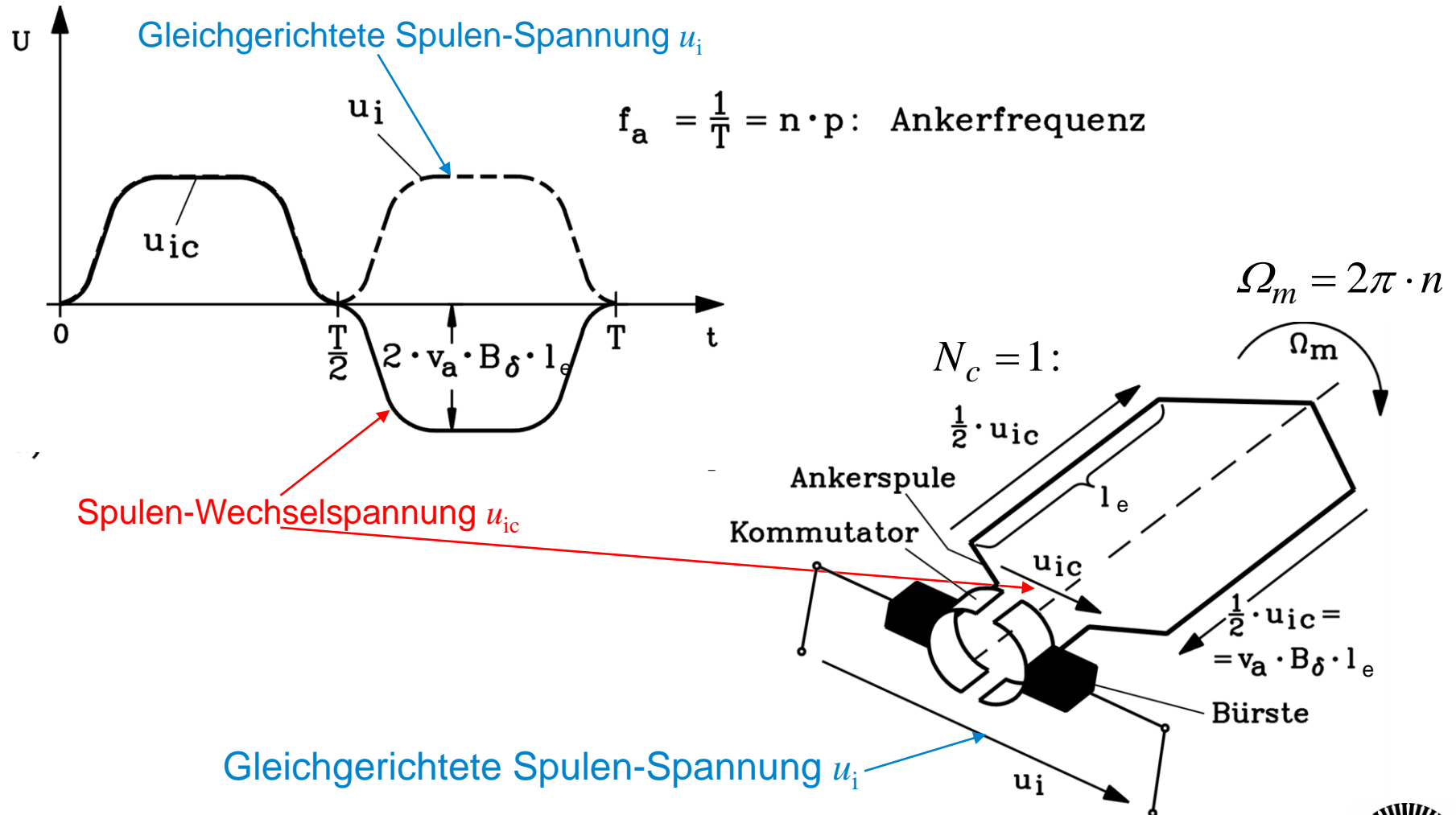
Induzierte Spannung je Spulenseite (Länge  $l_e$ ):

$$u_{i,c} / 2 = \int_0^{l_e} \vec{E}_b \cdot d\vec{s} = \int_0^{l_e} v_a \cdot B_\delta \cdot \vec{e}_z \cdot \vec{e}_z ds = v_a \cdot B_\delta \cdot l_e$$

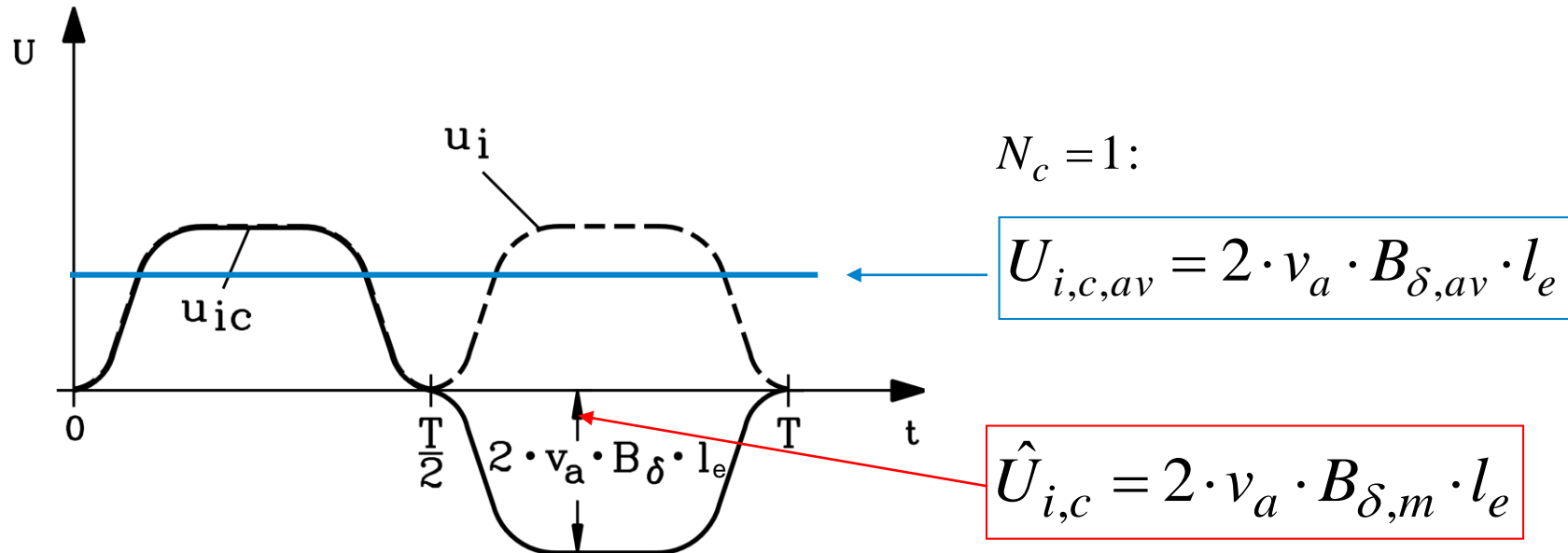


$$u_{i,c} = (u_{i,c} / 2) + (u_{i,c} / 2) = 2v_a \cdot B_\delta \cdot l_e$$

# Induzierte Anker-Spulenspannung $u_i$



# Kurvenform der induzierten Ankerspulsenspannung



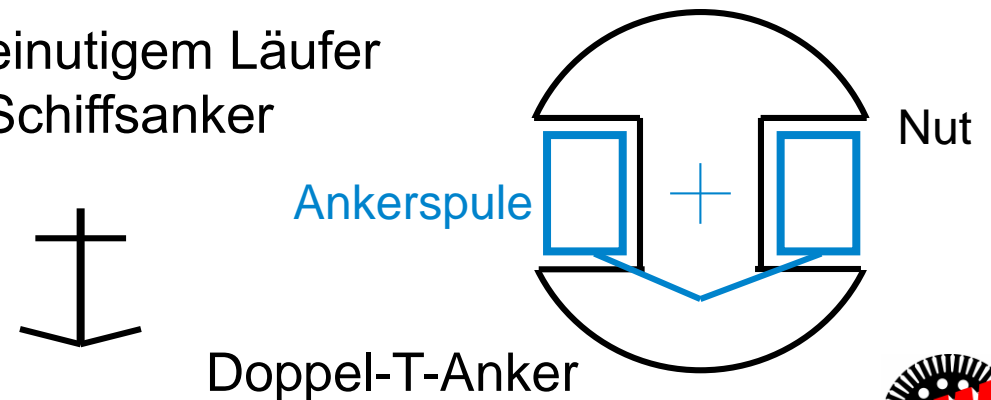
- Unter den Polen ist  $B_{\delta}(x)$  groß mit Maximalwert  $B_{\delta,m}$ , daher auch  $u_i$  groß.  
In den Pollücken wechselt das Feld die Polarität: Nulldurchgang von Feld und Spannung.
- Amplitude der **gleichgerichteten** Spulenspannung:  $\hat{U}_{i,c} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,m} \cdot l_e$
- Mittelwert entspricht Spannungsinduktion im mittleren Feld (ohne Pollücken):  $u_{i,av} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,av} \cdot l_e$
- **Einbrüche** der Spannung im Abstand  $T/2$  "unschön" ( $f_a = 1/T$  „Ankerfrequenz“).

## Zusammenfassung: Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine (1)

- Magnetisches Gleichfeld im Stator induziert Wechselspannung im Rotor (Anker)
- Mechanischer Gleichrichter (Kommutator und Kohlegraphit-Bürsten) erzeugen Gleichspannung
- Elektrische oder permanentmagnetische Ständerfelderregung

## Zusammenfassung: Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine (2)

- Ruhendes magnetisches Erregerfeld (Statorfeld) als Gleichfeld
- Rotierender geblechter Eisenkörper (Anker) mit Ankerspule(n)
- Bewegungsinduzierte Wechselspannung in der Ankerspule
- Über Kommutator und Bürsten gleichgerichtete Ankerspannung
- Ankerspannung proportional zur Drehzahl
- Läufer = Rotor = „Anker“, weil bei zweinutigem Läufer als „Doppel-T-Anker“ Ähnlichkeit mit Schiffsanker



## 10. Gleichstromantriebe

10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine

**10.2 Ankerwicklungen**

10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment

10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung

10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole

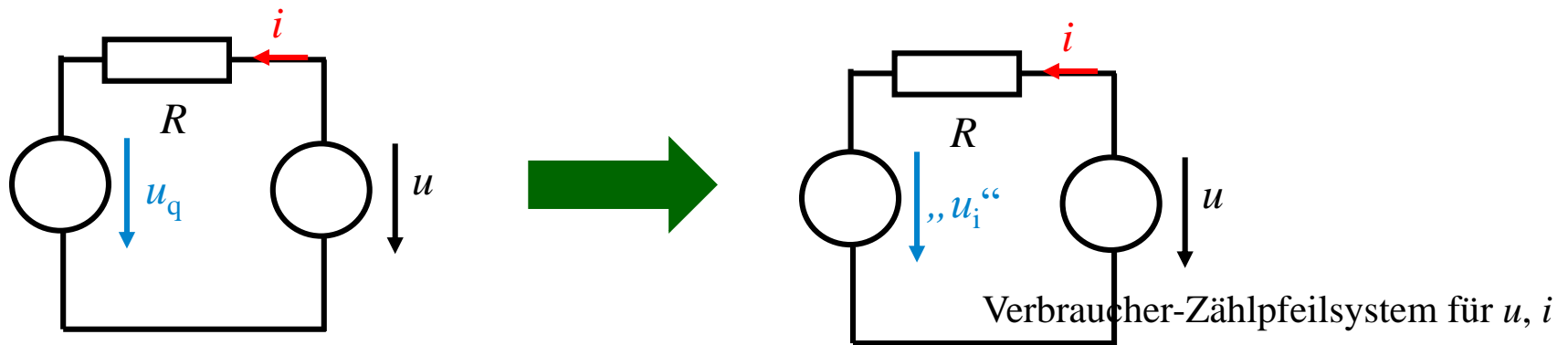
10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine

10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb

10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine

# Induzierte Spannung $U_i$ und Quellenspannung $U_q = -U_i$

Es ist üblich, im Ersatzschaltbild die der induzierten Spannung  $u_i$  entsprechende Quellenspannung  $u_q$  zu verwenden, und diese als „ $u_i$ “ zu bezeichnen!



Das hat zur Folge, dass für dieses „ $u_i$ “ gilt:  $u_q = d\Psi / dt = -u_i \Rightarrow u_q = „u_i“$

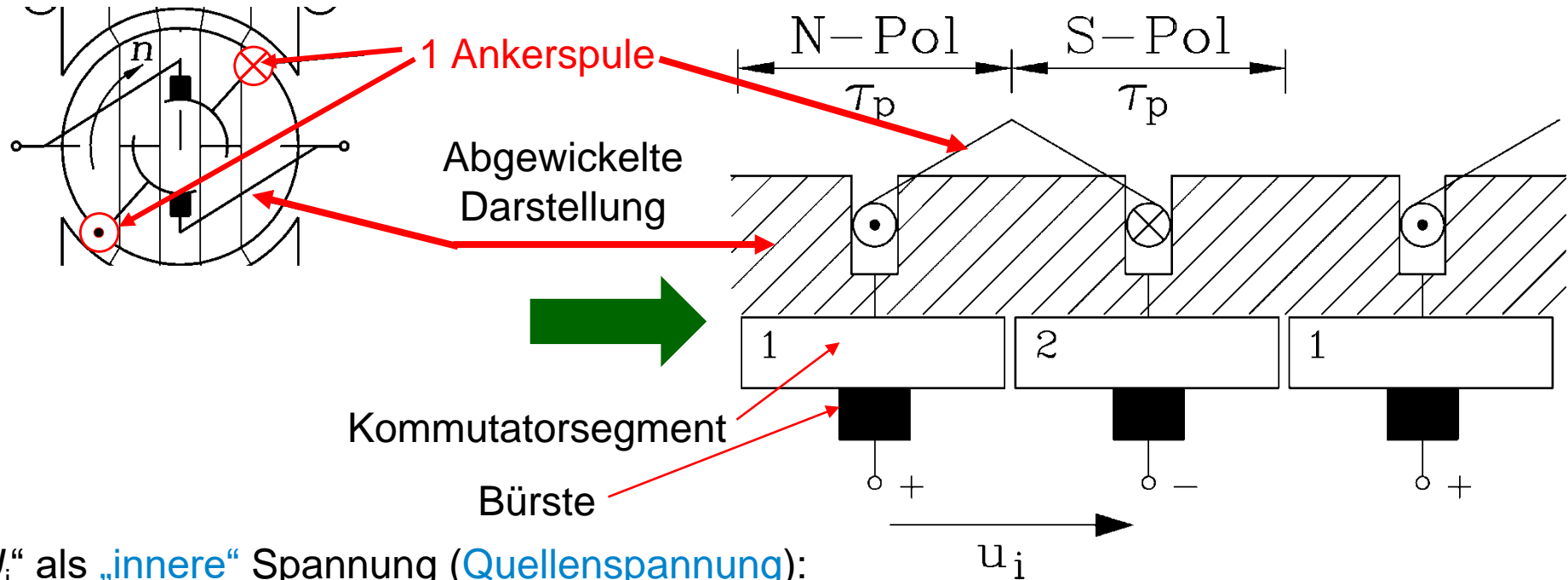
Im Sinne dieser Konvention wird „ $u_i$ “ (einfach:  $u_i$ ) in den folgenden Ersatzschaltbildern verwendet!

$$u = R \cdot i + u_q = R \cdot i + d\Psi / dt$$

$$u = R \cdot i + „u_i“$$



# Induzierte gleichgerichtete Ankerspulenspannung

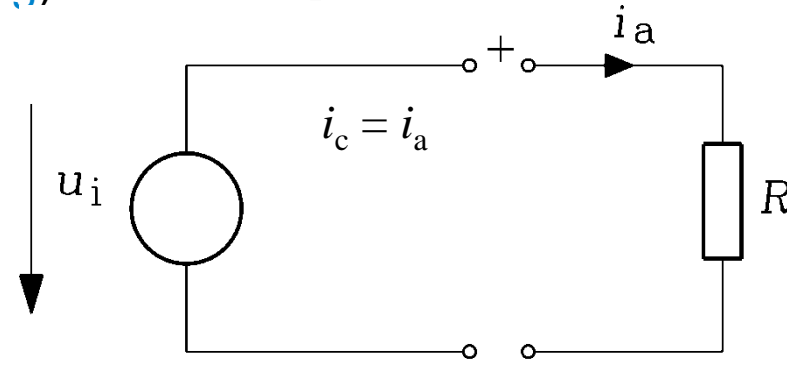


„ $U_i$ “ als „innere“ Spannung (Quellenspannung):

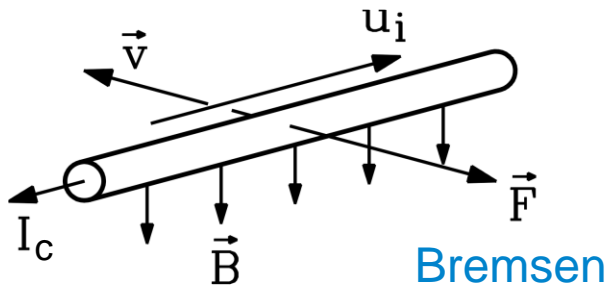
$$U_i \sim -\vec{v} \times \vec{B}_\delta$$

Elektrisches Ersatzschaltbild im Generatorbetrieb im Erzeuger-Zählfeilsystem (EZS)

$$u_i > 0, i_c > 0 \quad u_i \uparrow \downarrow i_c$$



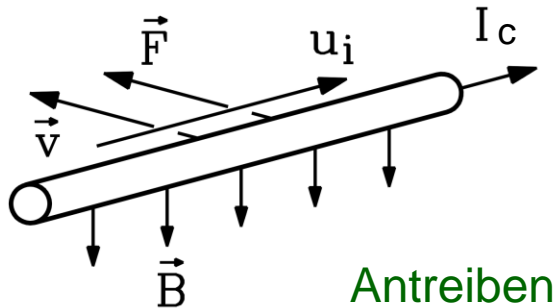
# Die LORENTZ-Kraft auf einen Ankerleiter



Generatorbetrieb: EZS  $u_i > 0, I_c > 0$   $u_i \uparrow \downarrow I_c$

Die LORENTZ-Kraft  $F$  wirkt **gegen** die Ankerumfangsgeschwindigkeit  $v = v_a$  und bremst!

$U_i$  als „innere“ Spannung (Quellenspannung  $U_q$ )



Motorbetrieb: VZS  $u_i > 0, I_c > 0$   $u_i \uparrow \uparrow I_c$

Die LORENTZ-Kraft  $F$  wirkt **in** Richtung der Ankerumfangsgeschwindigkeit  $v$  und treibt an!

- Strom  $I_c$  im Leiter im Magnetfeld  $B$
- **Kraftwirkung**  $F$  (LORENTZ-Kraft) maximal, wenn zwischen  $B$ - und Stromflussrichtung rechter Winkel

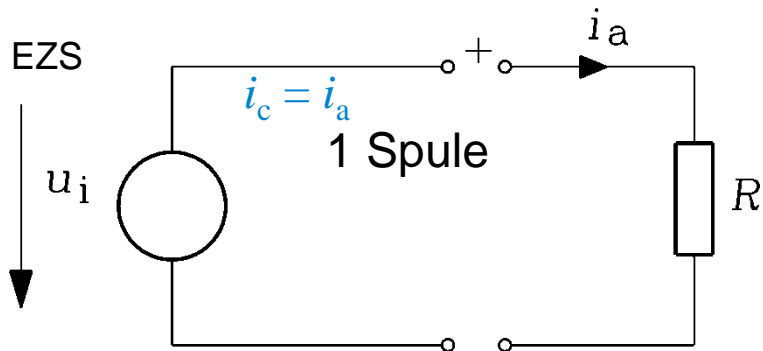
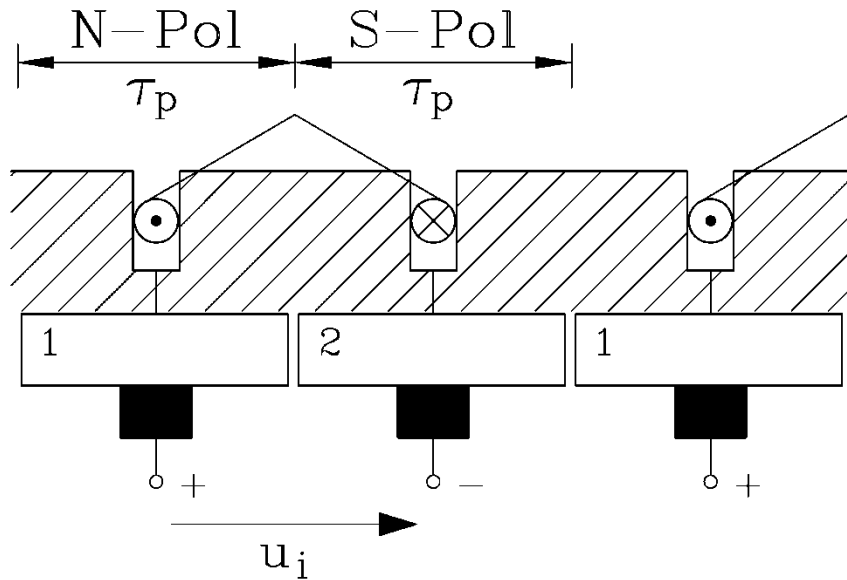
$$\vec{F} = \int_l I_c \cdot d\vec{s} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = \int_0^l I_c (d\vec{s} \times \vec{B}) \rightarrow F = \int_0^l I_c \cdot ds \cdot B = I_c \cdot B \cdot l$$

$N_c$  Windungen je Ankerspule:  $F = N_c I_c \cdot B \cdot l$

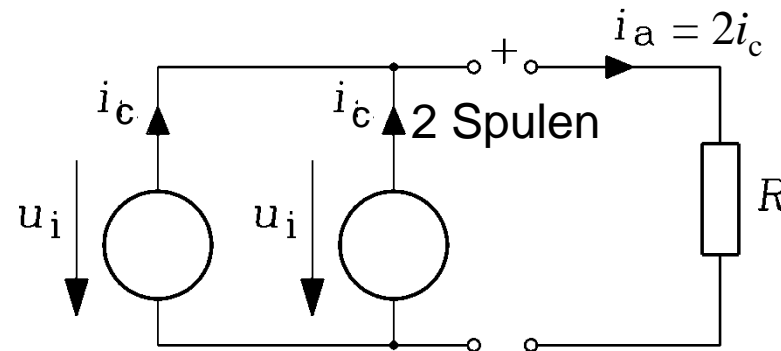
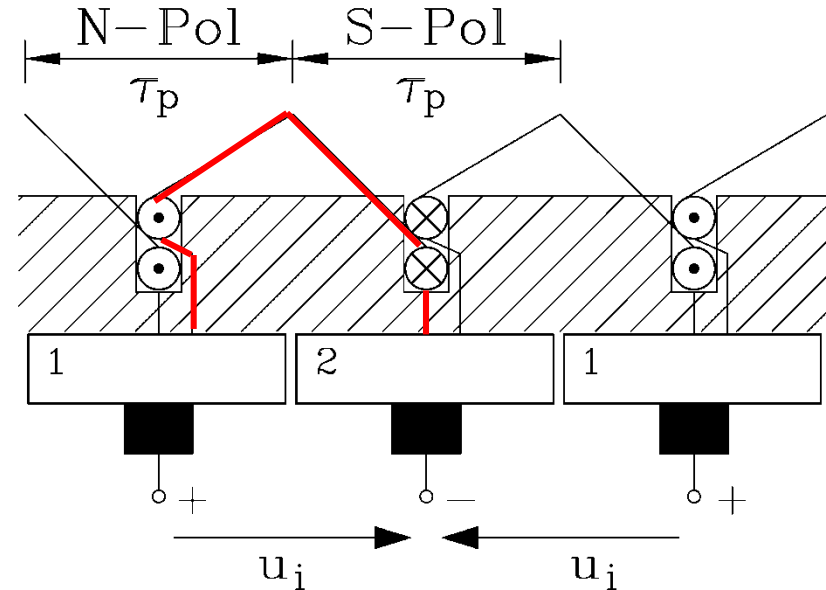
# Zweischichtwicklung im Anker

Einschichtwicklung (Hefner-Alteneck 1872)



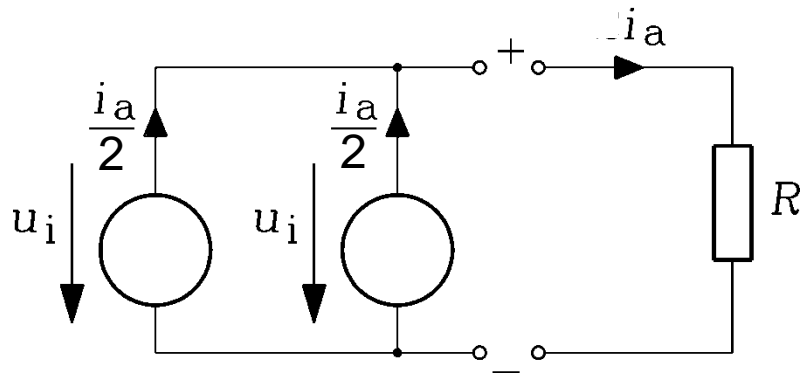
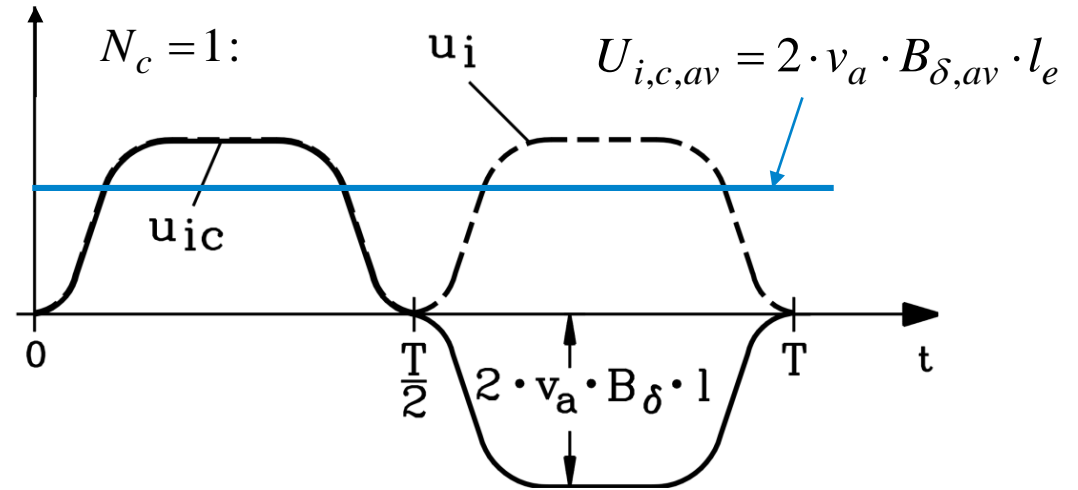
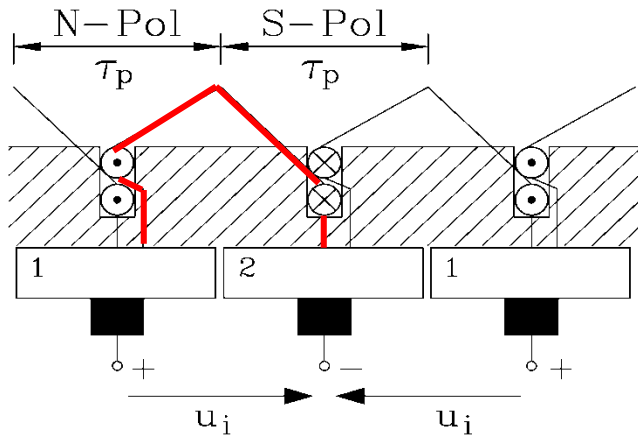
$K = 2, 2p = 2, K: \text{Kommutatorstegzahl}$

Zweischichtwicklung (Weston, 1882): doppelte Spulenzahl

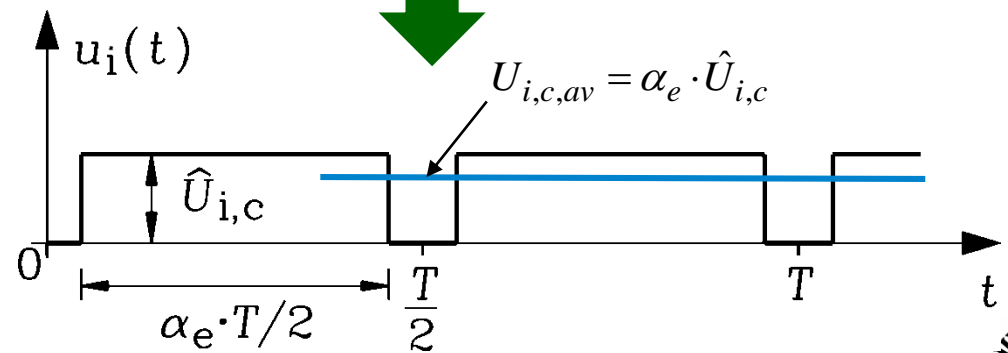


Spulenzahl je Parallelzweig:  $K/(2p) = 1$

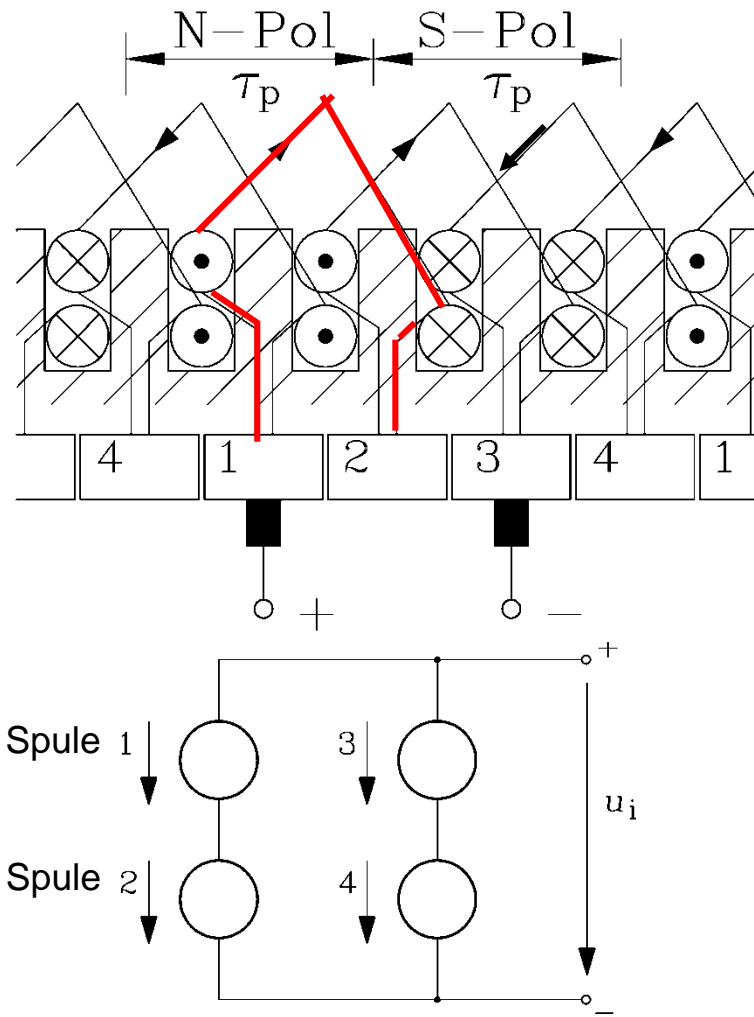
# Spannungskurvenform der Ankerspannung



Vereinfachter  
Kurvenverlauf:

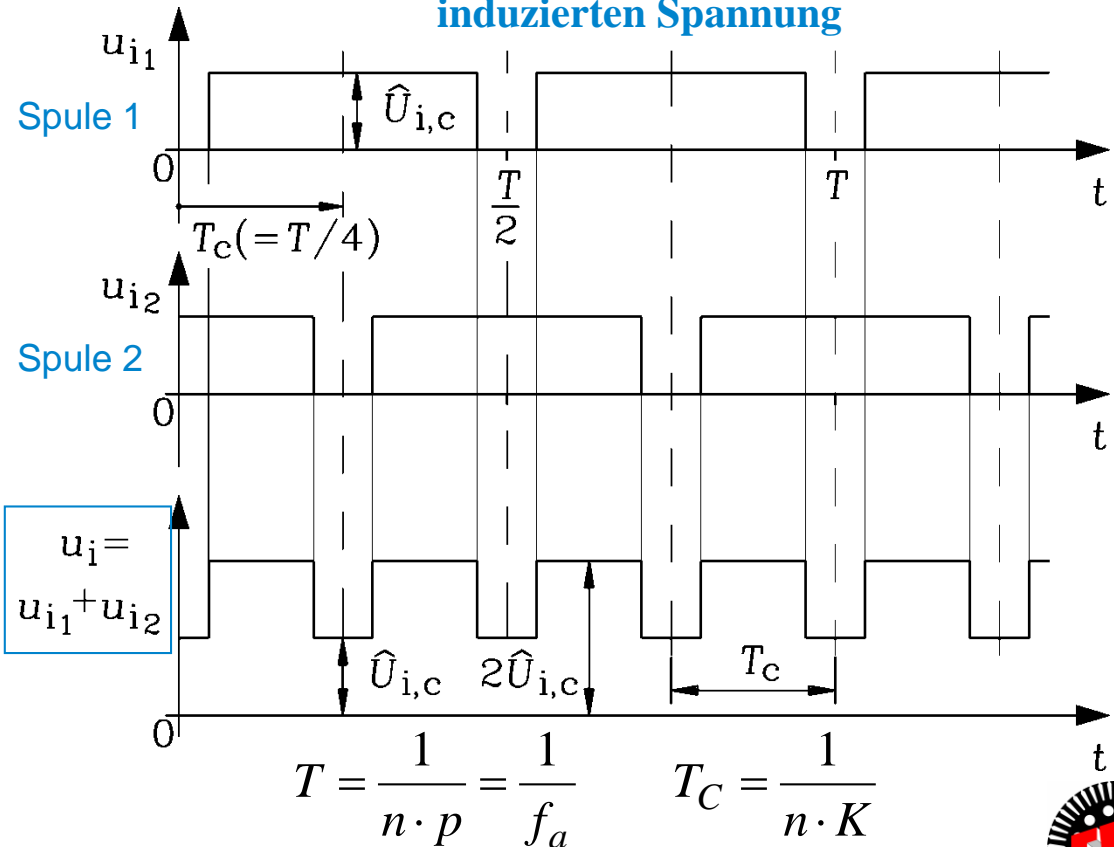


# Erhöhung der Spulenzahl im Anker

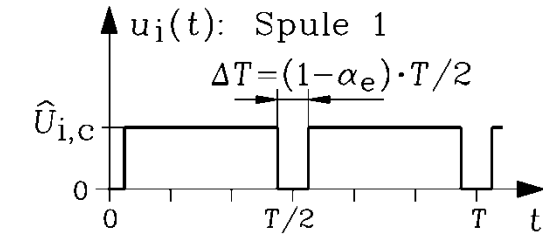


**Beispiel:**  $K = 4$ ,  $2p = 2$ : Spulenzahl  $K = 4$ ,  
Spulenzahl je Parallelzweig:  $K/(2p) = 2$

„Vergleichmäßigung“ der gleichgerichteten  
induzierten Spannung



# Erzeugung einer glatten induzierten Spannung durch Serienschaltung von Ankerspulen



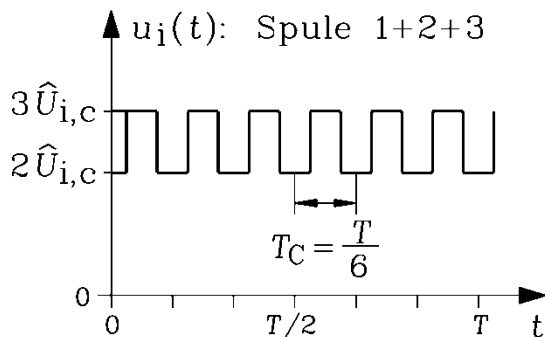
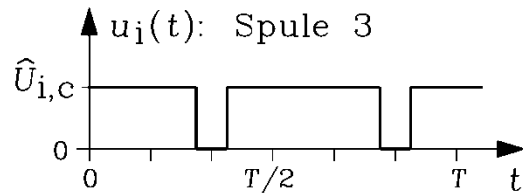
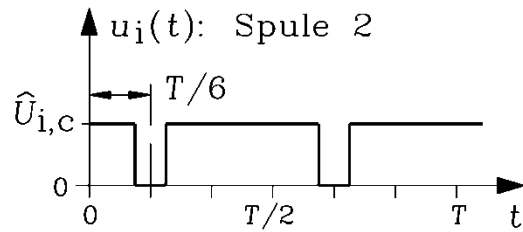
idealisiert

$$\hat{U}_{i,c} = 2N_c v_a B_{\delta,m} l_e$$

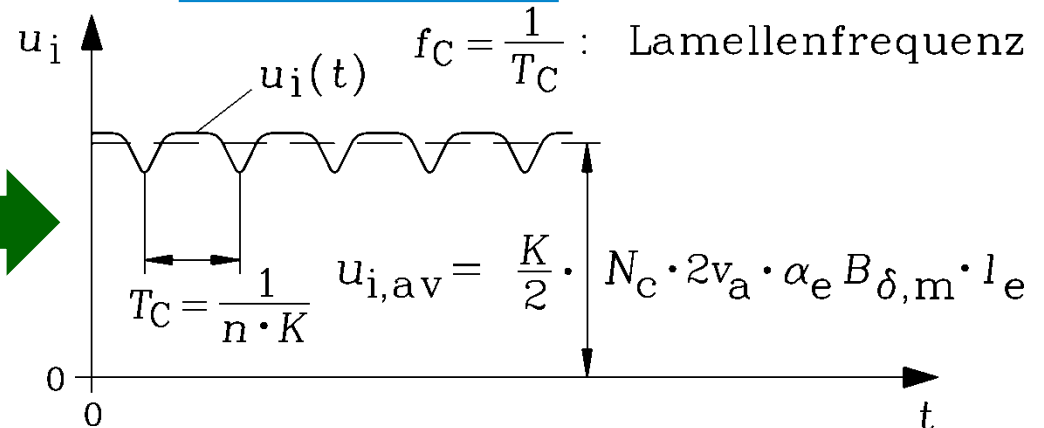
$$U_{i,c,av} = \alpha_e \cdot \hat{U}_{i,c}$$

**Beispiel:**  $2p = 2, K = 6$

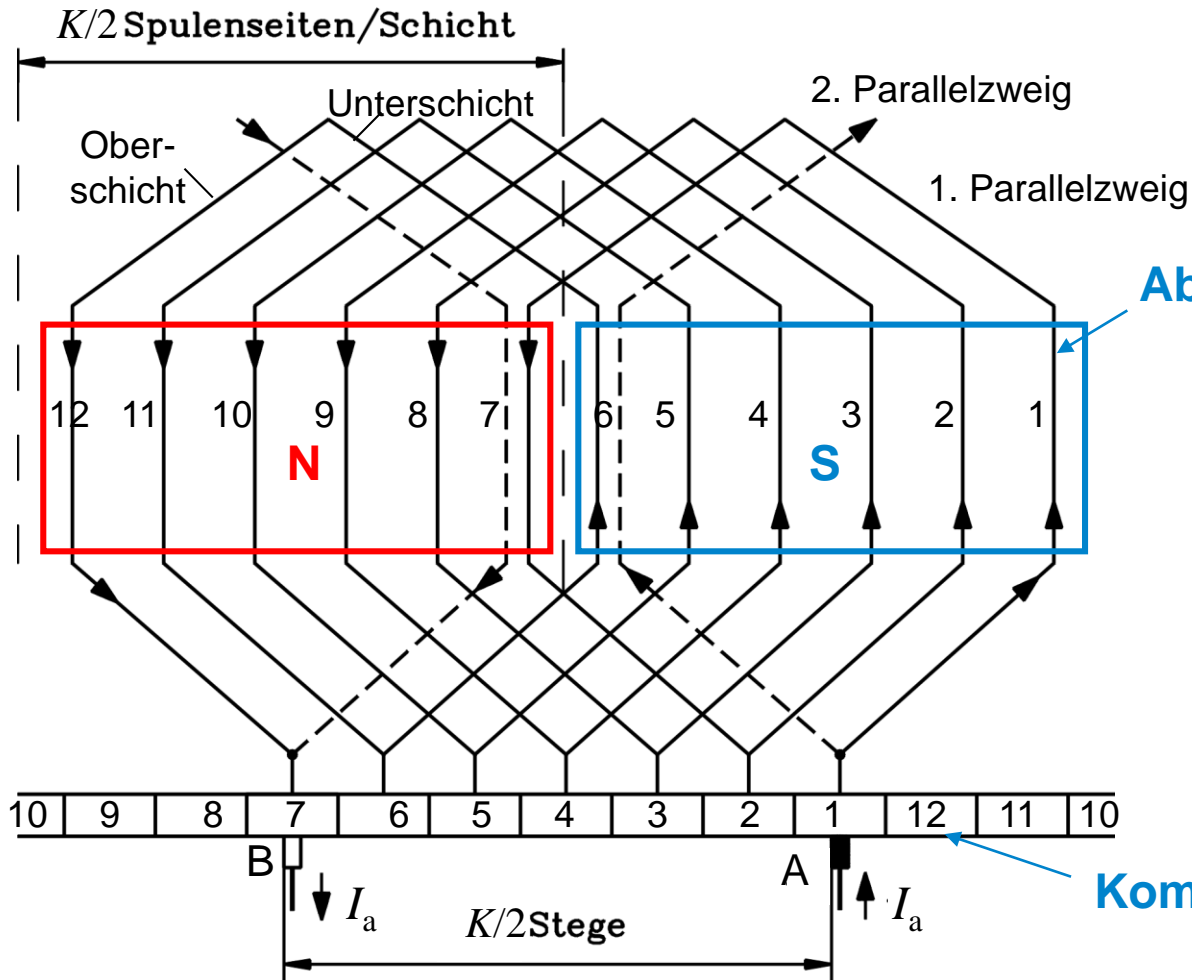
$K/2 = 3$  um je eine Nutteilung räumlich versetzte Spulen mit Windungszahl  $N_c$



realer Verlauf



# Abgewickelte Darstellung der Ankerwicklung



## Zweischichtwicklung:

2 parallele Ankerwicklungszweige  
2 Pole

Abgewickelt: Draufsicht auf  
Hauptpole

## Beispiel:

Spulenzahl je Parallelzweig:

$$K/2 = 6$$

$K = 12$  Ankerspulen bzw.  
Kommutatorlamellen

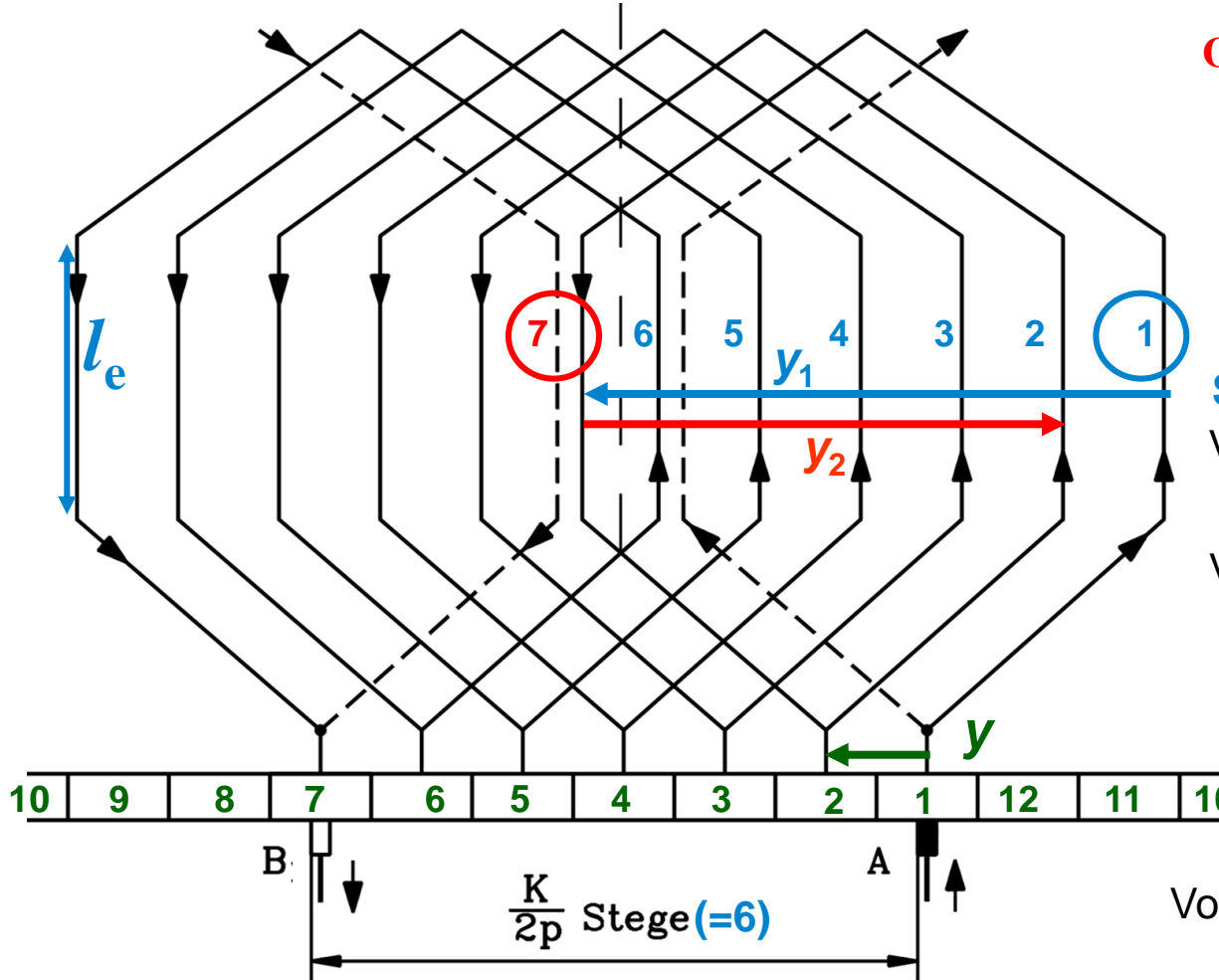
$Q = 12$  Ankernuten

Kommutatorsegmente

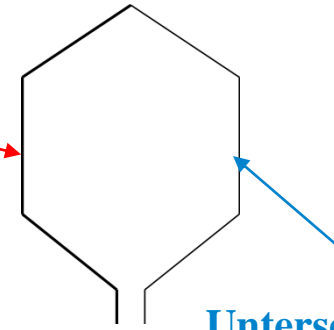
- Jede Spule beginnt/endet an einem Kommutatorsegment: Segmentzahl  $K$

# Wicklungsschritte bei der Schleifenwicklung

Beispiel:  $K = 12, u = 1, Q_r = 12, N_c = 1, z = 2 \cdot u \cdot N_c \cdot Q_r = 24$



Oberschicht



Unterschicht

**Spulenschritte:**

Von 1 Unterschicht nach 7 Oberschicht:  $y_1 = K/(2p) = 7 - 1 = 6$

Von 7 Oberschicht nach 2 Unterschicht:  $y_2 = 7 - 2 = 5$

**Kommutatorschritt:**

$$y = y_1 - y_2 = 6 - 5 = 1$$

Von Kommutatorsegment 1 nach Segment 2:  $y = 2 - 1 = 1$



# “Glättung” der induzierten Ankerspannung

- Mehrere Spulen werden
  - a) **in Serie geschaltet** und
  - b) an gegeneinander isolierte Kommutatorsegmente (“Lamellen”, „Stege“) gelötet (“**Schleifenwicklung**”).
- In den Spulen wird die Spannung **nacheinander** gleichartig, aber zeitversetzt induziert. Die Serienschaltung (Spannungssumme) **“verschmiert”** die Einbrüche der gleichgerichteten Spannung.
- $2p = 2$ : Zwischen Plus- und Minusbürste (**Gleitkontakt**) liegen  **$K/2$  Spulen** in Serie (z.B.:  $K/2 = 6$ ).  
Weitere  $K/2$  Spulen lassen sich durch Fortsetzung des Schemas „endlos“ anfügen.
- Allgemein:  **$K/(2p)$  Spulen zwischen benachbarten Bürsten (zwischen A und B) !**

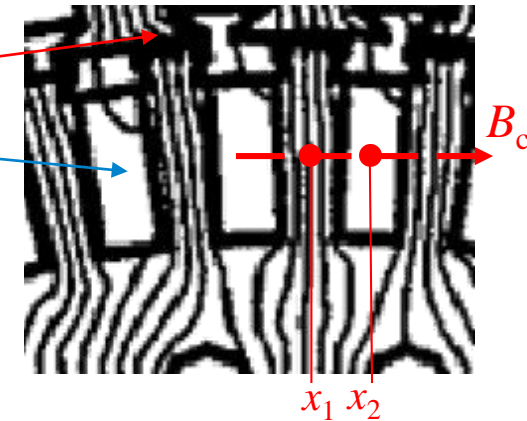
# Wie wirkt sich das Liegen der Leiter in den Eisen- nuten bezüglich der Spannungsinduktion aus?

Experts only



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Wegen der hohen Eisenpermeabilität fließt das Magnetfeld an den Nutenleitern vorbei durch die Zähne
- $B$ -Feld am Nutenleiter  $B_c(x_1) = B_Q$  ist daher viel kleiner als  $B_\delta$  im Luftspalt
- Die bewegungsinduzierte Spannung  $u_{ic,Q} \sim E_{b,Q}$  ist daher viel kleiner als die mit dem Luftspaltfeld  $B_\delta$  ersatzweise berechnete induzierte Spannung  $u_{ic} \sim E_b$



- Wieso stimmt **TROTZDEM** diese Ersatz-Berechnung mit der Wirklichkeit überein?

## ANTWORT 1:

Umgehen dieses Paradoxons durch direkte Berechnung von  $u_{ic} = -d\psi_c/dt$

## ANTWORT 2:

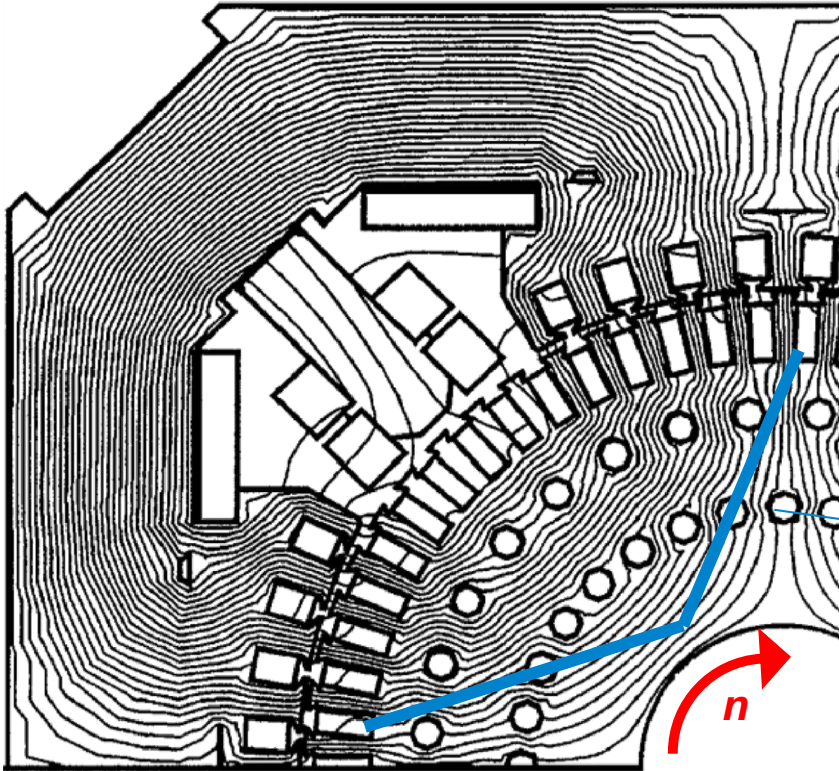
Auflösung des Paradoxons durch genaue Betrachtung der Nutfeldänderung

$$\vec{E}_{b,Q} = \vec{v} \times \vec{B}_Q \ll \vec{E}_b$$
$$\vec{E}_b = \vec{v}_a \times \vec{B}_\delta$$



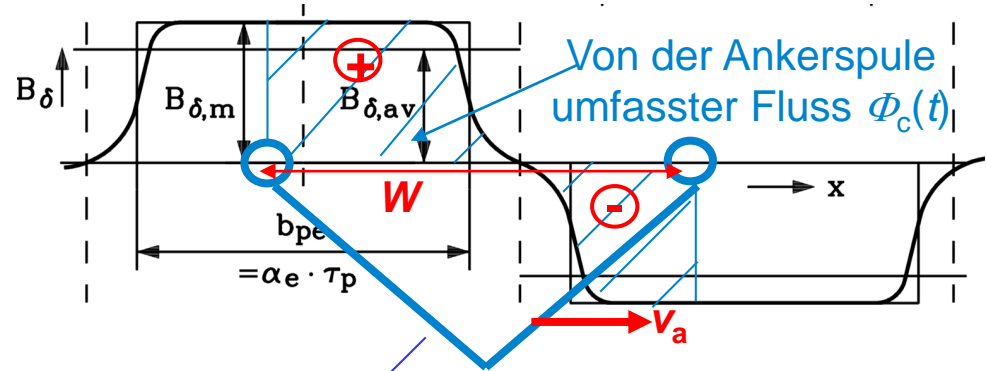
# ANTWORT 1: Spannungsinduktion $u_{ic} = -d\psi_c/dt$

Experts only



Quelle: ABB, Schweden

Änderung der Flussverketzung  $\psi_c$  jeder Läuferspule:



Ankerspule

$$u_{ic} = -\frac{d\psi_c}{dt} = -N_c \cdot \frac{d\Phi_c}{dt} = -N_c \cdot \frac{d}{dt} \int_{A_\delta} \vec{B}_\delta \cdot d\vec{A} =$$

$$= -N_c \cdot \int_{A_\delta} \frac{\partial \vec{B}_\delta}{\partial t} \cdot d\vec{A} + N_c \cdot \oint_C (\vec{v}_a \times \vec{B}_\delta) \cdot d\vec{s} = \oint_{N_c \cdot C} \vec{E}_b \cdot d\vec{s}$$

Wir können also mit  $E_b$  so rechnen, als ob die Spulenleiter an der Läuferoberfläche und NICHT in den Nuten liegen!

Stator-Luftspaltfeld ist GLEICH-Feld:  $\frac{\partial \vec{B}_\delta}{\partial t} = 0$



## ANTWORT 2: Spulenfeldänderung $B_c$

Experts only



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Aus der Sicht eines ruhenden Beobachters im Stator erfährt die bewegte Ankerspule

a) eine Bewegungsinduktion in dem kleinen Nutenfeld  $B_c = B_Q$

$$\vec{E}_{b,Q} = \vec{v} \times \vec{B}_Q \ll \vec{E}_b$$

b) Die Bewegung des Läufers mit seiner Nut-Zahn-Struktur ändert auf der Spulenfläche  $A_c$  im Bereich der von der Spule umfassten Nuten und Zähne lokal die Spulen-Flussdichte  $B_c$ : Wenn sich am Ort  $x_1$  ein Zahn befindet, ist dort die Flussdichte hoch, und am Ort  $x_2$ , wo eine Nut ist, ist die Flussdichte niedrig.

Wenig später ist bei  $x_1$  eine Nut und bei  $x_2$  ein Zahn: Die Flussdichte  $B_c$  schwankt daher an den Orten  $x_1, x_2$  mit der HOHEN Nutfrequenz  $n \cdot Q_r$ .

$$\frac{\partial \vec{B}_c}{\partial t}$$

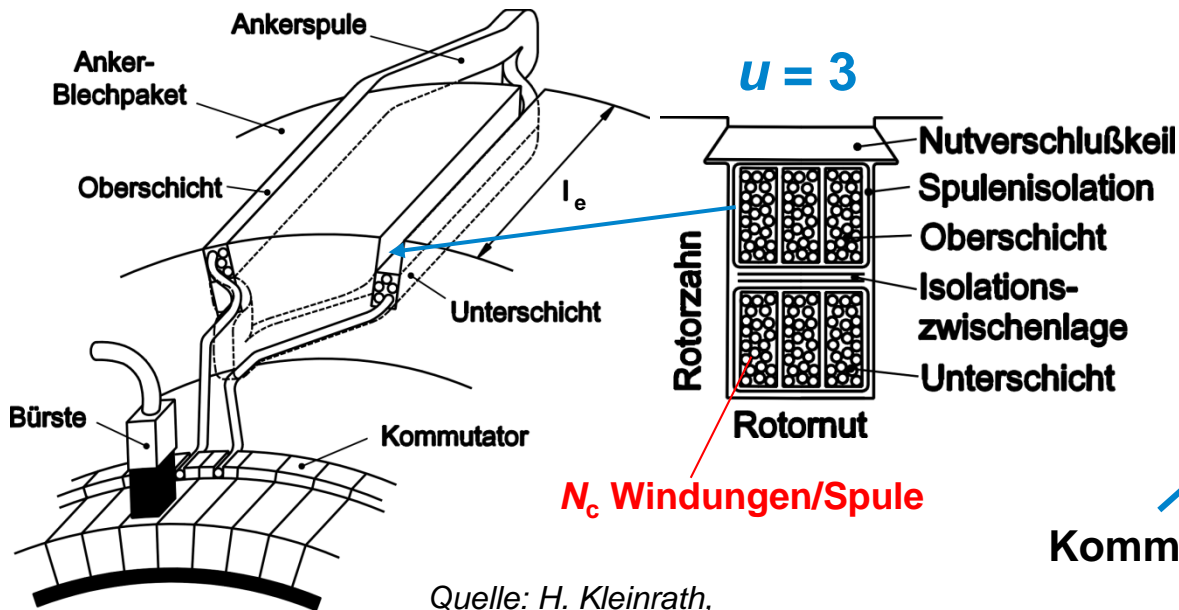
a) + b): Resultierende induzierte Spannung:

$$u_{ic} = N_c \cdot \left[ - \int_{A_c} \frac{\partial \vec{B}_c}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \oint_C \vec{E}_{b,Q} \cdot d\vec{s} \right] = N_c \cdot \left[ - \int_{A_c} \frac{\partial \vec{B}_c}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}_Q) \cdot d\vec{s} \right] = -N_c \cdot \frac{d}{dt} \int_{A_c} \vec{B}_c \cdot d\vec{A}$$
$$-N_c \cdot \frac{d}{dt} \int_{A_c} \vec{B}_c \cdot d\vec{A} = -N_c \cdot \frac{d\Phi_c}{dt} = -\frac{d\psi_c}{dt} = u_{ic} \quad \text{gemäß ANTWORT 1}$$

Wir können wieder mit  $E_b$  aus dem Luftspaltfeld rechnen, so als ob die Spulenleiter an der Läuferoberfläche und NICHT in den Nuten liegen!



# Aufbau der Ankerspulen und des Kommutators



Quelle: H. Kleinrath,  
Studententext

## Anker-Blechpaket beim Bewickeln



Kommutator

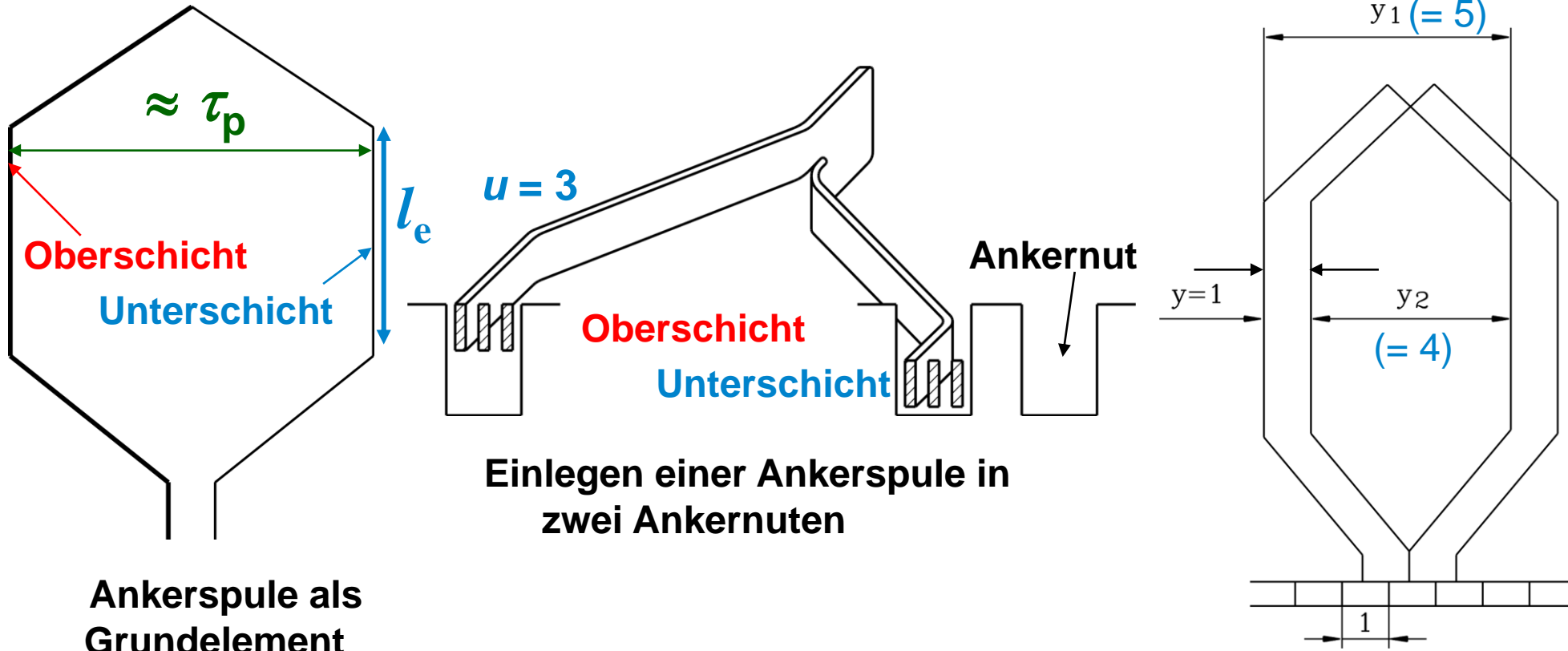
Ankerspulen

Quelle: Fa. Brenner, Bürstadt

- **Zweischichtwicklung:** Pro Nut (Ober-/Unterschicht) = doppelt so viele Spulen unterbringbar
- **Mehrere (=  $u$ ) Spulenseiten** nebeneinander in eine Nut = größere Nutung möglich (billiger)
- Durch Ober- und Unterschicht-Anordnung entsteht **ein zweiter Parallelzweig je Polpaar** in der Ankerwicklung, in dem auch  $u_{i,av}$  induziert wird.



# Zweischicht-Anker-Schleifenwicklung



Ankerspule als  
Grundelement

$$y_1 = K/(2p) = \text{Spulenschritt} = \text{etwa Polteilung } \tau_p$$

$$y = y_1 - y_2 = 1: \text{„Kommutatorschritt“}$$

$y = y_1 - y_2 = 5 - 4 = 1$   
Verbindung zur nächsten  
Ankerspule am Kommutator

# Begriffe der Zweischicht-Ankerwicklung

$K$ : Kommutatorstegzahl (= 12)

$u$ : Spulenseiten je Nut und Schicht (= 1)

$Q_r$ : Ankernutzzahl (= 12)

$$K = u \cdot Q_r (= 1 \cdot 12 = 12)$$

$N_c$ : Ankerspulenwindungszahl (z. B.: 7)

$z$ : Ankerleiterzahl

$$z = 2 \cdot u \cdot N_c \cdot Q_r (= 2 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 12 = 168)$$

$2p$ : Polzahl (= 2)

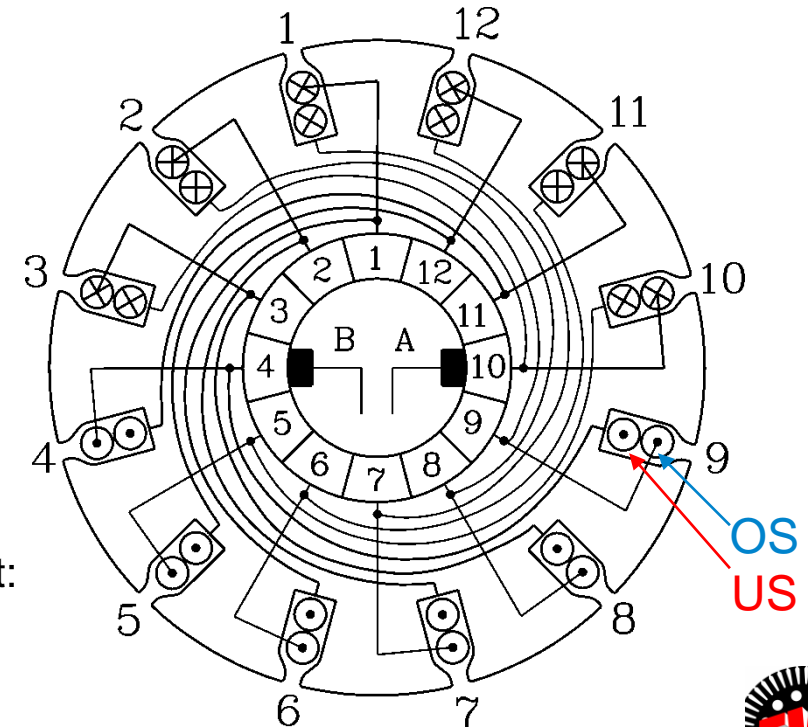
Beispiel:  $2p = 2$ ,  $K = 12$  Spulen in 12 Nuten:

1. Spule: 1 OS – 7 US

2. Spule: 2 OS – 8 US...

12. Spule: 12 OS – 6 US

1. Spule: 1 OS – 7 US usw. „endlos“



Jede Spule beginnt/endet an einem Kommutatorsegment:

Segmentzahl  $K = u \cdot Q_r$

# Ankerspulen in Läuferenuten

## Beispiel:

$2p = 2$ ,  
 $K = 12$  Spulen in 12 Nuten:

1. Spule: 1 OS – 7 US

2. Spule: 2 OS – 8 US

3. Spule: 3 OS – 9 US

4. Spule: 4 OS – 10 US

5. Spule: 5 OS – 11 US

6. Spule: 6 OS – 12 US

7. Spule: 7 OS – 1 US

8. Spule: 8 OS – 2 US

9. Spule: 9 OS – 3 US

10. Spule: 10 OS – 4 US

11. Spule: 11 OS – 5 US

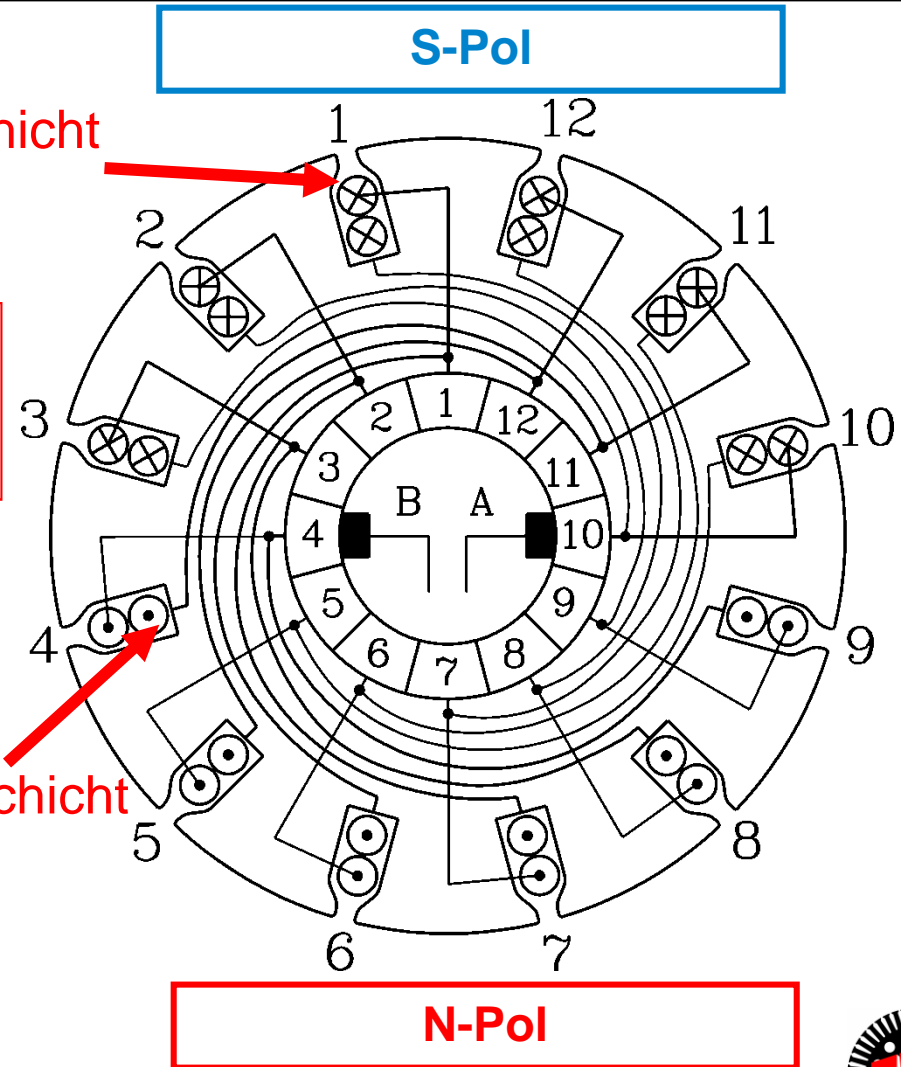
12. Spule: 12 OS – 6 US

1. Spule: 1 OS – 7 US usw. „endlos“ in sich geschlossen

1 OS  $\xrightarrow{+6}$  7 US  $\xrightarrow{-5}$  2 OS  
2 OS  $\xrightarrow{+6}$  8 US  $\xrightarrow{-5}$  3 OS

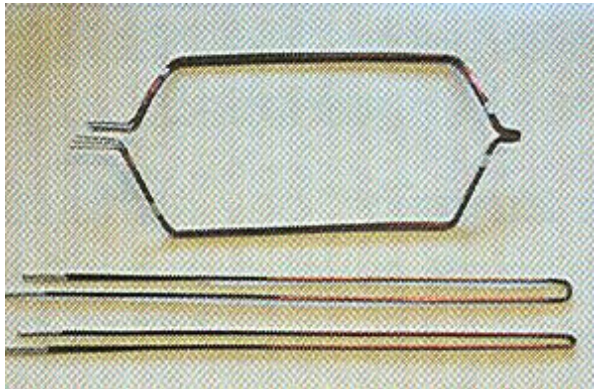
OBER-Schicht  
(OS)

UNTER-Schicht  
(US)

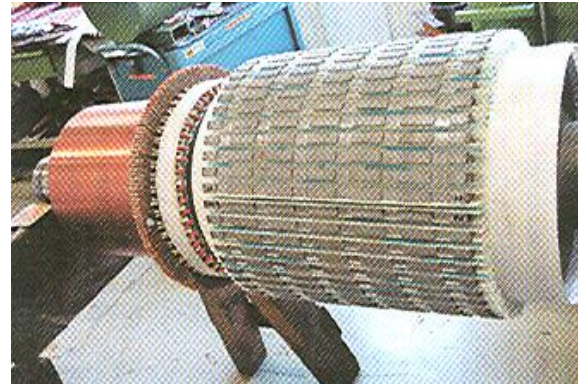




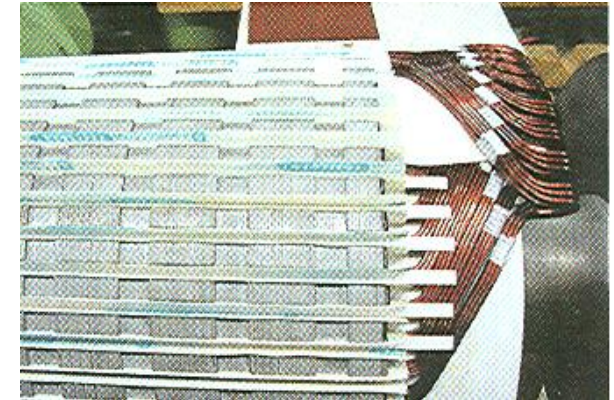
# Fertigung der Ankerspulen, Bewickeln des Ankers



Ankerspule (Läuferspule):  
Unten: ungeformt  
Oben: geformt



Läuferpaket unbewickelt:  
Isolation in Läuferfugen,  
Kommutator links



Einlegen der Ankerspulen:  
4-pol. Zweischichtwicklung,  
Unter- und Oberschicht,  $u = 3$



Anlöten der Ankerspulenenden an die  
Kommutatorsegmente:

Ober- und Unterschicht-Spulenenden  
werden in die Schlitze der  
Kommutatorsegmente eingelötet

Quelle: Fa. Brenner/Bürstadt, Deutschland

# Induzierte Ankerspannung

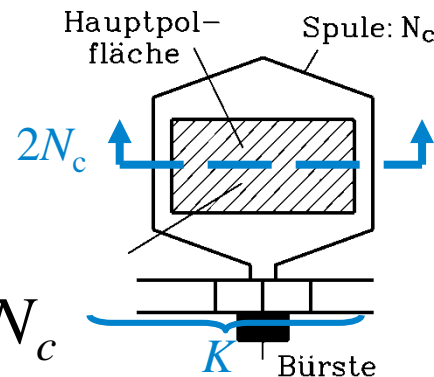
**Maximale Spannung pro Spule:**

$$\hat{U}_{i,c} = 2v_a B_{\delta,m} N_c l_e$$

**Fluss pro Pol:**  $\Phi = \alpha_e \tau_p l_e B_{\delta,m}$

**Ankerumfangs-  
geschwindigkeit:**  $v_a = 2p\tau_p \cdot n$

$$\left. \begin{aligned} 2p\tau_p &= d_{si} \cdot \pi \\ v_a &= d_{si} \cdot \pi \cdot n \end{aligned} \right\}$$



**Gesamtzahl der  
Ankerleiter:**  $z = 2 \cdot K \cdot N_c$

**2p Pole, 2a parallele Zweige:**

$$U_i = z \cdot \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi$$

**Mittlere Spannung pro Spule:**

$$U_{i,c,av} = 2v_a \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot N_c l_e$$

$$U_{i,c,av} = 2 \cdot 2p\tau_p \cdot n \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot N_c l_e$$

$$U_{i,c,av} = 2 \cdot 2p \cdot N_c \cdot n \cdot \Phi$$

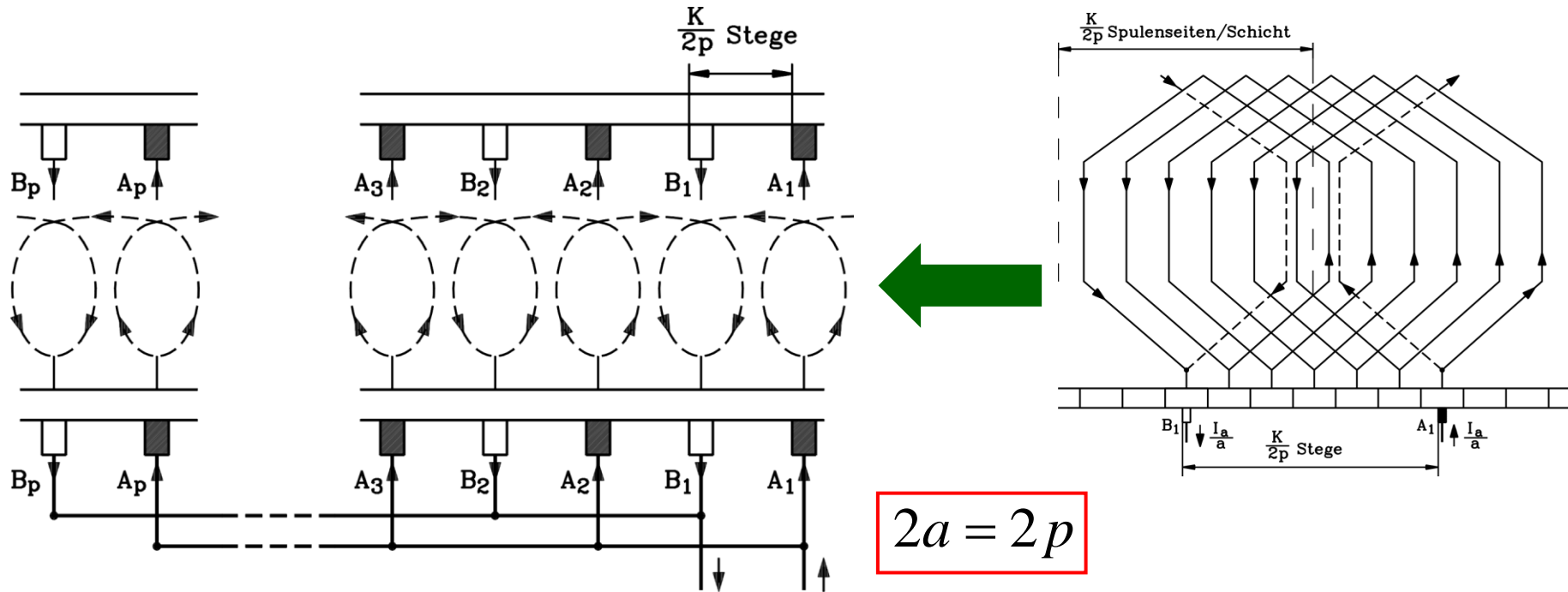
**Mittlere Spannung bei  $K(2p)$  Spulen:**

$$u_{i,av} = \frac{K}{2p} \cdot 2 \cdot 2p \cdot N_c \cdot n \cdot \Phi$$

$$u_{i,av} = (2 \cdot K \cdot N_c) \cdot n \cdot \Phi$$

$$u_{i,av} = U_i = z \cdot n \cdot \Phi$$

# Induzierte Spannung in der Ankerwicklung



## „SCHLEIFENWICKLUNG“:

Aus 2-poliger entsteht z. B. 6-polige (allgemein  $2p$ -polige) Maschine durch identische Fortsetzung der Ankerwicklung, der Ständerpolfolge und der Bürstenanordnung

**Induzierte Spannung:**  $U_i = z \cdot \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi = k_1 \cdot n \cdot \Phi$   $U_i = k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi$   $k_1 = \frac{z \cdot p}{a}$   $k_2 = \frac{k_1}{2\pi}$

# Beispiel: Induzierte Ankerspannung

- **Induzierte Spannung:**

$$U_i = \frac{z \cdot p}{a} \cdot n \cdot \Phi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \cdot 2\pi n \cdot \Phi = k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi$$

**Merkformel:**

$$U_i = k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi$$

- **Maschinenkonstante:**  $k_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a}$

- **Beispiel:** Schleifenwicklung

$z = 900$  Leiter,  $2p = 4$  Pole,  $2a = 4$  parallele Zweige:  $k_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{900 \cdot 2}{2} = 143.2$

$n = 4500/\text{min}$ ,  $\Phi = 0.008$  Wb:  $U_i = 143.2 \cdot (2\pi \cdot 4500/60) \cdot 0.008 = 540$  V

# Anzahl paralleler Zweige der Schleifenwicklung

$2a =$  Anzahl paralleler Ankerwicklungszweige (bei Zweischichtwicklung)

$2a = 2$ : Minimale Anzahl paralleler Zweige (bei  $2p = 2$ )

$2a = 2p$ : Stets sind Polzahl und Anzahl paralleler Zweige gleich

$a = p$  : Anzahl der positiven Kohlebürsten A

$a = p$  : Anzahl der negativen Kohlebürsten B

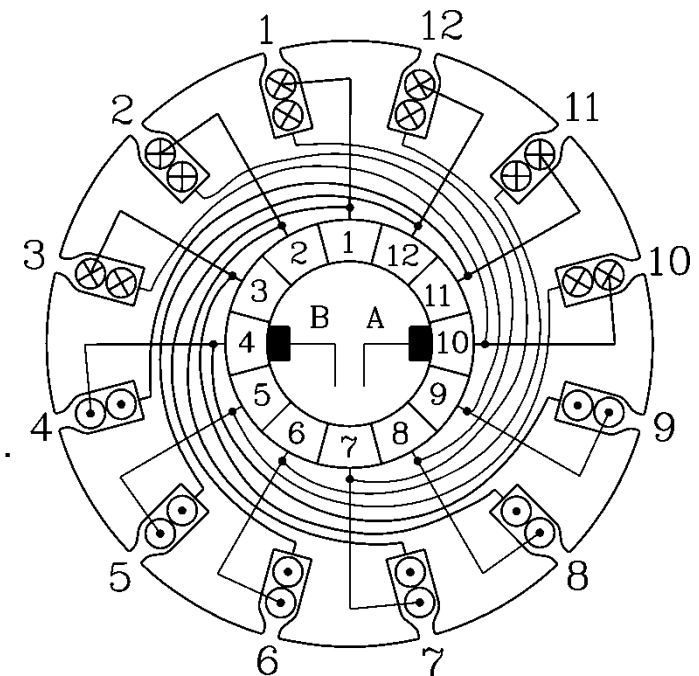
$2a = 2p$ : Anzahl der Bürsten A und B

**Beispiel:**  $2p = 2a = 2$ :  
Bei aktueller Läuferstellung:  
4 OS ... 9 OS: 1. Parallelzweig,  
10 OS ... 3 OS: 2. Parallelzweig.

## ACHTUNG:

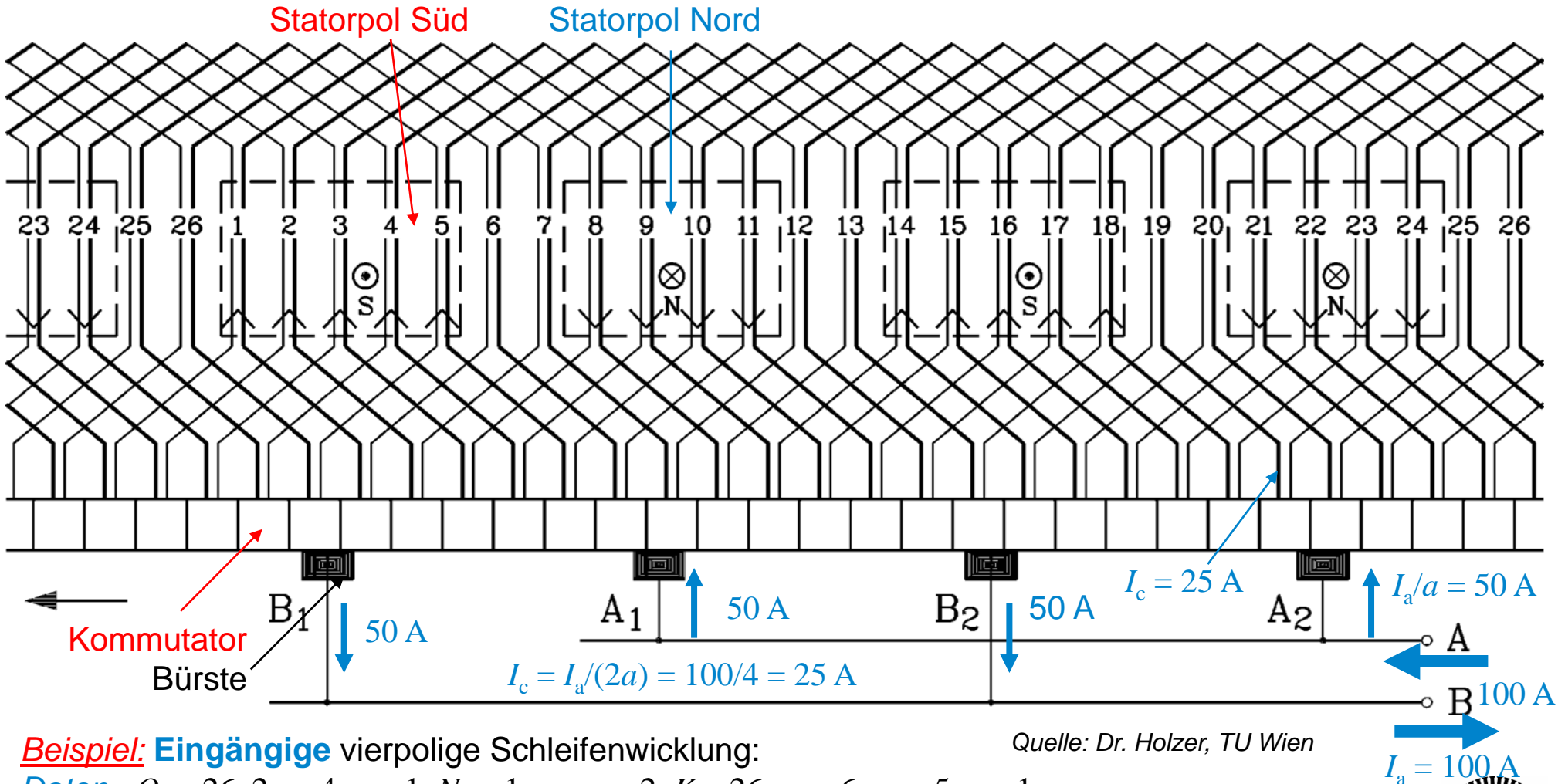
Bei Drehfeldmaschinen:

$a =$  Anzahl paralleler Zweige je Wicklungsstrang,  
weil auch  $a = 1$  (Serienschaltung) möglich.





# Vollständige eingängige Anker-Schleifenwicklung



**Beispiel:** Eingängige vierpolige Schleifenwicklung:

**Daten:**  $Q_r = 26$ ,  $2p = 4$ ,  $u = 1$ ,  $N_c = 1$ ,  $a = p = 2$ ,  $K = 26$ ,  $y_1 = 6$ ,  $y_2 = 5$ ,  $y = 1$

Quelle: Dr. Holzer, TU Wien

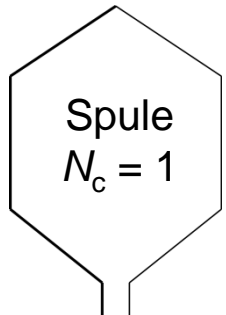
# Eingängige Anker-Schleifenwicklung: $2a = 2p$

**Übung**

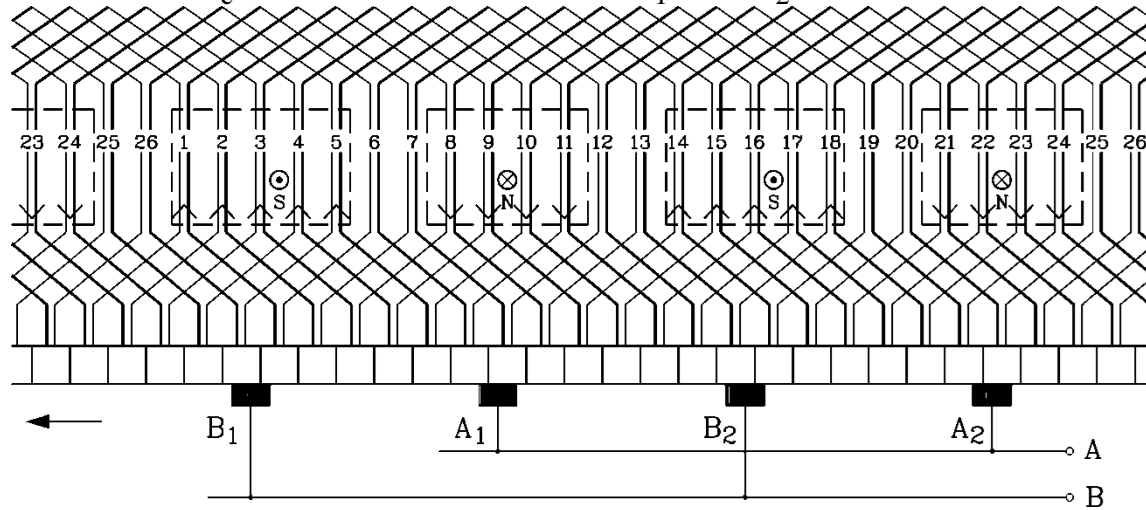


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Beispiel:**  $Q_r = 26, 2p = 4, u = 1, N_c = 1, a = p = 2, K = 26, y_1 = 6, y_2 = 5, y = 1$



10 V



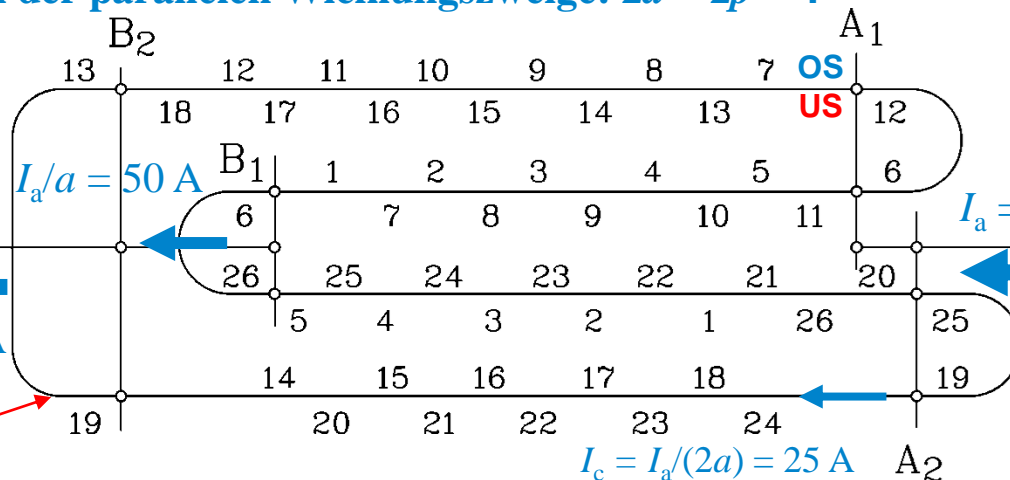
Anzahl der Pole = Anzahl der parallelen Wicklungsweige:  $2a = 2p = 4$

$U_a = 60V$   
(=  $6 \cdot 10V$ )

-30 V

$I_a = 100A$

„1 Gang“

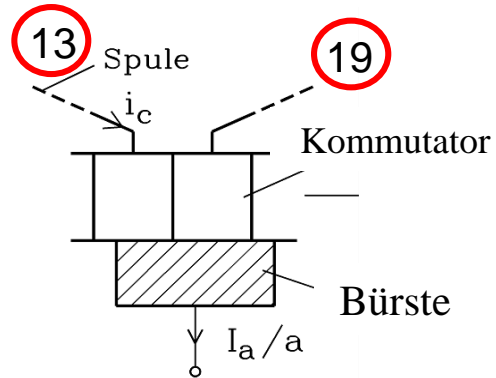


$P_\delta = U_i I_a =$   
 $= 60 \cdot 100 = 6kW$

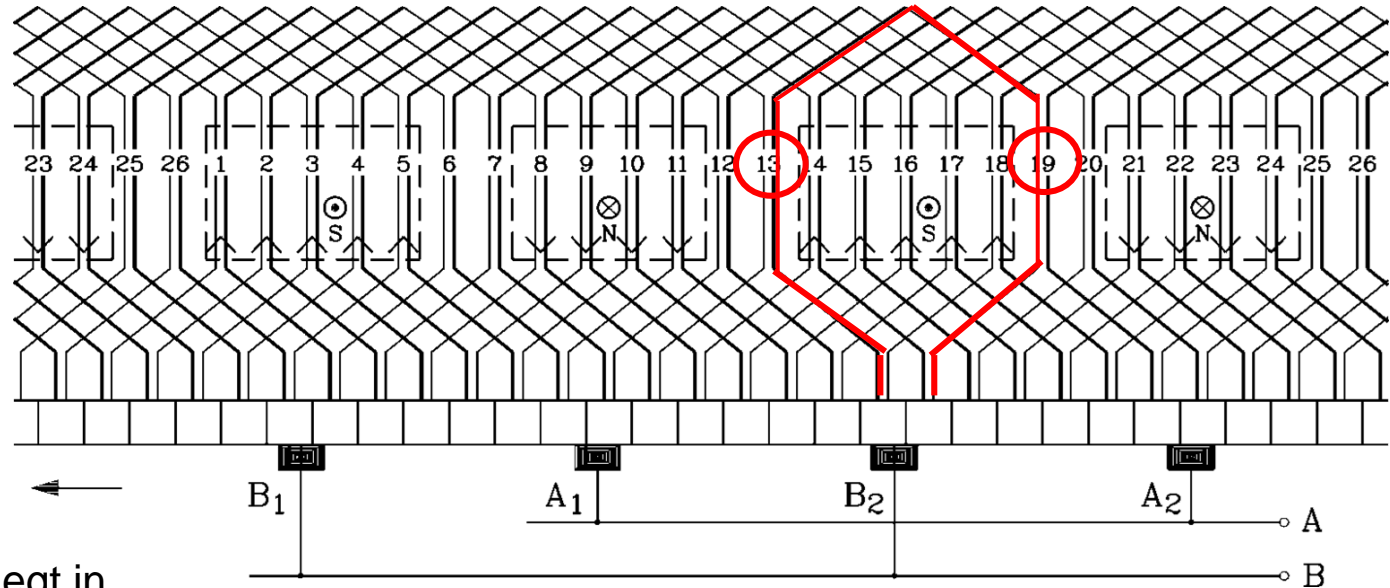
+30 V



# Bürstenkurzschluss NUR der spannungslosen Spulen



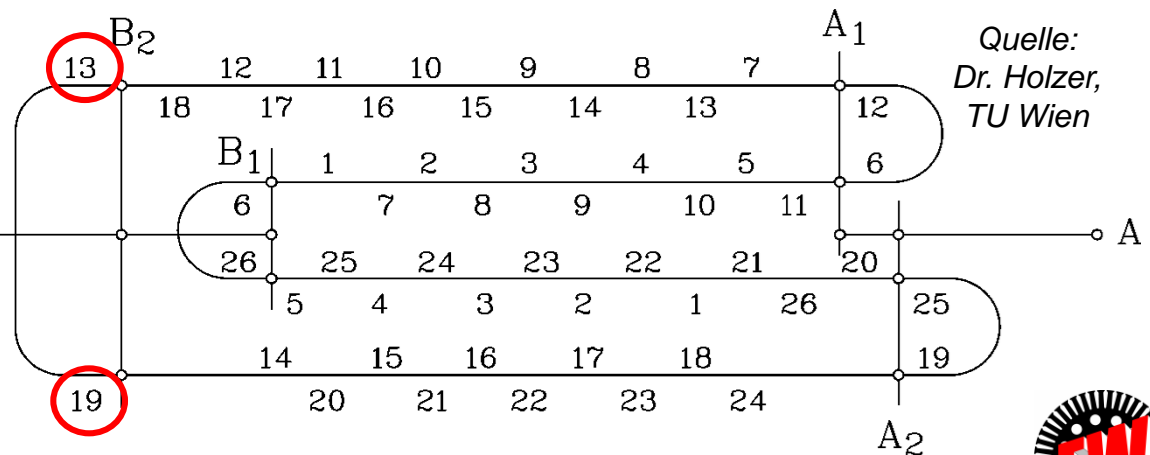
Spulenkurzschluss  
durch Bürste



**Beispiel:**

Spule 13(OS)-19(US) liegt in  
neutraler Zone = keine Spannung  
induziert = kann von Bürste B<sub>2</sub>  
gefahrlos kurzgeschlossen werden!  
Ebenso: 6(OS)-12(US),  
19(OS)-25(US), 26(OS)-6(US).

$$K = Q_r = 26, 2p = 4, y_1 = 6, y_2 = 5, y = 1$$

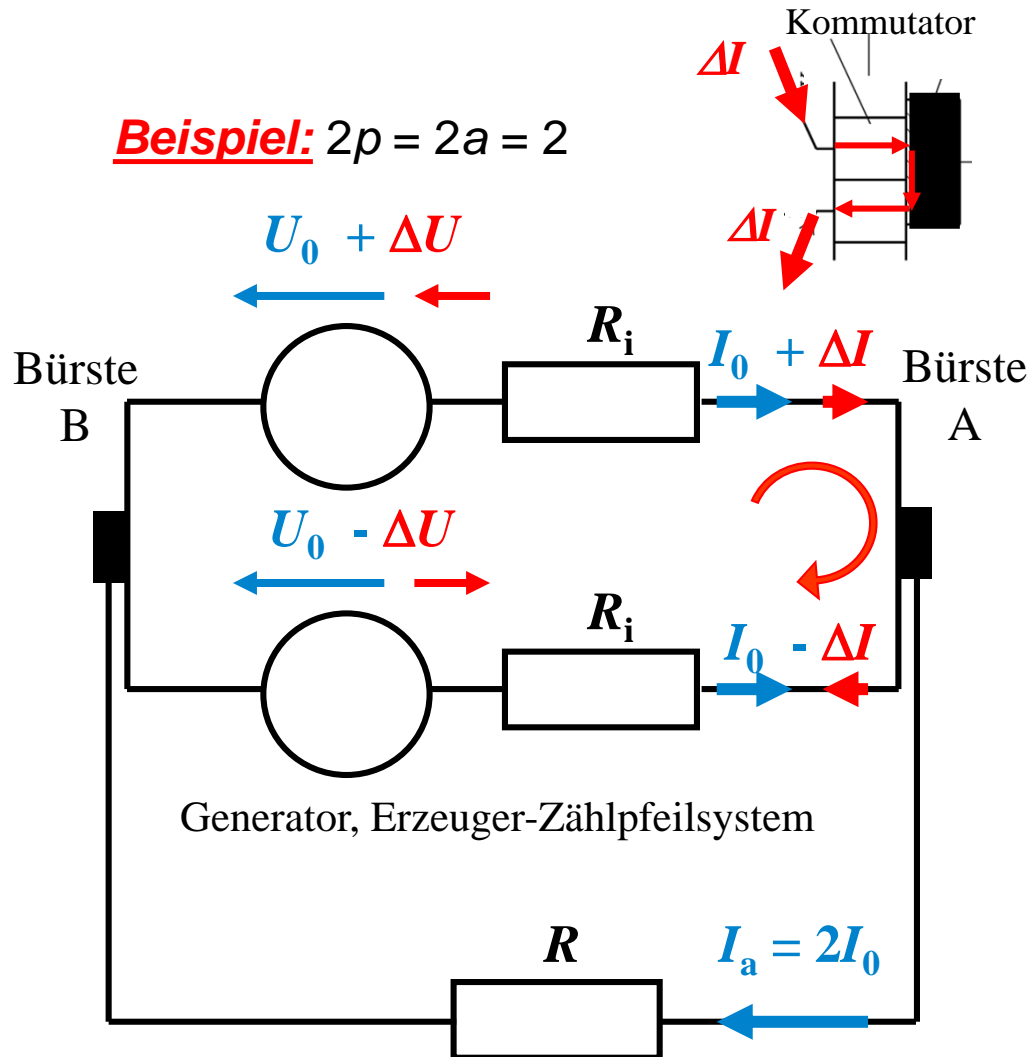




# Reale E-Maschinen sind (leicht) unsymmetrische Maschinen!

- Realität:  
Keine Maschine ist ideal symmetrisch
- Induzierte Spannungen je Pol:  
**Sind von Pol zu Pol nicht exakt gleich groß**
- Spannungsdifferenzen bewirken:  
Unsymmetrische Aufteilung des Ankerstroms  $I_a$  auf die parallelen Zweige  
Nicht  $I_c = I_a/(2a)$ , sondern bei z. B.  $2a = 4$ :  $I_{c1} \neq I_{c2} \neq I_{c3} \neq I_{c4}$  !

# Wirkung paralleler, ungleich großer Spannungen



**Beispiel:**  $2p = 2$ : 2 parallele Spannungsquellen mit ungleicher Quellenspannung  $U_1 \neq U_2$ , aber gleichem Spulen-(Innen)widerstand  $R_i$ :

$$U_1 = U_0 + \Delta U \quad U_2 = U_0 - \Delta U$$

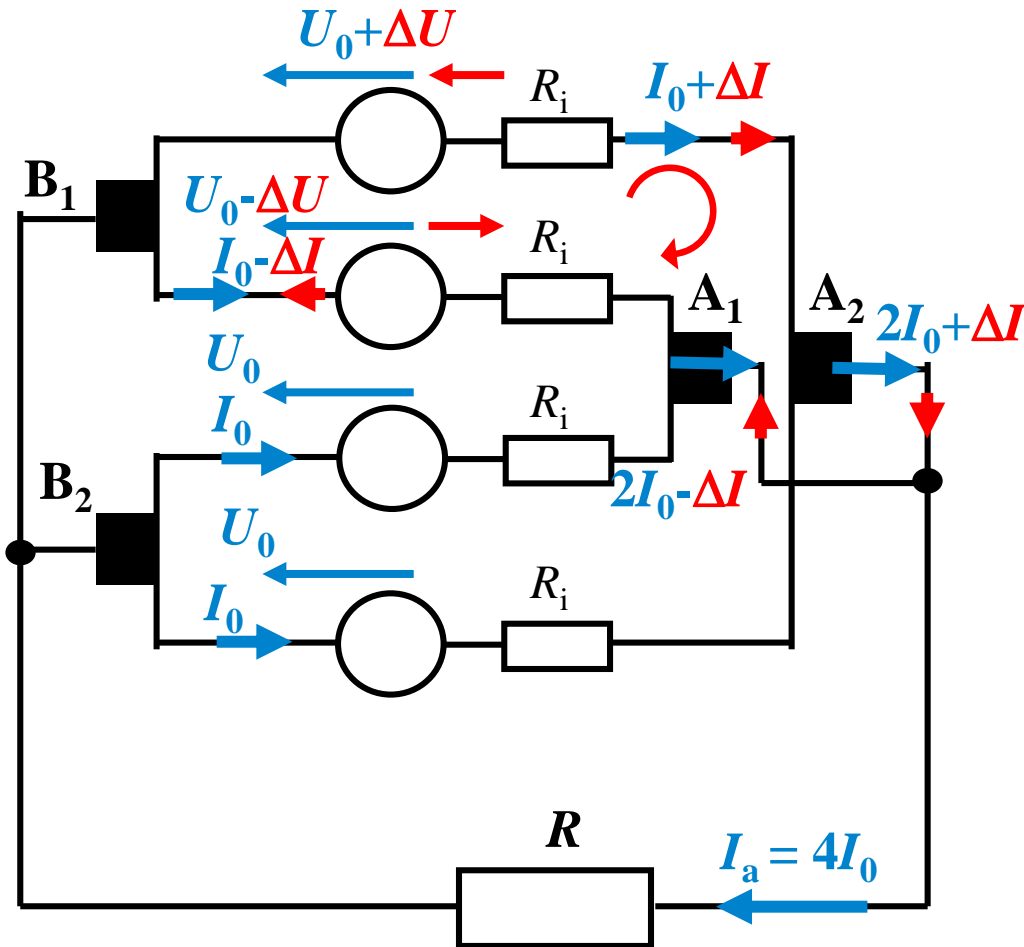
Der außen fließende Nutzstrom  $I_a$  wird vom Mittelwert  $U_0$  der beiden Spannungen getrieben!

$$I_a = 2I_0 = U_0 / (R + 0.5 \cdot R_i)$$

Zusätzlich fließt ein **innerer Kreisstrom  $\Delta I$**  als **Ausgleichsstrom** zwischen beiden Spannungsquellen (der von deren Spannungsdifferenz  $2\Delta U$  getrieben wird) über den Kommutator und nur quer über die Bürsten A, B!

$$\Delta I = 2\Delta U / (2R_i) = \Delta U / R_i$$

# Ausgleichsströme belasten Bürstenkontakt!



Generator, Erzeuger-Zählpeilsystem

## Beispiel:

Vierpolige Schleifenwicklung = vier parallele Wicklungszweige,  $2p = 2a = 4!$

z. B.: Zwei Spannungszweige mit unterschiedlicher induzierter Spannung

⇒ Ausgleichstrom  $\Delta I$  fließt über **parallele Bürsten  $A_1$  und  $A_2$**

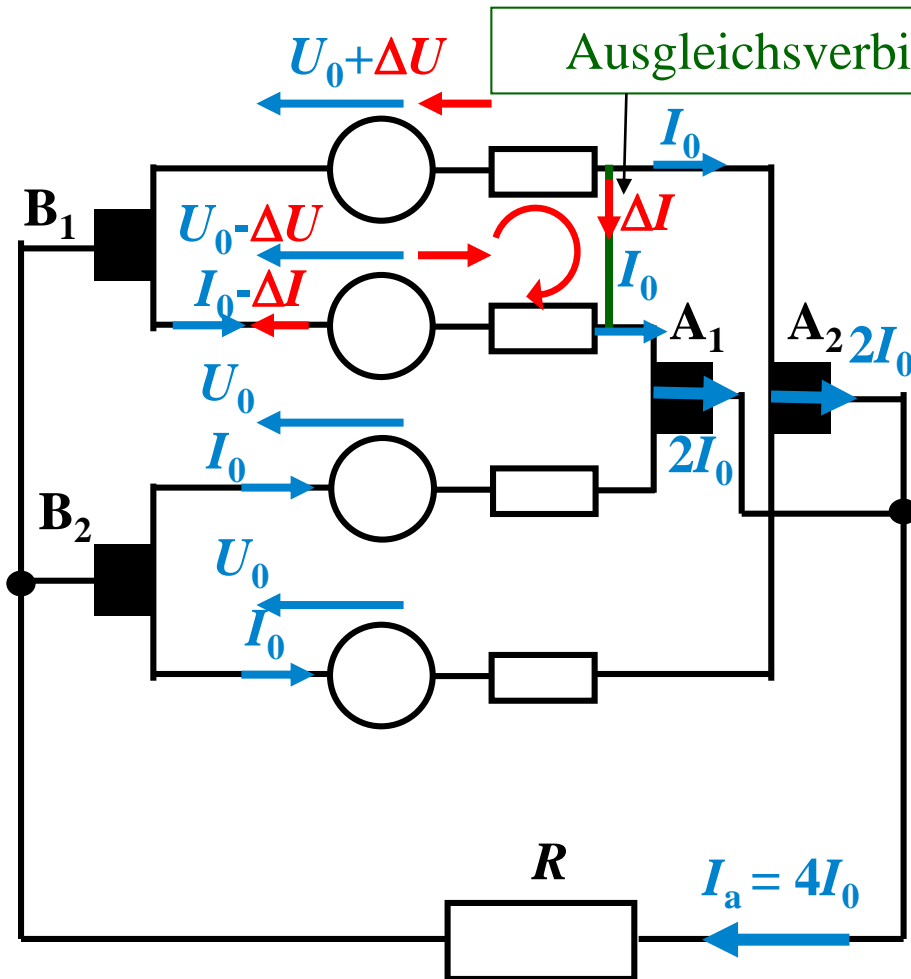
⇒ Bürste  $A_2$  wird elektrisch überlastet!

## Beispiel:

$\Delta I / 2I_0 = 0.2$ ,  $2p = 2a = 4$ :

Bürste  $A_2$  trägt **120%**, Bürste  $A_1$  **80 %** des Nenn-Bürstenstroms ⇒  $A_2$  elektrisch überlastet, **Bürstenlänge nimmt rasch ab; Bürste muss getauscht werden = HOHER Wartungsaufwand!**

# Ausgleichsverbinder übernimmt den Ausgleichsstrom



Generator, Erzeuger-Zählpfeilsystem

## Abhilfe: Ausgleichsverbinder 1. Art:

Kupferleitungen, die Kommutatorlamellen mit (theoretisch) gleichem elektrischen Potential verbinden.

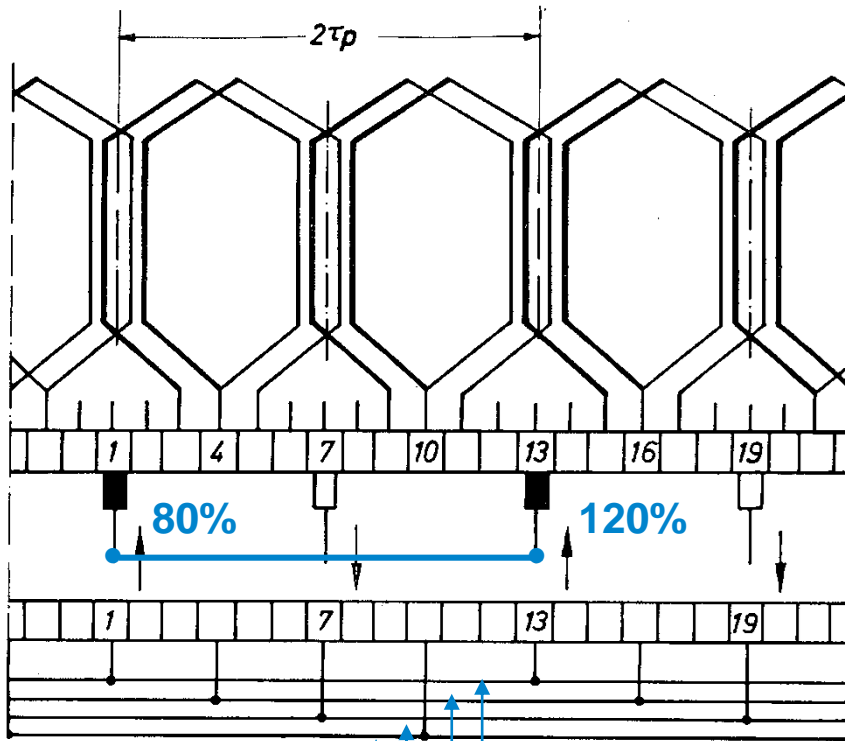
Ausgleichsstrom  $\Delta I$  fließt innerhalb der Ankerwicklung und durch den Ausgleichsverbinder, belastet aber NICHT den thermisch empfindlichen Bürstenkontakt!

## Beispiel:

$$\Delta I / 2I_0 = 0.2, 2p = 2a = 4:$$

Ausgleichsstrom im Ausgleichsverbinder 20 % des Nenn-Bürstenstroms, fließt aber NICHT über den empfindlichen Bürstenkontakt.

# Ausgleichsverbinder 1. Art für die Schleifenwicklung



**Ausgleichsverbinder 1. Art**  
(„Ausgleicher“)

Hier: Nur jede dritte Spule an Ausgleichern  
angeschlossen, also 4 Ausgleicher

„Ausgleichsverbinder-Schritt“:  $y_V = K / p$

## **Beispiel:**

$2p = 4$ ,  $2a = 4$ ,  $u = 2$ ,  $Q_r = 12$ ,  $K = 12 \cdot 2 = 24$ ,  
Ausgleichsverbinder-Schritt:

$$y_V = K/p = 24/2 = 12$$

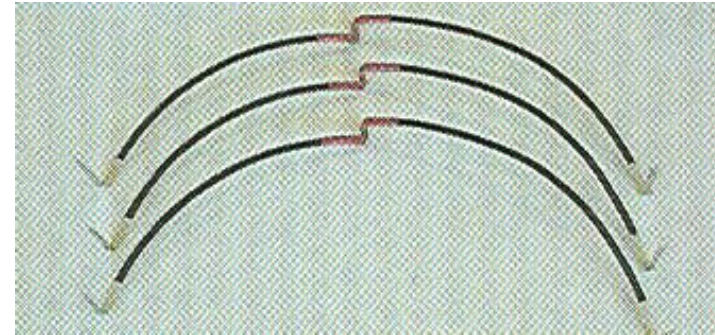
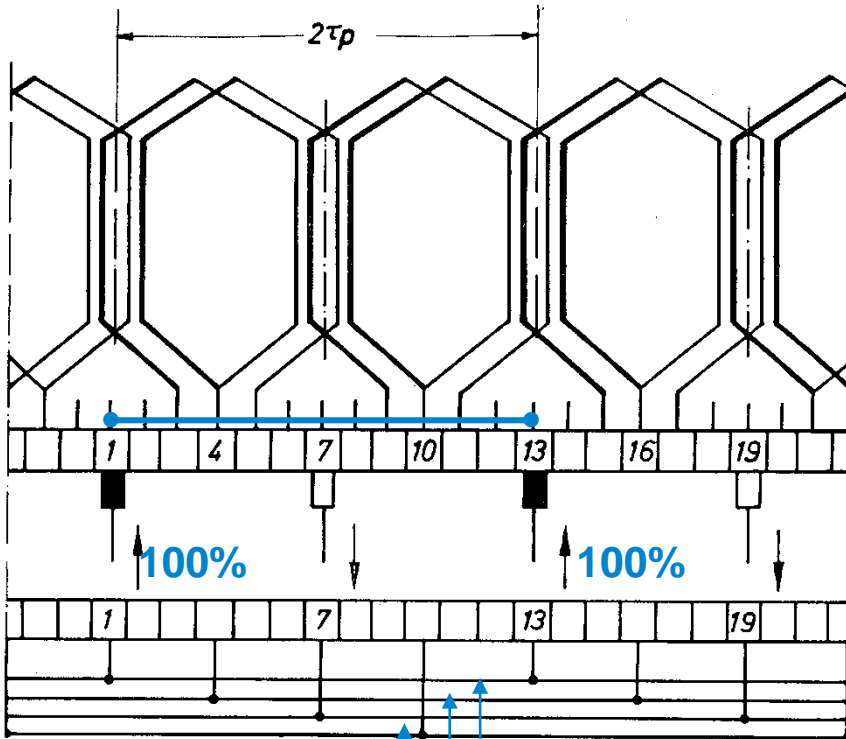
Lamelle 1 und 13 durch Ausgleicher 1. Art  
verbunden usw.  $\Rightarrow$  12 Ausgleicher

Am besten: Alle Spulen an Ausgleicher  
angeschlossen, aber teuer; daher meist nur eine  
Spule je Nut an Ausgleichern angeschlossen

z. B.

bei  $u = 2$  Spulen je Nut = 6 Ausgleicher:  
Jede zweite (allg.  $u$ -te Spule) an Ausgleichern

# Montage der Ausgleichsverbinder 1. Art



**Ausgleichsverbinder 1. Art** für vierpolige  
Wicklung: Verbinder-Schritt = 2 Polteilungen =  
halber Umfang



Quelle: Fa. Brenner, Bürstadt

**Ausgleichsverbinder 1. Art unter der Bandage**

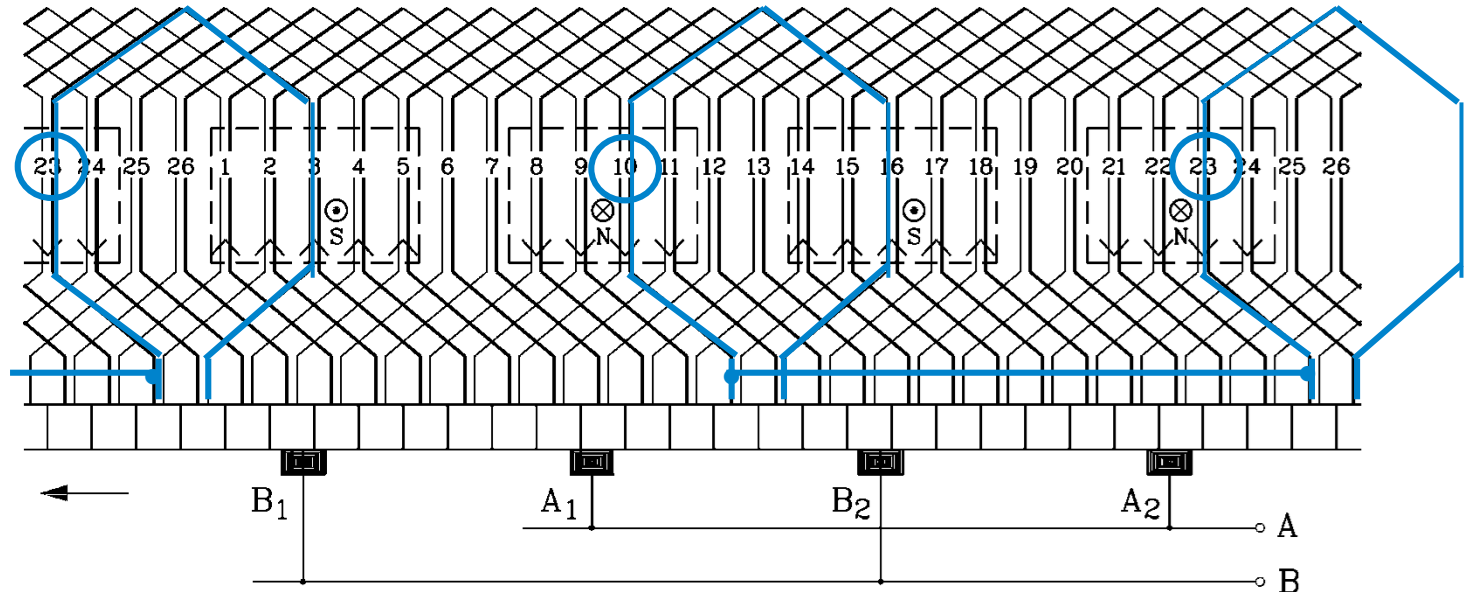




# Beispiel: $K = 26$ , $2p = 4$ : Ausgleichsverbinder 1. Art

Ausgleichs-  
verbinder-Schritt:

$$y_V = K/p$$

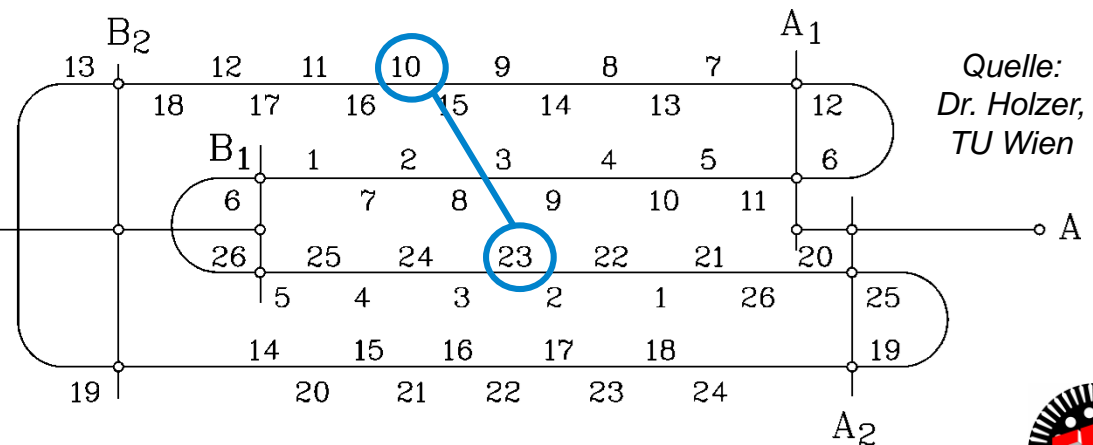


**Beispiel:**

$$y_V = K/p = 26/2 = 13$$

Es kann z. B. Kommutator-  
segment 10 mit 23 verbunden  
werden, weil sie theoretisch  
auf gleichem Potential liegen!

$$K = Q_r = 26, 2p = 4, y_1 = 6, y_2 = 5, y = 1$$

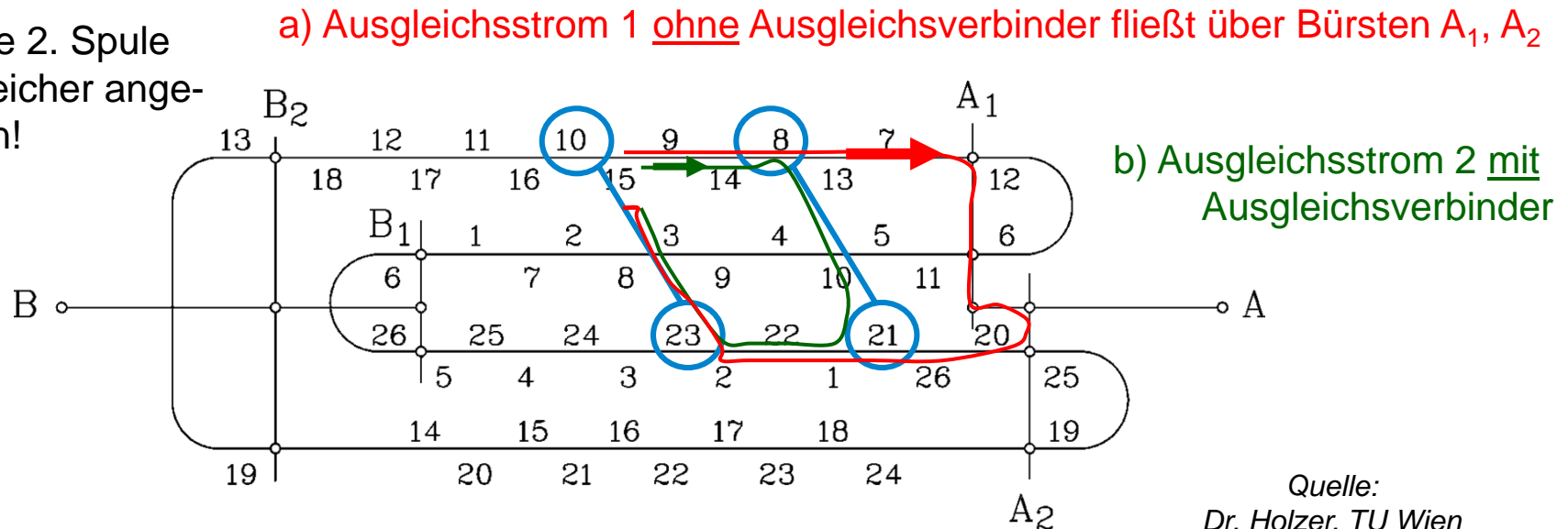


Quelle:  
Dr. Holzer,  
TU Wien



# Wirkung der Ausgleichsverbinder 1. Art

Hier: Jede 2. Spule an Ausgleicher angeschlossen!



Beispiel:

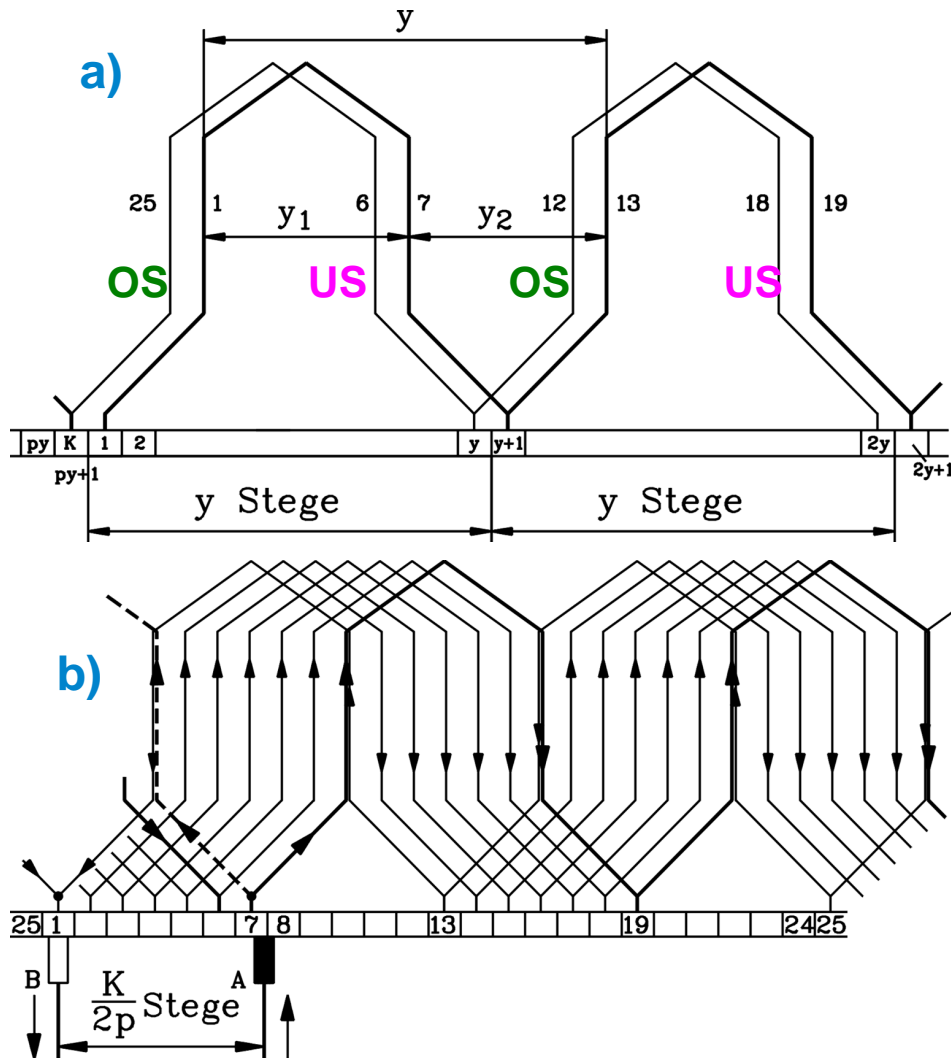
$$y_V = K/p = 26/2 = 13 \quad K = Q_r = 26, 2p = 4, y_1 = 6, y_2 = 5, y = 1$$

- a) **OHNE Ausgleicher:** z. B. Spulenseiten 10 (OS) & 23 (OS) haben (Unsymmetrie!) ungleiches el. Potential  $\Rightarrow$  Potentialdifferenz treibt **Ausgleichsstrom 1**, der auch über den Bürstenkontakt fließt und diesen zusätzlich thermisch belastet!
- b) **MIT Ausgleicher:** Zwischen Spule 10 und 23, 8 und 21 usw. angeordnet  $\Rightarrow$  Es fließt **Ausgleichsstrom 2**, aber intern über diese Ausgleichsverbinder  $\Rightarrow$  Er belastet Bürsten NICHT!





# Entstehung der Wellenwicklung



a) In Serie geschaltete “wellenförmige” Ankerspulen:

Bilden nach einem Anker-Umlauf NACH RECHTS einen “Wellenzug”

Anfang und Ende des Wellenzugs um eine Segmentteilung auseinander

b) Nach  $(K-1)/(2p)$  Wellenzügen ist die Hälfte aller OS und US belegt.

z. B.: Start bei 7, Ende bei 1

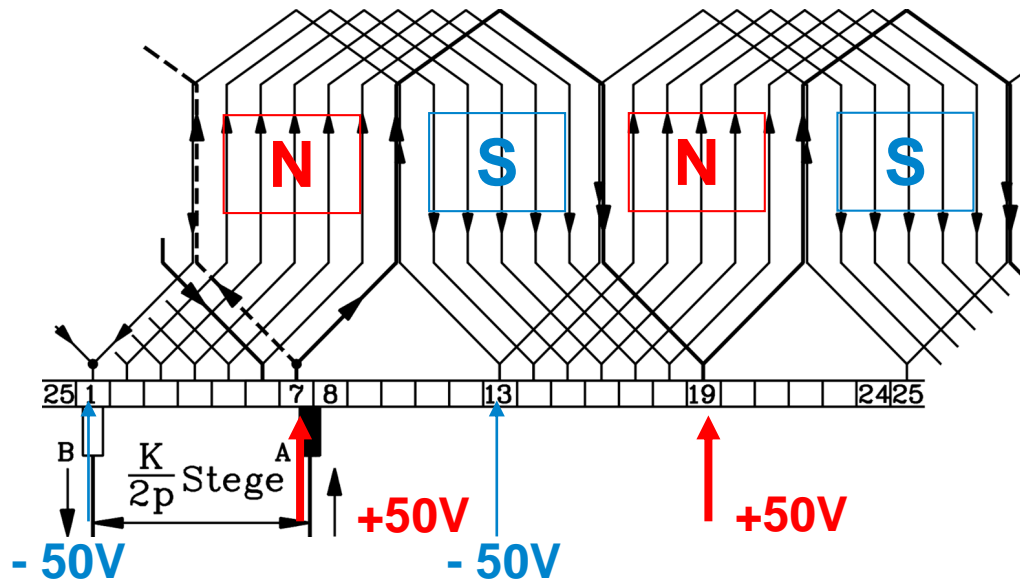
⇒ Derselbe Vorgang NACH LINKS (= gestrichelt) füllt die restlichen OS und US-Positionen:

Die eingängige Wellenwicklung hat stets zwei parallele Zweige:  $a = 1, 2a = 2$ , unabhängig von der Polzahl !

# Wellenwicklung: 2 Bürsten (+, -) reichen!

- Nur eine Plus- und eine Minus-Bürste ausreichend, da nur zwei parallele Zweige
- **ABER:** Großer Bürsten-Querschnitt für gesamten Strom  $I_a$  nötig  
⇒ große Bürstenmasse = UNGÜNSTIG wegen schlechter Laufruhe!
- Die von den Bürsten kontaktierten Spulen liegen in der neutralen Zone:  
Es wird in ihnen **keine** Spannung induziert.

**Beispiel:** Bei Kommutatorsegment 19 dasselbe el. Potential wie bei Segment 7!



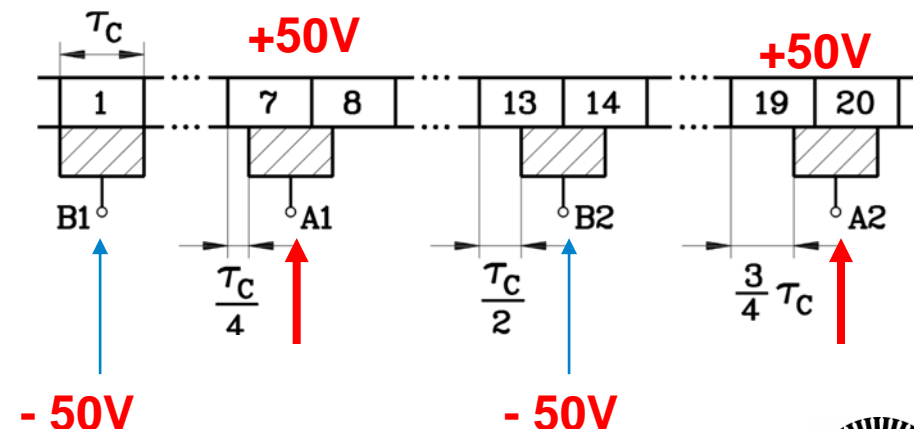
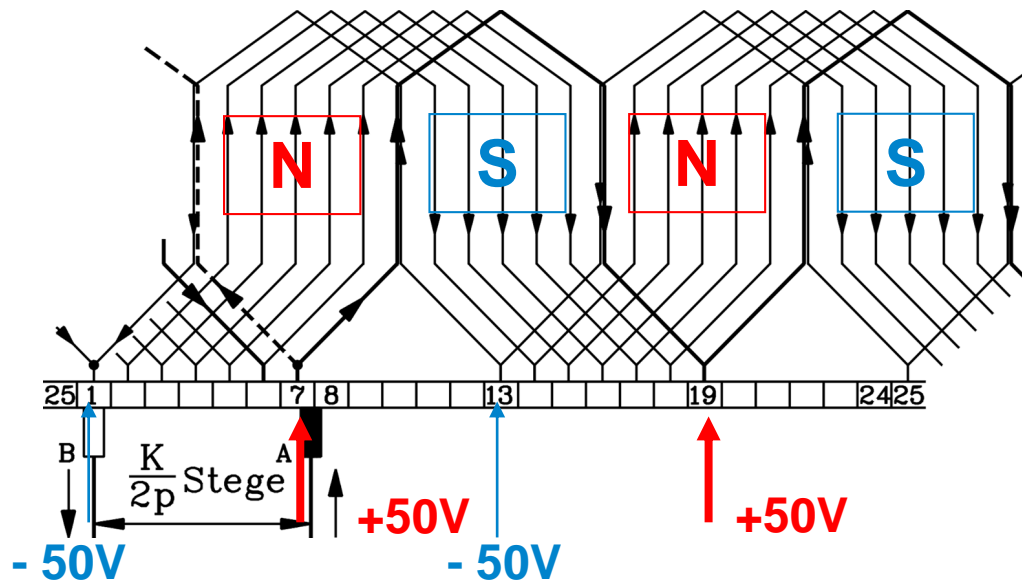
Zwischen A und B:  
Induzierte Spannung von  $p$   
Polen aufsummiert:

$$U_i = p \cdot z \cdot n \cdot \Phi$$

$p$ -fache Spannung von  
Schleifenwicklung!

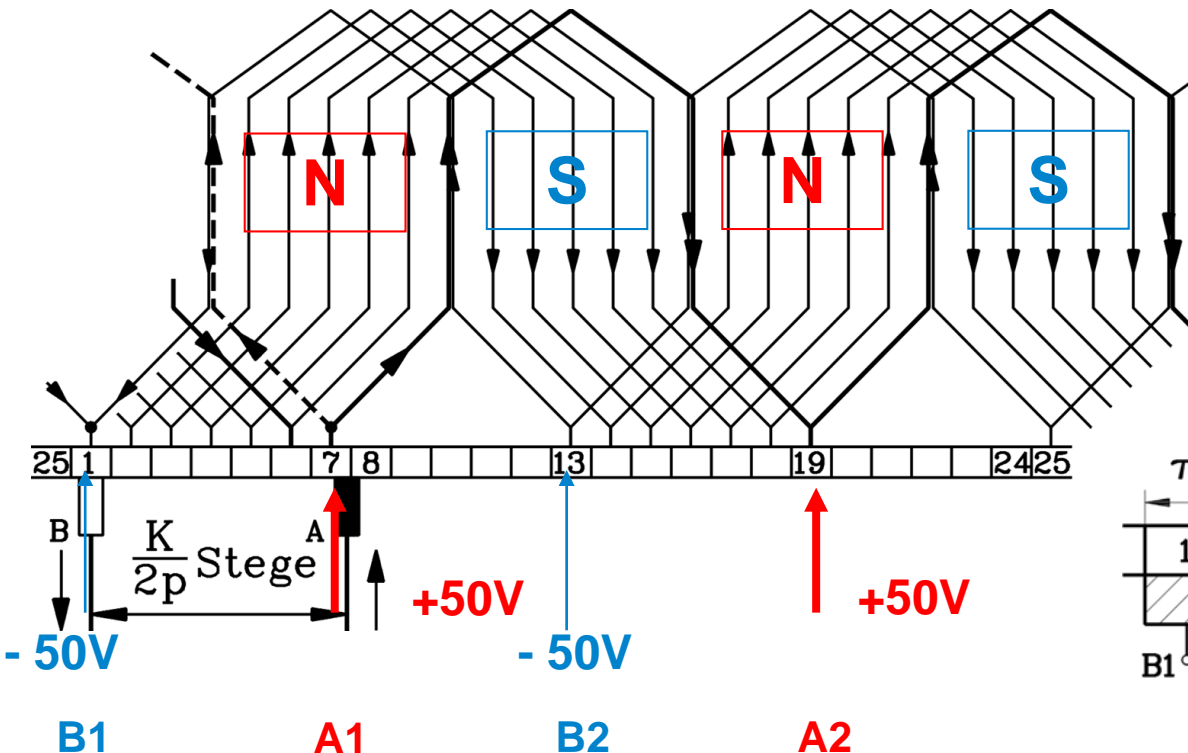
# Wellenwicklung mit $2p$ Bürsten

- **Gleiches Potential** bei Kommutatorsegmenten 1 und 13 (-) bzw. 7 und 19 (+):  
 $\Rightarrow$  Man kann im Abstand der doppelten Polteilung weitere A-Bürste u. B-Bürste setzen und mit der jeweils ersten parallel schalten.
- Es erfolgt nur ein Kurzschluss spannungsloser Spulen  
 (z. B. zwischen Kommutatorsegment 7-19, 8-20 usw.):
- **Stromaufteilung auf  $p$  Bürsten  $I_a/p \Rightarrow p$  Plus- und  $p$  Minus-Bürsten mit kleinem Querschnitt (und Masse)  $1/p$  möglich = gute Laufruhe.**

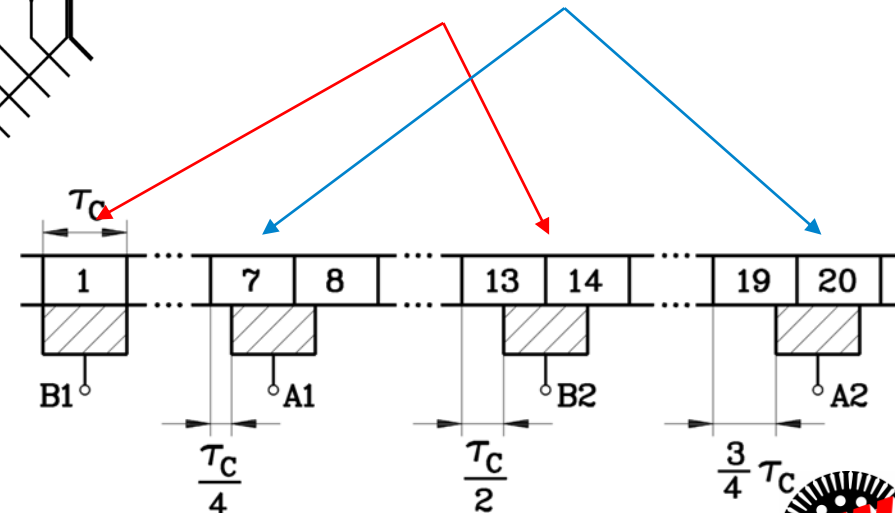


# Bei Wellenwicklung keine Ausgleicher erforderlich

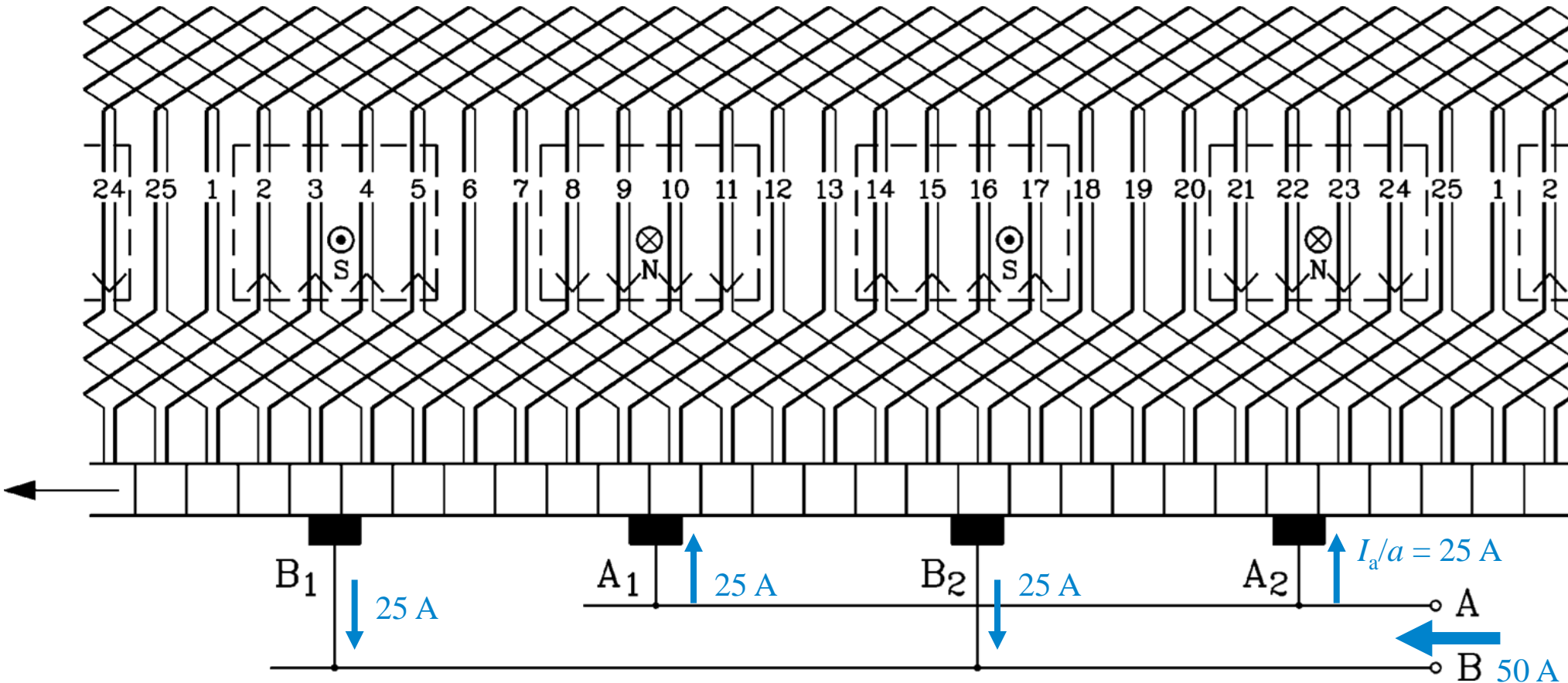
- Die spannungslosen Spulen wirken als **Ausgleicher 1. Art** (= sie verbinden gleiche Potentiale A1 und A2 bei  $2p = 4$ ). (Analog bei B1 und B2).
- $\Rightarrow$  Eingängige Wellenwicklung: Zwei parallele Zweige =  
= **kein** Ausgleichsstrom über die Bürsten, sondern über die spannungslosen Spulen!



Auf demselben el.  
Potential



# Vollständige eingängige Wellenwicklung



**Wellenwicklung:**  $y_1 = (K - 1) / (2p) = (25 - 1) / 4 = 6 = y_2$

**Beispiel:**  $Q_r = 25, 2p = 4, u = 1, N_c = 1, a = 1, K = 25, y_1 = 6, y_2 = 6, y = 12$

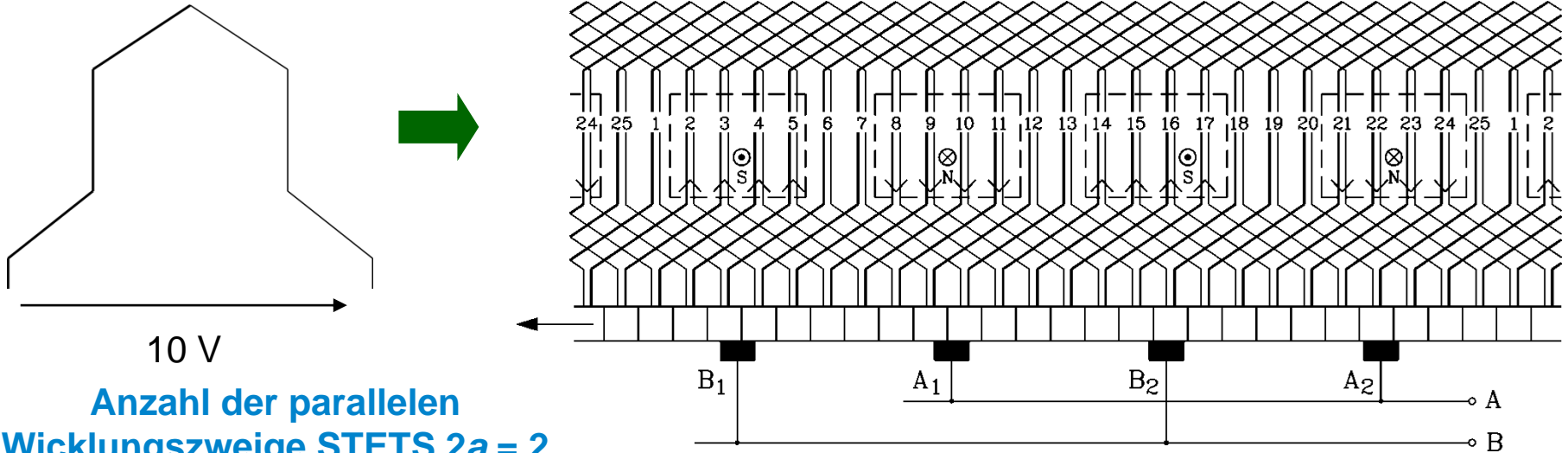
Quelle: Dr. Holzer, TU Wien

$I_a = 50 \text{ A}$

# Eingängige Anker-Wellenwicklung: $2a = 2$

## Übung

**Beispiel:**  $Q_r = 25, 2p = 4, u = 1, N_c = 1, a = 1, p = 2, K = 25, y_1 = 6, y_2 = 6, y = 12$

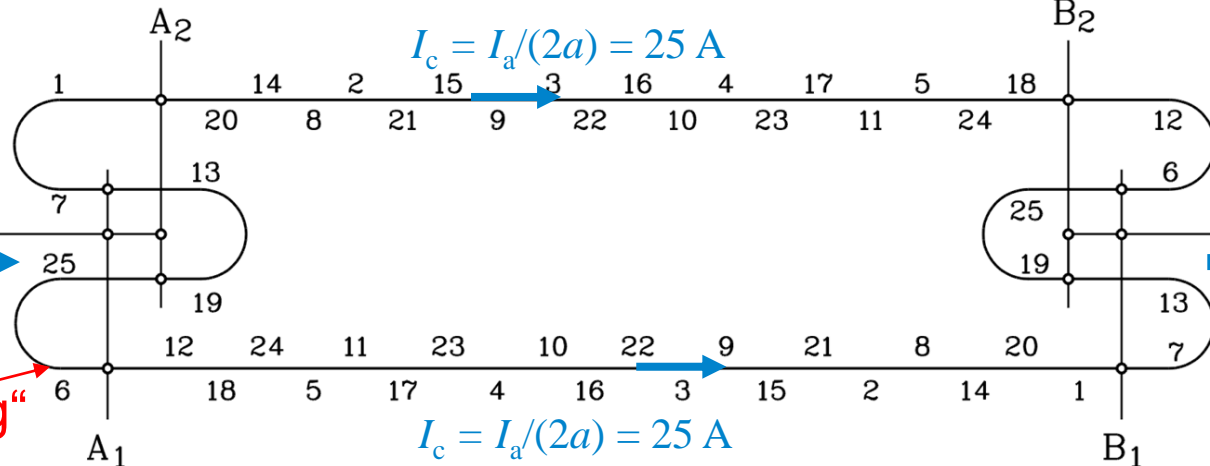


$U_a = 90 \text{ V}$   
(=  $9 \cdot 10 \text{ V}$ )

$+45 \text{ V}$

$I_a = 50 \text{ A}$

„1 Gang“



$P_\delta = U_i I_a =$   
 $= 90 \cdot 50 = 4.5 \text{ kW}$

$-45 \text{ V}$   
 $I_a = 50 \text{ A}$

Quelle: Dr. Holzer, TU Wien

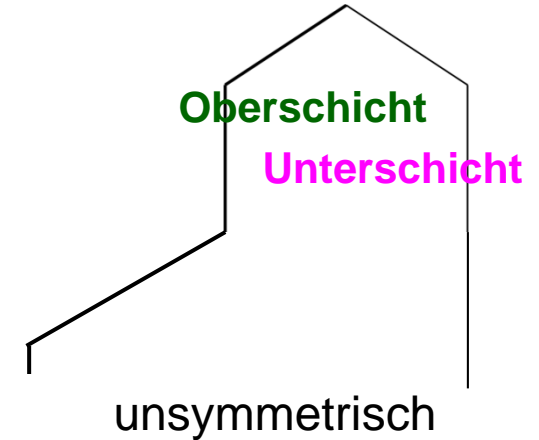
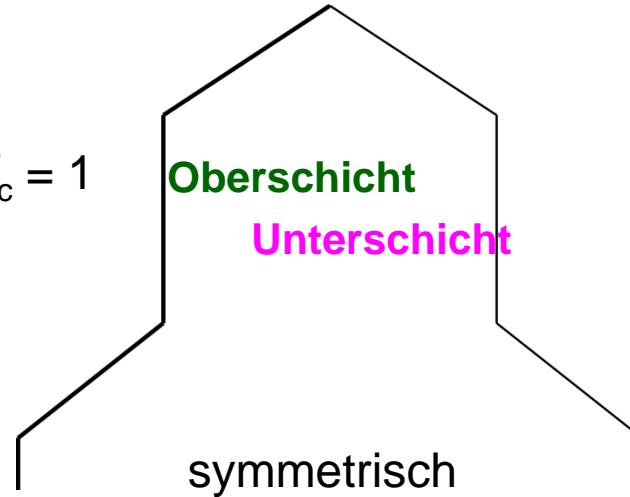


# Schleifenwicklung

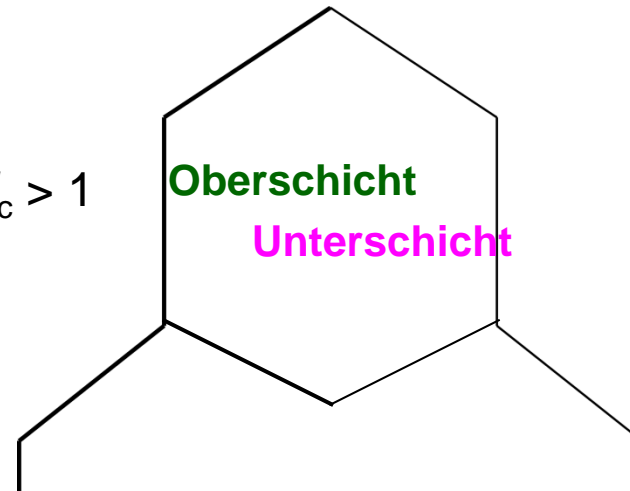
# Wellenwicklung



Spule  $N_c = 1$



Spule  $N_c > 1$



Eine Ankerspule als  
Grundelement



# Segmentspannung - Überschlagsgefahr

Mittlere Segmentspannung:

$$U_{s,av} = \frac{U_a}{K/(2p)} = \frac{p}{a} \cdot 2N_c v_a l_e B_{\delta,av}$$

Lokale Segmentspannung bei  $I_a = 0$ :

$$U_{s,max} = U_{s,av} \cdot \frac{B_{\delta,m}}{B_{\delta,av}} = \frac{U_{s,av}}{\alpha_e}$$

Zulässige Grenzwerte:

$$U_{s,av} < 20 \text{ V}, U_{s,max} < 35 \text{ V}$$

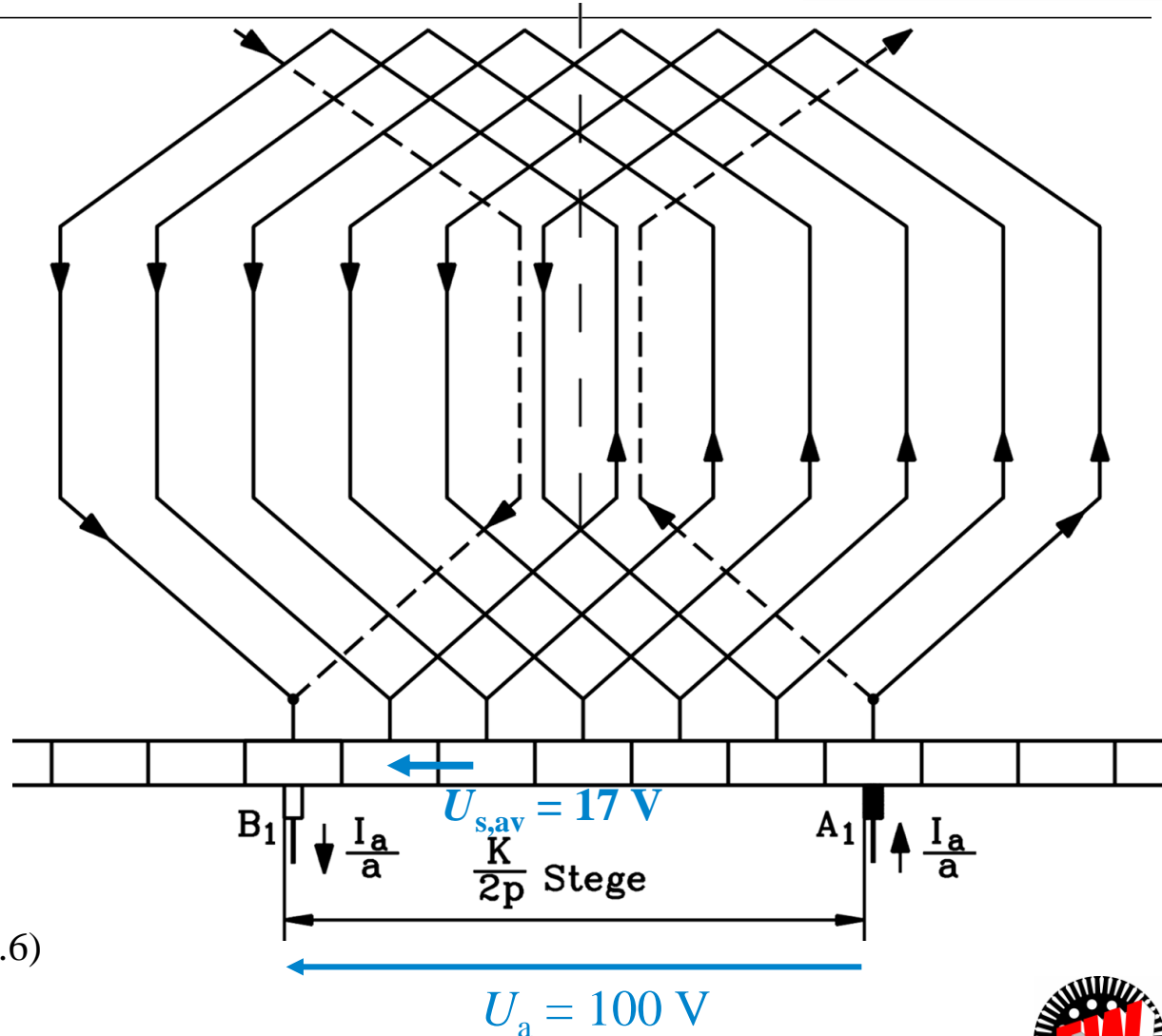
**Beispiel:**  $p/a = 1$ ,  $K/(2p) = 6$ ,  $U_a = 100 \text{ V}$

Mittlere Segmentspannung:

$$U_{s,av} = 100 \text{ V} / 6 = 17 \text{ V} < 20 \text{ V}$$

Lokale Segmentspannung ( $\alpha_e = 0.6$ ):

$$U_{s,max} = 17 \text{ V} / 0.6 = 28 \text{ V} < 35 \text{ V} (\approx 20 \text{ V} / 0.6)$$



# Vergleich: Schleifen- und Wellenwicklung (1)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

$$U_i = \frac{z \cdot p}{a} \cdot n \cdot \Phi$$

## Schleifenwicklung

Anzahl parallele Zweige = Polzahl:

$$2a = 2p$$

Ausgleicher 1. Art erforderlich

Hohe Ströme möglich,

weil viele parallele Zweige

Spannung steigt proportional  $z$

**Hohe Leistung möglich (bis ca. 12 MW)**

## Wellenwicklung

Anzahl parallele Zweige stets 2:

$$2a = 2$$

selbstaussgleichend

Strom begrenzt auf ca. 500 A,  
da max. ca. 250 A / Parallelzweig

Hohe Spannung,

da diese proportional  $z \cdot p$  steigt.

**Leistung begrenzt (ca. 300 kW)**

Bei  $U_a = 600$  V:

$$600 \text{ V} \cdot 500 \text{ A} = 300 \text{ kW}$$



# Vergleich: Schleifen- und Wellenwicklung (2)



- **Kleine Leistung:** Meist Wellenwicklung: billiger (keine Ausgleichverbinder),  
Viele Serienleiter  $\Rightarrow$  ausreichend hohe Spannung trotz des kleinen Flusses  $\Phi$
- **Große Leistung:** Ausschließlich mit Schleifenwicklung

**Beispiel:** 6 MW-Walzwerksantriebe mit 18 Polen:

Schleifenwicklung: 18 parallele Ankerwicklungsarme

## 2.7m-Walzwerks-Grobgerüst-Tandem-Antrieb 2 x 6 = 12 MW :

$n = 50 \dots 100/\text{min}$ ,  $M = 1146 \dots 573 \text{ kNm}$ ,  $2p = 18 = 2a$ ,  $U_a = 1300 \text{ V}$ ,  $I_a = 4870 \text{ A}$ ,

Bürstenstrom  $I_a/(2a) = 270 \text{ A}$ , Kommutator-Stegzahl:  $K = 1638$ ,  $K/(2p) = 91$

Stator-Innendurchmesser  $d_{si} = 4.2 \text{ m}$ , Eisenlänge  $l_e = 0.8 \text{ m}$ ,

Kommutator-Durchmesser  $d_C = 2.9 \text{ m}$ ,

Segmentspannung  $U_{s,av} = 1300 \text{ V}/91 = 14.3 \text{ V} < 20 \text{ V}$

Quelle: ELIN-Union AG

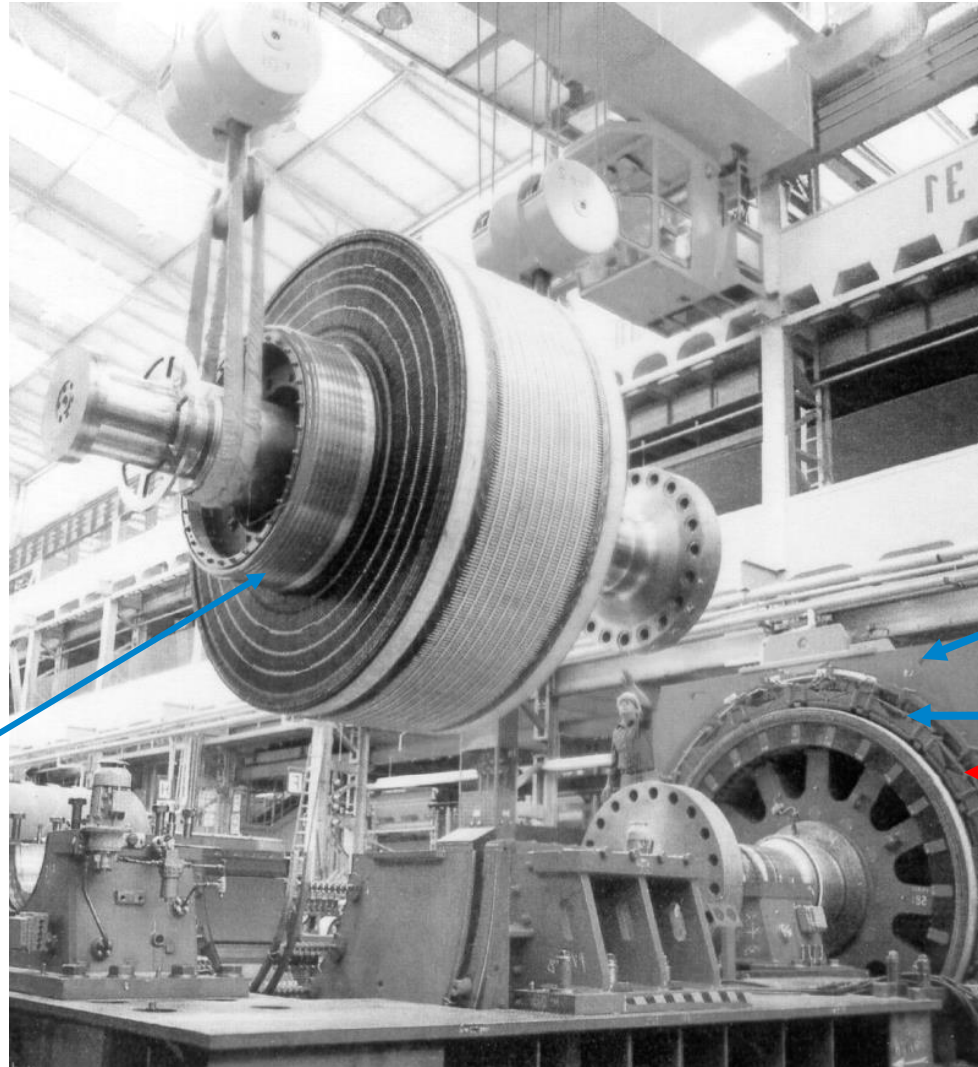


# Grosse hochpolige fremderregte Gleichstrommaschine

## Schleifenwicklung

Tandem = Zwillings-  
Anordnung

Kommutator



**Weltgrößter  
Walzwerks-  
Zwillingsumkehr-  
motor**

2 x 12 785 kW

90 ... 150/min

1357 ... 814 kNm

$2p = 2a = 18$

Zweite Gleich-  
strommaschine

S

N

S

Quelle: Siemens AG



## Zusammenfassung: Ankerwicklungen

- Läuferwicklung: Schleifen- oder Wellenwicklung (eingängig)
- Mehrgängige Wicklungen veraltet (nicht mehr im Einsatz)
- Schleifenwicklung: Polzahl = parallele Wicklungszweigzahl
- Wellenwicklung: Nur zwei parallele Zweige
- Schleifenwicklung: für große Ströme und Leistungen = große Maschinen
- Wellenwicklung: für kleinere Maschinen bis ca. 300 kW

## 10. Gleichstromantriebe

10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine

10.2 Ankerwicklungen

**10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment**

10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung

10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole

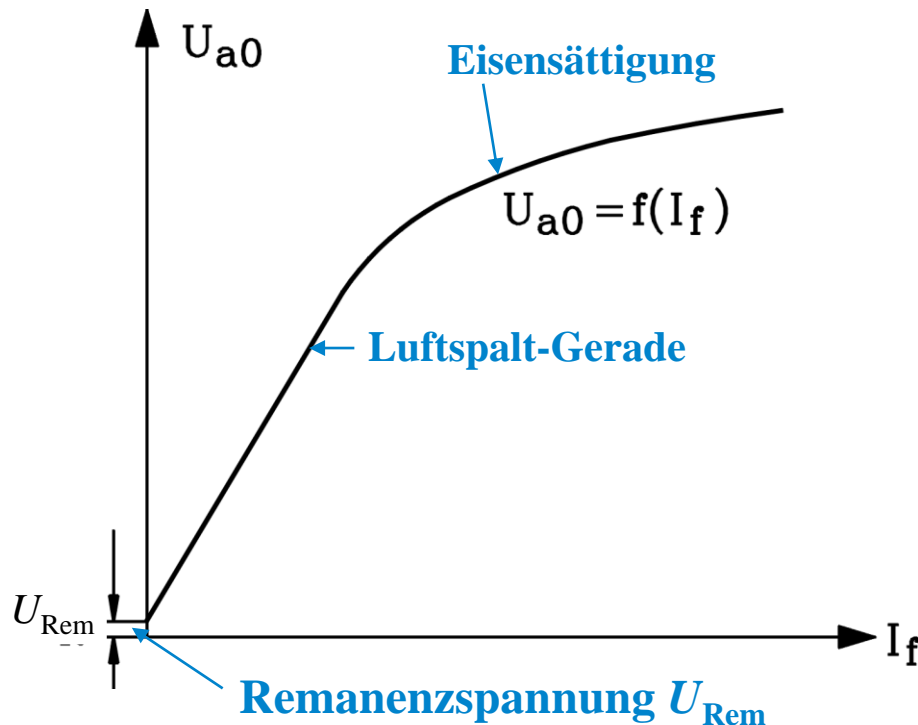
10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine

10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb

10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine

# Induzierte Spannung = Leerlaufkennlinie (Generator)

**Leerlaufkennlinie:**  $U_{a0} = U_i$  ( $n = \text{konst.}$ )  
Generatorisch gemessene Ankerspannung

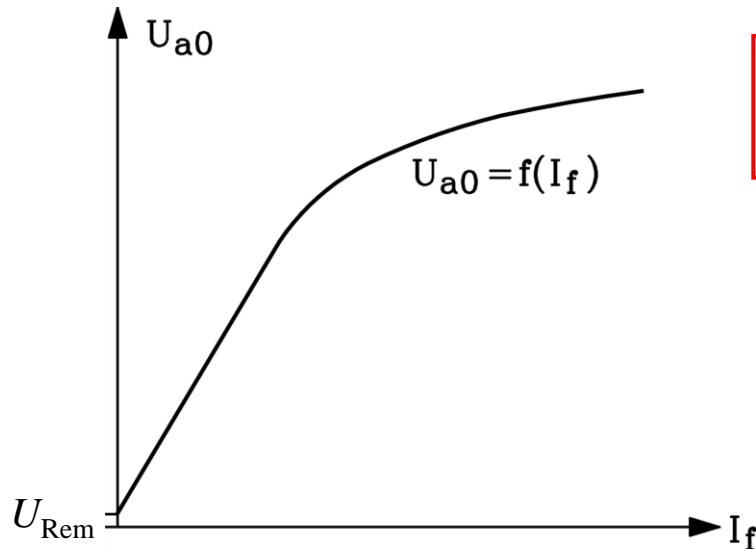


**$U_i$ -Veränderung über  $n$  und  $I_f$ :**

$$U_{a0} = U_i = z \cdot \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi(I_f) = k_1 \cdot n \cdot \Phi$$

- Induzierte Spannung  $U_i$  steigt **LINEAR**
  - a) mit Drehzahl  $n$
  - b) mit Fluss  $\Phi$
  - c) **nichtlinear** mit Feldstrom  $I_f$
- denn Eisensättigung:  
Fluss  $\Phi$  steigt **nichtlinear** mit Feldstrom  $I_f$

# Generatorische Anker-Leerlaufspannung $U_{a0}$



$$U_{a0} = U_i = z \cdot \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi(I_f) = k_1 \cdot n \cdot \Phi$$

- Feldstrom abgeschaltet:  $I_f = 0$ : Es verbleibt **Remanenzflussdichte  $B_{Rem}$**  im Statoreisen; induziert **kleine Remanenzspannung  $U_{Rem}$** .
- Motorbetrieb: Von außen an Bürsten externe Spannung  $U > U_i$  angelegt:  $U = U_i + I_a R_a + U_b$   
Es fließt Gleichstrom (**Ankerstrom  $I_a$** ).
- **Ankerwicklungswiderstand  $R_a$**  und Bürstenspannungsfall  $U_b$  (ca. 2V) sind **klein !**



# Beispiel: Gleichstrommaschinenparameter

- **Rotor = Läufer = Anker, Stator = Ständer** Motor: 560 V, 70 A, 35 kW, 4500/min
- **Windungszahl** je Ankerspule:  $N_c$  (z. B.: 5), ideale Polbedeckung: z.B.:  $\alpha_c = 0.7$
- **Fluss pro Pol:**  $\Phi = \alpha_c \cdot \tau_p \cdot l_e \cdot B_{\delta,m}$  z.B.:  $B_{\delta,m} = 0.95$  T, Polteilung  $\tau_p = 0.1$  m, Länge  $l_e = 0.12$  m, daher  $\Phi = 0.7 \cdot 0.1 \cdot 0.12 \cdot 0.95 = 0.008$  Wb
- Anzahl der **Spulenseiten je Rotornut**  $2u$  (z. B.  $u = 3$ )
- Anzahl der **Rotornuten**  $Q$  (z. B. 30)
- Anzahl der **Kommutatorlamellen** und **Ankerspulen:**  $K = Q \cdot u$  (z. B.  $30 \cdot 3 = 90$ )
- Anzahl der **Leiter am Ankerumfang:**  $z = K \cdot N_c \cdot 2$  (z.B.:  $90 \cdot 5 \cdot 2 = 900$ )
- Anzahl der **Pole**  $2p =$  Anzahl der **parallelen Ankerzweige**  $2a$  (z. B. Schleifenwickl.: 4)
- **Ankerumfang:**  $2p\tau_p = d_{si}\pi$  (z. B.  $4 \cdot 0.1$  m = 0.4 m,  $d_{si} = 127.3$  mm),  
**Ankerumfangsgeschwindigkeit:**  $v_a = 2p\tau_p \cdot n$ ;  $v_a = 0.4 \cdot (4500/60) = 30$  m/s = 108 km/h

# Beispiel: Anker einer 200 kW-Gleichstrommaschine

Übung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Angaben:** Anker-Nennspannung 430 V, Nenndrehzahl  $n = 1470/\text{min}$ ,  
Ankerdurchmesser  $d_r = 400$  mm, Polzahl  $2p = 4$ , Ankerlänge  $l_e = 190$  mm,  $Q_r = 58$  Nuten,  
Spulenseiten je Nut & Schicht  $u = 4$ , Windungszahl/Spule  $N_c = 1$ ,  
äquivalente Polbedeckung  $\alpha_e = 0.7$ , maximale Luftspaltflussdichte:  $B_{\delta,m} = 0.86$  T,  
Schleifenwicklung  $2a = 4$

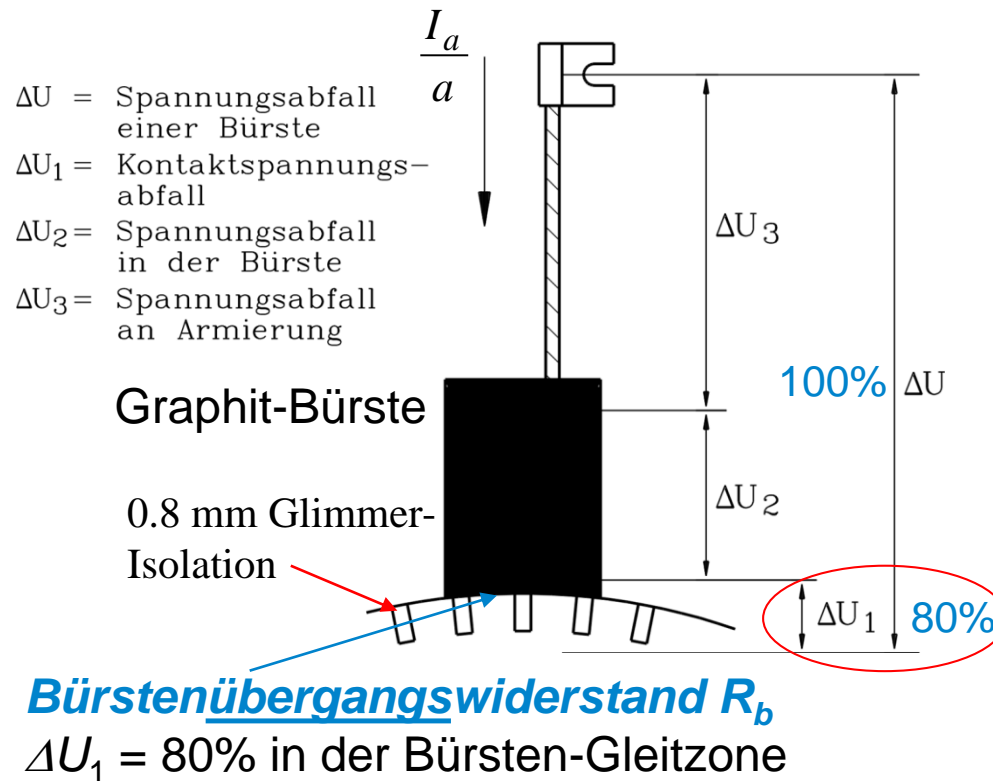
Bitte selbst rechnen

## Berechnungen:

- Anzahl der Kommutatorsegmente  $K = Q_r \cdot u = 58 \cdot 4 = \underline{232}$
- Gesamtleiterzahl  $z = 2 \cdot K \cdot N_c = 2 \cdot 232 \cdot 1 = \underline{464}$
- Polteilung  $\tau_p = d_{si} \cdot \pi/4 = 400 \pi/4 = \underline{314.2 \text{ mm}}$  ( $d_r \approx d_{si}$ )
- Hauptfluss pro Pol  $\Phi = \alpha_e \cdot \tau_p \cdot l_e \cdot B_{\delta,m} = 0.7 \cdot 0.3142 \cdot 0.19 \cdot 0.86 = \underline{35.9 \text{ mWb}}$
- **Induzierte Spannung**  
 $U_i = z \cdot (p/a) \cdot n \cdot \Phi = 464 \cdot (2/2) \cdot (1470/60) \cdot 0.0359 = \underline{408.5 \text{ V}}$
- Mittlere Segmentspannung zwischen zwei Kommutatorsegmenten bei Nenndrehzahl  
 $408.5/(232/4) = 7 \text{ V} < 18 \dots 20\text{V}$  (sonst Überschlag zwischen den Segmenten !)  
Zwischen den Segmenten 0.8 mm Glimmer als Isolation, aber Luftstrecke parallel !



# Der Bürstenkontakt (1)



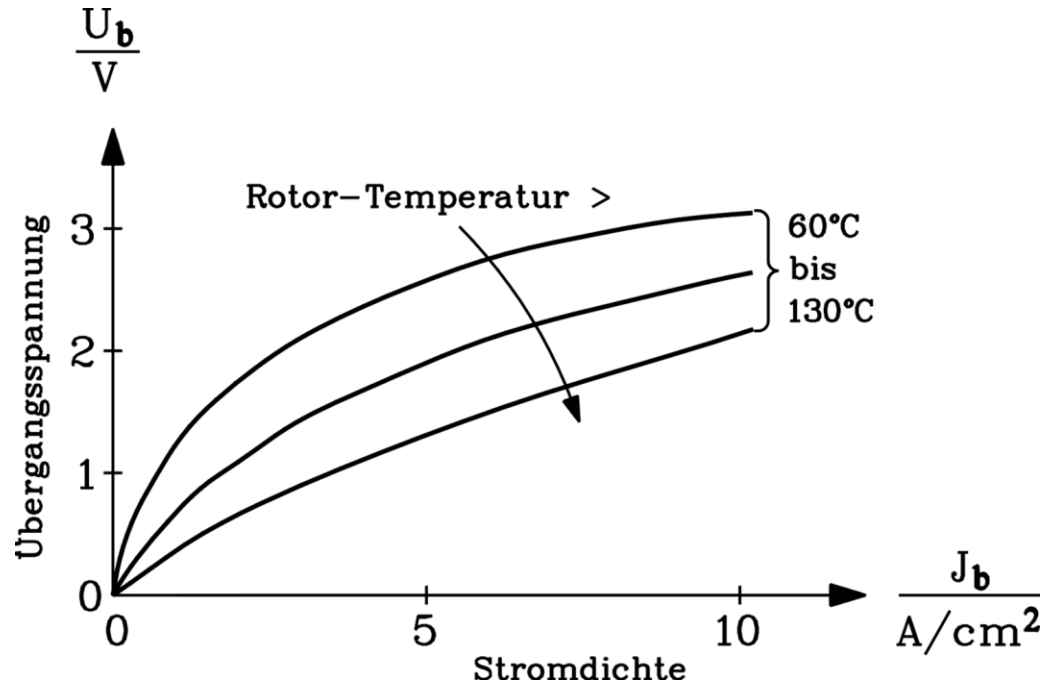
$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 \Big|_{I_{aN}} \approx 1 \text{ V}$$

$$\Delta U_A + \Delta U_B = \Delta U_b \Big|_{I_{aN}} \approx 2 \text{ V}$$

Quelle:

Schunk Kohlenstofftechnik, Giessen

# Der Bürstenkontakt (2)

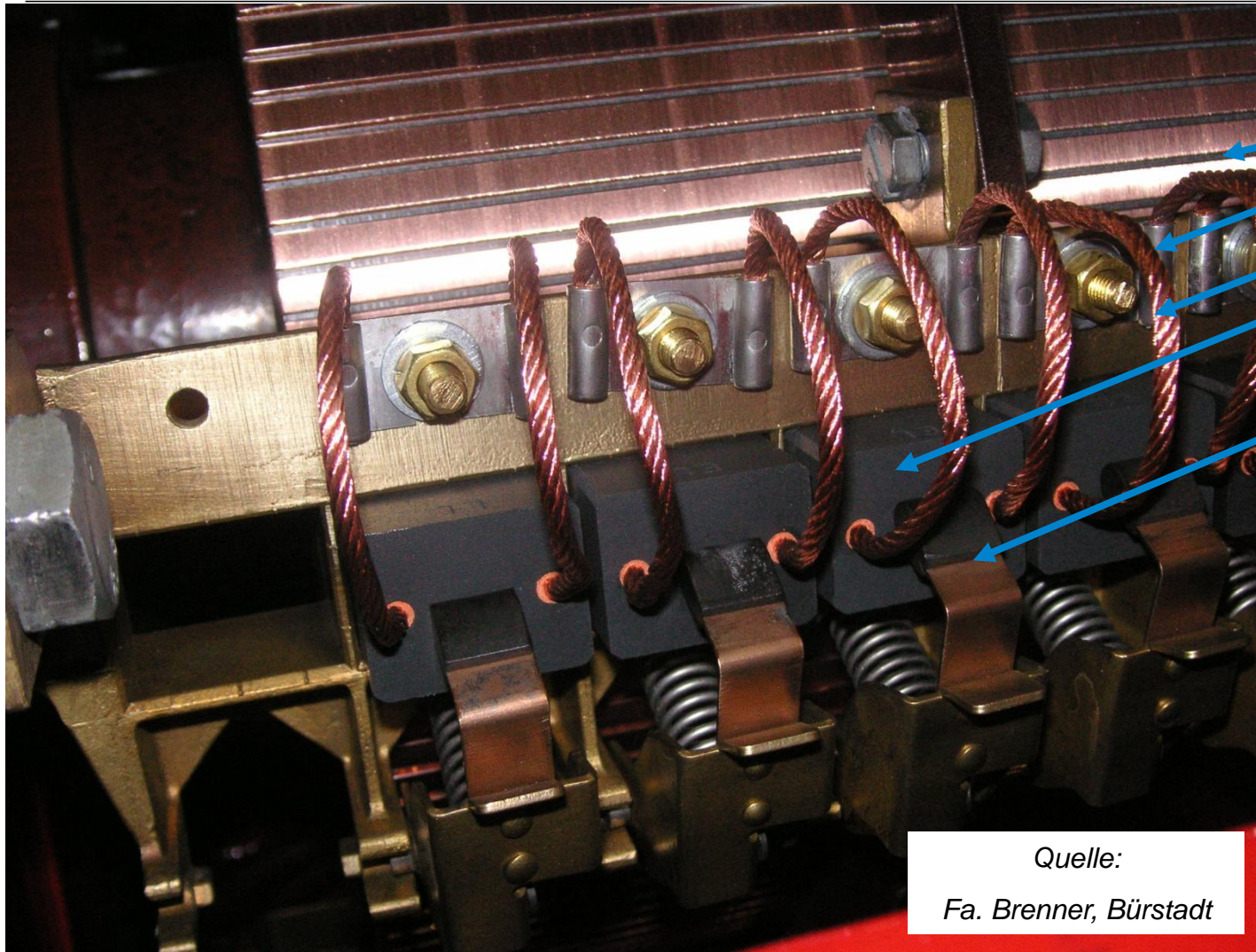


Quelle:  
Schunk Kohlenstofftechnik, Giessen

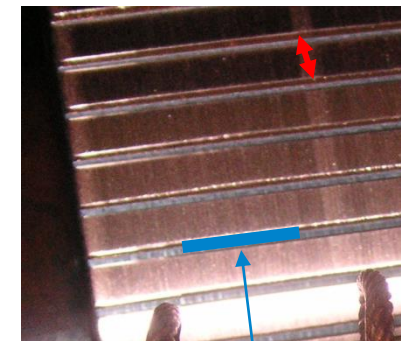
- Bürstenspannungsfall für A- und B-Bürste:  $U_b = \Delta U_A + \Delta U_B = \text{ca. } 2 \text{ V}$
- Bürstenspannungsfall  $U_b$ :
  - steigt nichtlinear mit der Bürstenstromdichte  $J_b$ ,
  - sinkt mit steigender Temperatur.
- Zulässige Dauer-Bürsten-Stromdichte  $J_b$ : **ca. 1/100 der Spulen-Stromdichte**
  - a) DAUERND:  $< 10 \text{ A/cm}^2$ , b) kurzzeitig ca.  $< 20 \text{ A/cm}^2$



# Kommutator und Graphitbürsten



- Kommutator-Lamellen
- Isolation (Glimmer)
- Bürstenhalter (Messing)
- Stromseile
- 5 Graphitbürsten parallel je Bürstenhalter
- Federdruck
- Kommutatorstegteilung  
ca. 3.2 mm im Minimum

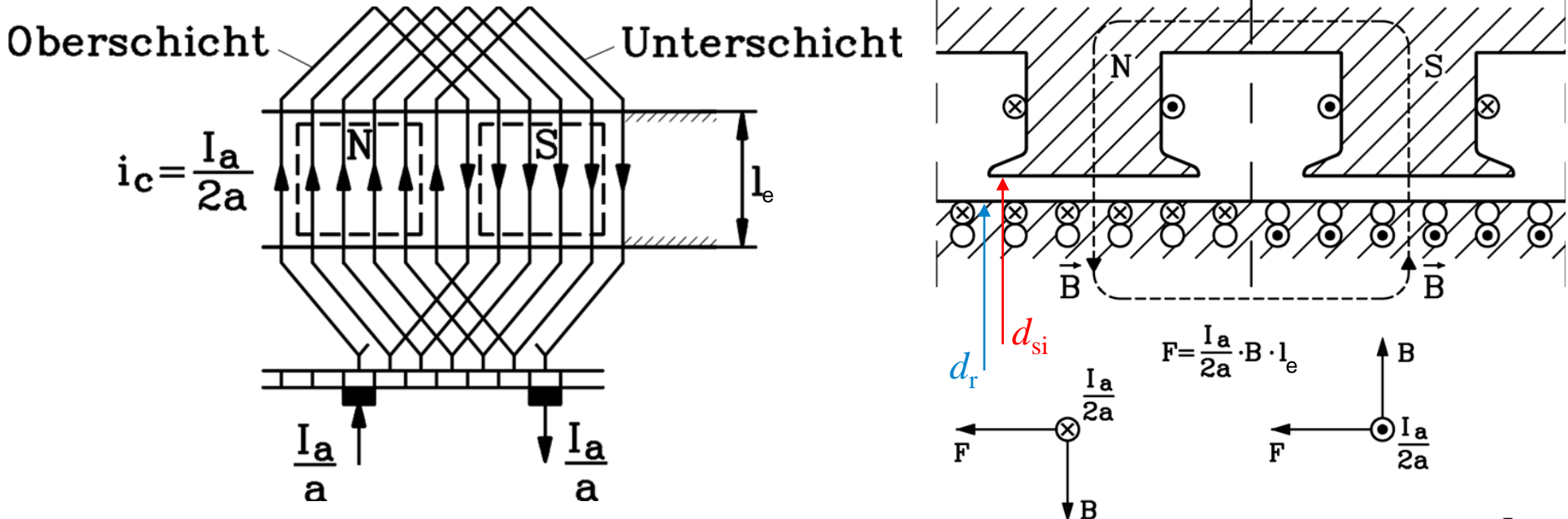


Glimmerisolierung  
ca. 0.8 mm

Quelle:  
Fa. Brenner, Bürstadt



# Elektromagnetisches Drehmoment $M_e$



Pro Pol existiert nur **eine** Stromrichtung. Strom teilt sich auf  $2a$  parallele Zweige:  $I_c = \frac{I_a}{2a}$   
 In der Ankerwicklung: **Wechselstrom**  $i_c$  je Spule, außen: **Gleichstrom**  $I_a$

Gleichsinnige Kraft auf die Ankerleiter im Luftspaltfeld  $B_\delta$ :  $F_c = I_c B_\delta l_e$

Mittlere Kraft pro Leiter:  $F_{c,av} = I_c \alpha_e B_{\delta,m} l_e$

Hebelarm  $d_r / 2 = (d_{si} - 2\delta) / 2 \approx d_{si} / 2 = p \tau_p / \pi$

**Drehmoment** bei  $z$  Leitern: 
$$M_e = z \cdot \frac{p \tau_p}{\pi} \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \alpha_e B_{\delta,m} l_e = \frac{z \cdot (p/a)}{2\pi} \cdot I_a \cdot \alpha_e \tau_p l_e B_{\delta,m}$$



$$M_e = z \cdot \frac{p\tau_p}{\pi} \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \alpha_e B_{\delta,m} l_e = \underbrace{\frac{z \cdot (p/a)}{2\pi}}_{k_2} \cdot I_a \cdot \underbrace{\alpha_e \tau_p l_e B_{\delta,m}}_{\Phi}$$

$$M_e = k_2 \cdot I_a \cdot \Phi$$

Nicht verwechseln mit Formel für induzierte Spannung !

$$U_i = k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi$$



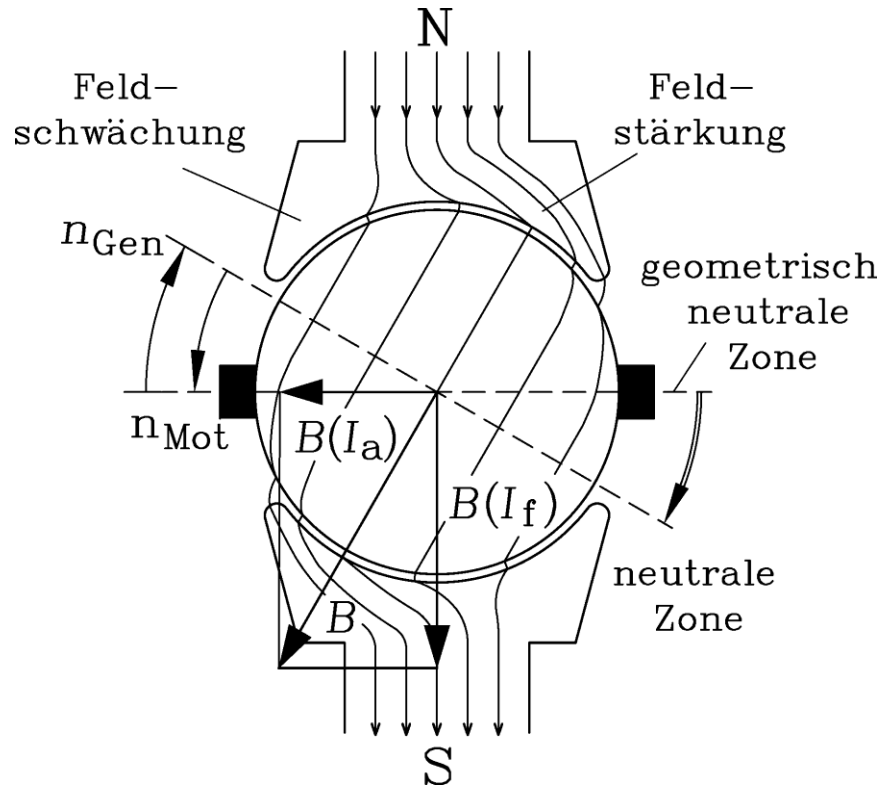
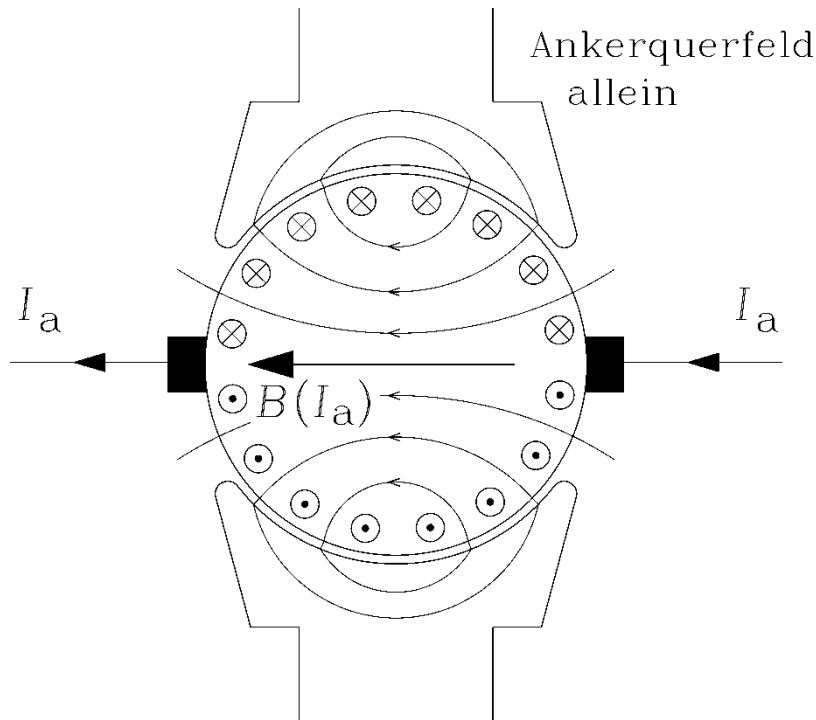
## Zusammenfassung: Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment

- Induzierte Spannung prop. zu Drehzahl und Ständerfluss/Pol
- El.-magn. Drehmoment prop. zu Ankerstrom und Ständerfluss/Pol
- Bürstenkontakt: Elektrisch nichtlinear, etwa 2 V Spannungsfall
- Bei großen Ankerspannungen z. B.  $U_a = 400 \text{ V}$  ist  $U_b$  vernachlässigbar klein
- Bei kleinen Ankerspannungen z. B.  $U_a = 12 \text{ V}$  darf  $U_b = 2 \text{ V}$  nicht vernachlässigt werden

## 10. Gleichstromantriebe

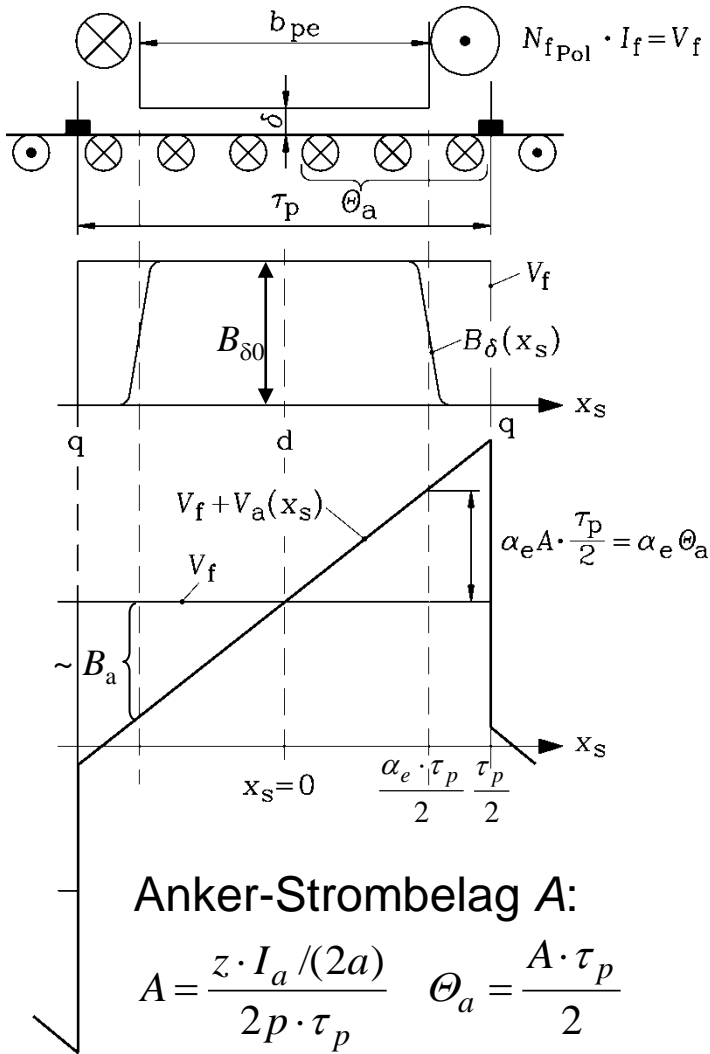
- 10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine
- 10.2 Ankerwicklungen
- 10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment
- 10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung**
- 10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole
- 10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine
- 10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb
- 10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine

# Kraftbildung aus dem Feldlinienbild erkennbar



- **Überlagerung** des Eigenfelds der Ankerleiter mit dem Erregerfeld der Hauptpole ergibt **resultierendes Magnetfeld**.
- Flussröhren zwischen den Feldlinien wirken wie **"Gummischnüre" (MAXWELL'scher Magnetzug)** und drehen den Läufer im **Gegen-Uhrzeigersinn (MOTOR-Betrieb)**.

# Feldverzerrung durch das Ankerfeld



- $I_a = 0$  : Luftspaltfeld  $B_{\delta 0}$  bei **Leerlauf** (Ankerstrom = 0) unter dem Pol annähernd konstant, da konstanter Luftspalt  $\delta$ :  $B_{\delta 0} = \mu_0 \cdot V_f / \delta$

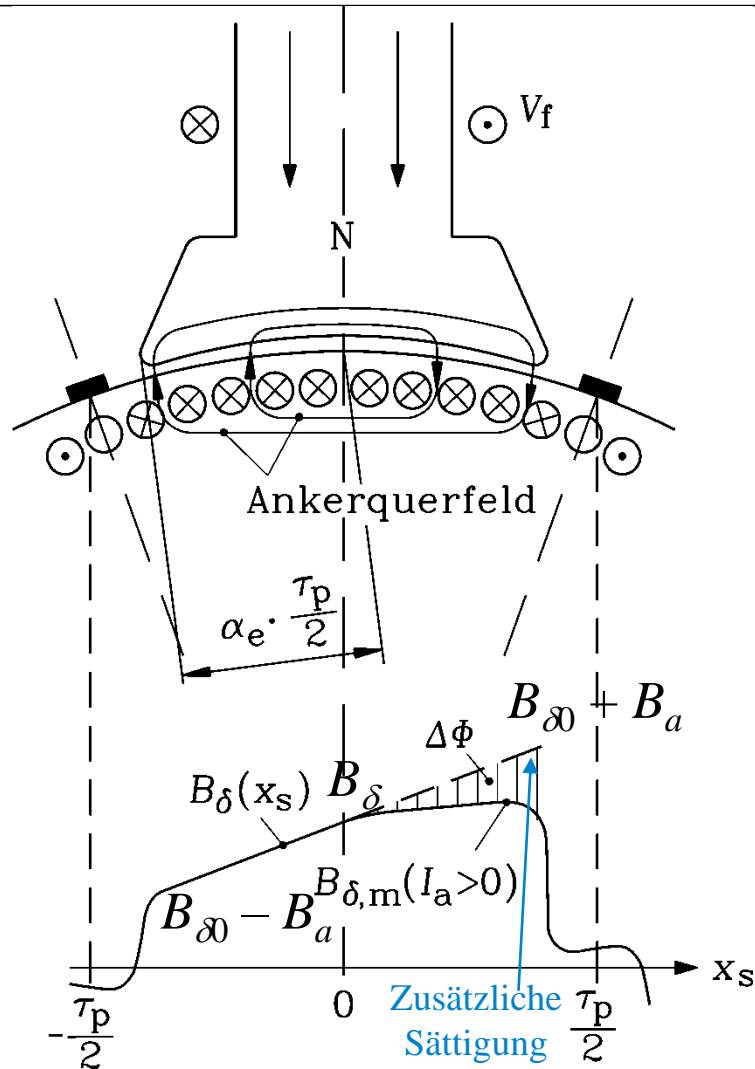
$$B_{\delta}(x_s) = \mu_0 \cdot \frac{V_f}{\delta(x_s)} \quad \text{für } \mu_{Fe} \rightarrow \infty$$

- $I_a > 0$  : Bei **Last** (Ankerstromfluss) entsteht zusätzlich das **Ankerfeld**  $B_a$ . Es überlagert sich "quer" zum Hauptfeld und verzerrt es (**Ankerrückwirkung**).  $B_a = \mu_0 \cdot \alpha_e \cdot \Theta_a / \delta$

$$B_{\delta}(x_s) = \mu_0 \cdot \frac{V_f + V_a(x_s)}{\delta(x_s)} \quad \text{für } \mu_{Fe} \rightarrow \infty$$

- Linke Polhälfte:  $B_{\delta} = B_{\delta 0} - B_a$
- Rechte Polhälfte:  $B_{\delta} = B_{\delta 0} + B_a$

# Flussverringering durch die Ankerrückwirkung (ARW)



- Die Feldzunahme in der rechten Polhälfte treibt das Eisen in **Sättigung**.

$$\mu_{Fe} \rightarrow \infty$$

- Daher gilt rechts **nicht**  $B_\delta = B_{\delta 0} + B_a$ , sondern:

$$B_\delta < B_{\delta 0} + B_a$$

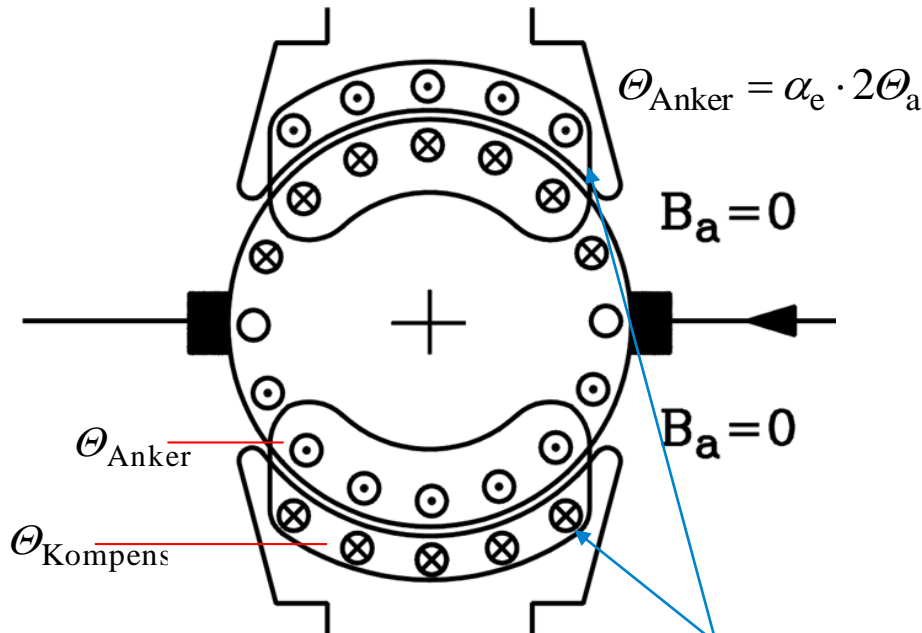
- Wegen der Eisensättigung rechts ist die Flusszunahme rechts geringer als die Abnahme links, so dass insgesamt pro Pol ein **Flussverlust  $\Delta\Phi$**  auftritt.

$$\underbrace{\Phi(I_a = 0)}_{\alpha_e \tau_p l_e B_{\delta,m}} > \Phi(I_a \neq 0) = \Phi(I_a = 0) - \Delta\Phi$$

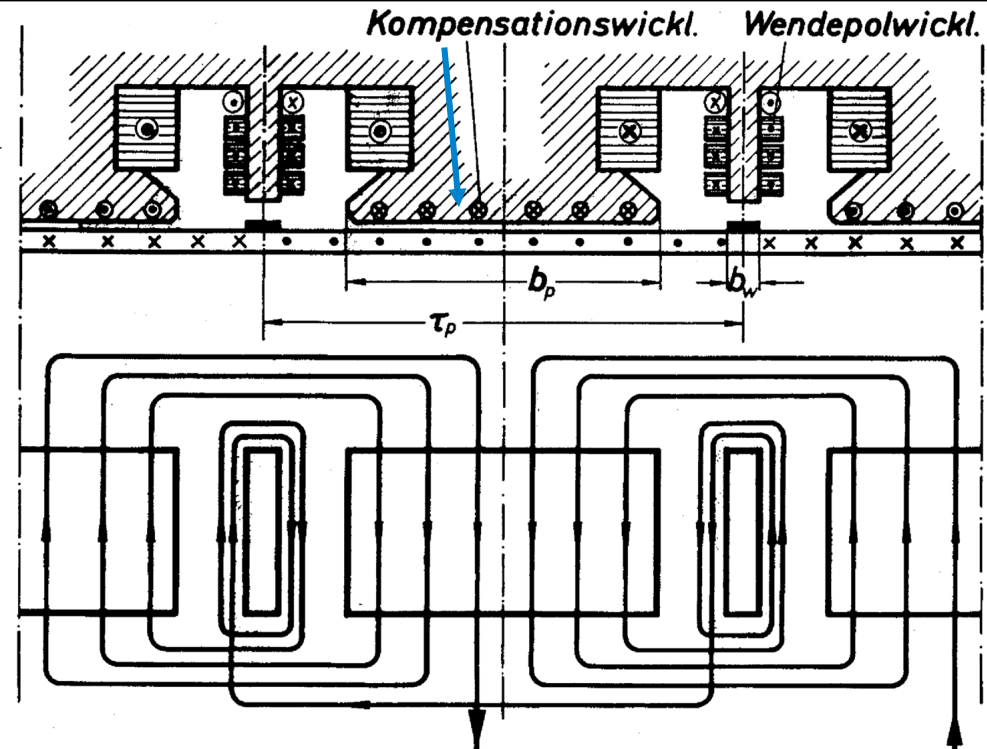
## Fazit:

Mit steigendem Ankerstrom  $I_a$  sinkt der Fluss pro Pol  $\Phi$  (TROTZ konstanten Erregerstroms  $I_f$ ).

# Abhilfe gegen Ankerrückwirkung: Kompensationswicklung



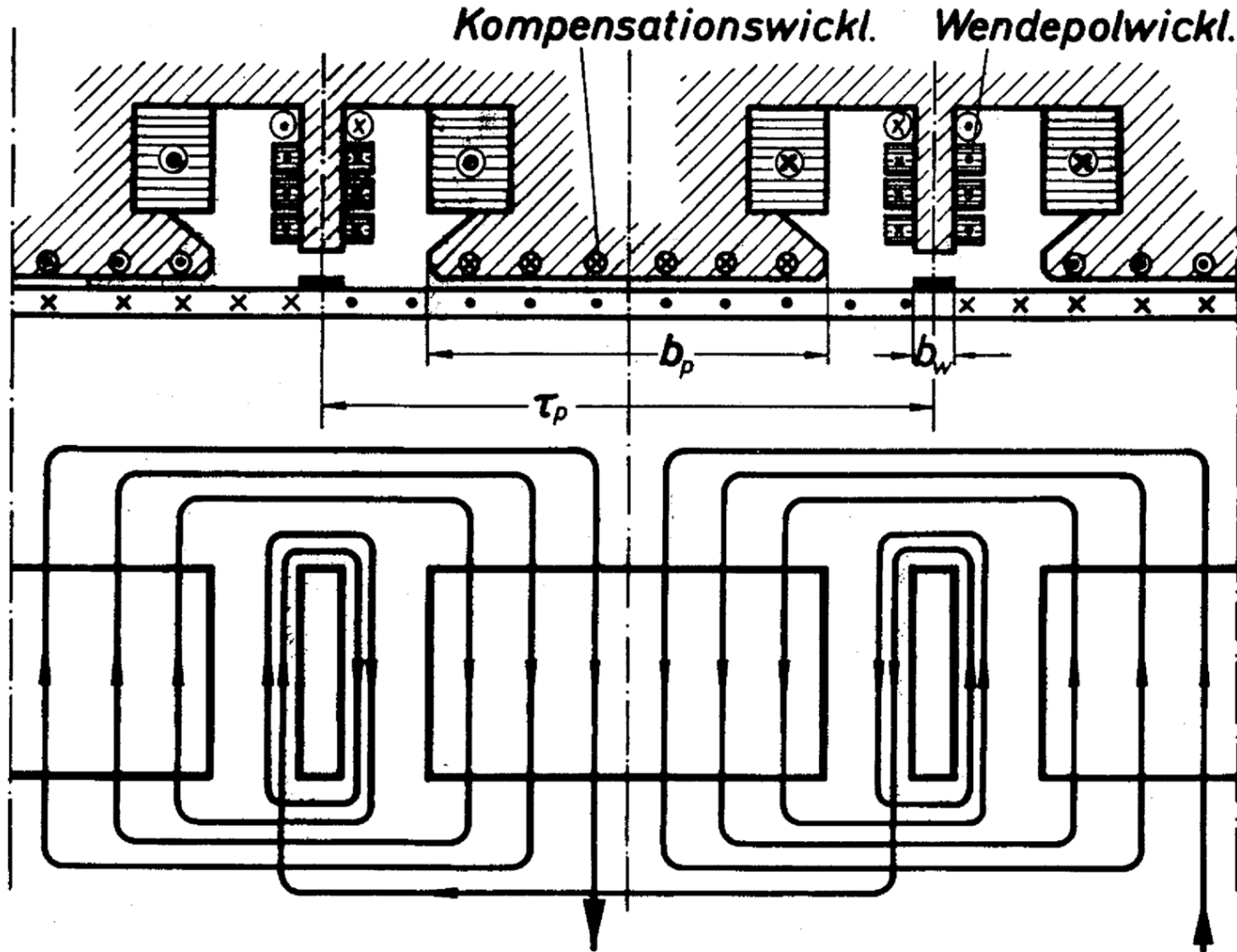
$$\oint_C \vec{H}_a \cdot d\vec{s} = \Theta_{\text{Anker}} - \Theta_{\text{Kompens}} = 0$$



Schaltung der Wendepol- und der **Kompensationswicklung**  
in Serie zur **Ankerwicklung**

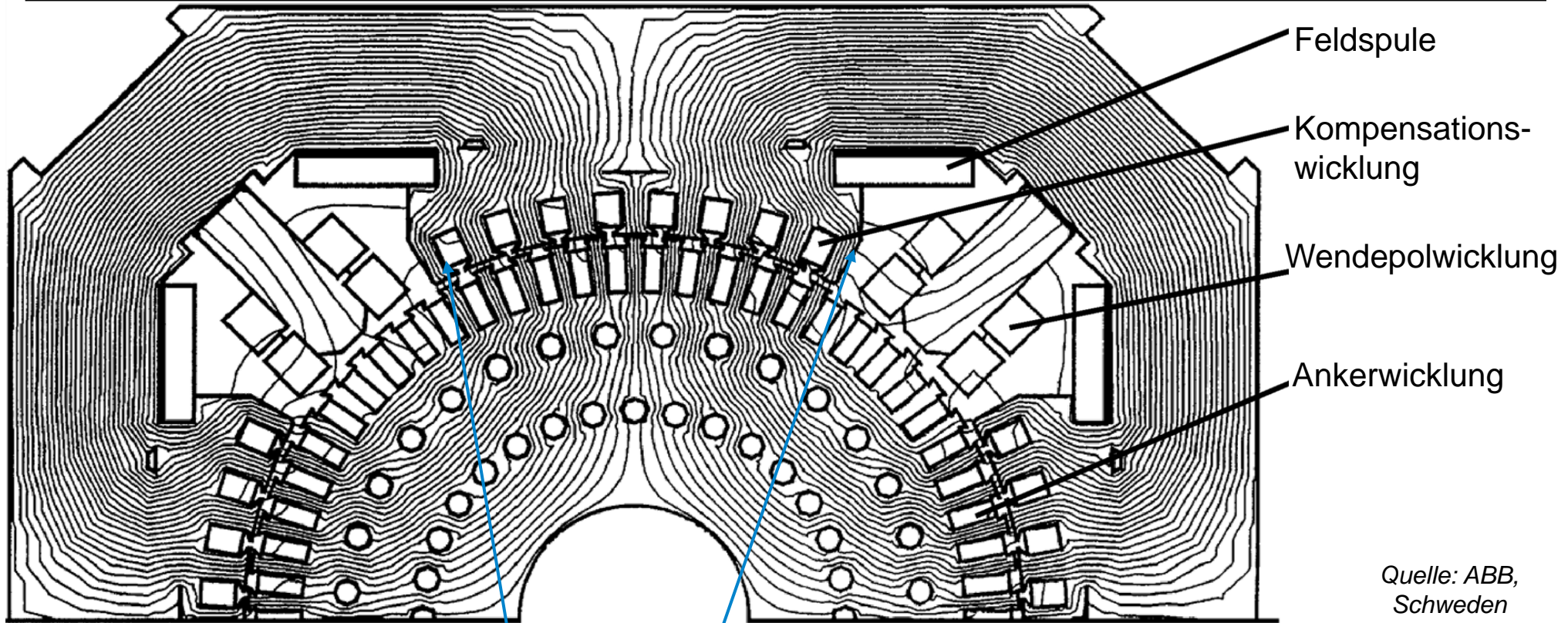
- Von  $I_a$  durchflossene **Kompensationswicklung** in den Ständerpolen
- Wickelsinn entgegengesetzt zur Ankerwicklung:  
Durchflutungen von Anker- und Kompensationswicklung **heben sich auf:  $B_a = \mu_0 H_a = 0$ .**

# Kompensationswicklung und Wendepolwicklung





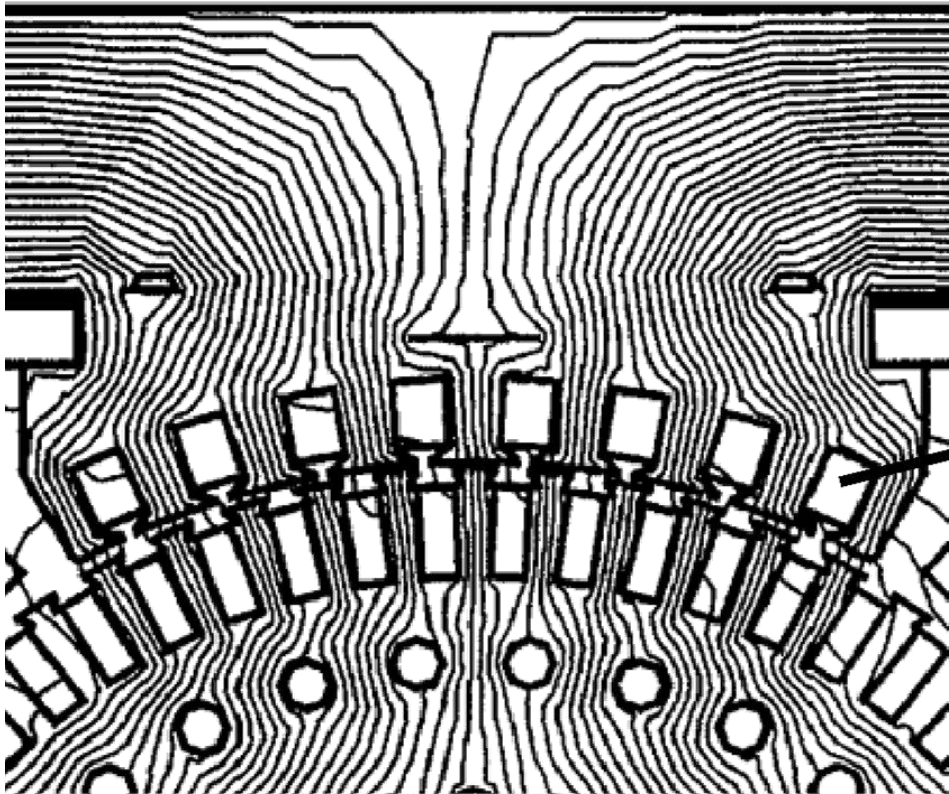
# Kompensierte vierpolige Gleichstrommaschine



Quelle: ABB,  
Schweden

Feldliniendichte links und rechts gleichmäßig = KEINE Feldverzerrung !

Kompensationswicklung erforderlich ab ca. 200 ... 300 kW !



$$2a = 4:$$

10 Ankernuten im Bereich von 8  
Kompensationsnuten:

$$\Theta_{\text{Anker}} = 10 \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot 2N_c$$

$$\Theta_{\text{Kompens}} = 8 \cdot I_a \cdot N_{c,K}$$

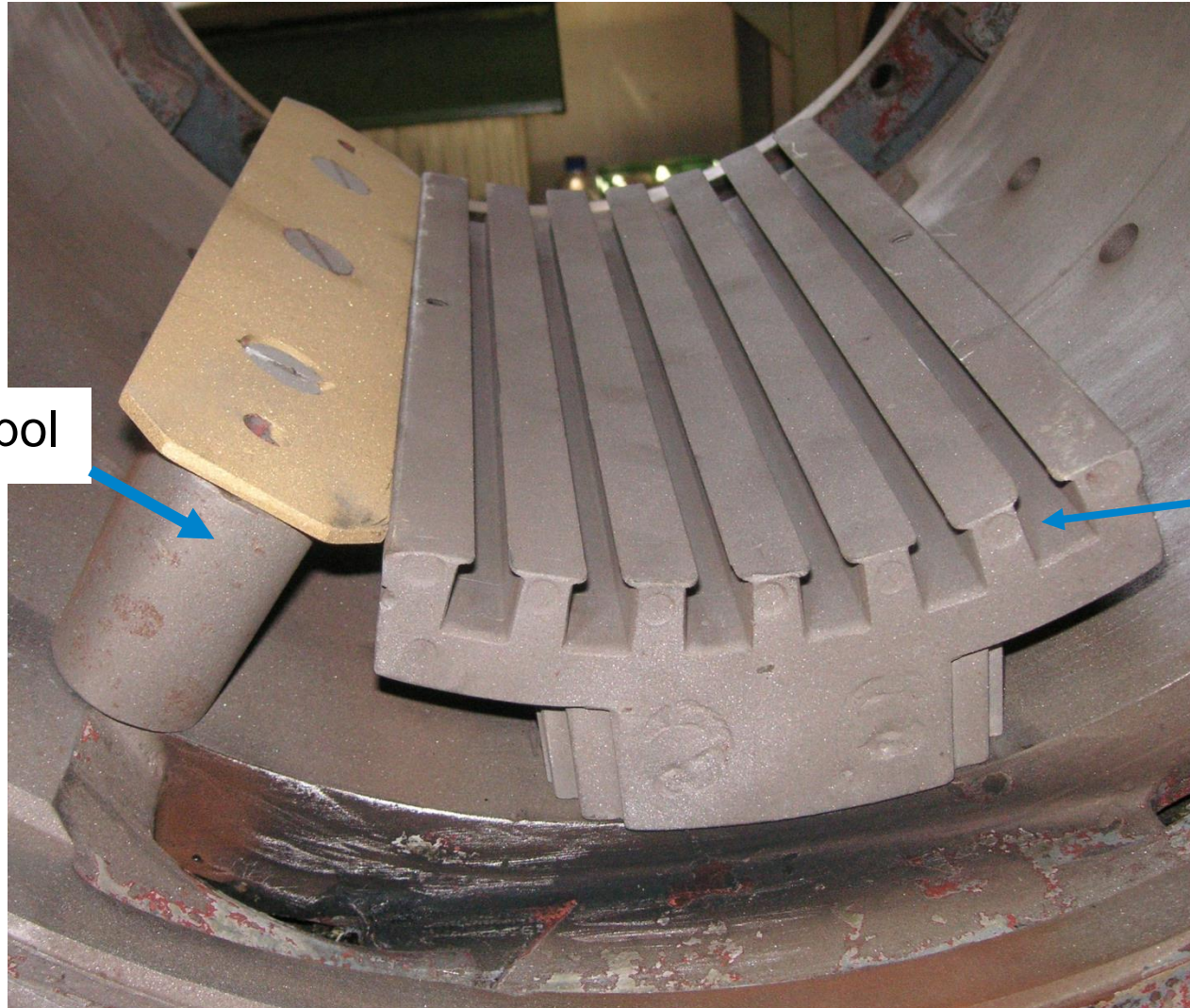
$$\Theta_{\text{Anker}} \approx \Theta_{\text{Kompens}}:$$

$$10 \cdot \frac{N_c}{2} \approx 8 \cdot N_{c,K}$$

$$\text{z.B. : } N_c = 3, N_{c,K} = 2:15 \approx 16$$



# Gleichstrommaschine – 4 Ständerpole, unbewickelt



Quelle:

Fa. Brenner, Bürstadt

Wendepol

Hauptpol mit 6  
Nuten/Pol für  
Kompensations-  
wicklung K

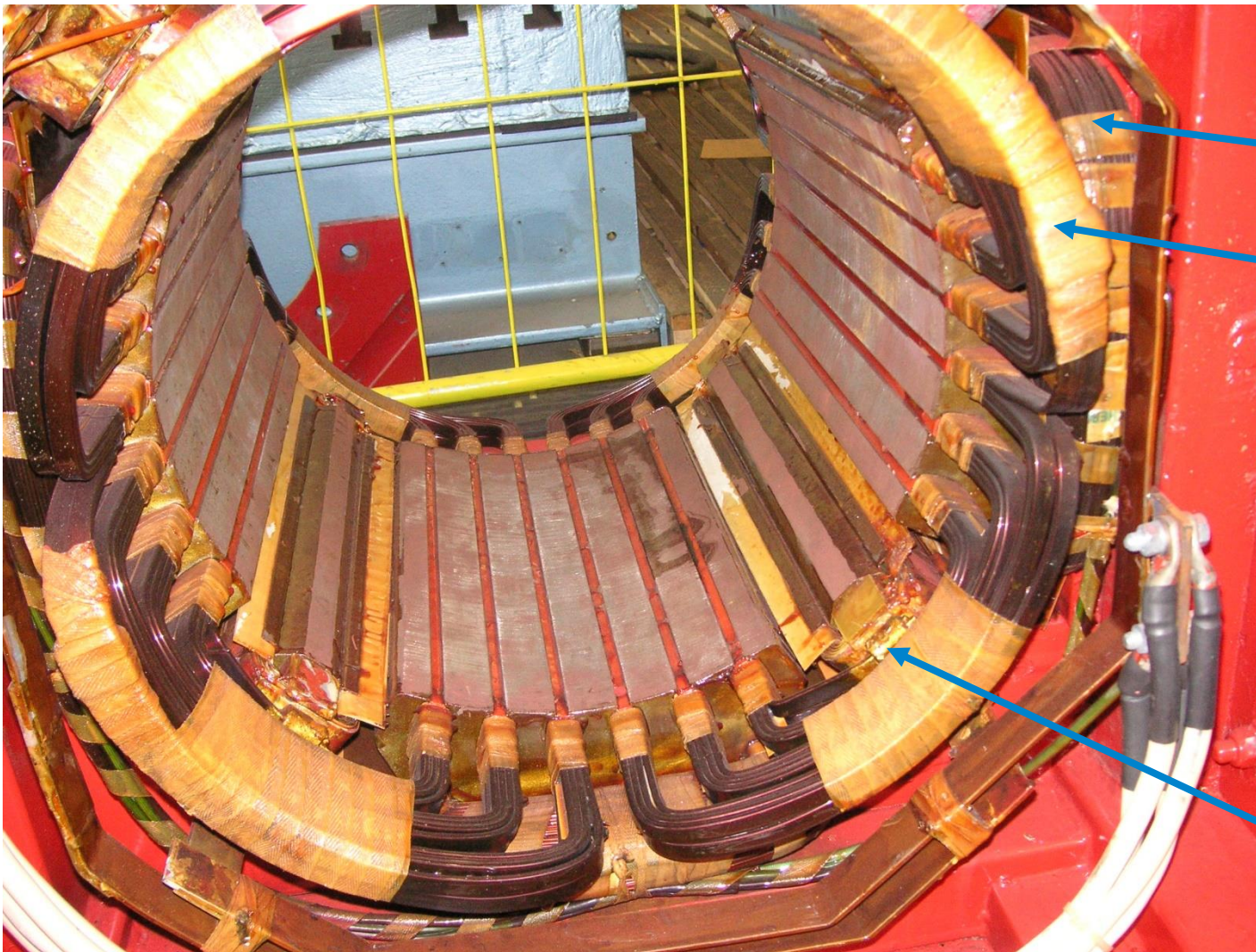
(Nutteilung von  $K \neq$   
Ankernutteilung  $\Rightarrow$   
kein mag. Rastmoment)



# Bewickelte Ständerpole – vierpolig ( $2p = 4$ )

Quelle:


Fa. Brenner, Bürstadt



Erregerwicklung

Kompensationswicklung:  
6 Spulenseiten/Pol;  
Anzahl Leiter/Pol:

$$z_{K,Pol} = 6 \cdot 8 = 48$$

1 Spule  }  $N_c = 2 \cdot 4 = 8$

Anzahl Windungen  
in Serie:

$$N_K = 2p \cdot z_{K,Pol} / 2 = 96$$

Wendepolwicklung

# Unkompensierte Maschine: Maximale Segmentspannung $U_s$ bei Nenn-Ankerstrom



## Nennpunkt

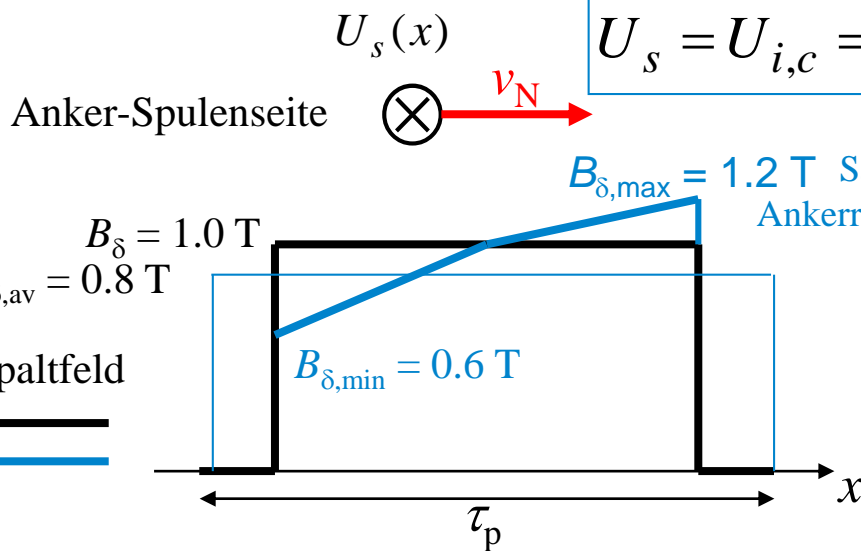
$$\Phi_N, I_{aN}, n_N, v_N$$

$$(p/a = 1, \alpha_e = 0.8, U_a = U_N)$$

$$(B_a(I_{aN}) = 0.4 \text{ T})$$

## Feldschwächung

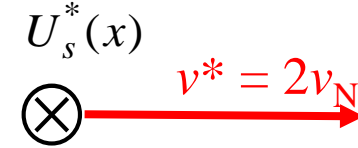
$$\Phi_N/2, I_{aN}, 2n_N, 2v_N$$



$$U_{s,av} \sim v_N \cdot B_{\delta,av}, U_{s,av} = 20V$$

$$U_{s,max} \sim v_N \cdot B_{\delta,max}$$

$$U_{s,max} = (1.2 / 0.8) \cdot 20 = 30V < 35V$$



$$U_{s,av} \sim 2v_N \cdot B_{\delta,av}^*, U_{s,av} = 20V$$

$$U_{s,max}^* = (0.9 / 0.4) \cdot 20 = 45V > 35V$$

**Kompensationswicklung erforderlich !**



## Zusammenfassung: Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung


- Eigen-Magnetfeld des Läufers überlagert sich dem Ständerfeld
- Resultierendes Feld im Luftspalt „verzerrt“ mit Feldüberhöhung
- Kompensationswicklung in Ständerpolen hebt das Läuferfeld auf =  
= KEINE Feldverzerrung  $\Rightarrow$ 
  - a) Kein Fluss- und Drehmomentverlust bei  $I_{aN}$
  - b) Keine zu hohe Segmentspannung im Feldschwächbereich  $n > n_N$

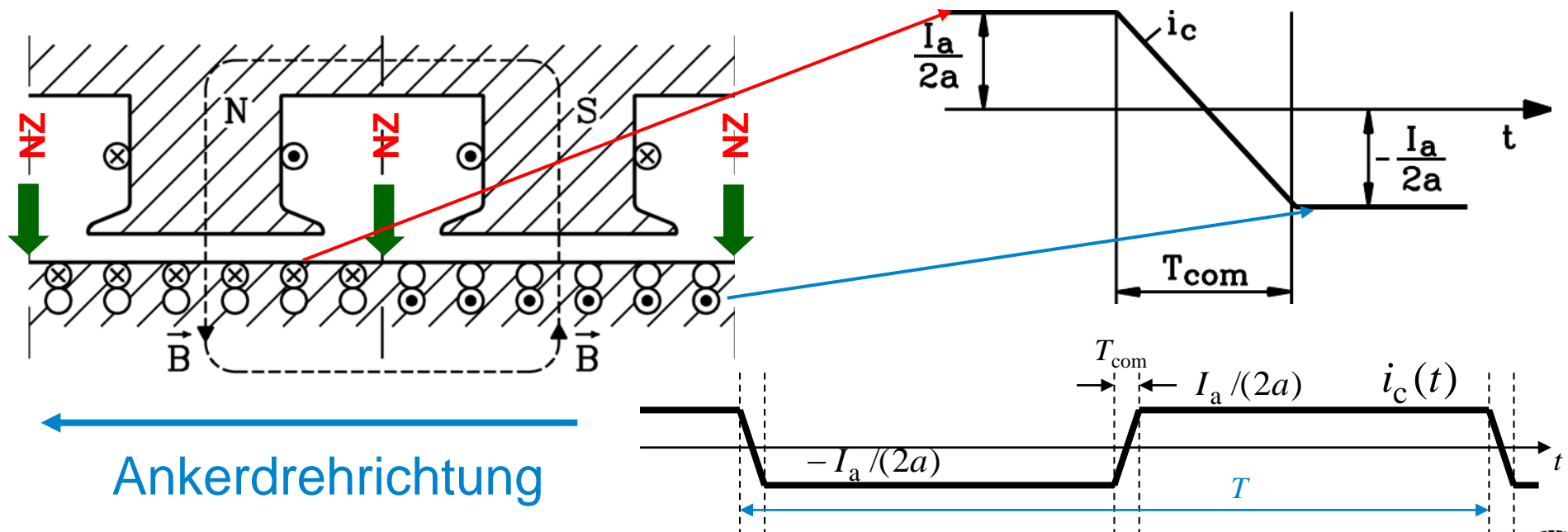
## 10. Gleichstromantriebe

- 10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine
- 10.2 Ankerwicklungen
- 10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment
- 10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung
- 10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole**
- 10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine
- 10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb
- 10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine



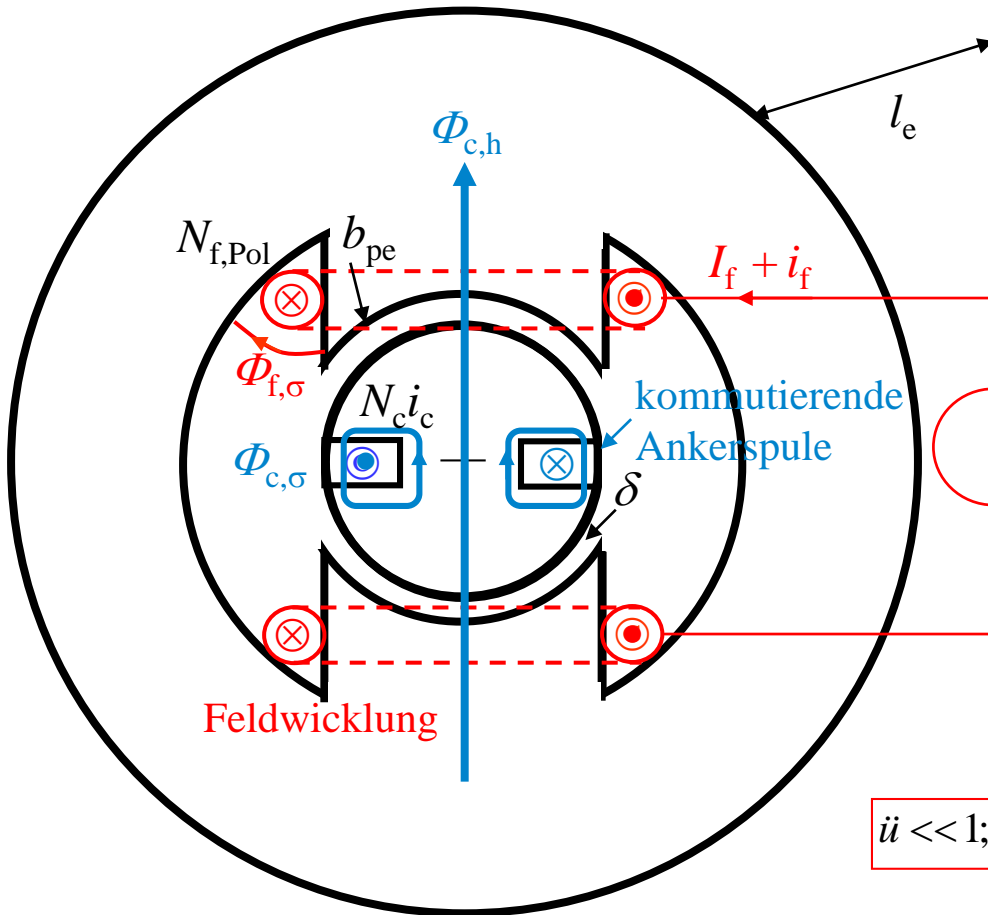
# Kommutierung (Stromwendung) des Ankerstroms

- Ankerspulenstrom  $i_c$  ist **Wechselstrom**
- $i_c$  wechselt zwischen positiven Wert  $I_a / (2a)$  und negativen Wert  $-I_a / (2a)$  am Ort , wenn die Bürste die beiden Spulenanschlüsse (= benachbarte Kommutatorsegmente) **kurz schließt**.
- Dabei befinden sich die beiden Spulenseiten in der „neutralen Zone“ **NZ** ( $B_\delta = 0$ ). Es wird **keine Spannung** in sie induziert ( $U_{i,c} = 0$ )



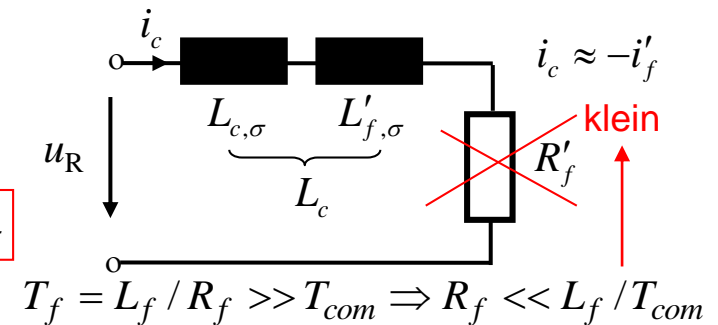
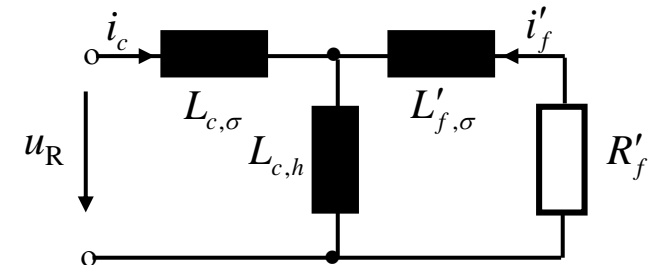
# Induktivität $L_c$ der kommutierenden Ankerspule

Experts only



Der Luftspaltfluss  $\Phi_{c,h}$  der kommutierenden Ankerspule ist mit der Feldwicklung verkettet („Transformator“) und induziert diese während der Stromwendung  $di_c/dt$ , so dass zusätzlich zum DC-Feldstrom  $I_f$  der kleine „AC“-Strom  $i_f(t)$  fließt.

Die „ideale“ Spannungsquelle  $U_f$  ist für  $i_f$  ein „Kurzschluss“. Transformator-Übersetzung:  $\ddot{u} = N_c' / (2N_{f,Pol})$



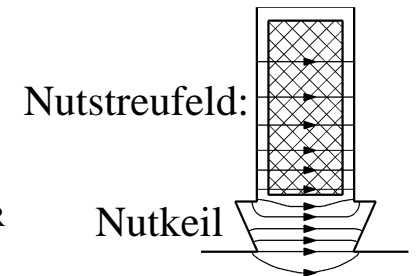
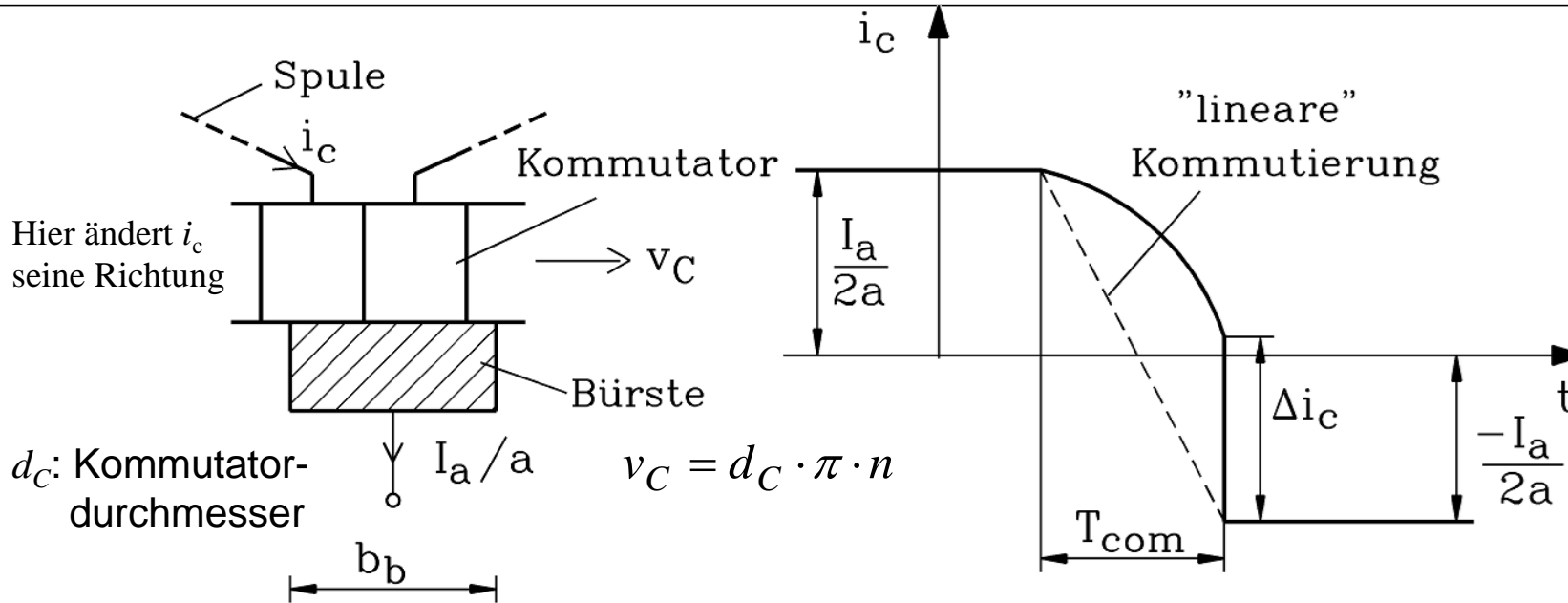
$$\ddot{u} \ll 1; L_{c,h} \gg L_{c,\sigma}, L'_{f,\sigma}$$

$$\Phi_{c,\sigma} \rightarrow L_{c,\sigma}, \Phi_{f,\sigma} \rightarrow L'_{f,\sigma}, \Phi_{c,h} \rightarrow L_{c,h} = \mu_0 \cdot N_c^2 \cdot b_{pe} l_e / (2\delta)$$

$$L'_{f,\sigma} = \ddot{u}^2 \cdot L_{f,\sigma}, R'_f = \ddot{u}^2 \cdot R_f, i'_f = i_f / \ddot{u} \quad L_c \text{ wird durch die Streuflüsse gebildet und ist daher klein.}$$



# Kommutierung (Stromwendung) des Ankerstroms



- Ankerspule hat Induktivität  $L_c$ , Anteil  $L_{c,\sigma}$  dch. Ankernut- und Stirn-Strefenfeld
- Stromänderung bewirkt Selbstinduktionsspannung (**"Reaktanzspannung"**)  $u_R$
- Näherung: **"lineare Kommutierung"**:

$$u_R = L_c \cdot \frac{di_c}{dt} \approx L_c \cdot \frac{I_a}{a \cdot T_{com}} = k_R \cdot n \cdot I_a$$

$$v_C = d_C \cdot \pi \cdot n \quad T_{com} = b_b / v_C \sim 1/n$$

$\Rightarrow$

$$u_R = k_R \cdot n \cdot I_a$$

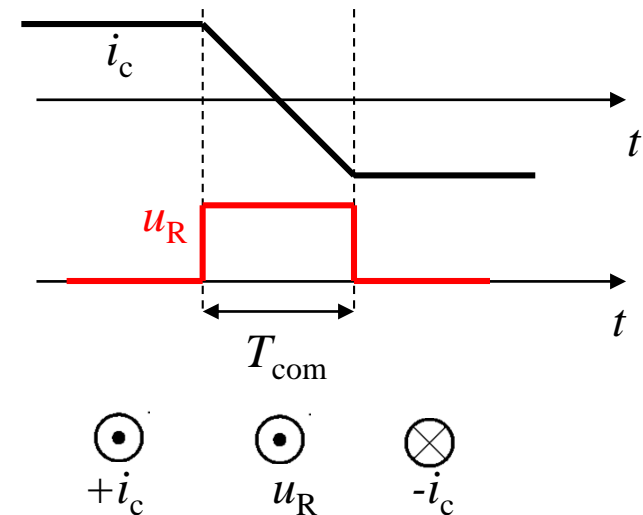
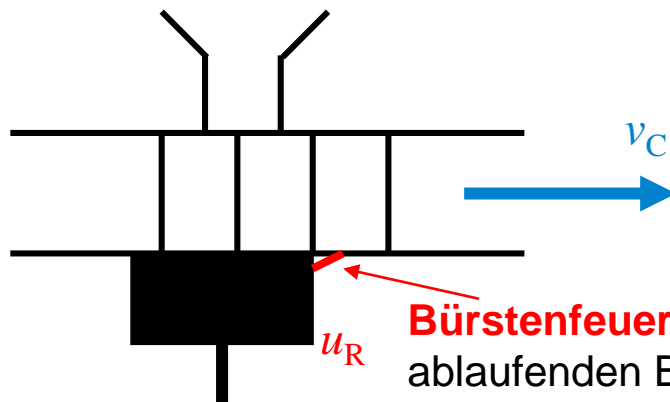
$$k_R = L_c d_C \pi / (a \cdot b_b)$$

# Schädliche Reaktanzspannung $u_R$

$$u_R = k_R \cdot n \cdot I_a$$

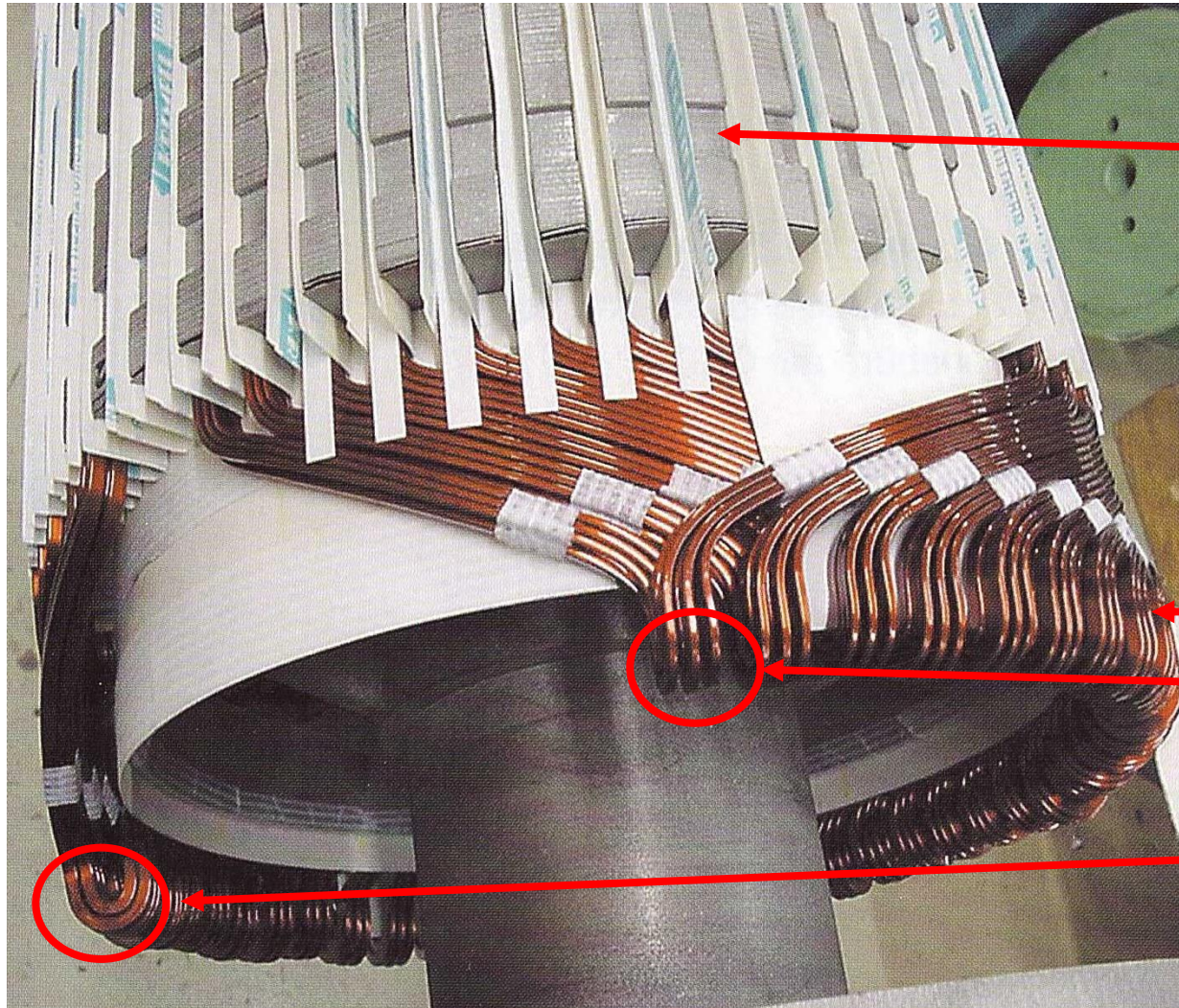
$$k_R \sim 1/b_B$$

- $u_R$  steigt a) mit Belastung der Maschine (prop.  $M_e$  bzw.  $I_a$ ),  
b) mit Drehzahl  $n$ ,  
sinkt mit breiteren Bürsten  $\Rightarrow$  mehrere Spulen gleichzeitig kurzgeschlossen & kommutierend.
- $u_R$  "zündet" **Abschaltfunken** (aus magn. Energie  $L_c \cdot \Delta i_c^2 / 2$  wird Schaltfunkenenergie)  
zw. Bürste und Kommutatorlamelle:  
**(„Bürstenfeuer“)**  $\Rightarrow$  rasche Erosion der Bürsten !  
Bürstenlänge nimmt ab  $\Rightarrow$  Bürstentausch nötig !





# Einlegen der Zweischicht-Ankerspulen in keillose Nuten



## Nuten ohne Keile:

Die Wicklung wird nur mit Glasfaserbandagen („Umfangsnuten“ im Blechpaket) bandagiert

## Vorteil:

Geringere Nuthöhe =  
= geringere Ankerstreuinduktivität =  
= **geringere Reaktanzspannung  $u_R$**

Vierpoliger Wickelkopf

$u = 3$  Spulenseiten je Nut und Schicht

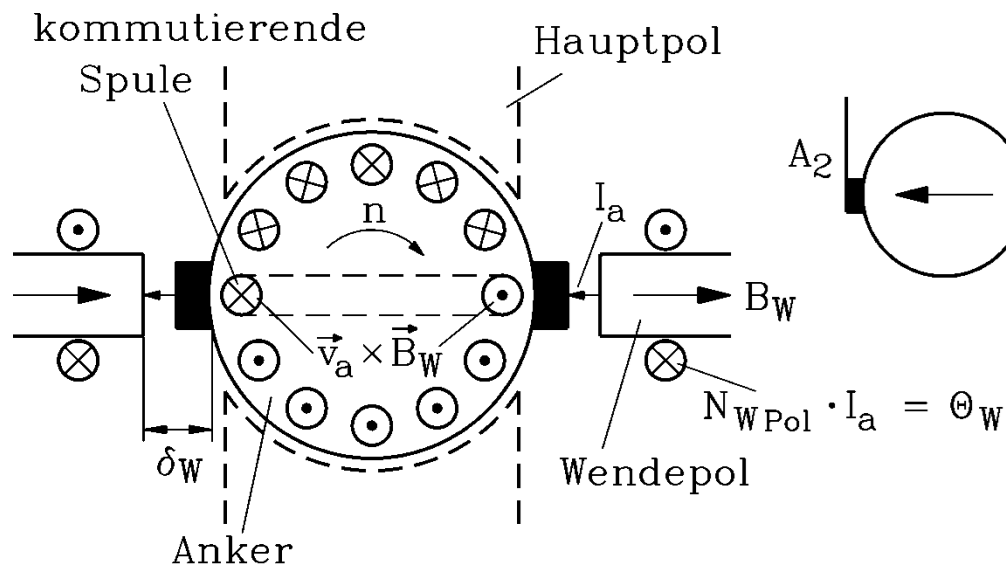
$N_c = 2$  Windungen je Spule

Quelle: Fa. Brenner, Bürstadt

# Wendepole W zur Aufhebung der Reaktanzspannung $u_R$

- **Wendepole** in Pollücken mit Wendepolwicklung (Windungszahl  $N_{W,Pol}$ , Ankerstrom  $I_a$ )
- **Wendepolfeld**  $B_{\delta W}$  induziert (Bewegungsinduktion) in kommutierende Ankerspule  
**Wendefeldspannung**  $u_W$
- $u_W$  ist zur Reaktanzspannung  $u_R$  entgegengesetzt und **hebt sie auf:  $u_W = -u_R$ !**

$$u_W = 2N_c \int_0^{l_e} (\vec{v}_a \times \vec{B}_{\delta W}) \cdot d\vec{s} = 2N_c \cdot v_a \cdot l_e \cdot B_{\delta W} \quad v_a = d_r \cdot \pi \cdot n, \quad B_{\delta W} \sim I_a \Leftrightarrow \text{wenn Wendepol-Eisenkreis ungesättigt!}$$



$$u_W = k_W \cdot n \cdot I_a$$

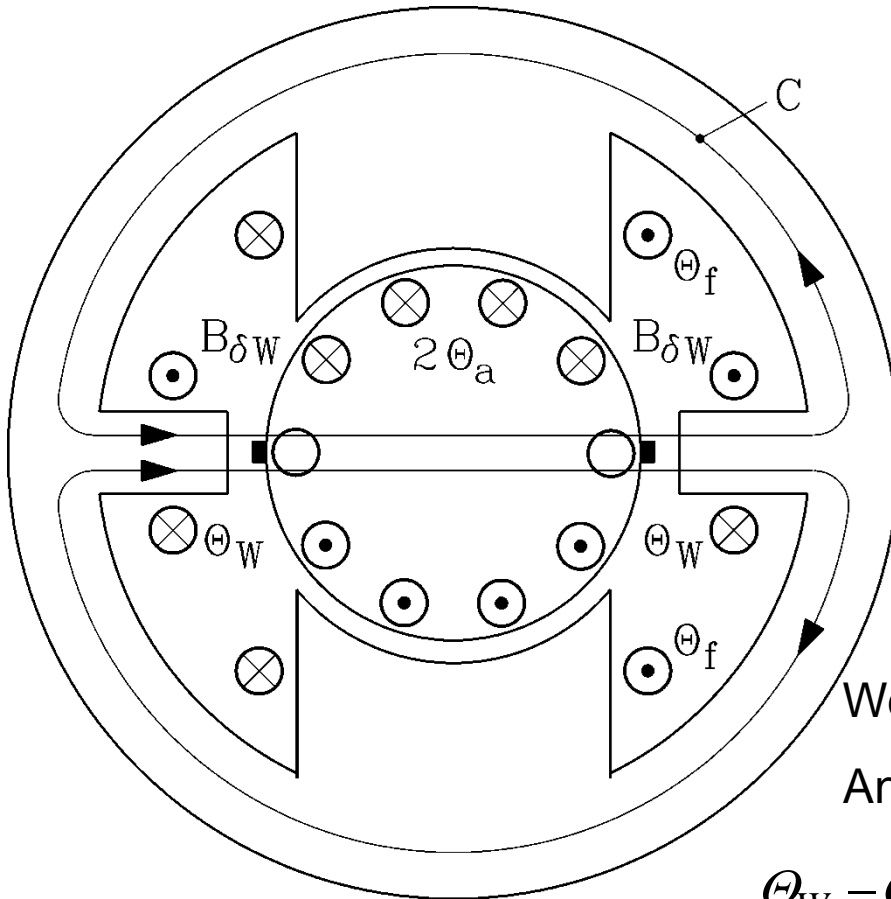
Ziel:

$$u_R - u_W = 0$$

Schaltung der Wendepolwicklung B1-B2 in Serie zum Anker A1-A2 mit **entgegengesetztem** Wicklungssinn

# Dimensionierung der Wendepolwicklung

Unkompensierte Maschine:



- $u_R$  und  $u_W$  hängen von  $n$  und  $I_a$  ab:  $u_R = u_W$  für **JEDEN** Betriebspunkt  $(n, I_a)$ , wenn  $k_W = k_R$

$$u_R - u_W = (k_R - k_W) \cdot n \cdot I_a = 0$$

- **Wendepolerregerdurchflutung  $\Theta_W$ :**  $B_{\delta W} \sim I_a$   
Wendepol-Eisenkreis muss **ungesättigt** sein !

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2H_{\delta,W} \delta_W = 2\Theta_W - 2\Theta_a + \Theta_f - \Theta_f = 2 \cdot (\Theta_W - \Theta_a)$$

$$B_{\delta W} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta_W - \Theta_a}{\delta_W} = \mu_0 \cdot \frac{N_{W,Pol} I_a - N_{a,Pol} I_a}{\delta_W} \sim I_a$$

$$u_W = k_W \cdot n \cdot I_a \quad k_W = 2N_c \mu_0 \pi \cdot l_e \cdot \frac{d_r}{\delta_W} \cdot (N_{W,Pol} - N_{a,Pol})$$

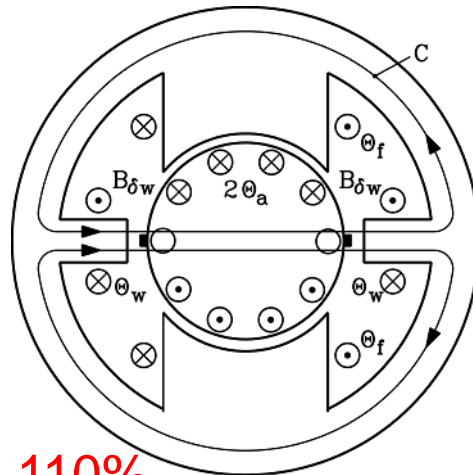
Wendepoldurchflutung:  $N_{W,Pol} I_a$

Ankerdurchflutung:  $N_{a,Pol} I_a = \frac{z}{2 \cdot 2p} \cdot \frac{I_a}{2a} = \frac{z}{8ap} \cdot I_a$

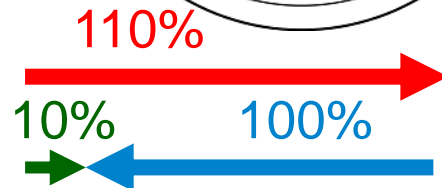
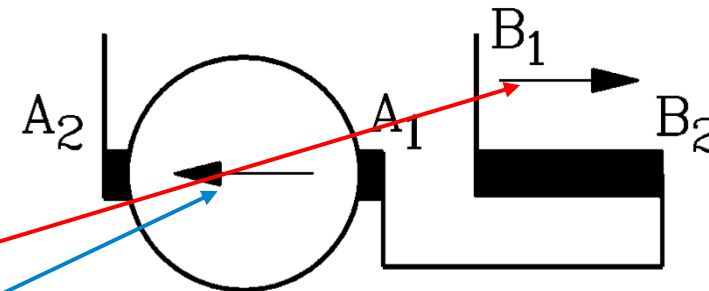
$$B_{\delta W} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta_W - \Theta_a}{\delta_W} = \left( \frac{\Theta_W}{\Theta_a} - 1 \right) \cdot \mu_0 \cdot \frac{\Theta_a}{\delta_W} \approx (0.1 \dots 0.12) \cdot \mu_0 \cdot \frac{\Theta_a}{\delta_W}$$



# Schaltung der Wendepolwicklung



- Wendefeld muss Ankerfeld **entgegen** wirken
- Daher: **Entgegengesetzter** Wicklungssinn



**Wendefeld**

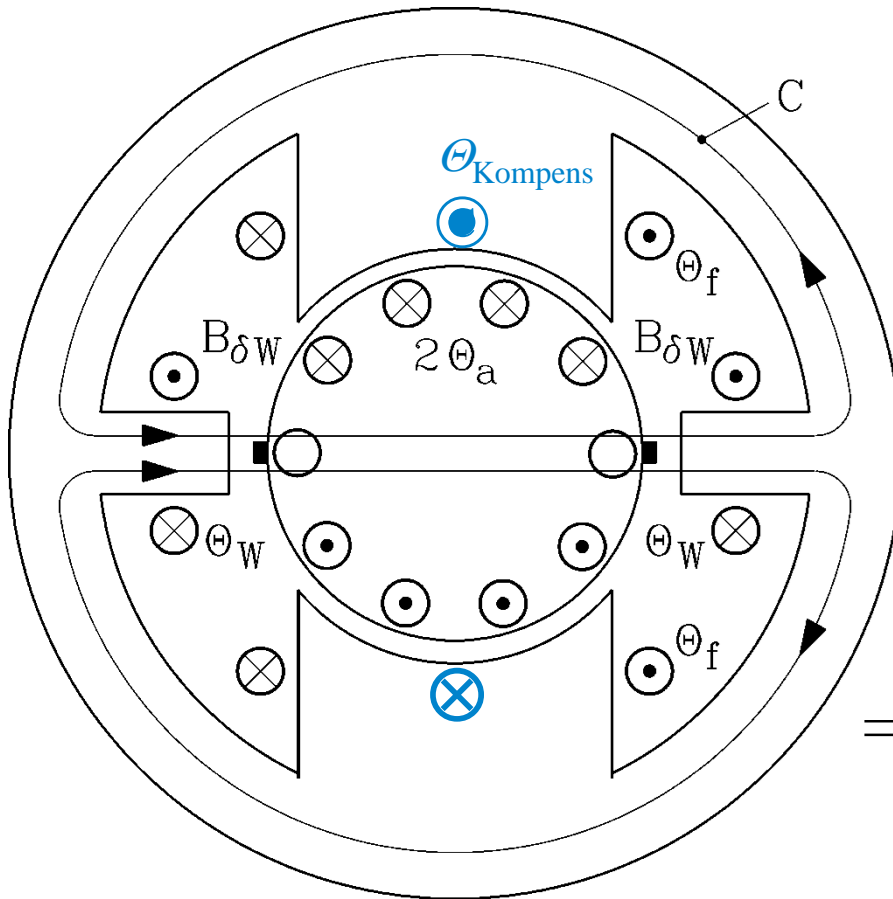
**Ankerfeld**

$$\frac{\Theta_W}{\Theta_a} = 1.1 \dots 1.12 = \frac{N_{W,Pol}}{N_{a,Pol}}$$

**Resultierendes Wendefeld**

- Für  $k_W = k_R$  müssen  $\delta_W$  und  $N_{W,Pol}/N_{a,Pol}$  richtig gewählt werden.
- **Optische Überprüfung**, ob die Bürsten "feuern"
- Falls Bürsten feuern: Wendefeld zu stark/zu schwach = **"Über-/Unterkommutierung"**
- Entfernen/Einbringen von Unterlegblechen am Wendepol vergrößert/verkleinert den Wendepolluftspalt  $\delta_W$  und **verringert/erhöht** daher das Wendefeld

# Wendepolwicklung bei kompensierter Maschine



$$\Theta_{\text{Kompens}} = \Theta_{\text{Anker}} = \alpha_e \cdot 2\Theta_a$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2H_{\delta,W} \delta_W = 2\Theta_W + \Theta_{\text{Anker}} - 2\Theta_a + \Theta_f - \Theta_f =$$

$$= 2 \cdot \Theta_W + \Theta_{\text{Anker}} - 2 \cdot \Theta_a$$

$$B_{\delta W} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta_W - \Theta_a \cdot (1 - \alpha_e)}{\delta_W}$$

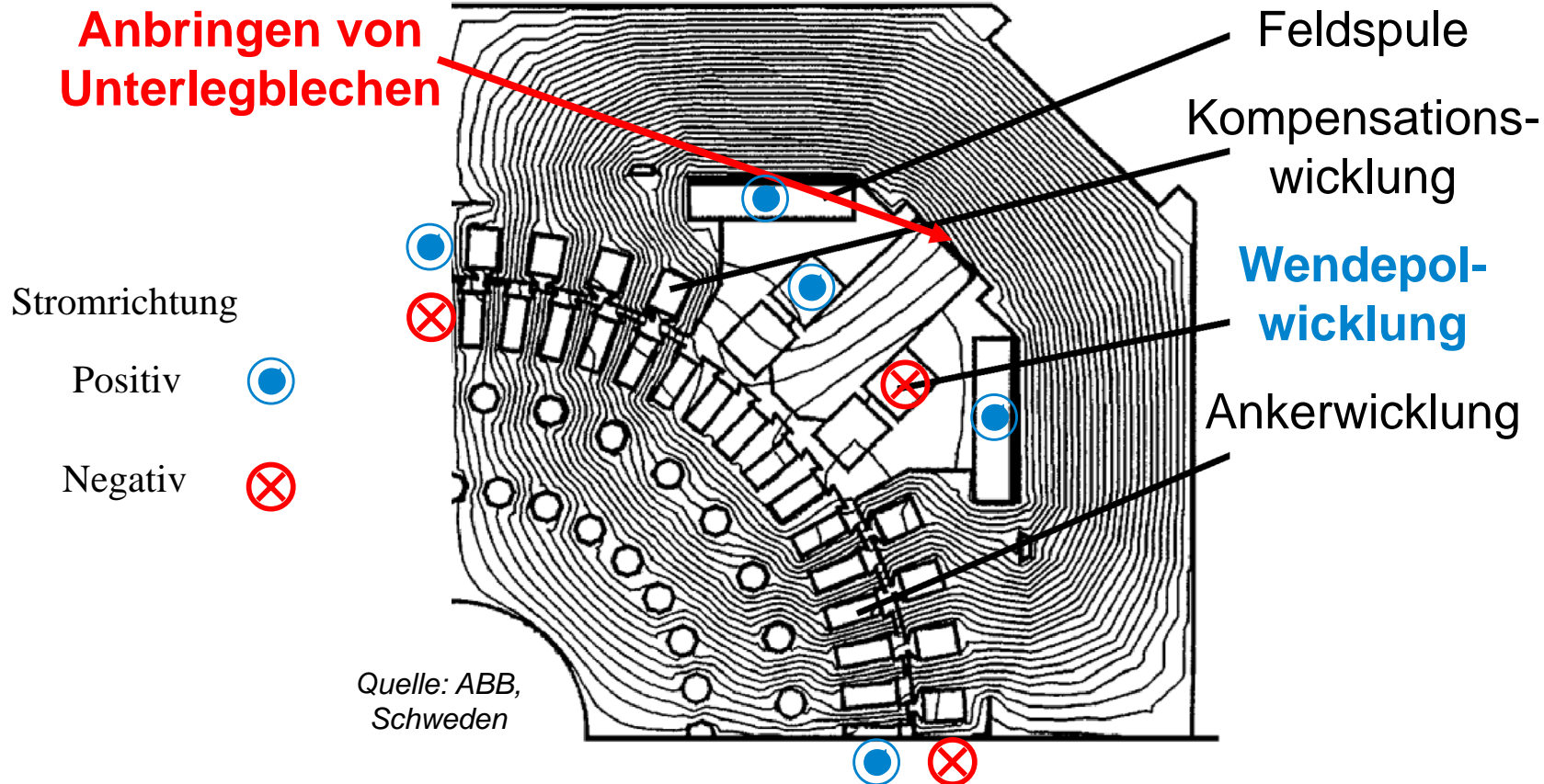
$$B_{\delta W} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta_a}{\delta_W} \cdot \underbrace{\left[ \frac{\Theta_W}{\Theta_a} - 1 + \alpha_e \right]}_{0.1 \dots 0.12} \sim I_a$$

$$\Rightarrow \frac{\Theta_W}{\Theta_a} \approx (1.1 \dots 1.12) - \alpha_e \approx (1.1 \dots 1.12) - (0.6 \dots 0.8)$$

$$\frac{\Theta_W}{\Theta_a} \approx (0.3 \dots 0.32) \dots (0.5 \dots 0.52)$$

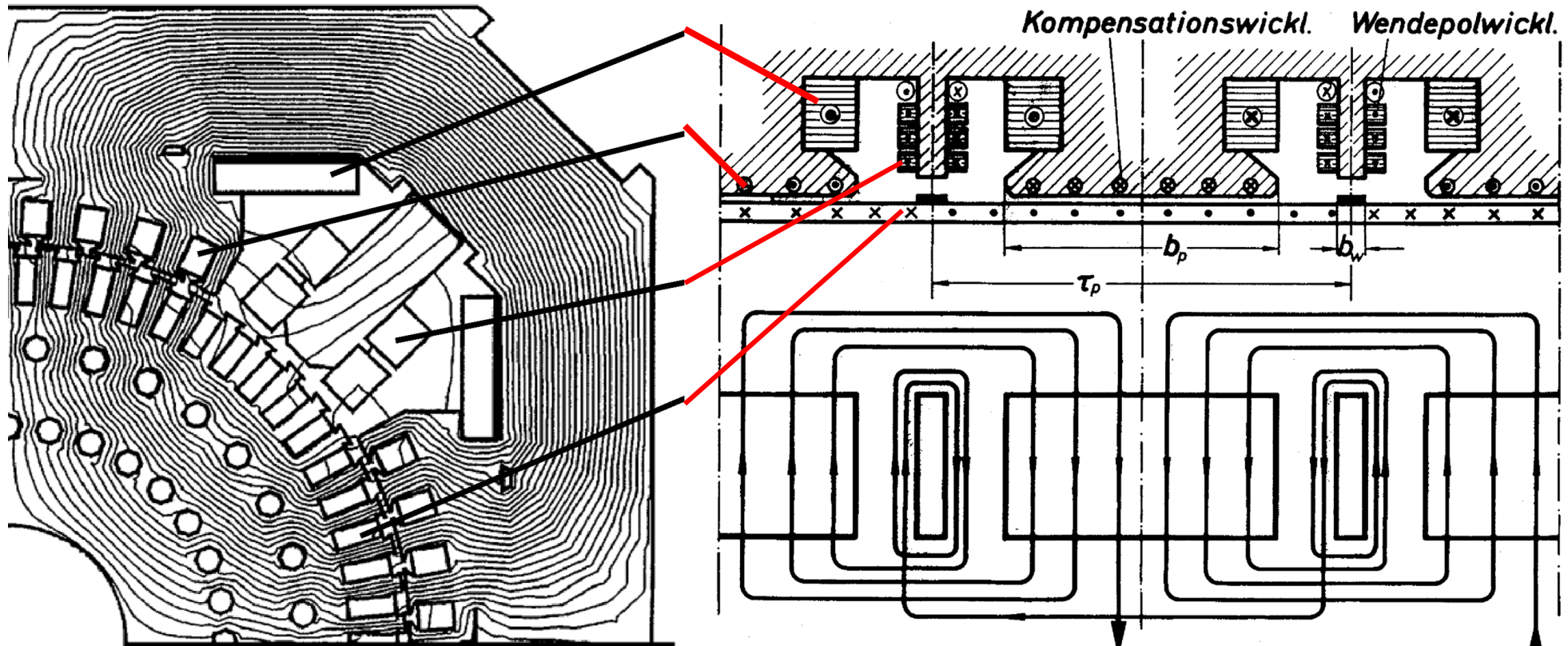
Die Kompensationswicklung **verringert** die Anzahl der Windungen  $N_{W,Pol}$  der Wendepolspulen im Verhältnis von ca.  $(0.3 \dots 0.5)/1.1$  **erheblich!**

# Wendepole in einer vierpoligen Gleichstrommaschine

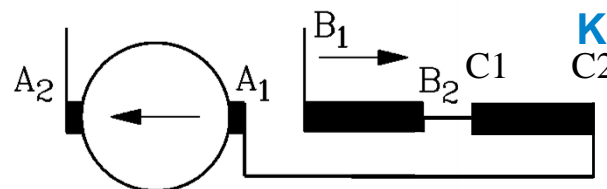


Wendepole erforderlich ab  $u_R \approx 1V \leftrightarrow$  ca. 1 kW bei 1500/min !

# Wendepole in einer vierpoligen Gleichstrommaschine



Quelle: ABB,  
Schweden



Schaltung von Wendepolwicklung (B1-B2) und  
Kompensationswicklung (C1-C2) in Serie zur  
Ankerwicklung (A1-A2)



# Beispiel: Fremderregte Gleichstrommaschine

Vierpoliger Gleichstrommotor  
- mit Wendepolen  
- ohne Kompensationswicklung

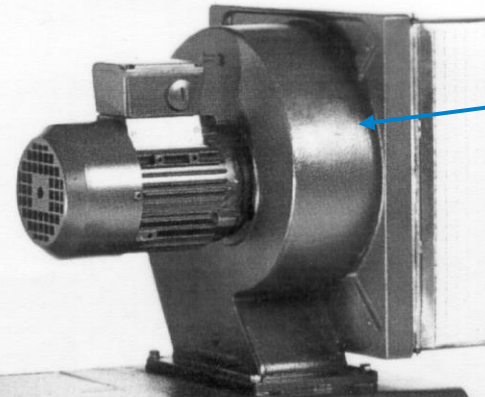
$U_{aN} = 400 \text{ V}$ ,  $I_{aN} = 260 \text{ A}$ ,  
 $P_N = P_{m,out} = 100 \text{ kW}$ , 2000/min, Achshöhe  
160 mm

$$\eta_a = \frac{100000}{400 \cdot 260} = 96.15\% *)$$

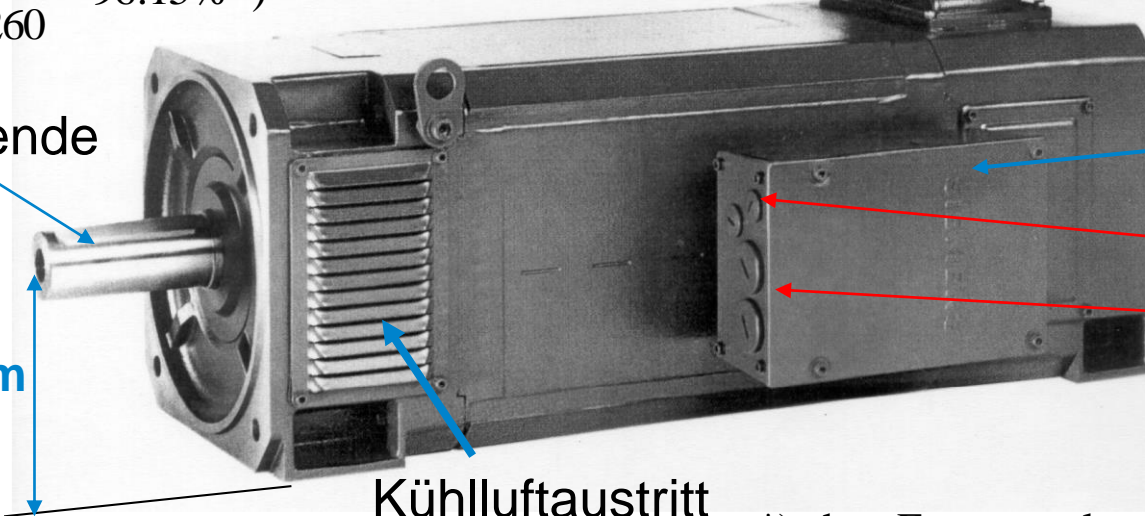
Wellenende

160 mm

Kühlluftaustritt



Fremdlüfter mit  
2-poligem  
Asynchronantrieb



Klemmenkasten

Feldwicklungsklemmen

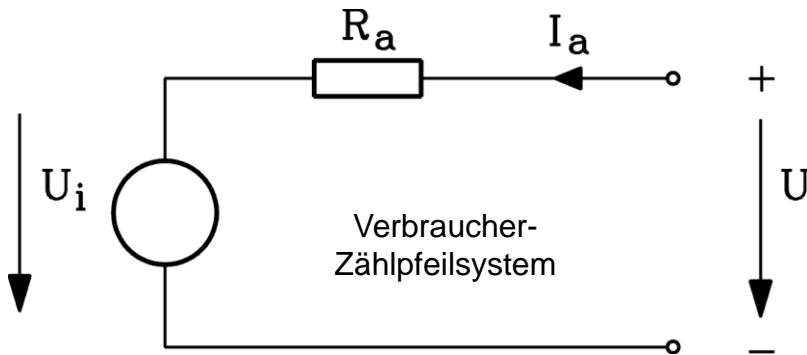
Ankerklemmen

Quelle: Siemens AG,  
Bad Neustadt/Saale, Deutschland

\*) ohne Erregerverluste 700 W,  $\eta_{res} = 95.51\%$

# Ersatzschaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine

- Ankerleiter, Wendepol- u. Kompensationswicklung = gesamter **Ankerwiderstand**  $R_a$
- **Fremderregung:** Erregerstrom  $I_f$  unabhängig von  $I_a$  einstellbar.



$$U = R_a \cdot I_a + U_b + U_i, \quad U_i = k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi(I_f)$$

- $U_b$ : Bürstenspannungsfall ca. 2 V,  
 $U_b$  oft vernachlässigt, wenn  $U_b/U \ll 1$ ,  
z. B. bei  $U = U_N \geq 100\text{V}$
- **Bremssende Läuferverluste:** Ummagnetisierungsverluste, Reibungsverluste, Zusatzverluste (Wechselstrom-Skineffekt) werden **VERNACHLÄSSIGT!**
- **Innere Leistung  $P_\delta$ :** Luftspaltleistung  $P_\delta$  wird über die **LORENTZ-Kräfte** in mechanische Leistung  $P_m$  (elektromagnetisches Drehmoment  $M_e$ ) umgesetzt.

$$P_\delta = U_i I_a = \Omega_m M_e = P_m \quad \Rightarrow \quad M_e = U_i I_a / \Omega_m = (k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi / \Omega_m) \cdot I_a = k_2 \cdot I_a \cdot \Phi$$



## Beispiel:

# Leistungsbilanz eines Gleichstrommotors

200 kW-Motor:  $P_N = P_{m,out} = 200 \text{ kW}$

$U_{aN} = 430 \text{ V}$ ,  $n_N = 1470/\text{min}$ ,  $\eta_a = 92\%$  (Anker-Wirkungsgrad),  $U_i = 408.5 \text{ V}$

- Zugeführte elektrische Leistung:  $P_{e,in} = P_{m,out} / \eta_a = 200 / 0.92 = 217.4 \text{ kW} = U_{aN} \cdot I_{aN}$

- Ankerstrom:  $I_{aN} = P_{e,in} / U_{aN} = 217400 / 430 = \underline{506 \text{ A}}$

- Innere Leistung:  $P_\delta = U_i \cdot I_{aN} = 408.5 \cdot 506 = \underline{206.7 \text{ kW}} > P_{m,out} !$

**Bremssende Läuferverluste** bewirken:  $P_\delta > P_{m,out}$

- Elektromagnetisches Drehmoment:  $M_e = 206.7 / (2\pi \cdot 1470/60) = \underline{1343 \text{ Nm}}$

- Drehmoment an der Welle:  $M_M = P_{m,out} / \Omega_m = 200 / (2\pi \cdot 1470/60) = \underline{1299 \text{ Nm}}$

# Beispiel:

## Verlustbilanz der Gleichstrommaschine



200 kW-Gleichstrommotor fremderregt,  $I_{aN} = 506 \text{ A}$ ,  $R_a = 37.9 \text{ m}\Omega$ ,  $P_{Cu,a} = R_a \cdot I_{aN}^2 = 9.7 \text{ kW}$

### A: Gesamte Läuferverluste

17.4 kW

#### 1. Ankerkreisverluste $217.4 - 206.7 = 10.7 \text{ kW}$ :

1.1 Bürsten:  $2 \text{ V} \cdot 506 \text{ A} = 1.0 \text{ kW}$

1.2 Ankerwiderstand:  $P_{Cu,a} = P_{d,a} - P_b = 10.7 - 1.0 = 9.7 \text{ kW}$

1.0 kW  
9.7 kW } 10.7 kW

#### 2. Sonstige Läuferverluste durch mechanisch bremsendes Verlustmoment $M_d$

(= Differenz zwischen elektromagnetischem und Wellen-Moment):

$$M_d = M_e - M_M = 1.343 - 1.299 = 0.044 \text{ kNm},$$

$$P_{Fe} + P_R + P_Z = 2\pi \cdot n_N \cdot M_d = P_\delta - P_{m,out} = 206.7 - 200 = 6.7 \text{ kW}$$

##### 2.1 Ummagnetisierungsverluste $P_{Fe}$ :

Wirbelstrom- und Hystereseverluste im geblechten Eisenkern des Läufers

##### 2.2 Zusatzverluste $P_Z$ :

Wirbelströme in den Nutenleitern (Stromverdrängung, da Leiter-Wechselstrom!)

##### 2.3 Reibungs- und Ventilationsverluste $P_R$ (Lager, Bürsten, Kühlluftstrom)

6.7 kW

### B: Erregerverluste $P_f = U_f \cdot I_f = 1.5 \text{ kW}$

1.5 kW

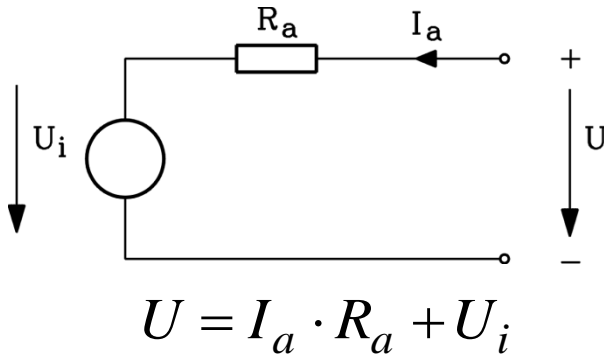
### C: Gesamtverluste: $17.4 + 1.5 = 18.9 \text{ kW}$

18.9 kW

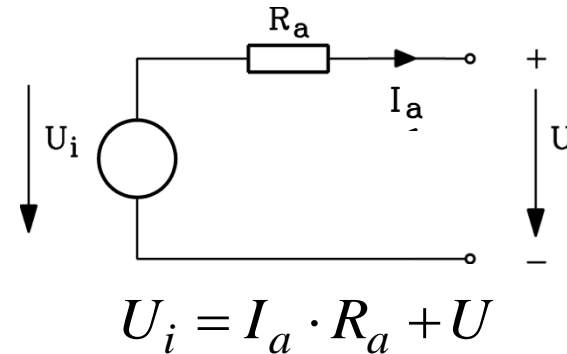


# Stationäre Grundgleichungen der fremderregten Gleichstrommaschine

Verbraucher-Zählpfeilsystem



Erzeuger-Zählpfeilsystem



## Im Verbraucher-Zählpfeilsystem:

$$U = U_a = I_a \cdot R_a + U_i (+U_b)$$

$$U_i = k_2 \cdot \Omega_m \cdot \Phi(I_f)$$

$$U_f = R_f \cdot I_f$$

$$M_e = k_2 \cdot I_a \cdot \Phi(I_f)$$

$$M_e \approx M_M$$

- Vernachlässigung der Reibungs-, Ummagnetisierungs-, Zusatzverluste im Läufer:  $M_d = 0$
- Wellenmoment  $M_M \cong$  inneres Moment  $M_e$

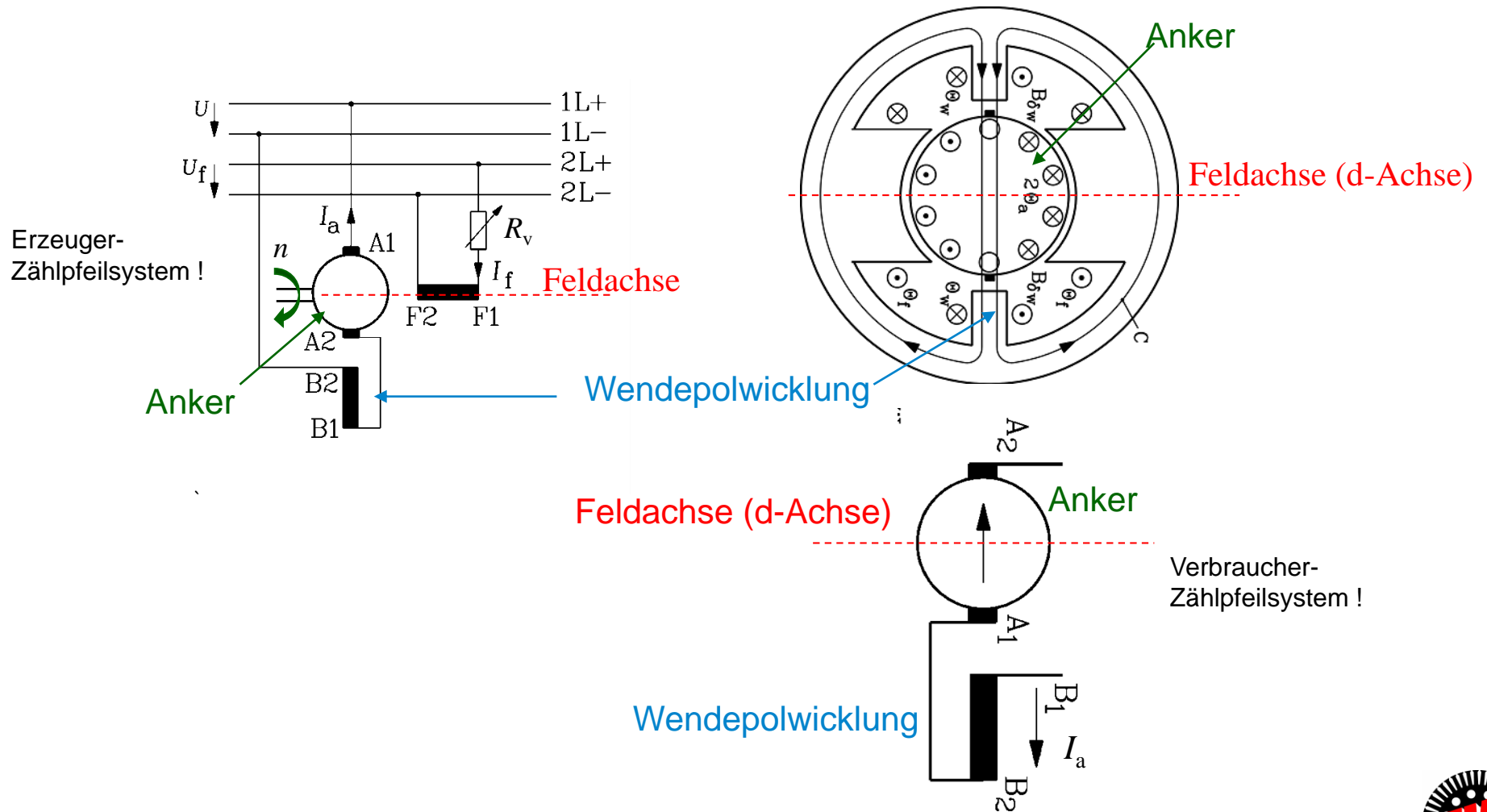
## Zusammenfassung: Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole

- Läuferstrom = Wechselstrom.  
Läufer-Eigenfeld induziert „Reaktanzspannung“ in Läuferspule bei Stromwendung
- Reaktanzspannung ergibt Schalfunken an den Bürsten = „Bürstenfeuer“
- Wendepolwicklung in den Hauptpollücken induziert Gegenspannung  
(„Wendefeldspannung“ hebt Reaktanzspannung auf = KEIN Bürstenfeuer)
- Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine erfasst i. A. nur Verluste im Ankerkreis

## 10. Gleichstromantriebe

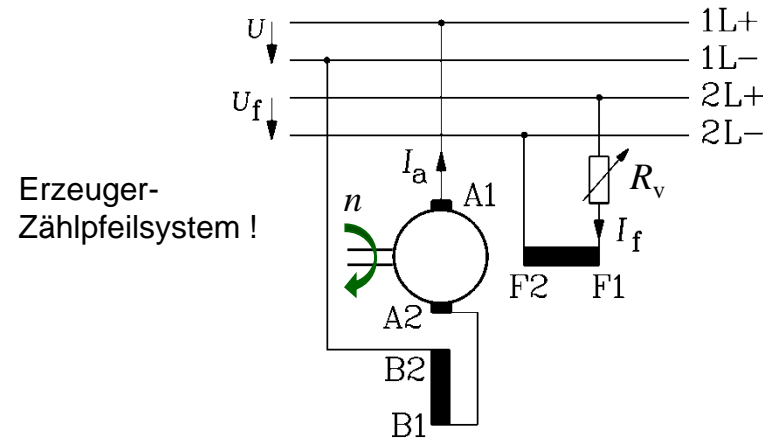
- 10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine
- 10.2 Ankerwicklungen
- 10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment
- 10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung
- 10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole
- 10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine**
- 10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb
- 10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine

# Schaltbild der Gleichstrommaschine (z.B.: unkompensiert, fremderregt)





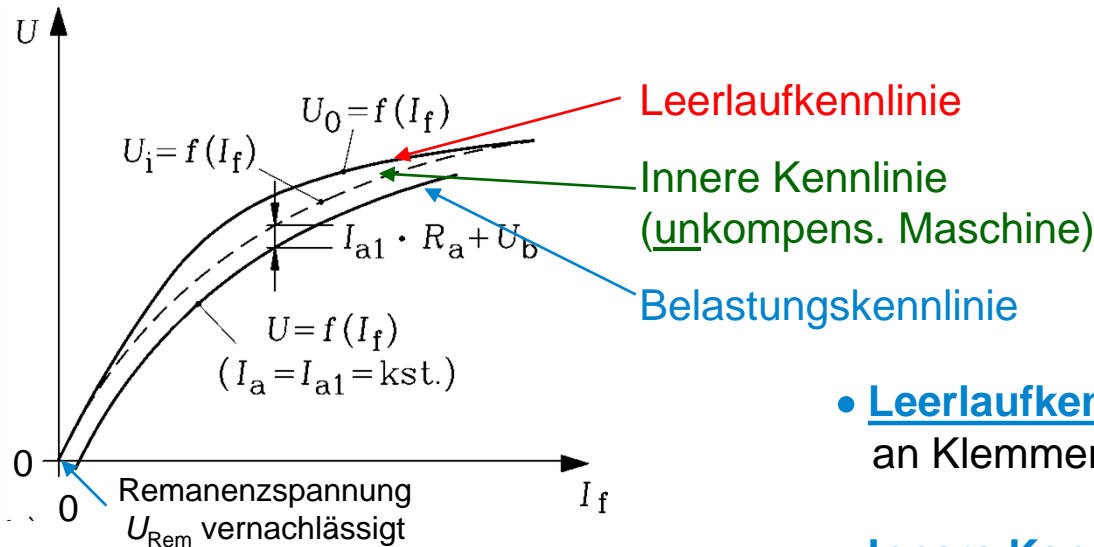
# Fremderregter unkompensierter Gleichstromgenerator: Schaltung



**$n = \text{konst.}$**

- Maschine mit  **$n = \text{konst.}$**  angetrieben
- Erregerwicklung F1-F2 aus **fremder** Gleichspannungsquelle  $U_f$  gespeist: Klemmen 2L+, 2L-
- $I_f$  über **Feldstell-Widerstand  $R_v$**  verändert

# Fremderregter unkompensierter Gleichstromgenerator: Kennlinien

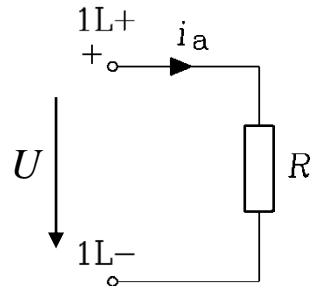


- Leerlaufkennlinie:**  $I_a = 0$ , Leerlaufspannung  $U_0(I_f)$  an Klemmen  $1L+$ ,  $1L^-$ 

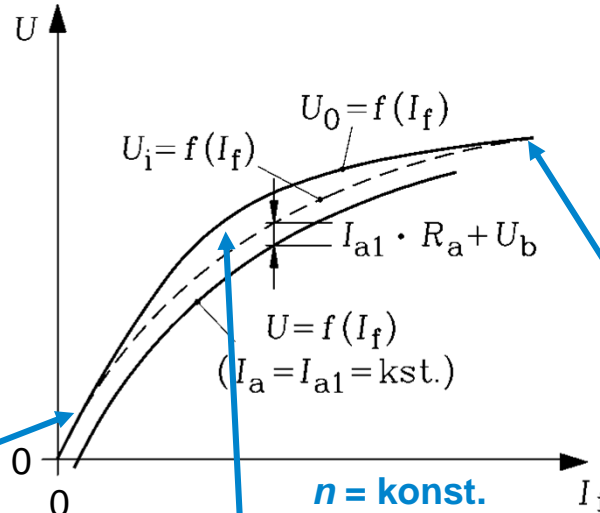
$$U_0 = k_1 \cdot n \cdot \Phi(I_f)$$
- Innere Kennlinie:** Bei unkompensierter Maschine:  
**Sättigung durch Ankerrückwirkung:** Polfluss  $\Phi$  sinkt mit steigendem Ankerstrom  $I_a$  um den Wert  $\Delta\Phi$ :  
 $I_a > 0$ : 
$$U_i(I_f, I_a) = k_1 \cdot n \cdot \Phi(I_f, I_a) < U_0$$
- Belastungskennlinie:** Ankerspannung  $U(I_f)$  bei  $1L+$ ,  $1L^-$  in Abhängigkeit von  $I_f$  bei  $I_a = \text{konst.}$ :

$$U(I_f, I_a) = U_i(I_f, I_a) - I_a R_a - U_b$$

# Ankerrückwirkung bei unterschiedlichem Erregerstrom $I_f$



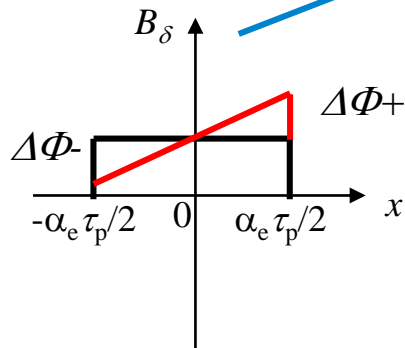
Ankerstrom  $I_a = I_{a1}$  an Lastwiderstand  $R$  konstant!



**Unkompensierte Gleichstrommaschine**

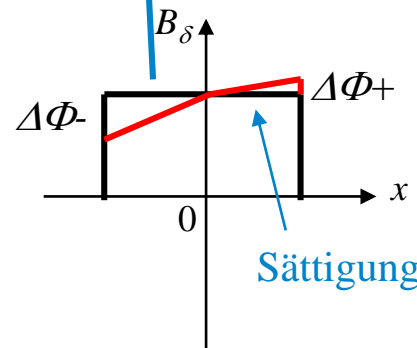
Flussverlust pro Pol:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_- - \Delta\Phi_+$$



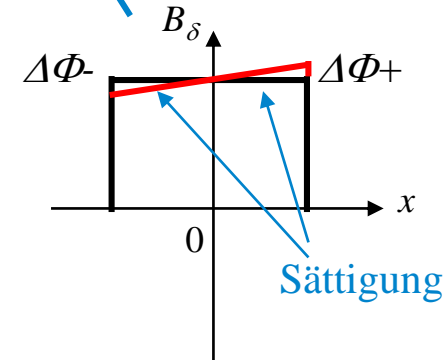
$I_f$  klein, keine Eisensättigung  
 $\Delta\Phi_- = \Delta\Phi_+$ :  $\Delta\Phi = 0$

KEIN Flussverlust:  $U_i = U_0$



$I_f$  Nennwert, mittlere Eisensättigung  
 $\Delta\Phi_- > \Delta\Phi_+$ :  $\Delta\Phi > 0$

Flussverlust tritt auf:  $U_i < U_0$

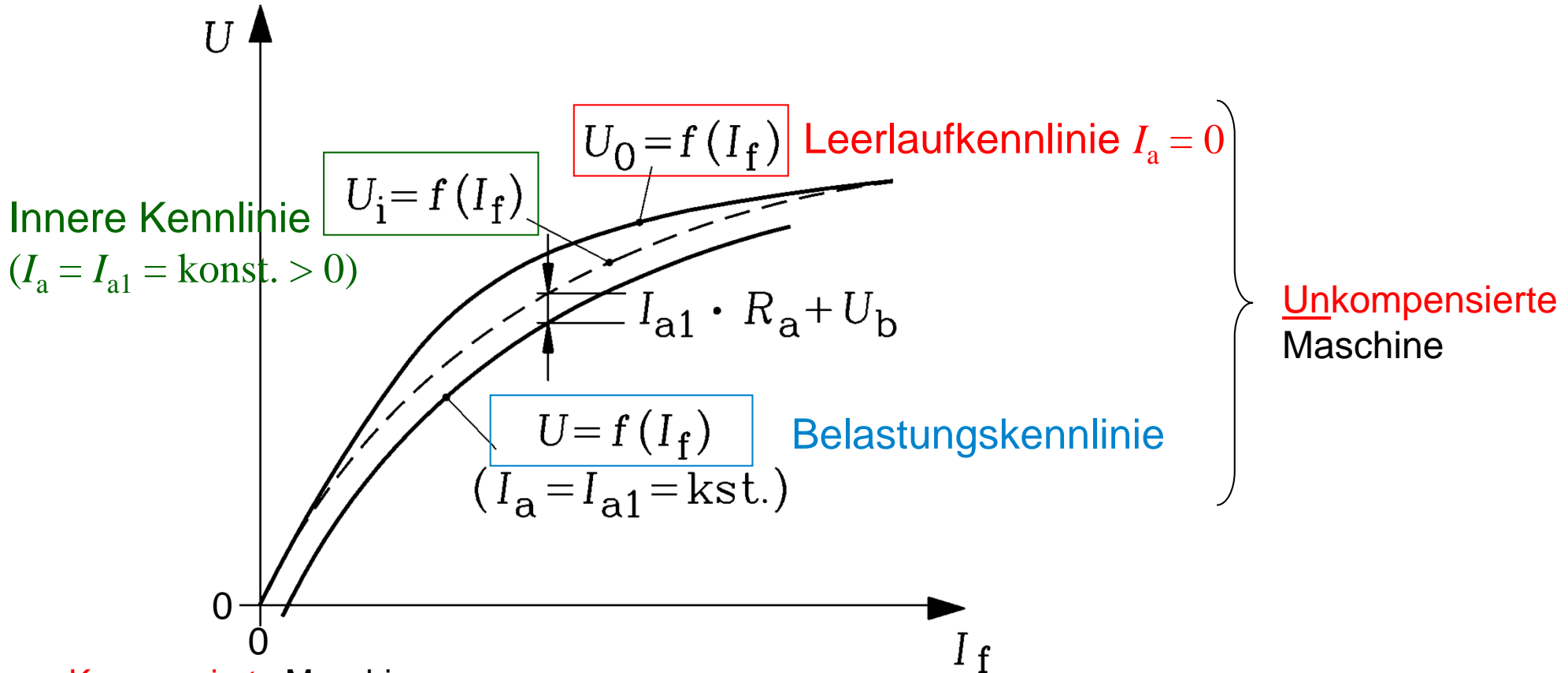


$I_f$  groß, hohe Eisensättigung  
 $\Delta\Phi_- = \Delta\Phi_+$ :  $\Delta\Phi = 0$

KEIN Flussverlust:  $U_i = U_0$



# Fremderr. GS-Generator: Belastungskennlinie $U(I_f)$



- **Kompensierte** Maschine:

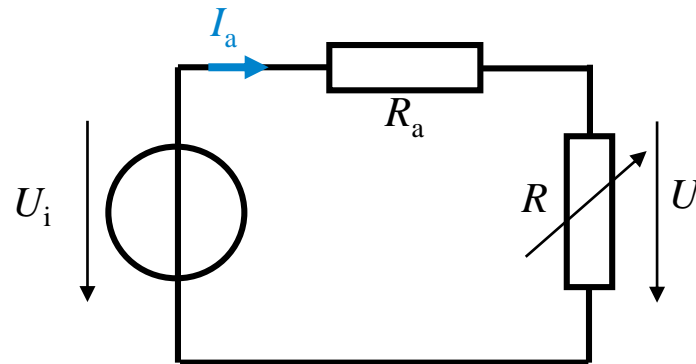
Innere Kennlinie  $U_i =$  Leerlaufkennlinie  $U_0$ :  $U(I_f, I_a) = U_0(I_f) - I_a \cdot R_a$

- **Un**kompensierte Maschine:

Innere Kennlinie  $U_i \neq$  Leerlaufkennlinie  $U_0$ :  $U(I_f, I_a) = U_i(I_f, I_a) - I_a \cdot R_a$

# Fremderregter GS-Generator: Äußere Kennlinie $U(I_a)$ (1)

$R$ : Veränderbarer äußerer Belastungswiderstand



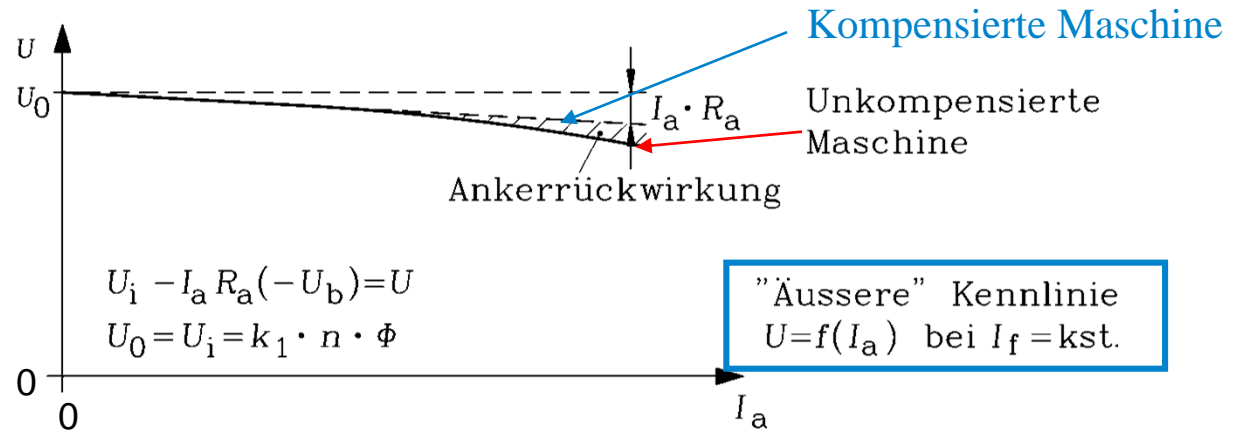
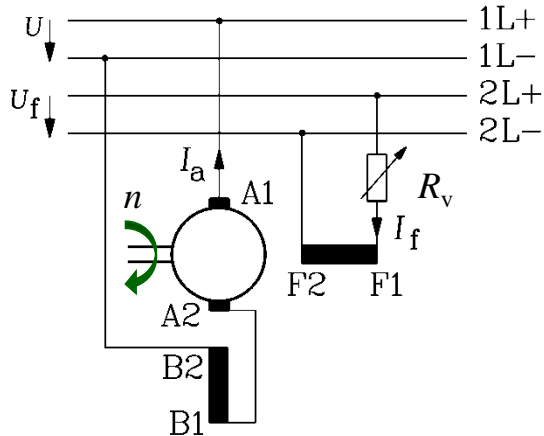
- **Äußere Kennlinie ( $n = \text{konst.}$ ):**

Ankerspannung in Abhängigkeit von  $I_a$  bei  $I_f = \text{konst.}$

$$U(I_f, I_a) = U_i(I_f, I_a) - I_a R_a - U_b \approx U_i(I_f, I_a) - I_a \cdot R_a = I_a \cdot R$$

# Fremderregter GS-Generator: Äußere Kennlinie $U(I_a)$ (2)

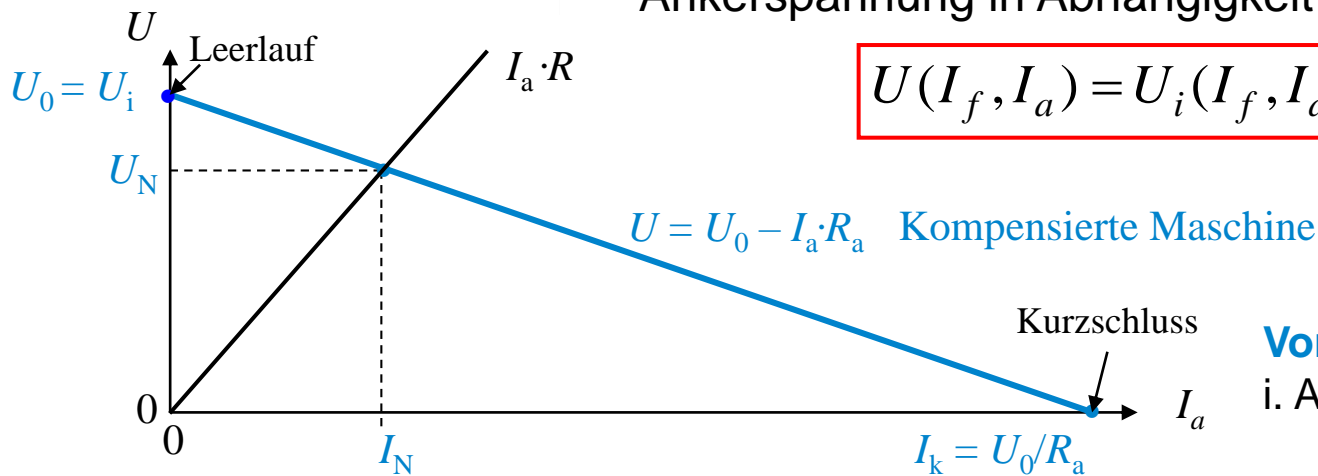
Erzeuger-Zählpeilsystem !



## • Äußere Kennlinie ( $n = \text{konst.}$ ):

Ankerspannung in Abhängigkeit von  $I_a$  bei  $I_f = \text{konst.}$

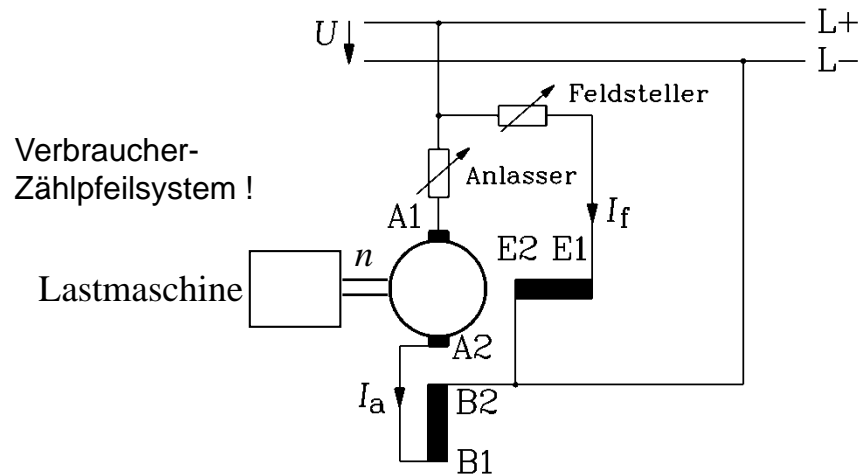
$$U(I_f, I_a) = U_i(I_f, I_a) - I_a R_a - U_b$$



**Vorsicht:** Kurzschluss-Strom  $I_k$   
i. A. unzulässig HOCH!



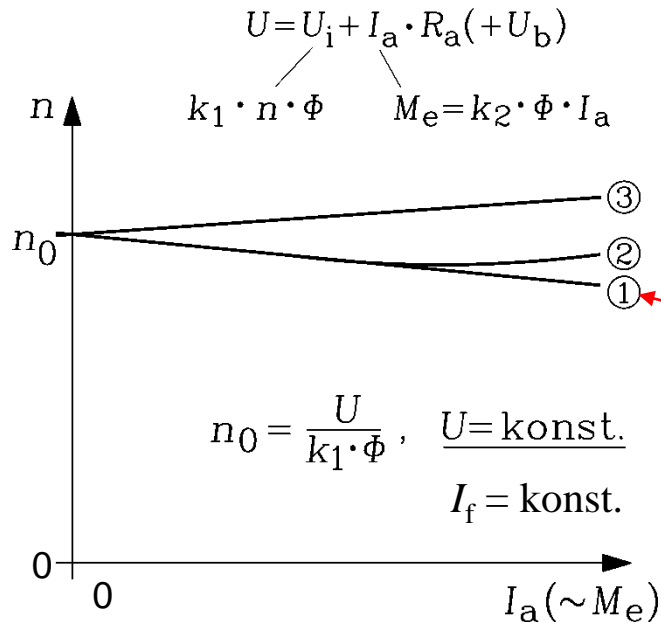
# Nebenschluss-/Fremderregter Gleichstrommotor: Schaltung



$U = \text{konst.}$

- Maschine mit  $U = \text{konst.}$  gespeist  
Erregerstrom  $I_f$  **einstellbar** über Feldsteller  
**Nebenschluss:** Klemmen: E1-E2, an  $U$   
**Fremderregt:** Klemmen: F1-F2: Fremde  $U_f$ -Quelle

# Nebenschluss-/Fremderregter Gleichstrommotor: Kennlinien



$$n = n_0 - \frac{M_e \cdot R_a}{k_1 \cdot k_2 \cdot \Phi^2}$$

## 1: Motorkennlinie $n(M)$ : Kompensierter Motor

$$U = U_i + I_a \cdot R_a (+U_b), \quad U_i = k_1 \cdot n \cdot \Phi$$

$$n = \frac{U_i}{k_1 \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi}$$

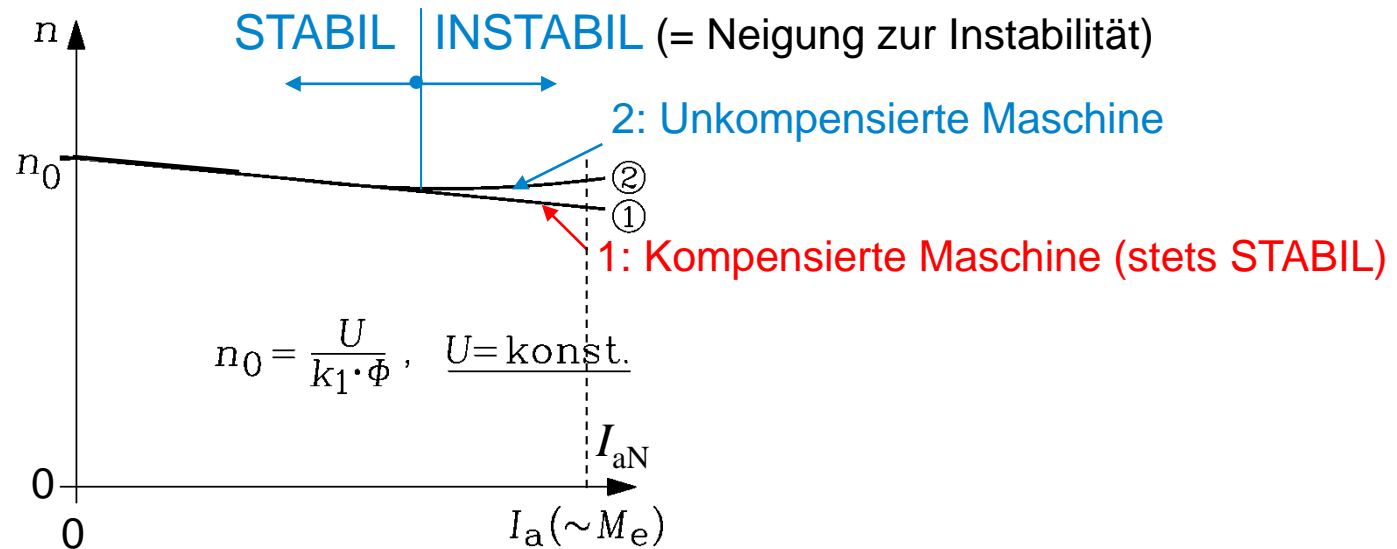
$$n = n_0 - \frac{M_e \cdot R_a}{k_1 \cdot k_2 \cdot \Phi^2}$$

- Motor-**Leerlauf**: Lastmoment  $M_s = 0$ :

Motor nur durch eigenes kleines Verlustmoment  $M_d$  (Reibung,

Ummagnetisierungsverluste) gebremst:  $M_{e0} = M_d \cong 0$ . **Leerlaufdrehzahl**:  $n_0 = U / (k_1 \cdot \Phi(I_f))$

- Fremderregter GS-Motor und GS-Nebenschlussmotor haben KOMPENSIERT
  - eine fallende Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie (1)
  - mit flacher Neigung, da der Ankerspannungsfall im Verhältnis zur Klemmenspannung klein ist („steife“ Kennlinie = Nebenschlussverhalten!)
- Unkompensiert steigt die  $n(M)$ -Kennlinie (2) bei großem  $I_a$  wieder an



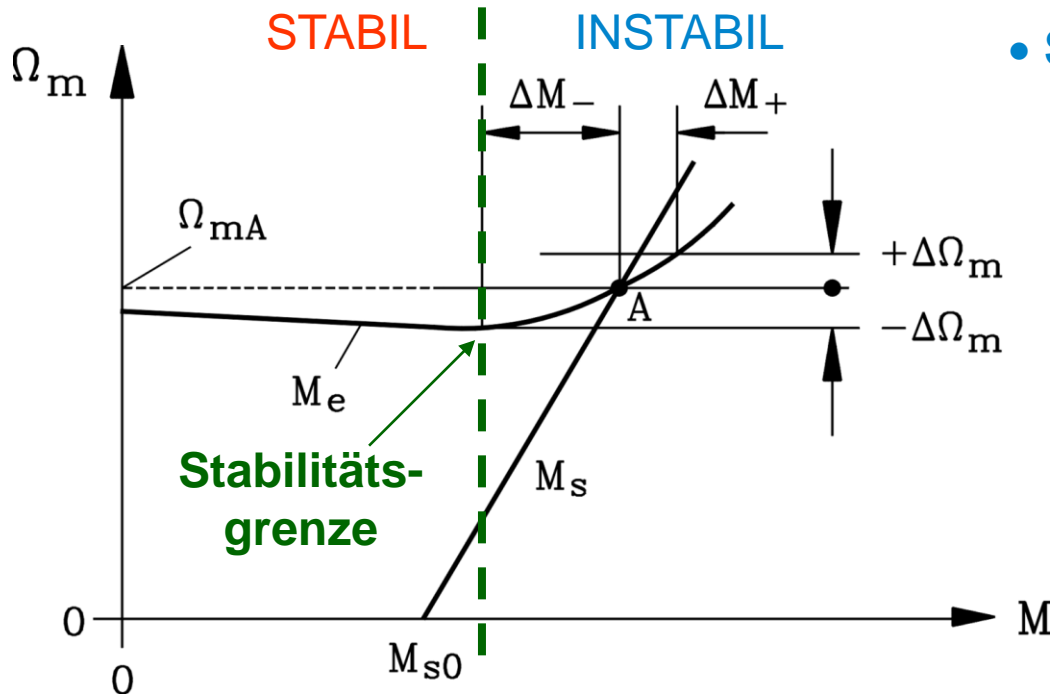
# Instabilität beim Nebenschluss-/ fremderregten GS-Motor (1)

- **Unkompensierte** Maschine: Hauptfluss  $\Phi$  sinkt etwa ab Nennstrom  $I_a = I_N$  auf  $\Phi' = \Phi - \Delta\Phi$   
(wegen zusätzlicher Sättigung durch Ankerrückwirkung)
- Bei großem  $I_a$  ist  $\Delta\Phi$  groß: Drehzahl steigt wieder an → **INSTABILITÄT**  
(**1. Term** in der Gleichung stärker steigt als der **2. Term**)

$$\Omega_m = \frac{U}{k_2 \cdot (\Phi - \Delta\Phi(I_a))} - \frac{R_a \cdot M_e}{k_2^2 \cdot (\Phi - \Delta\Phi(I_a))^2}$$

# Instabilität beim Nebenschluss-/fremderregten GS-Motor (2)

$$\Omega_m = \frac{U}{k_2 \cdot (\Phi - \Delta\Phi(I_a))} - \frac{R_a \cdot M_e}{k_2^2 \cdot (\Phi - \Delta\Phi(I_a))^2}$$



- **Stabilitätsbedingung** (Herleitung bei ASM):

$$\frac{dM_e}{d\Omega_m} - \frac{dM_s}{d\Omega_m} < 0 \Rightarrow \text{stabil}$$

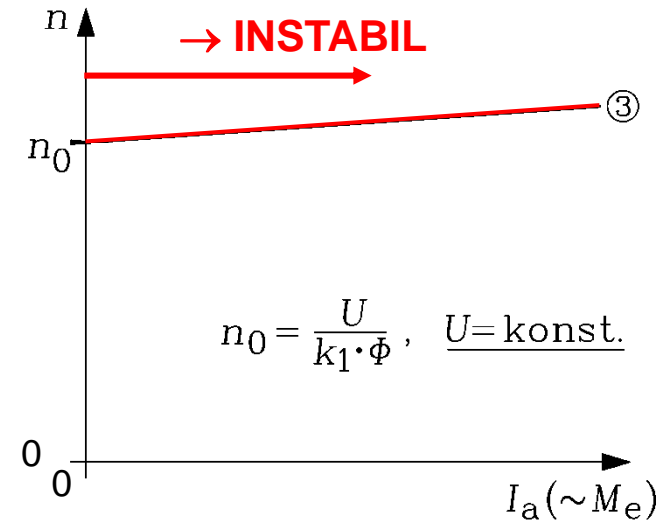
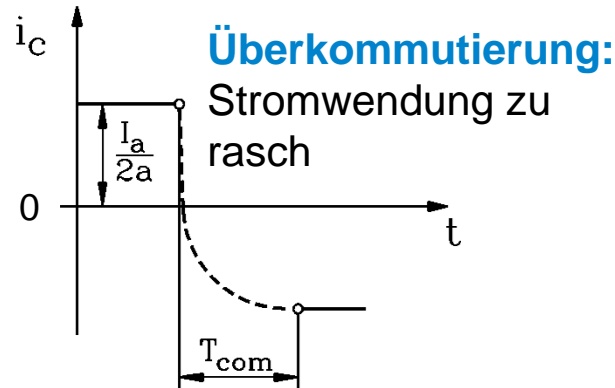
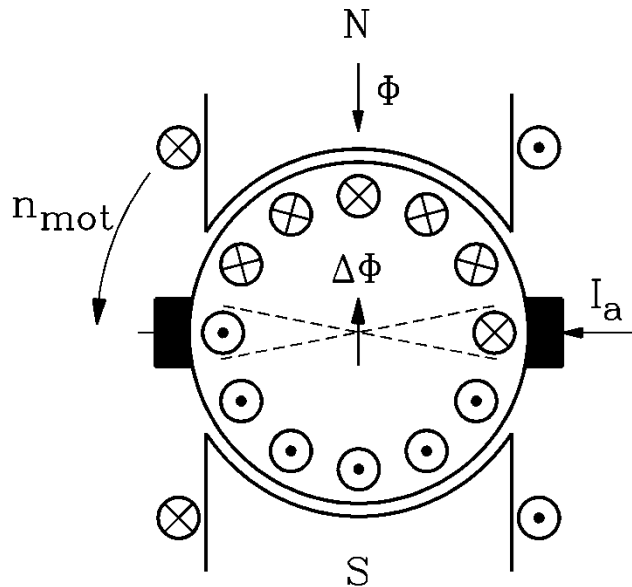
**Beispiel:**

INSTABIL:

Drehzahlzunahme bei steigender Belastung: Maschine “geht durch”, sie beschleunigt ungebremst auf hohe Drehzahlen bis zur Selbstzerstörung.

Abhilfe: Kompensationswicklung

# Instabilität bei überkommütierendem Motor (Kurve 3)



- Kommütierende Spule hat durch **Überkommütierung** bereits die umgekehrte Spulendurchflutung und erregt Spulenfluss  $\Delta\Phi \sim I_a$ , der dem Hauptfluss  $\Phi$  entgegenwirkt ( $\Phi - \Delta\Phi$ ) und diesen daher **schwächt** → **INSTABILITÄT**
- Da  $\Delta\Phi \sim I_a$  schon bei kleinsten Strömen schwächend auftritt, kann die Drehzahlkennlinie  $n(M)$  schon ab dem Leerlauf ansteigen (**Kurve 3**)

$$\Omega_m = \frac{U}{k_2 \cdot (\Phi - \Delta\Phi(I_a))} - \frac{R_a \cdot M_e}{k_2^2 \cdot (\Phi - \Delta\Phi(I_a))^2}$$

- **Abhilfe:** Wendefeld schwächen





# Ankerstrom im Stillstand $n = 0$

- **Motorstillstand:**  $n = 0$ : Induzierte Spannung ist Null:  $U_i = 0$

$$U = U_i + I_a \cdot R_a = 0 + I_a \cdot R_a \Rightarrow \underline{\underline{I_a = U / R_a}}$$

Ankerwiderstand ist (außer bei Kleinmotoren) sehr klein:

Ankerstrom im Stillstand **SEHR GROSS**  $\Rightarrow$  Motorwicklung würde **verbrennen** !

- **Beispiel:**

Gleichstrommotor:  $U_N = 430 \text{ V}$ ,  $P_N = 200 \text{ kW}$ ,  $\eta_a = 92\%$  (ohne Erregerverluste),  
 $R_a = 37.9 \text{ m}\Omega$

Nennstrom:  $I_N = P_N / (\eta_a \cdot U_N) = \underline{\underline{506 \text{ A}}}$

Anfahren ohne Anlasser:  $I_a = U_N / R_a = 430 / 0.0379 = \underline{\underline{11350 \text{ A}}} = \underline{\underline{22.4}} \cdot I_N$

Strom ist viel zu **hoch**!

- **Abhilfe zur Ankerstrom-Begrenzung im Stillstand (Anfahren,  $n = 0$ ):**

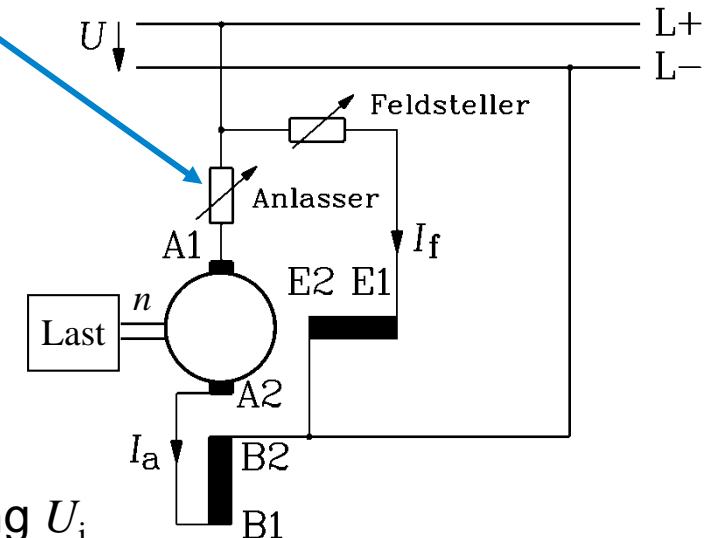
Strombegrenzender Anlass-Widerstand:

$R_{\text{Anlasser}}$  im Ankerkreis:

Dient zum Anfahren des Motors mit Nennstrom:

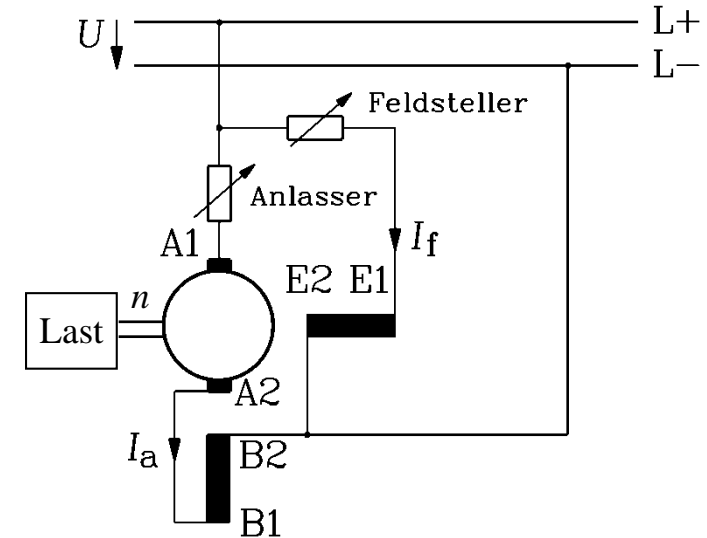
$$(R_{\text{Anlasser}} + R_a) \cdot I_N = U \quad \Rightarrow \quad R_{\text{Anlasser}} = \frac{U}{I_N} - R_a$$

- **Nach dem Anfahren** begrenzt die induzierte Spannung  $U_i$  den Strom  $I_a$ ; der Anlasser wird kurz geschlossen, um nicht unnötig Stromwärme-Verluste zu verursachen.



# Beispiel: Anlasswiderstand im Ankerkreis

$$(R_{Anlasser} + R_a) \cdot I_N = U \Rightarrow R_{Anlasser} = \frac{U}{I_N} - R_a$$



## • Beispiel:

Gleichstrommotor:  $U_N = 430 \text{ V}$ ,  $P_N = 200 \text{ kW}$ ,  $I_N = 506 \text{ A}$ ,  $R_a = 37.9 \text{ m}\Omega$

Erforderlicher Anlass-Widerstand:

Für Anfahren mit Nennstrom

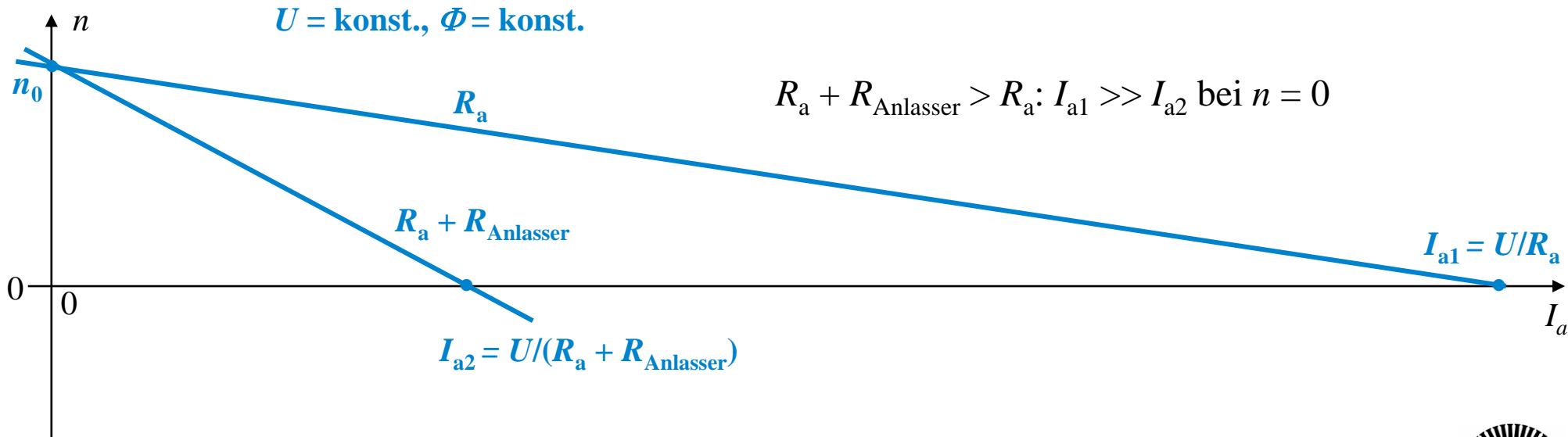
$$R_{Anlasser} = U_N / I_N - R_a = 430 / 506 - 0.0379 = \underline{\underline{0.8 \Omega}}$$

# Anfahren mit Anlasswiderstand $R_{\text{Anlasser}}$ im Ankerkreis

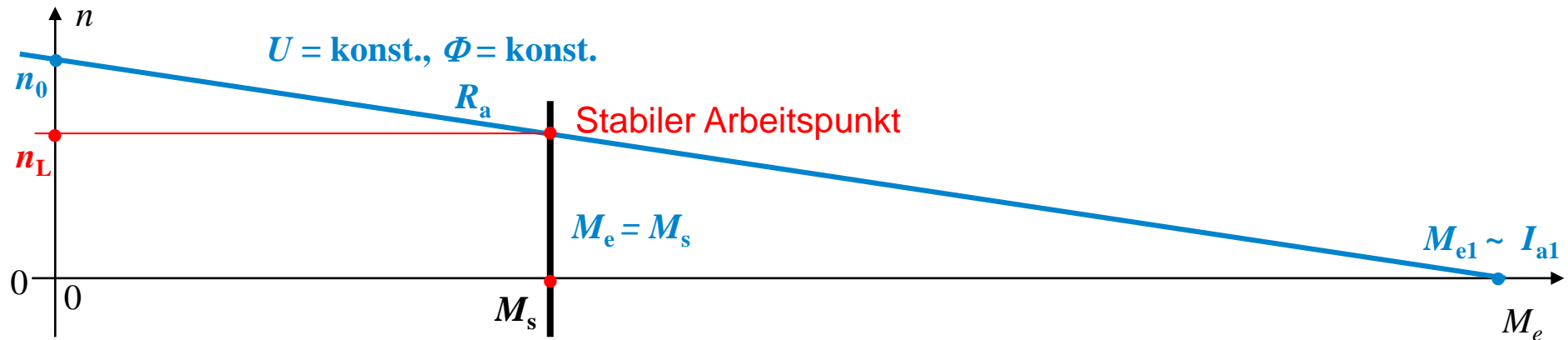
$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi(I_f)} = \frac{U}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} \Rightarrow n = n_0 - \frac{R_a + R_{\text{Anlasser}}}{k_1 \cdot \Phi} \cdot I_a$$

Leerlaufdrehzahl  $n_0$  konstant !

Neigung von  $n(I_a)$  wird größer mit steigendem  $R_{\text{Anlasser}}$ , (= Anfahren mit "Anlasser,,)



# Gleichstrommotor am Batterienetz



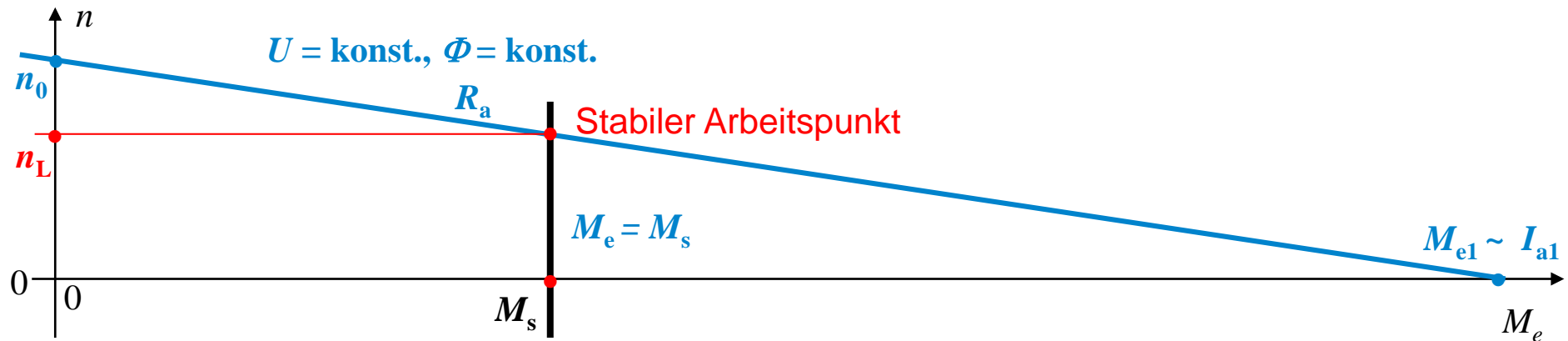
- Auf welche Drehzahl läuft Motor hoch ?

Stationär gilt: Belastungsmoment  $M_s =$  Motormoment  $M_e$ :  $dn/dt = 0$

$$J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = M_e - M_s = 0 \rightarrow d\Omega_m / dt = 0 \rightarrow \Omega_m = \text{konst.}$$

$J$ : Polares Trägheitsmoment von E-Maschine und Lastmaschine

# Beispiel: Gleichstrommotor am Batterienetz



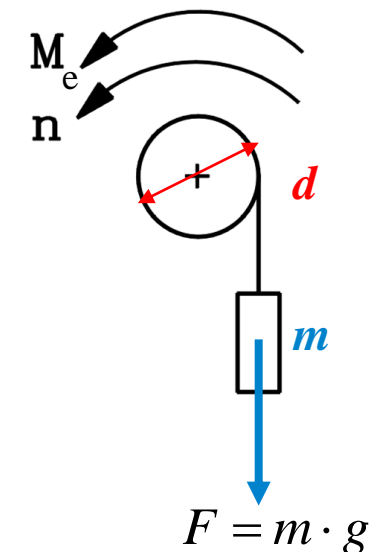
- Beispiel: Last heben:

Lastmoment ist UNabhängig von der Drehzahl:

$$M_s = m \cdot g \cdot \frac{d}{2}$$

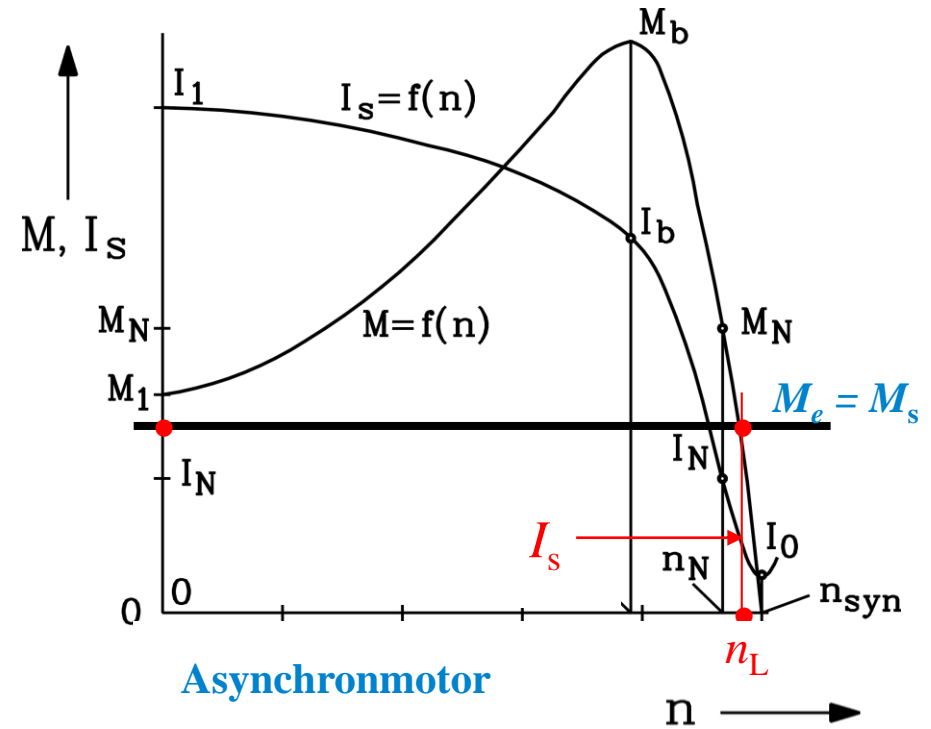
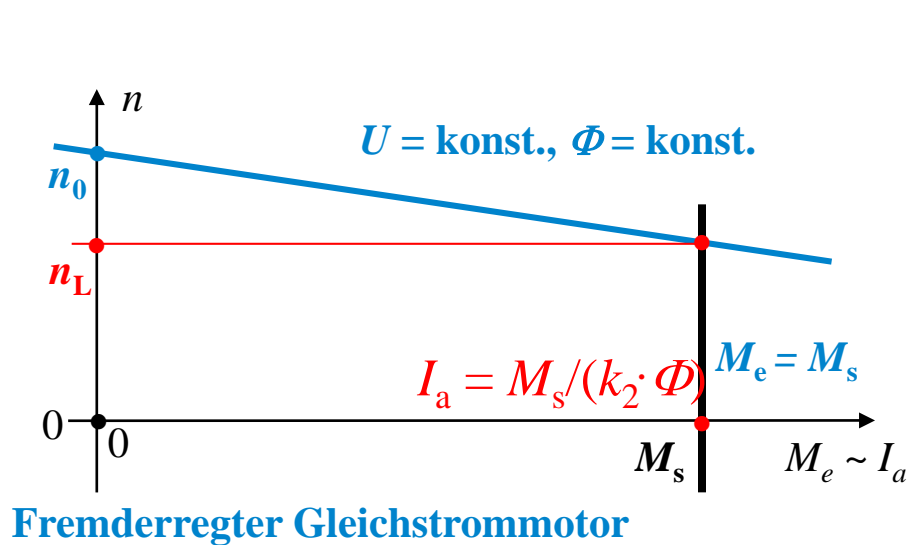
Die Drehzahl steigt von  $n = 0$  auf  $n_L$ , wo  $M_e = M_s$  ist.

Die Lastdrehzahl  $n_L$  ist kleiner als die Leerlaufdrehzahl  $n_0$ !





# Gleichstrommotor versus Asynchronmotor

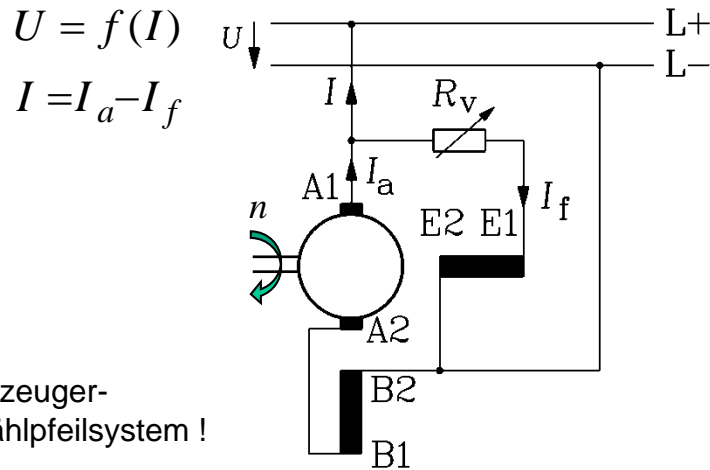


**Beispiel:** Last heben

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

Lastmoment unabhängig von der Drehzahl

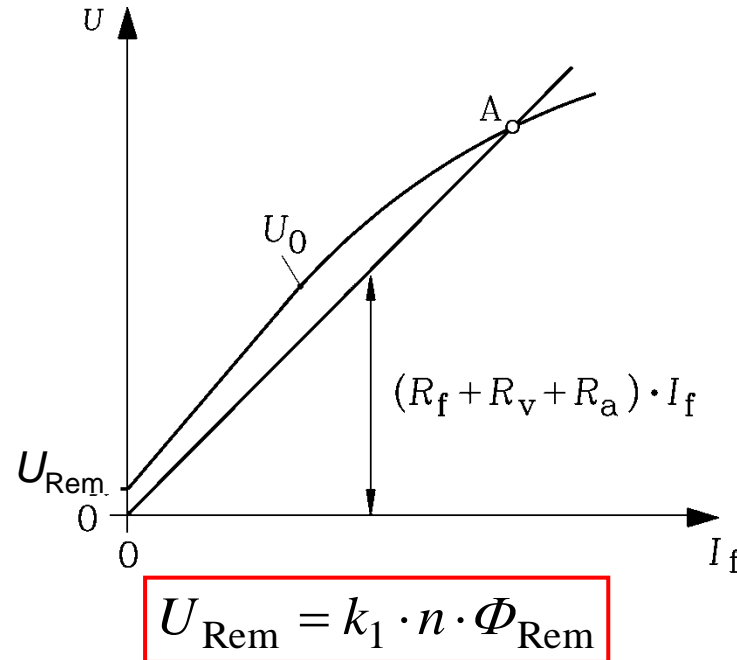
# Nebenschlussgenerator



$R_a$ : A1 ... B2,  $R_f$ : E1 ... E2

$n = \text{konst.}$

- Erregerwicklung E1-E2 parallel (= **Nebenschluss**) zum Anker A1-B2 geschaltet.
- Wenn **Stator-Eisenremanenz** vorhanden: Angetriebener Generator liefert ohne jede Fremdspannungsquelle selbst Spannung.

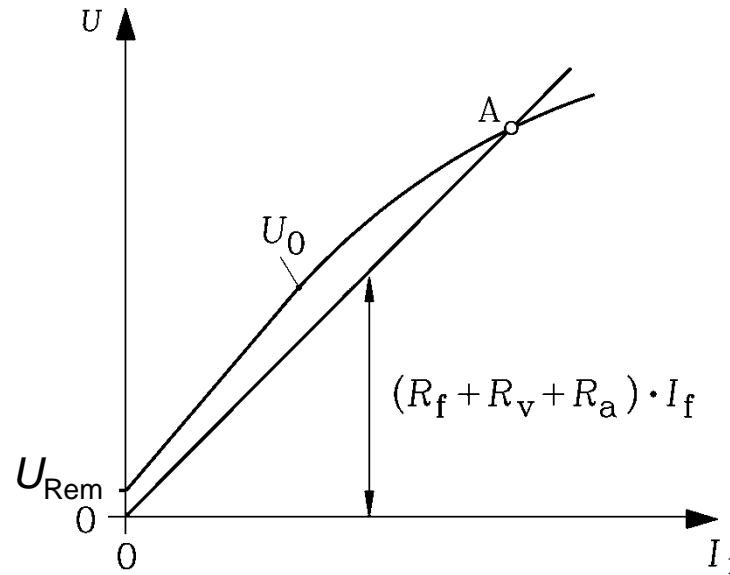


**Arbeitspunkt A:**

Entspricht der durch **Selbsterregung** eingestellten Ankerspannung  $U$  bei  $I_a = 0$

# Selbsterregung des Nebenschlussgenerators

$n = \text{konst.}$



$$U_{\text{Rem}} = k_1 \cdot n \cdot \Phi_{\text{Rem}}$$

- Stator-Eisenremanenzfluss  $\Phi_{\text{Rem}}$  induziert im Leerlauf ( $I_a = 0$ ) in der rotierenden Ankerwicklung die kleine **“Remanenzspannung”**  $U_{\text{Rem}}$
- $U_{\text{Rem}}$  treibt Feldstrom  $I_f = U_{\text{Rem}} / (R_a + R_f + R_v)$ , dessen Hauptfluss  $\Phi(I_f)$  den Remanenzfluss verstärkt
- Daher: Induzierte Spannung steigt an und treibt größeren Erregerstrom  $I_f =$  = “Aufschaukeln” bis zum Spannungsgleichgewicht (**Arbeitspunkt A**)
- Erstpublikation: **Werner von SIEMENS** 1866 als **„Dynamoelektrisches Prinzip“**

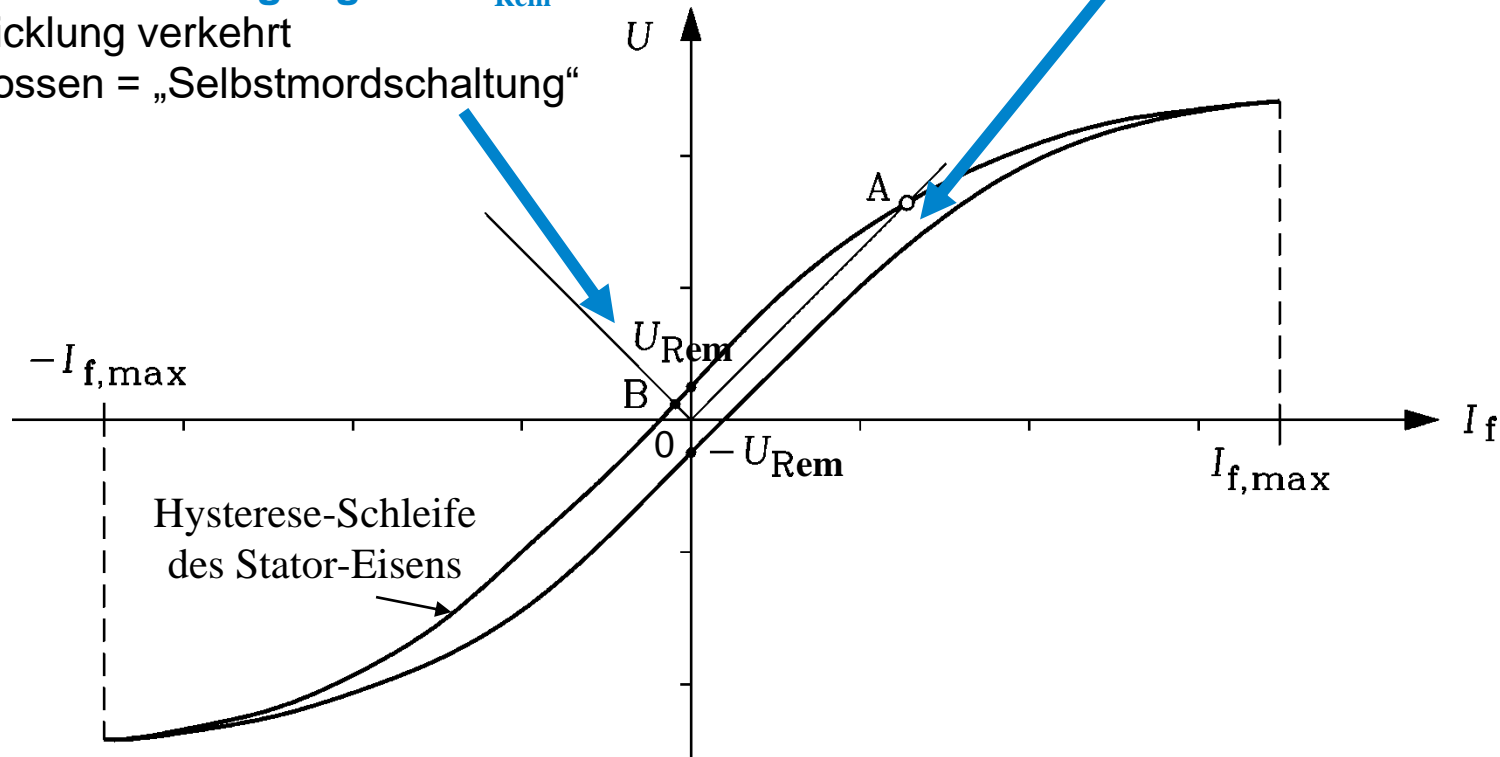
# Nebenschlussgenerator: „Selbstmordschaltung“



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**B: Falsche Selbsterregung:  $U < U_{Rem}$**   
Erregerwicklung verkehrt  
angeschlossen = „Selbstmordschaltung“

**A: Richtige Selbsterregung:  $U > U_{Rem}$**

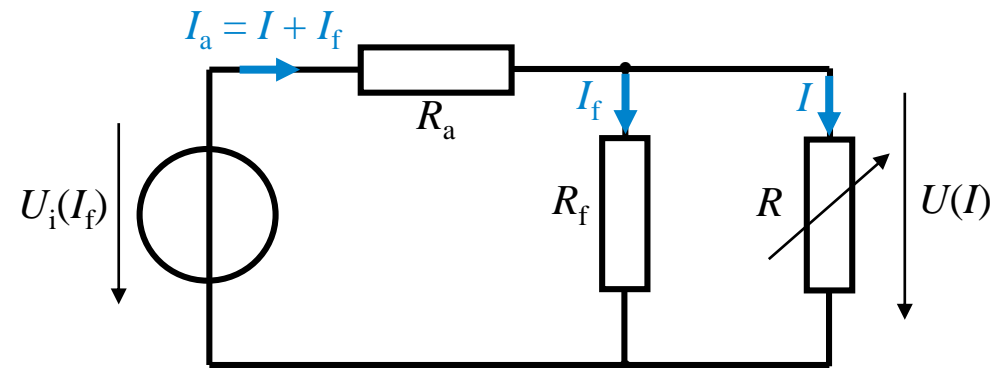
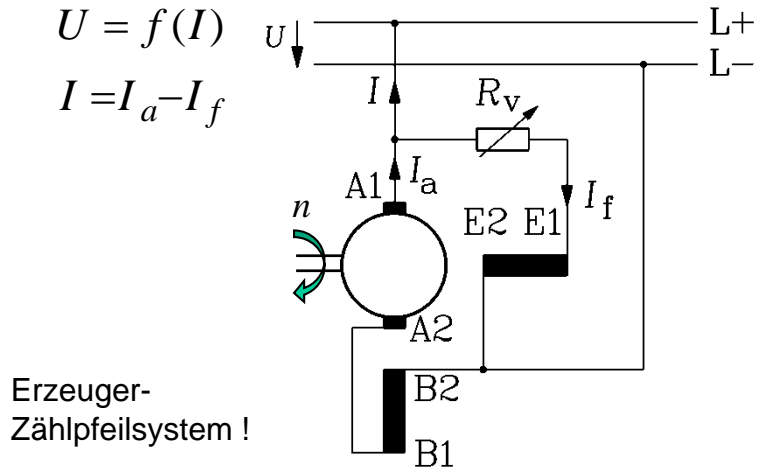


## Selbstmordschaltung:

Bei vertauschten Klemmen E1, E2 erzeugt der Erregerstrom  $I_f$  einen zum Remanenzfluss **entgegen gesetzten** Fluss  $\Phi$  und schwächt ihn: **KEINE** Auferregung ! Abhilfe: E1, E2 tauschen!



# Nebenschlussgenerator



$$U = U_i(I_f) - I_a \cdot R_a = U_i(I_f) - (I + I_f) \cdot R_a$$

$$U = (R_v + R_f) \cdot I_f \Big|_{R_v=0} = R_f \cdot I_f$$

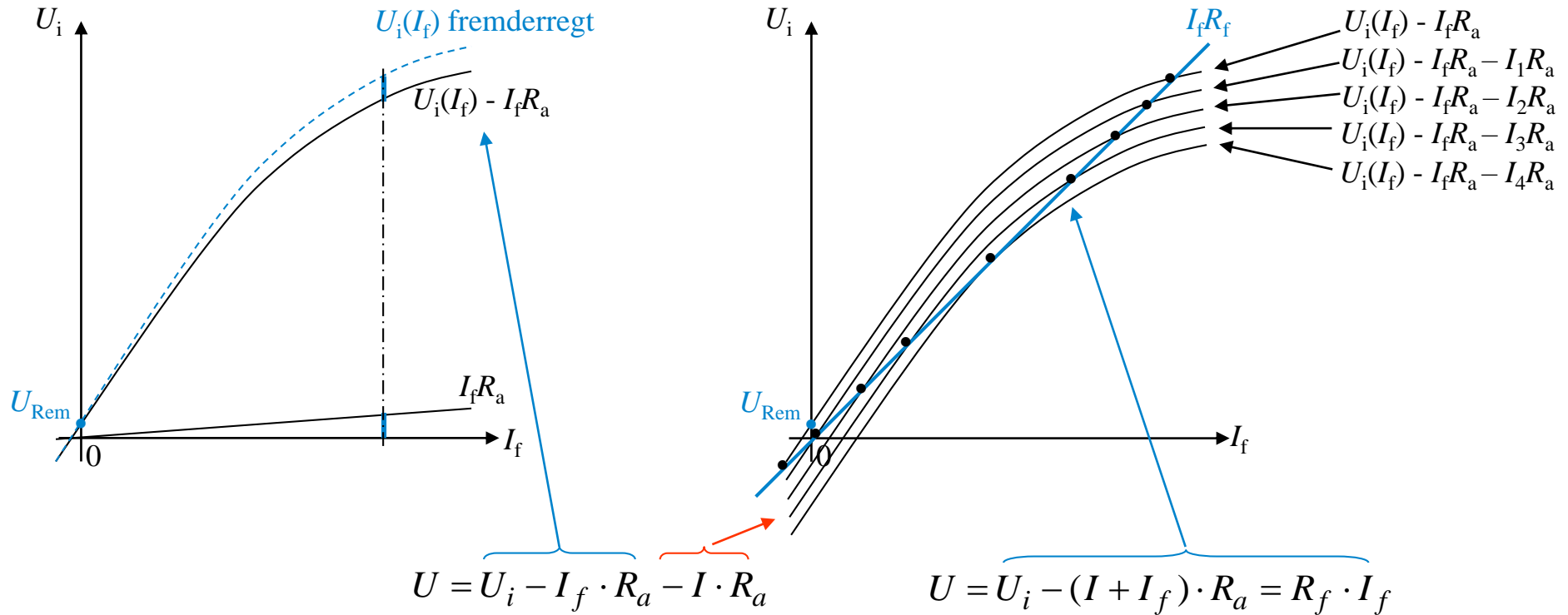
$$U = R \cdot I$$

# Ermittlung der äußeren Kennlinie des Gleichstrom-Nebenschlussgenerators (1)

Herleitung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

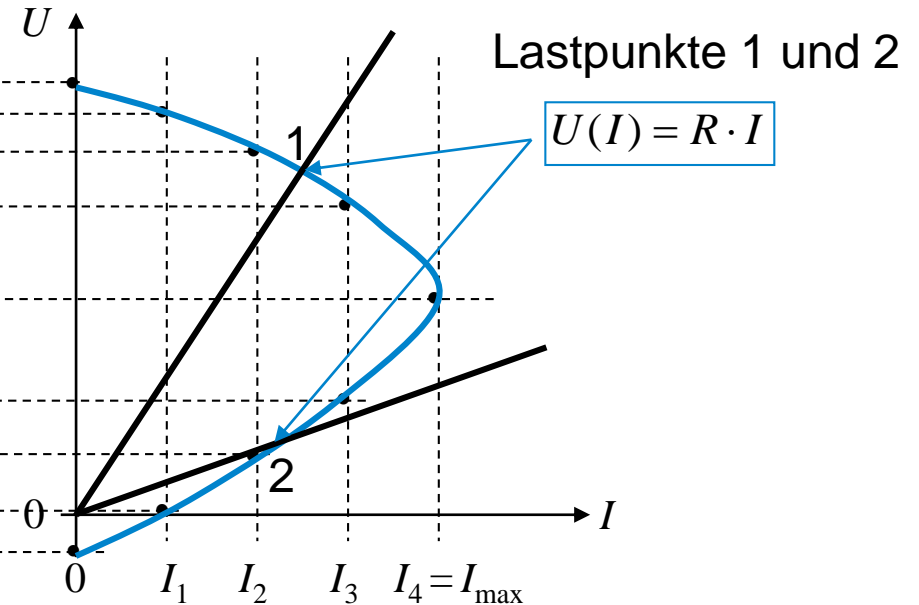
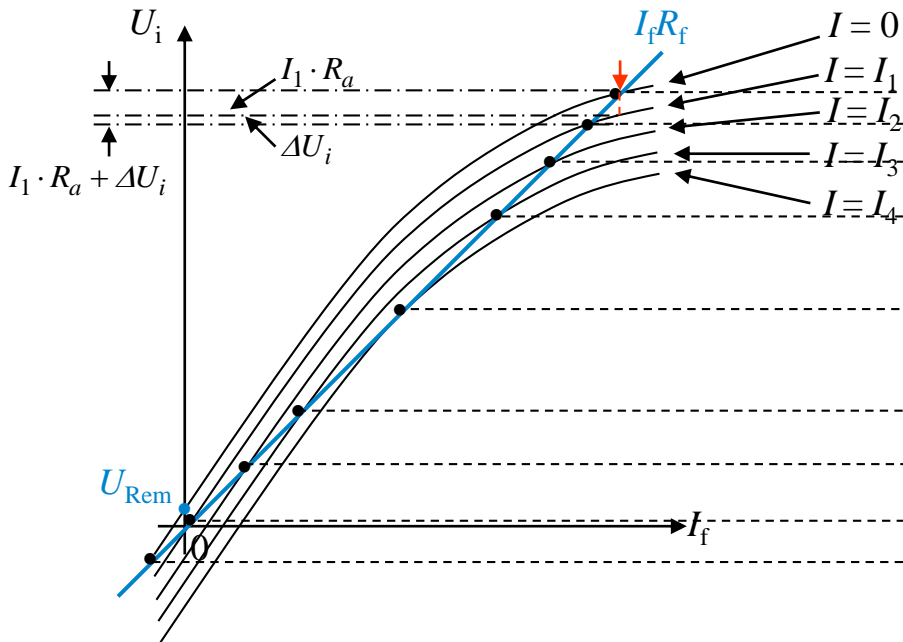


# Ermittlung der äußeren Kennlinie des Gleichstrom-Nebenschlussgenerators (2)

Herleitung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

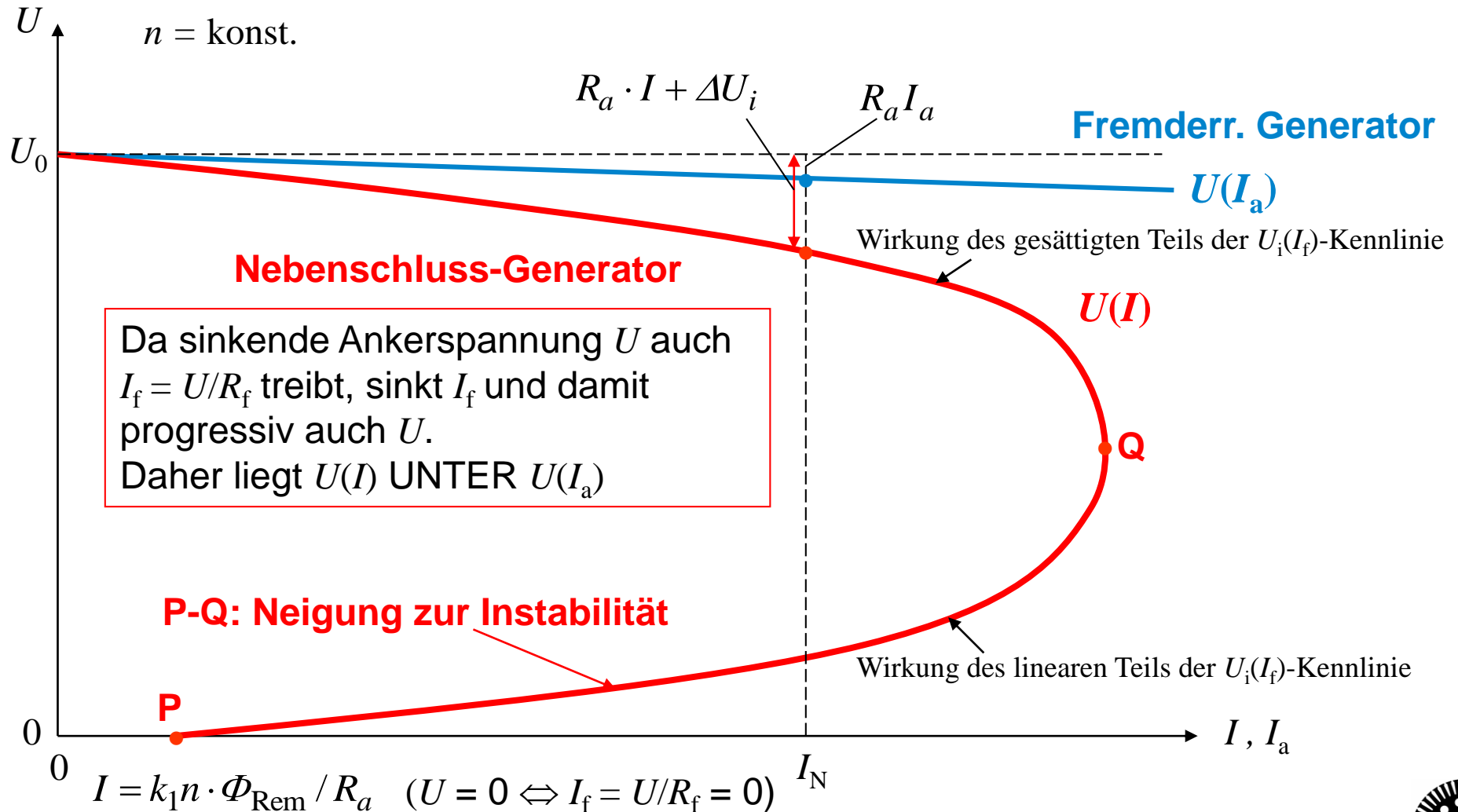


Lastpunkte 1: STABIL  
Lastpunkte 2: INSTABIL



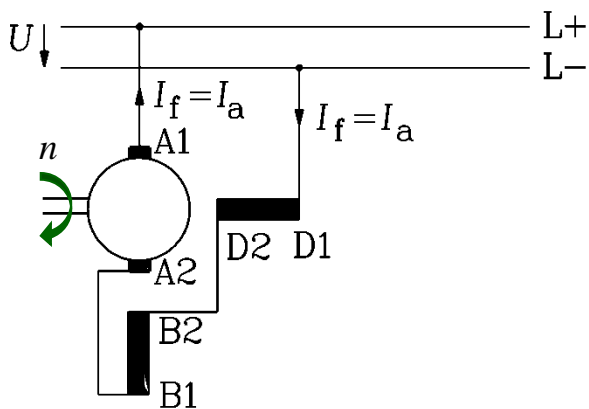


# Äußere Kennlinie: Fremderr. Generator vs. Nebenschlussgenerator



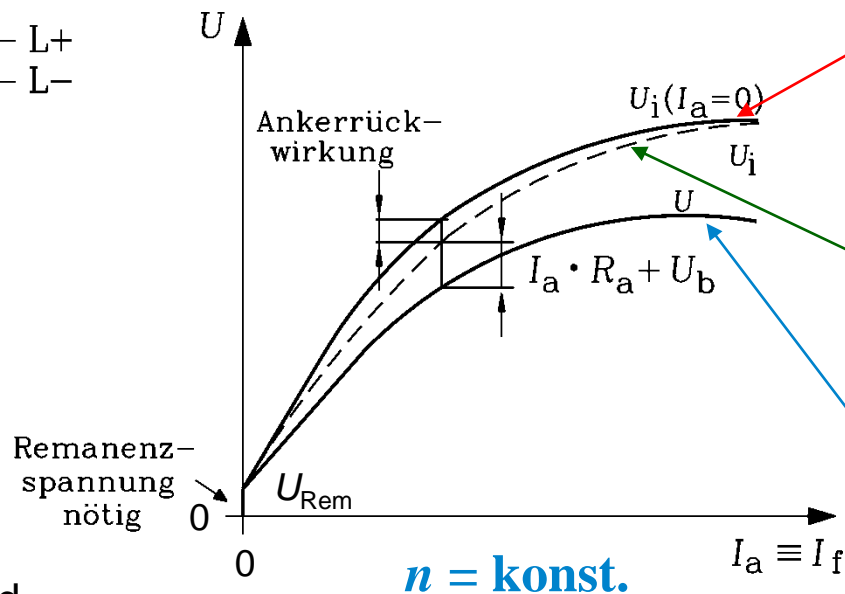
# Reihenschlussgenerator (Hauptschlussgenerator)

Erzeuger-Zählpeilsystem !



**Serien(= Reihen)-**  
Schaltung von Anker und  
Erregung:  $I_a = I_f$

$R_a$ : (A1-A2) + (B1-B2) + (D1-D2)



**Leerlaufspannung:**  
Bei Fremderregung messbar.

$$U_0 = U_i(I_f, I_a = 0)$$

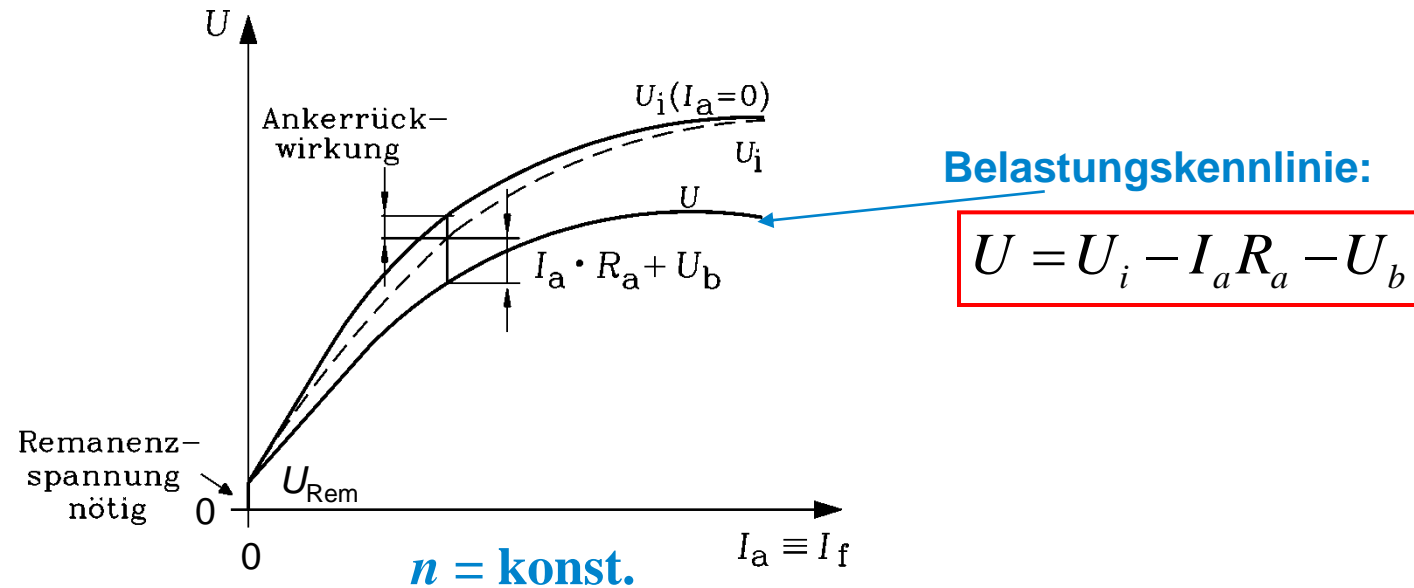
**Innere Kennlinie:** unkompensiert

$$U_i(I_f, I_a > 0)$$

**Belastungskennlinie:**

$$U = U_i - I_a \cdot R_a - U_b$$

**Beispiel:** Unkompensierte Maschine



- Remanenzspannung  $U_{Rem}$  ist “Initialspannung”. Erst bei Belastung (= Stromentnahme  $I_a$ ) steigen  $U$  und Hauptfluss  $\Phi$  an, weil der Belastungsstrom  $I_a$  gleichzeitig Erregerstrom  $I_f$  ist.
- Steigender  $I_a$ : Ankerspannungsfall  $I_a R_a$  steigt linear, induzierte Spannung  $U_i$  wegen Eisensättigung weniger als linear: Klemmenspannung  $U$  **sinkt nach Maximum wieder ab**.
- **Bedeutung:** Generatorische Bremse des RS-Motors (z. B. elektrische Bahn, Elektroauto).

# Beispiel: Reihenschlussgenerator lädt Batterie

Experts only



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Generator:

Erzeuger-Zählpeilsystem

$$U = U_i - I_a R_a - U_b$$

$$U_b \ll U_i : U = U_i - I_a R_a$$

Arbeitspunkt: stationär

$$u(I_a^*) = U_i - I_a^* R_a = U_{Batt,0} + I_a^* R_{Batt,i} = u_{Batt}(I_a^*)$$

dynamisch: Generator

$$u_{dyn}(t) = U_i - i_a R_a - L_a \frac{di_a}{dt} = u(i_a) - L_a \frac{di_a}{dt} = u_{Batt}(i_a)$$

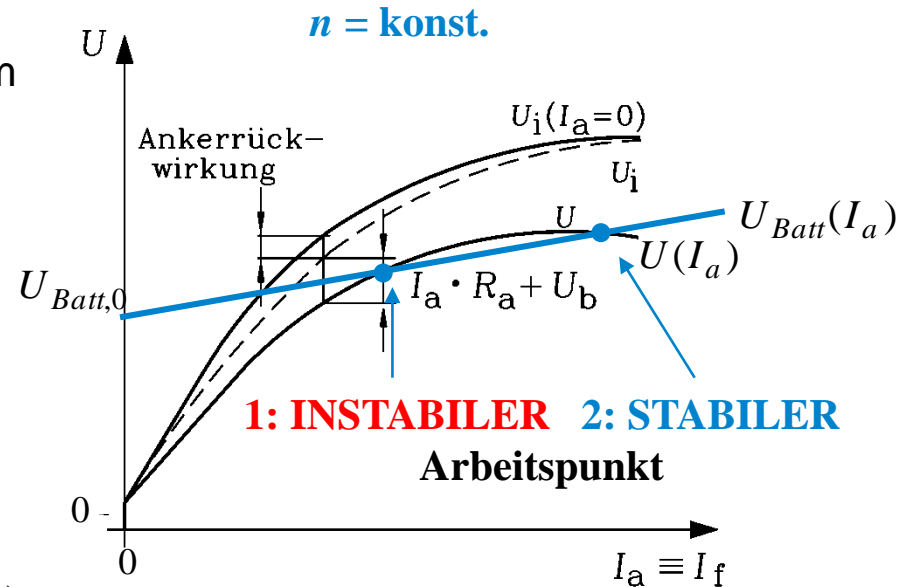
Dynamische Änderung des Ankerstroms  $i_a$  auf Grund einer Störung  $\Delta i_{a0}$  des Arbeitspunkts  $I_a^*$ :  $i_a(t) = I_a^* + \Delta i_a(t)$

$$u(I_a^* + \Delta i_a) = u(I_a^*) + \frac{du}{di_a} \cdot \Delta i_a \quad u_{Batt}(I_a^* + \Delta i_a) = u_{Batt}(I_a^*) + \frac{du_{Batt}}{di_a} \cdot \Delta i_a$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = u(i_a) - u_{Batt}(i_a) \Rightarrow L_a \frac{d\Delta i_a}{dt} = \left( \frac{du}{di_a} - \frac{du_{Batt}}{di_a} \right) \cdot \Delta i_a = k \cdot \Delta i_a \Rightarrow \frac{d\Delta i_a}{dt} - \frac{k}{L_a} \cdot \Delta i_a = 0 \quad \Delta i_a(t=0) = \Delta i_{a0}$$

Arbeitspunkt 1: **INSTABIL**  $k = du / di_a - du_{Batt} / di_a > 0$

Arbeitspunkt 2: **STABIL**  $k = du / di_a - du_{Batt} / di_a < 0$



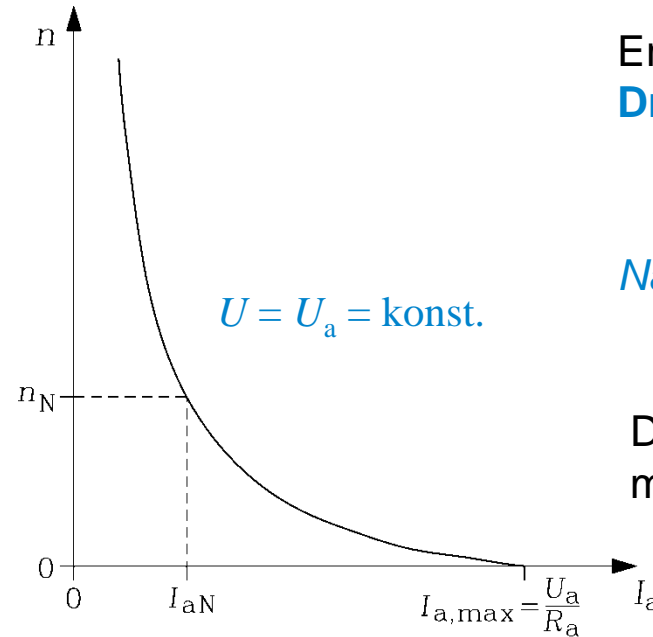
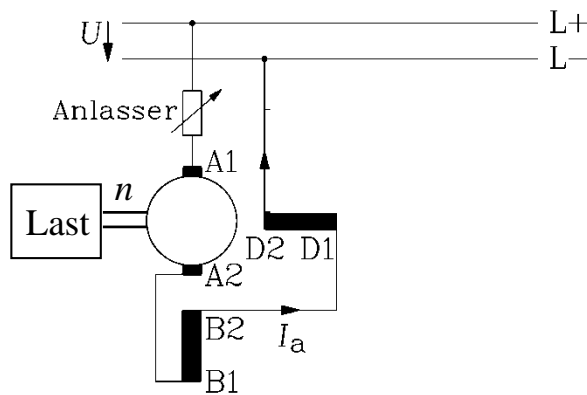
$$\Delta i_a(t) = \Delta i_{a0} \cdot e^{(k/L_a) \cdot t}$$



# Reihenschlussmotor (Hauptschlussmotor)

Verbraucher-Zählpeilsystem !

$$U = 2\pi \cdot n \cdot k_2 \cdot \Phi + I_a \cdot R_a$$



Erregerstrom = Ankerstrom:  $I_f = I_a$

**Drehmoment:**

$$M_e = k_2 \cdot \Phi(I_a) \cdot I_a$$

*Näherung:* Sättigung = konstant:

$$L' = \text{konst.}: \Phi = L' \cdot I_a$$

Drehmoment steigt **quadratisch** mit Ankerstrom:

$$M_e = k_2 \cdot L' \cdot I_a^2$$

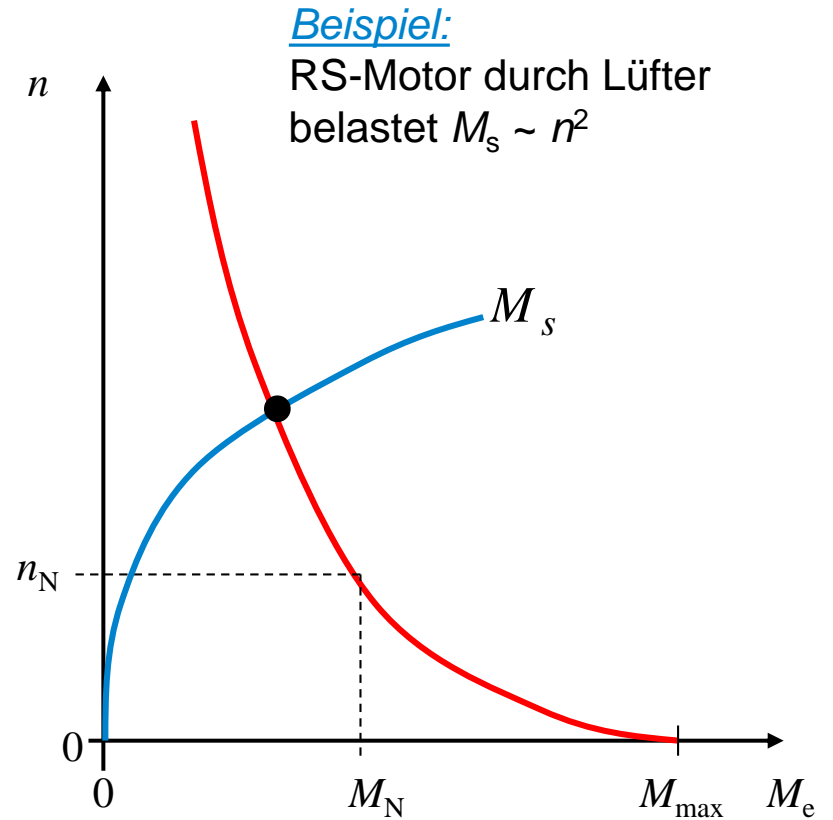
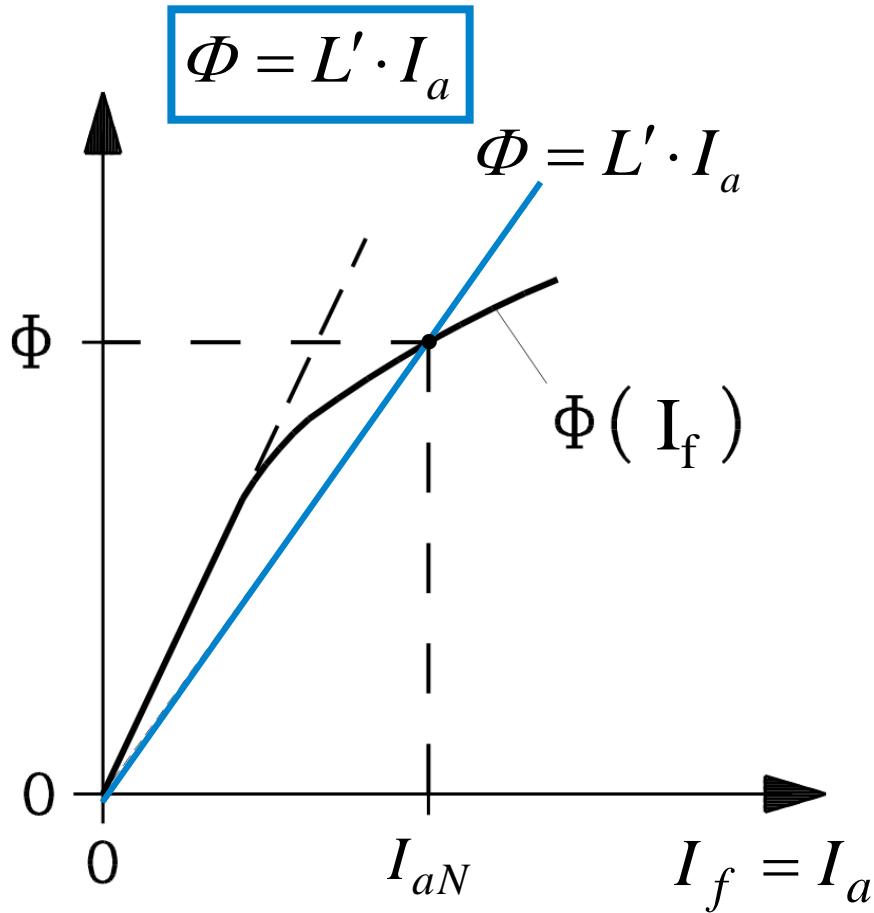
- Bei kleinen Ankerströmen (= kleiner Fluss  $\Phi$ ) gilt  $L' = \text{konst.}$  **exakt**, da Eisensättigung erst bei größerem Fluss  $\Phi$  einsetzt!

- **$n(M)$ -Kennlinie:** 
$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{2\pi \cdot k_2 \cdot \Phi} = \frac{1}{2\pi \cdot k_2 \cdot L'} \cdot \left( \frac{U}{I_a} - R_a \right) = \frac{U}{2\pi \cdot \sqrt{k_2 \cdot L'}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M_e}} - \frac{R_a}{2\pi \cdot k_2 \cdot L'}$$

- Die Drehzahl des Reihenschlussmotors sinkt hyperbolisch mit der Belastung  $M_e$  auf den Wert Null beim Anfahren.

# Flusskennlinie und ihre Linearisierung

# Reihenschlussmotor- Drehmoment-Kennlinie



$$M_{\max} = k_2 \cdot L' \cdot I_{a,\max}^2 = k_2 \cdot L' \cdot (U_a / R_a)^2$$



- Reihenschluss-Motor **darf nicht vollständig entlastet werden**, da bei  $M_s = 0$  der Motor auf sehr hohe Drehzahl beschleunigt (**“Durchgehen”**) und durch zu hohe Fliehkräfte zerstört wird.
- Starke Drehzahlabnahme mit steigender Belastung = **“weiche Kennlinie”**
- **Einsatzgebiete:** Traktion (Eisenbahn: z. B. Italien 3 kV, DC-Netz), ältere Elektroautos
  - a) **Niedrige Drehzahlen (“Anfahren”)**: Hohes Drehmoment  $M_{\max}$  = gute Beschleunigung
  - b) Rad-Fahrweg-Kontakt (Rollwiderstand) und Luftwiderstand **belasten den Antrieb stets.**

Beim Durchdrehen der Räder (**“Schleudern”**) bei nassem Fahrweg:  
**Überdrehzahlschutz nötig!**



# Drehzahlverstellung beim Reihenschlussmotor

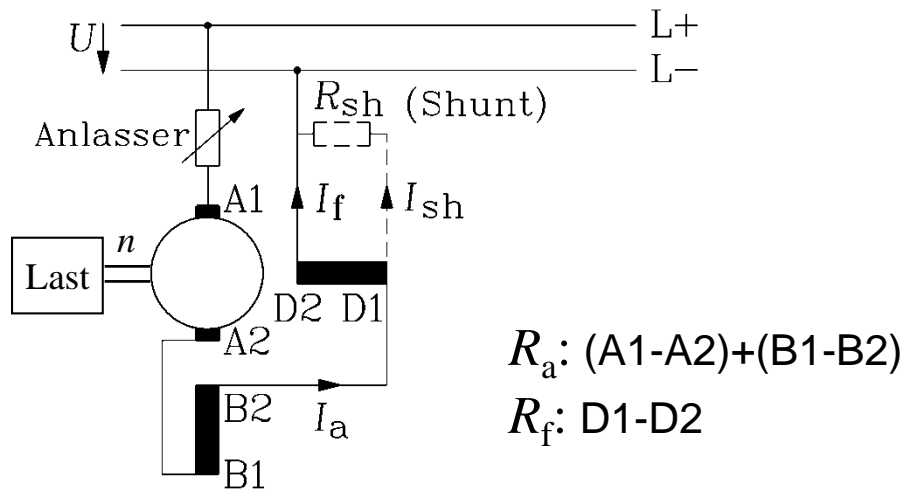
1) Anfahren am Batterienetz: Anlasser!

2) Drehzahlverstellung durch Feldschwächung mit Shunt-Widerstand:

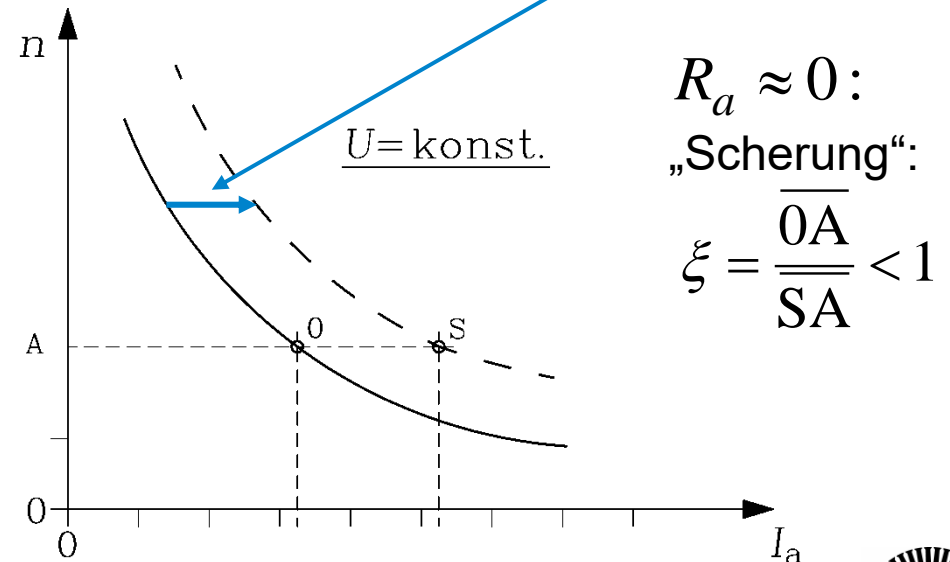
Parallelwiderstand  $R_{sh}$  zur Feldwicklung (**Shunt-Widerstand**):

Verringerung des Stroms  $I_f$  durch die Feldwicklung = **Flussverringern** =  
= **Drehzahlanstieg**

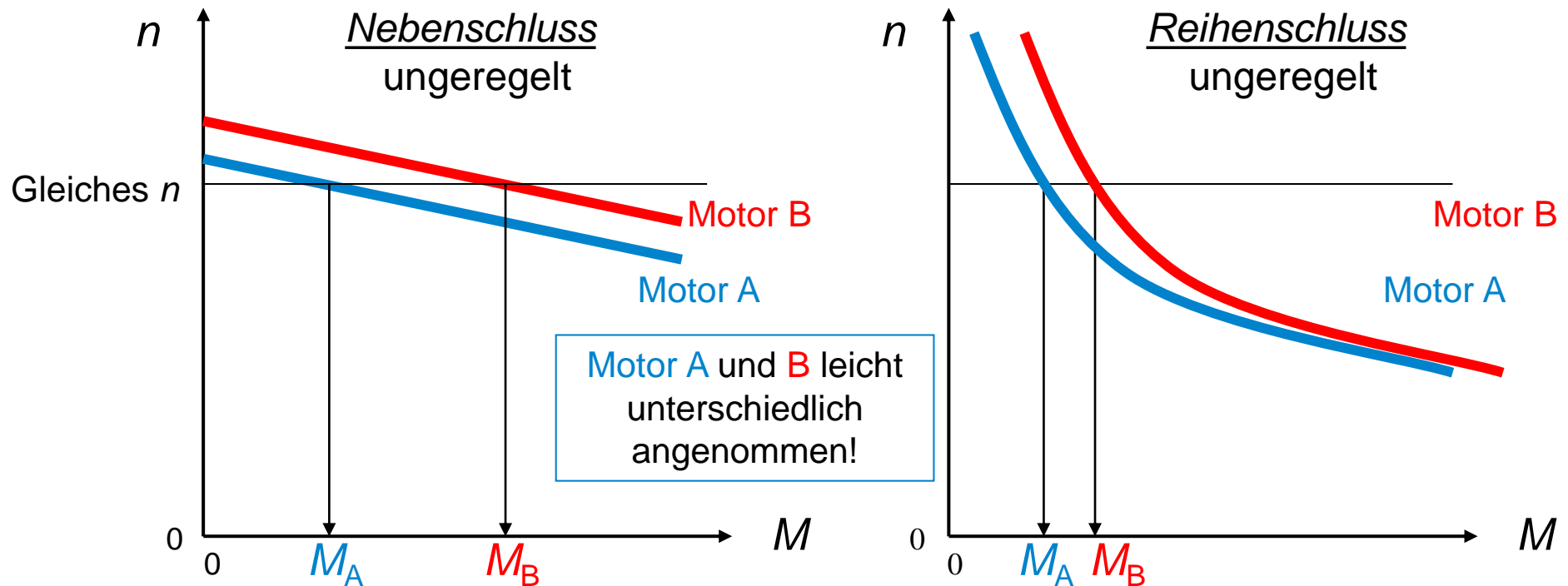
$$I_f \cdot R_f = I_{sh} \cdot R_{sh} = (I_a - I_f) \cdot R_{sh} \Rightarrow \frac{I_f}{I_a} = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_f} = \xi < 1$$



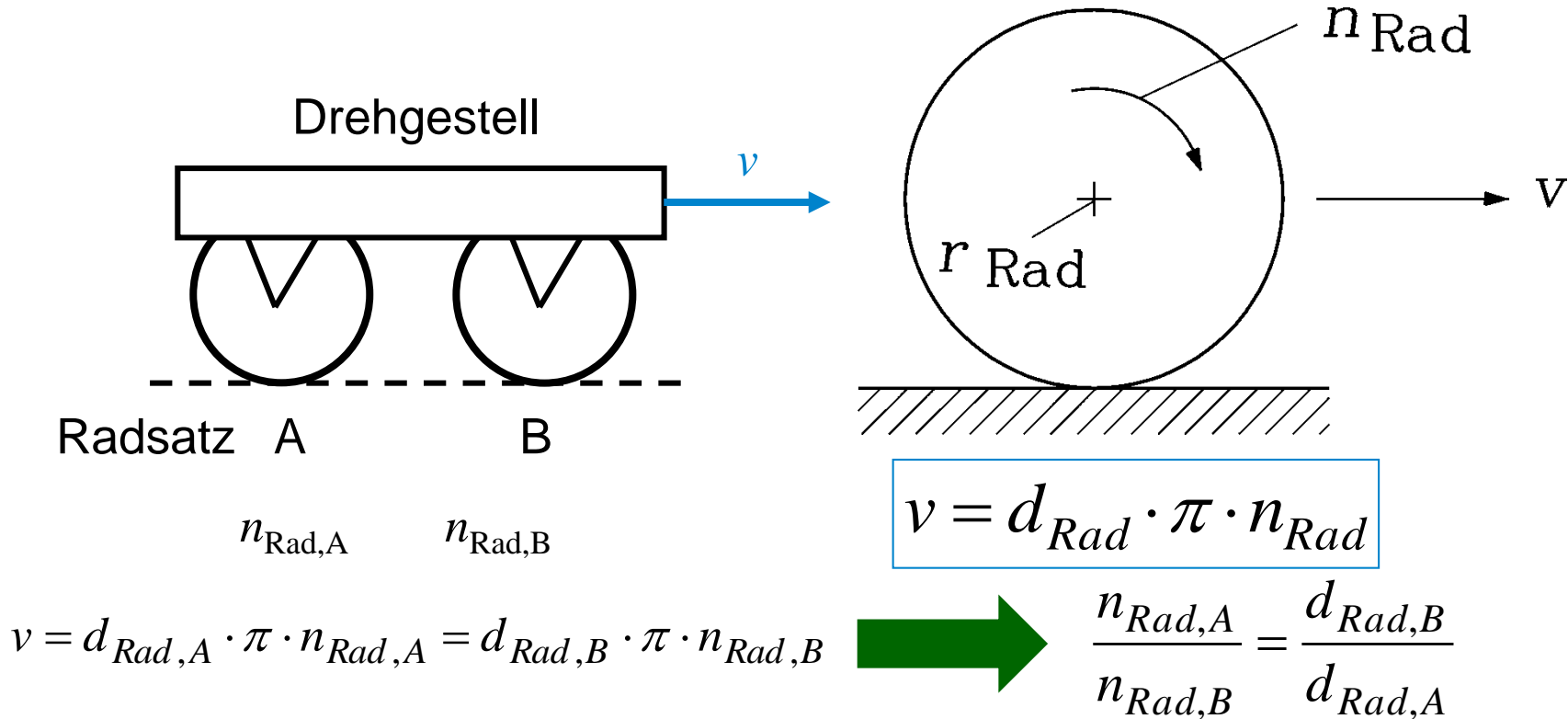
Verbraucher-Zählpfeilsystem !



# Tandembetrieb auf einer Achse: Gleiche Drehzahl $n$

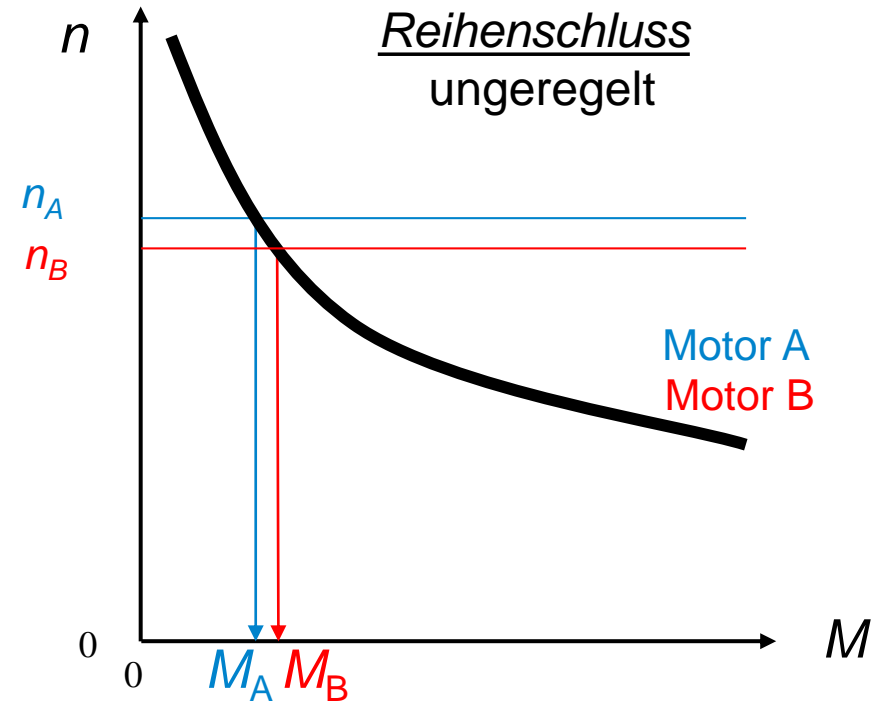
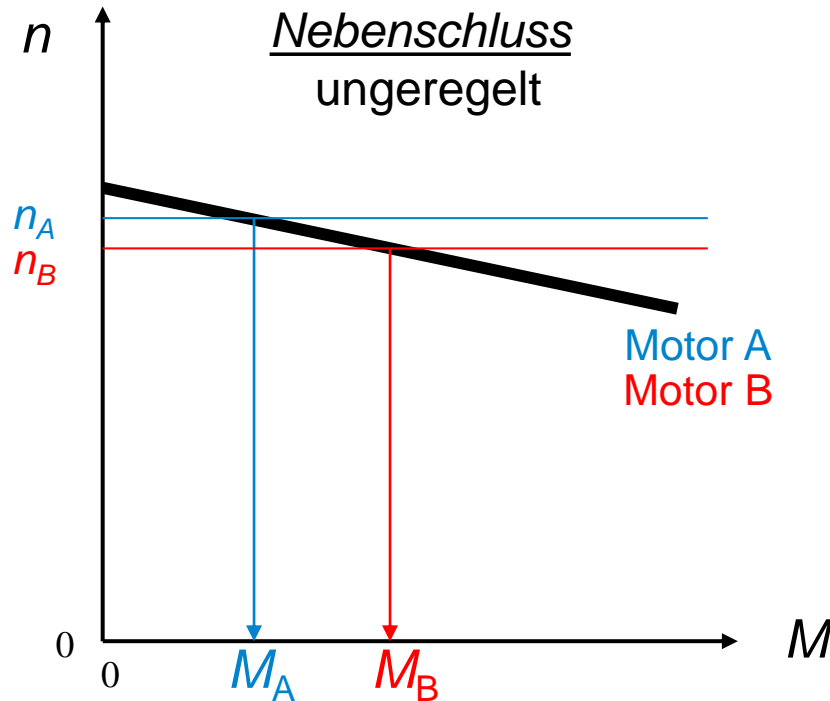


- **Nebenschluss:** Bei kleinen Unterschieden in der  $n(M)$ -Kurve große Unterschiede in der Motorbelastung: Motor B überbelastet! **Schlechte** Lastaufteilung! Regelung nötig!
- **Reihenschluss:** Bei kleinen Unterschieden in der  $n(M)$ -Kurve kleine Unterschiede in der Motorbelastung: Motor B nicht überlastet! **Gute** Lastaufteilung!



**Drehzahl unterschiedlich** auf unterschiedlichen Achsen A und B bei **unterschiedlicher Radabnutzung** (= unterschiedliche Raddurchmesser  $d_{Rad,A} \neq d_{Rad,B}$ )!

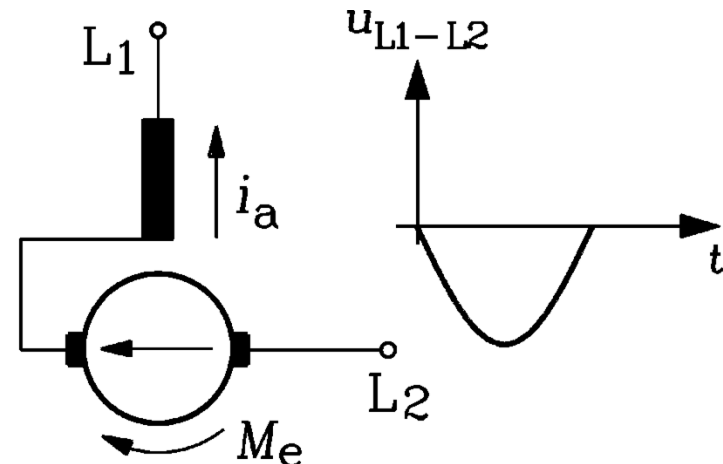
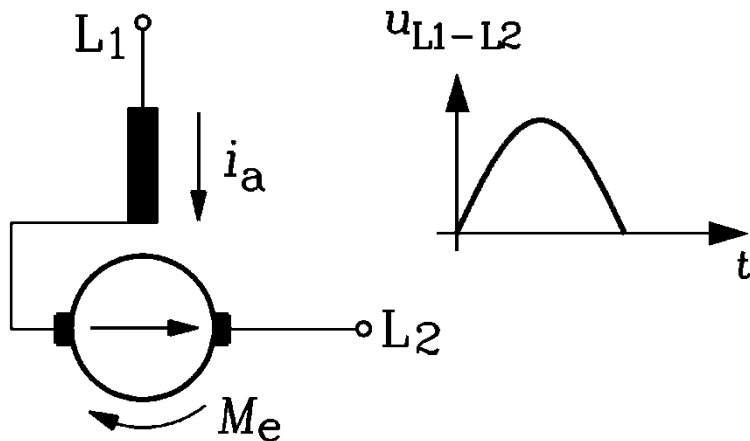
# Traktionsantrieb: Lastaufteilung bei gleicher Geschwindigkeit $v$



- Motoren A, B seien identisch, aber auf unterschiedlichen Achsen. Unterschiedliche Radabnutzung: Bei gleicher Geschwindigkeit unterschiedliche Drehzahl  $n_A$  und  $n_B$ !
- Nebenschluss: Motor B überbelastet! **Schlechte** Lastaufteilung !
- Reihenschluss: Motor B nicht überlastet! **Gute** Lastaufteilung !

# Prinzip der Wechselstrom-Kommutatormaschine

- Erregerwicklung und Ankerwicklung **in REIHE** geschaltet (Reihenschluss-Motor) am Einphasen-Wechselstromnetz (**Einphasen-Reihenschlussmotor**).
- **Erregerstrom = Ankerstrom  $i_a$  = Wechselstrom mit Frequenz  $f$** . Ankerstrom erregt Hauptfluss  $\Phi$ , daher pulsiert  $\Phi$  im Takt mit  $i_a$ :  $\Phi$  und  $i_a$  polen sich gleichzeitig um.
- **Drehmoment** hat daher wegen  $M_e \sim \Phi \cdot i_a = (-\Phi) \cdot (-i_a)$  **stets dieselbe Richtung**, pulsiert aber mit **doppelter** Frequenz  $2f$



# Pulsierendes Moment der Wechselstrom-Kommutatormaschine

- Betrieb am Einphasen-Netz: Ankerstrom ist Wechselstrom mit Netzfrequenz.

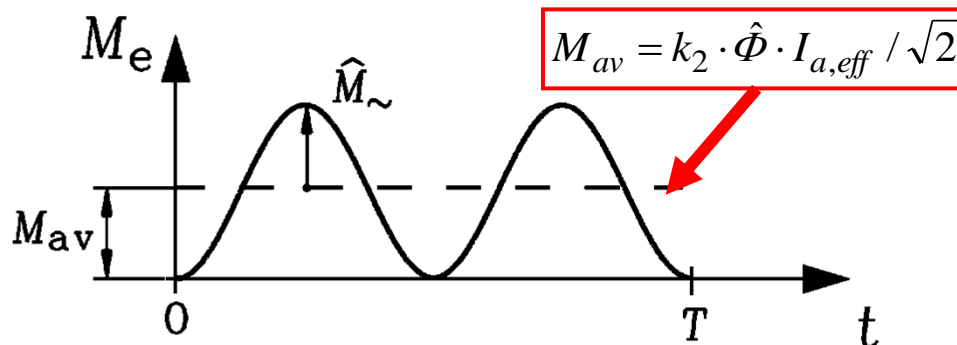
$$i_a(t) = \hat{I}_a \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad \Rightarrow \quad \Phi(t) = \hat{\Phi} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

- Mit  $2f$  PULSIERENDES Moment (z. B.:  $f = 50$  Hz,  $2f = 100$  Hz!):

$$M_e(t) = k_2 \Phi(t) i_a(t) = k_2 \hat{\Phi} \sin(2\pi f t) \cdot \hat{I}_a \sin(2\pi f t) \quad \Rightarrow \quad M_e(t) = k \cdot \hat{\Phi} \cdot \hat{I}_a \cdot (1 - \cos(2\pi \cdot 2f \cdot t)) / 2$$

$$M_e(t) = k_2 \cdot \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}} \cdot I_{a,eff} \cdot (1 - \cos(2\pi \cdot 2f \cdot t)) \quad I_{a,eff} = \hat{I}_a / \sqrt{2}$$

- NUR der Moment-Mittelwert  $M_{av}$  kann genutzt werden.

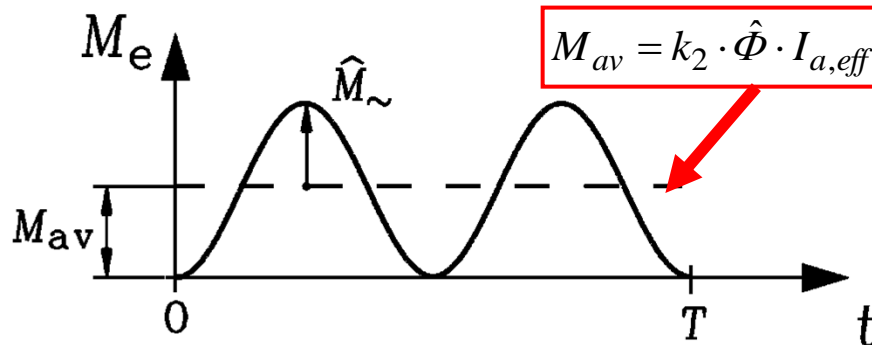


# Nutzbares Drehmoment der Wechselstrom-Kommutatormaschine

$$M_e(t) = k_2 \cdot \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}} \cdot I_{a,eff} \cdot (1 - \cos(2\pi \cdot 2f \cdot t))$$

$$I_{a,eff} = \hat{I}_a / \sqrt{2}$$

- NUR der Moment-Mittelwert  $M_{av}$  kann genutzt werden
- Thermisch zulässiges **AC-Drehmoment ist nur 70% =  $1/\sqrt{2}$  des DC-Drehmoments.**



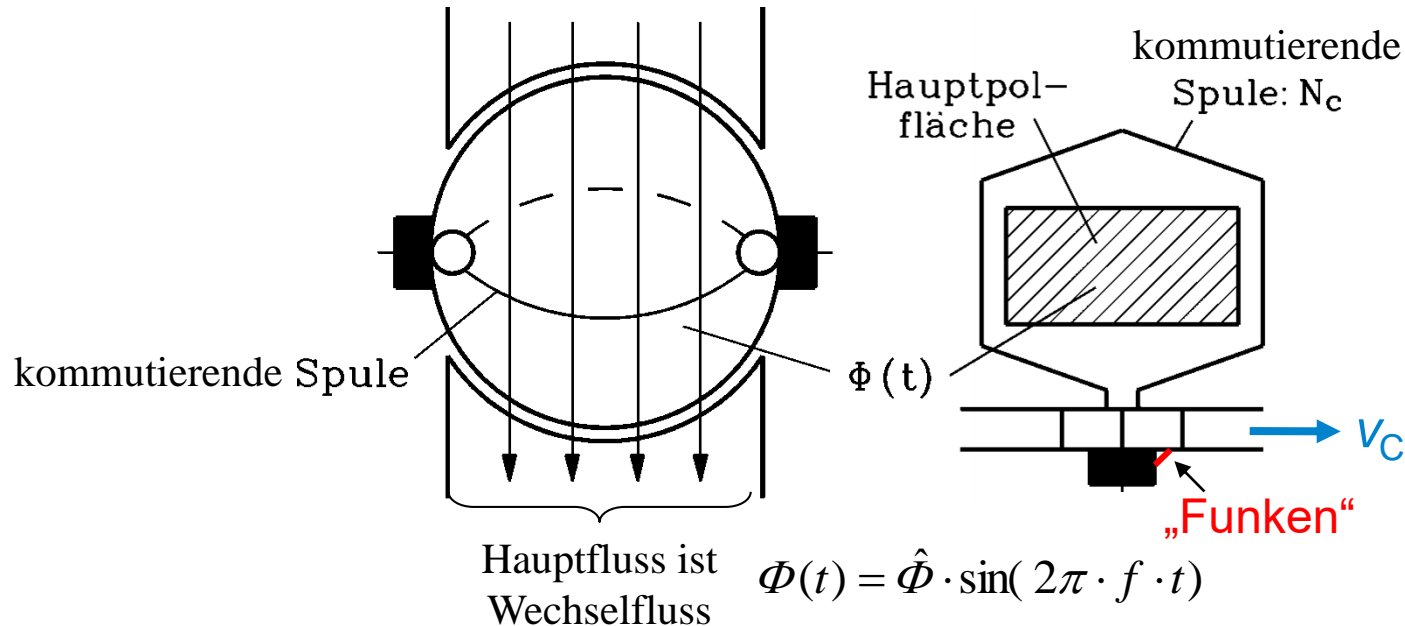
- Gleiche Stromwärme:  $I_{a,DC} = I_{a,eff}$

- Gleiche Eisensättigung:  $\Phi_{DC} = \hat{\Phi}$

$$M_{DC} / M_{av} = (\Phi_{DC} \cdot I_{a,DC}) / (\hat{\Phi} \cdot I_{a,eff} / \sqrt{2}) = \sqrt{2}$$



# Transformatorische Funkenspannung $u_{Tr}$



Wechselfluss induziert in kommutierende Spule „transformatorische Funkenspannung“:

$$u_{Tr}(t) = -N_c \cdot d\Phi(t) / dt = -N_c \cdot 2\pi \cdot f \cdot \hat{\Phi} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$u_{Tr}$  treibt Kreisstrom in kommutierender Spule  $\Rightarrow$  zündet zusätzliche „Funken“ an der ablaufenden Bürstenskante bei Kreisstromunterbrechung!

**Fazit:**

Wechselstrom-Kommutatormaschine hat **mehr** Bürstenfeuer als Gleichstrommaschine!

# Wechselstrom-Kommutatormotor-Kennlinie

- **Einsatz mit Einphasen-Wechselstrom:**

- **Traktion bei 16.7 Hz:**

- z. B. *Deutsche Bahn*: Statt 50 Hz ist  $f = 16.7$  Hz zur Verringerung der transformatorischen Funkenspannung; zusätzlich Phasenverschiebung des Wendepolstroms (Patent von *Behn-Eschenburg*) „bekämpft“  $u_{Tr}$

- **Haushaltsgeräte bei 50 Hz: *Universalmotor*:**

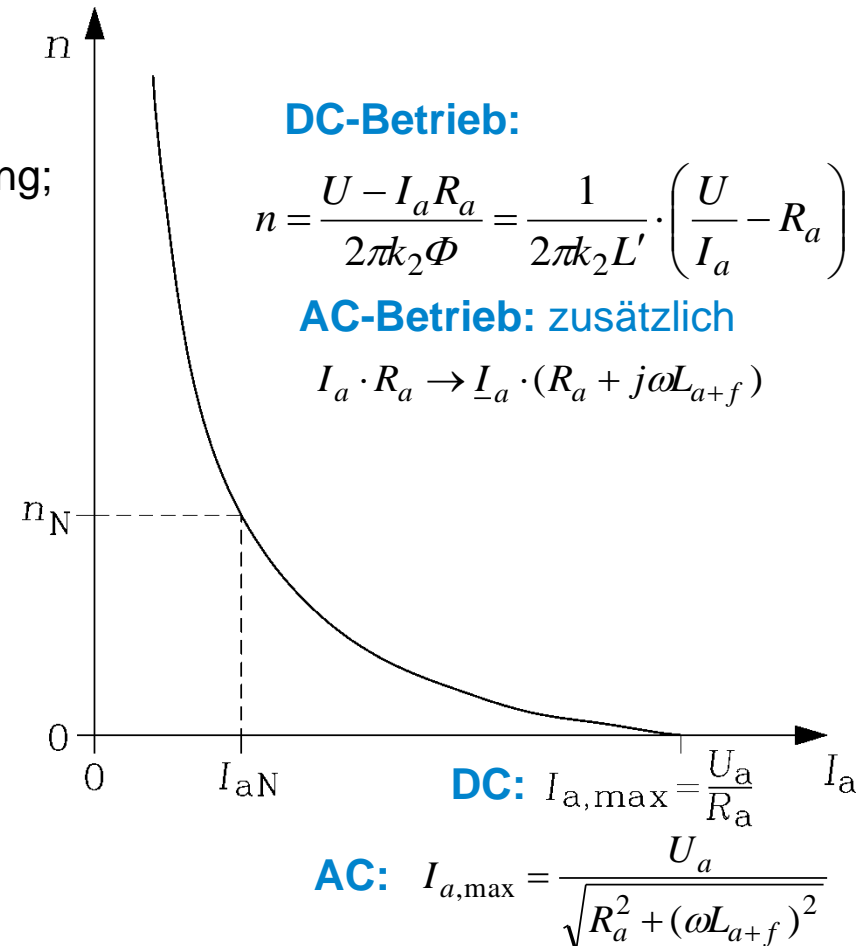
- Föhn, Bohrmaschine, Staubsauger:  
 $n_{max}$  bis ca. 40000/min und tw. höher.  
Polfläche klein  $\Rightarrow \Phi$  klein  $\Rightarrow u_{Tr}$  klein

- **Drehzahlverstellung:**

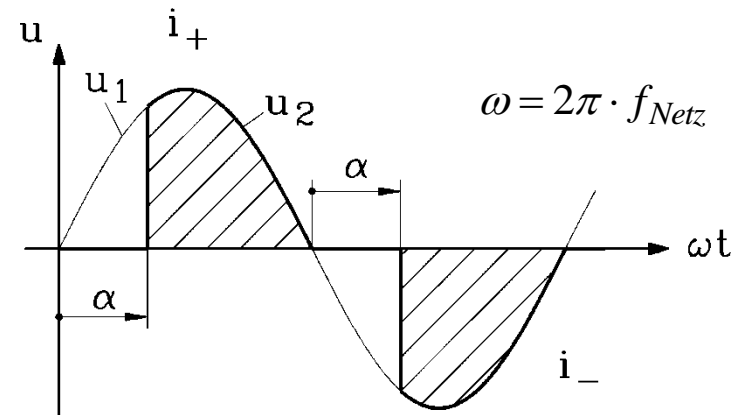
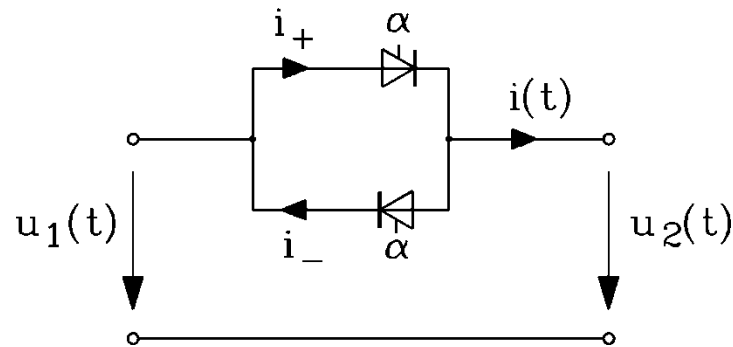
Verstellung der Ankerwechselfspannung  $\underline{U}$

- a) Bahn: Stelltransformator mit Anzapfungen
- b) Haushaltsgeräte: Phasenanschnitt über Triac-Schaltung!

- **Kleinmotor: Anfahren ohne Anlasser möglich!**



# Triac-Schaltung zur Ansteuerung kleiner Wechselstrom-Kommutatormaschinen



Zwei antiparallele Thyristoren (Steuerwinkel  $\alpha$ )

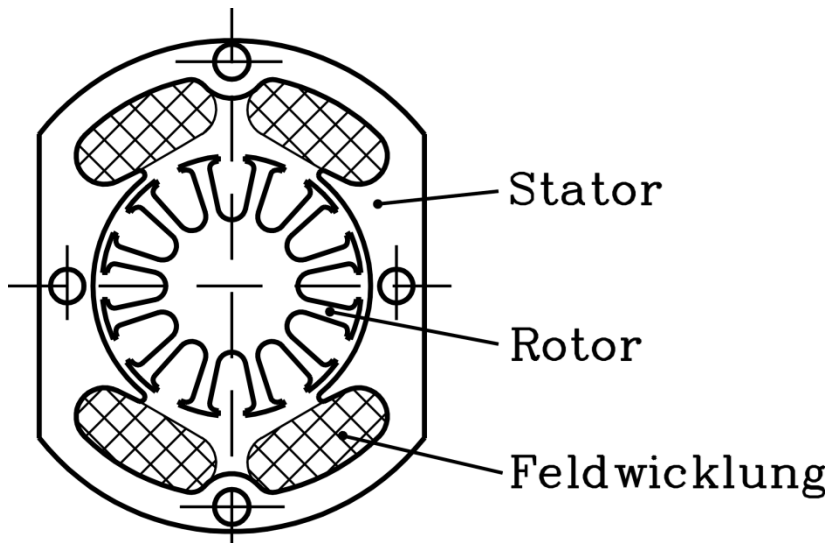
(Alternativ: Ein **Triac** = bidirektionaler Halbleiter-Schalter)

versorgen mit der Ausgangsspannung  $u_2$  als Wechselspannung mit **Phasenanschnitt**.

Durch die fehlende „Spannungs-Zeit-Fläche“ erhält der Motor im Mittel **weniger Spannung**:

Deshalb **sinkt** seine Drehzahl.

**Nachteil:** Wechselstrom ist **nicht mehr sinusförmig**, aber infolge der Glättung durch die Motorinduktivität  $L_{a+f}$  „sinusförmiger“ als die Spannung  $u_2$ .



Quelle: R. Fischer, hanser-Verlag

- Kleiner, **zweipoliger** Motor für hohe Drehzahlen (typisch bis 40 000 /min),
- **Billigausführung** für Massenproduktion
- Keine Wendepole, daher Bürstenfeuer  
ABER:  
nur geringe Betriebsstundenzahl in Haushaltsgeräten
- Betrieb am Haushalts-Einphasen-Netz 230V  $\Rightarrow$  Ankerstrom ist Wechselstrom mit Netzfrequenz (z. B.  $f = 50$  Hz).
- Ankerwicklung und Feldwicklung in Serie geschaltet (**Reihenschluss**).

# Beispiel zum Universalmotor

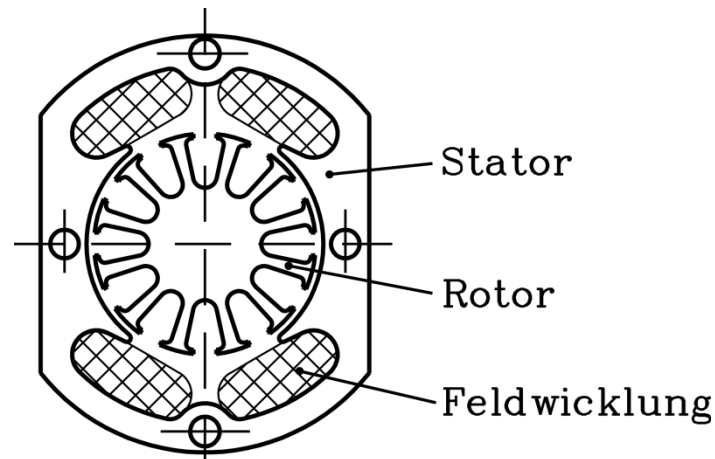
- Kleinmotoren: **Motornennleistung** ist genormt als  $P_N = P_{el,in}$  (nicht  $P_{m,out}$ !)

- **Beispiel:**  $P_N = 100 \text{ W}$ ,  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $\cos \varphi_N = 0.8$  (induktiv)

$$\Rightarrow I_N = S_N / U_N = \frac{P_{el,in}}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{1}{U_N} = \frac{P_N}{\cos \varphi_N} \cdot \frac{1}{U_N} = \frac{100}{0.8} \cdot \frac{1}{230} = 0.54 \text{ A}$$

Die Motorabgabeleistung  $P_{m,out}$  ist um den Wirkungsgrad  $\eta$  kleiner,

$$\text{z. B.: } \eta = 0.7 : P_{m,out} = \eta \cdot P_N = 0.7 \cdot 100 = 70 \text{ W}$$



Quelle: R. Fischer, hanser-Verlag

## Zusammenfassung: Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine

- Gleichstrommaschine erlaubt Generator- und Motorbetrieb
- Fremderregte Schaltung; Nebenschluss-Schaltung; Reihenschluss-Schaltung
- Verbundschaltung (Compound-Schaltung) = Nebenschluss und Hilfs-Reihenschluss:  
Generatorbetrieb:  
Hilfs-RS kompensiert Spannungsabnahme  $-I_a R_a$ , so dass  $U(I_a) \approx \text{konst.}$  für  $0 \leq I_a \leq I_N$   
(siehe Skript)
- Reihenschluss-Schaltung auch bei Wechselstrom einsetzbar  
(z. B. Universalmotor)

## 10. Gleichstromantriebe

- 10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine
- 10.2 Ankerwicklungen
- 10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment
- 10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung
- 10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole
- 10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine
- 10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb**
- 10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine



# Drehzahlveränderbarer fremderregter Gleichstromantrieb

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi(I_f)} = \frac{U}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} = n_0 - \frac{R_a}{k_1 \cdot \Phi} \cdot I_a$$

- **Fremderregter Gleichstrommotor:**

## Drehzahlveränderung durch

- a) Spannungsänderung  $U$  ( $U = U_a$ : Ankerspannung)
- b) Feldschwächung  $\Phi$  (über  $U_f$ : verminderte Erregerspannung)
- c) Widerstandserhöhung  $R + R_a$  (über Vorwiderstand  $R$ )

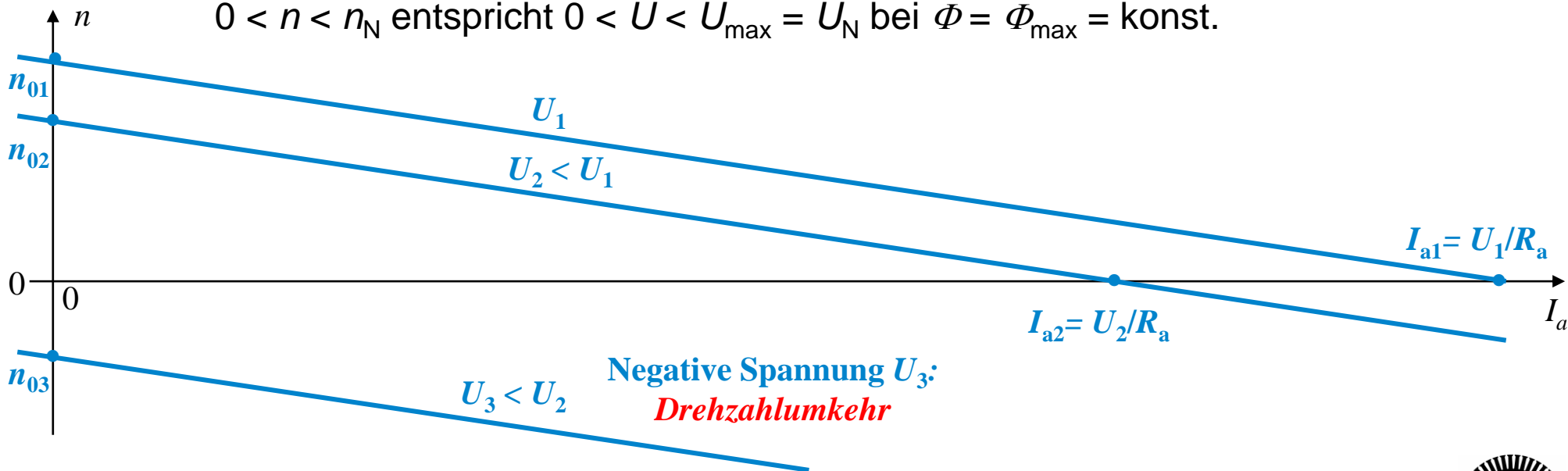
# Fremderregter Gleichstrommotor: Drehzahlveränderung durch Spannungsänderung U

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi(I_f)} = \frac{U}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} = n_0 - \frac{R_a}{k_1 \cdot \Phi} \cdot I_a$$

Leerlaufdrehzahl  $n_0$  geändert,  $n(I_a)$ -Kennlinie **parallel** verschoben

"Ankerstellbereich":

$0 < n < n_N$  entspricht  $0 < U < U_{\max} = U_N$  bei  $\Phi = \Phi_{\max} = \text{konst.}$



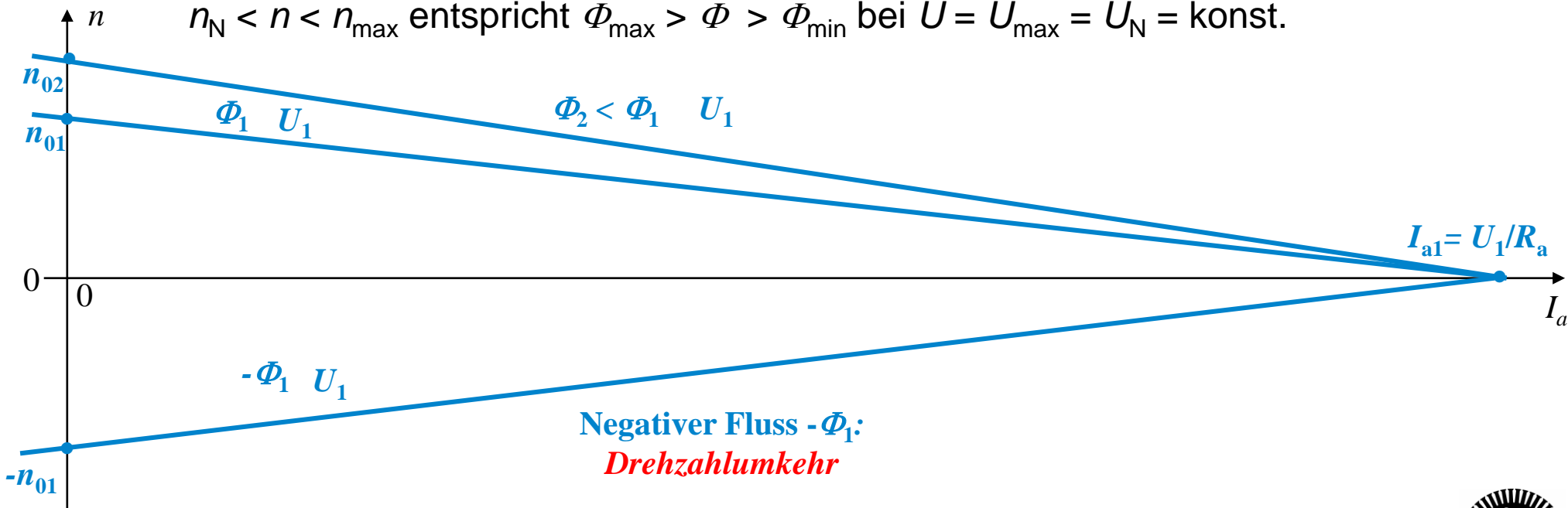
# Fremderregter Gleichstrommotor: Drehzahlveränderung durch Feldschwächung $\Phi$

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi(I_f)} = \frac{U}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} = n_0 - \frac{R_a}{k_1 \Phi} \cdot I_a$$

Leerlaufdrehzahl  $n_0$  geändert, **Neigung** von  $n(I_a)$  wird größer, wenn  $\Phi$  sinkt.

"Feldschwächbereich":

$n_N < n < n_{\max}$  entspricht  $\Phi_{\max} > \Phi > \Phi_{\min}$  bei  $U = U_{\max} = U_N = \text{konst.}$

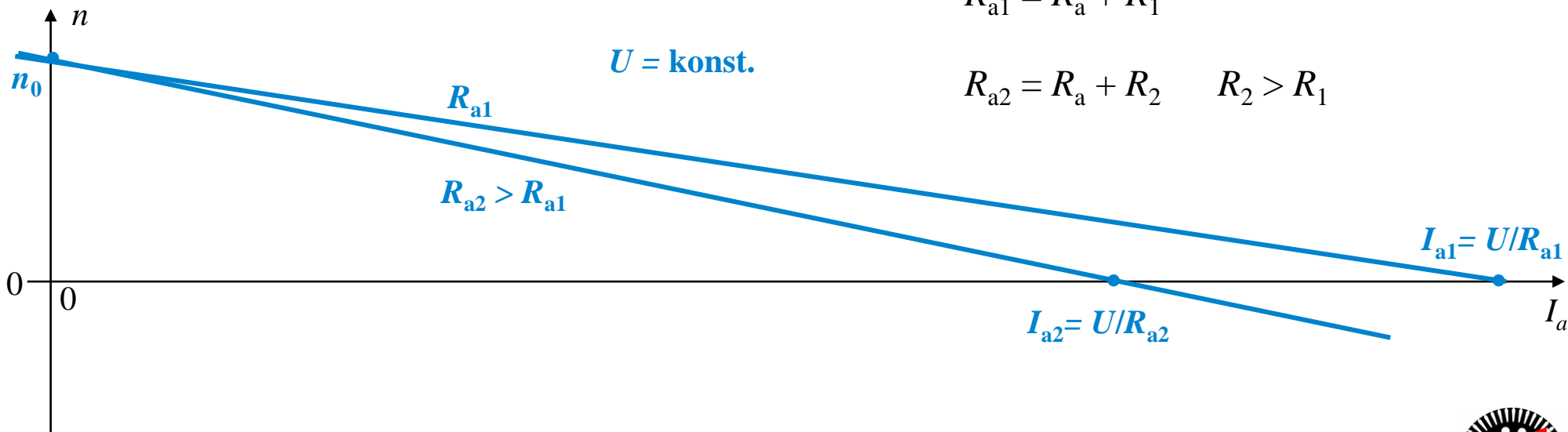


# Fremderregter Gleichstrommotor: Drehzahlveränderung durch Widerstandserhöhung $R + R_a$



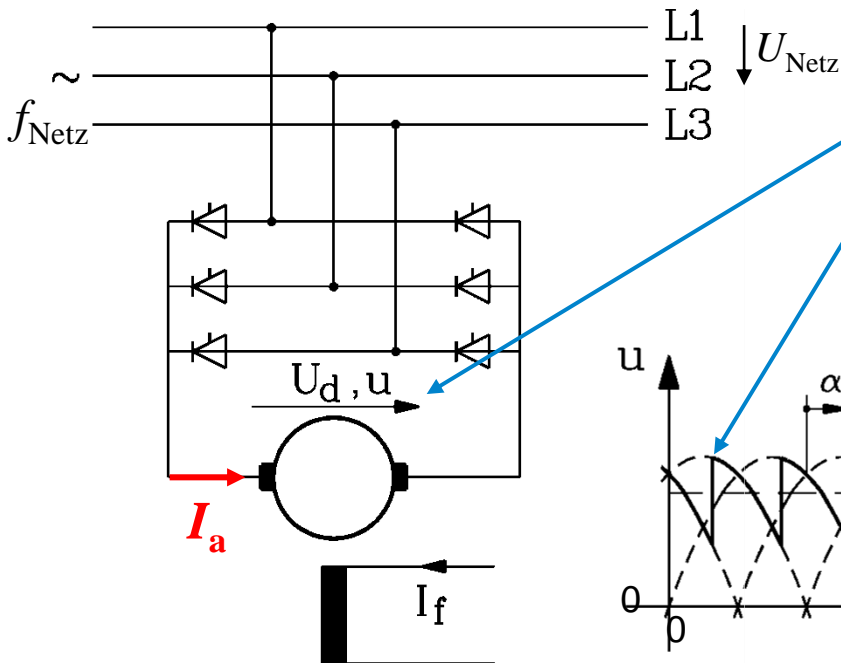
$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi(I_f)} = \frac{U}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} \Rightarrow n = n_0 - \frac{R_a + R}{k_1 \cdot \Phi} \cdot I_a$$

Leerlaufdrehzahl  $n_0$  konstant, **Neigung** von  $n(I_a)$  wird größer mit steigendem  $R$ , z. B. Anfahren mit "Anlasser,,  $n$ -Steuerung bei früheren Straßenbahnantrieben  
Heute: Kaum mehr verwendet, da Verluste im Widerstand  $R$



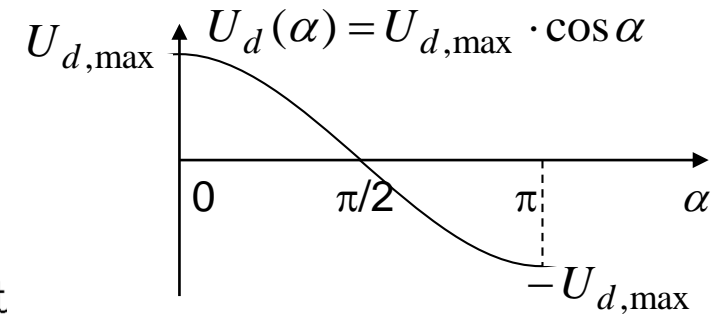
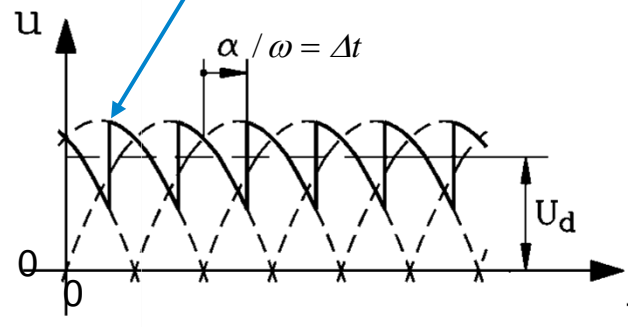
# Thyristor-Stromrichter gespeister Gleichstromantrieb

- Erzeugung einer variablen Ankerspannung aus dem Drehstromnetz L1, L2, L3 durch Gleichrichtung als Gleichspannung  $U_d$  für den Gleichstromantrieb



## Gesteuerter Drehstrom-Brücken-Gleichrichter B6C: Anker-Spannungsverlauf

- Schaltung für eine Stromrichtung  $I_a > 0$
- Für Stromumkehr  $I_a < 0$  ist **zweiter** antiparalleler Stromrichter nötig.

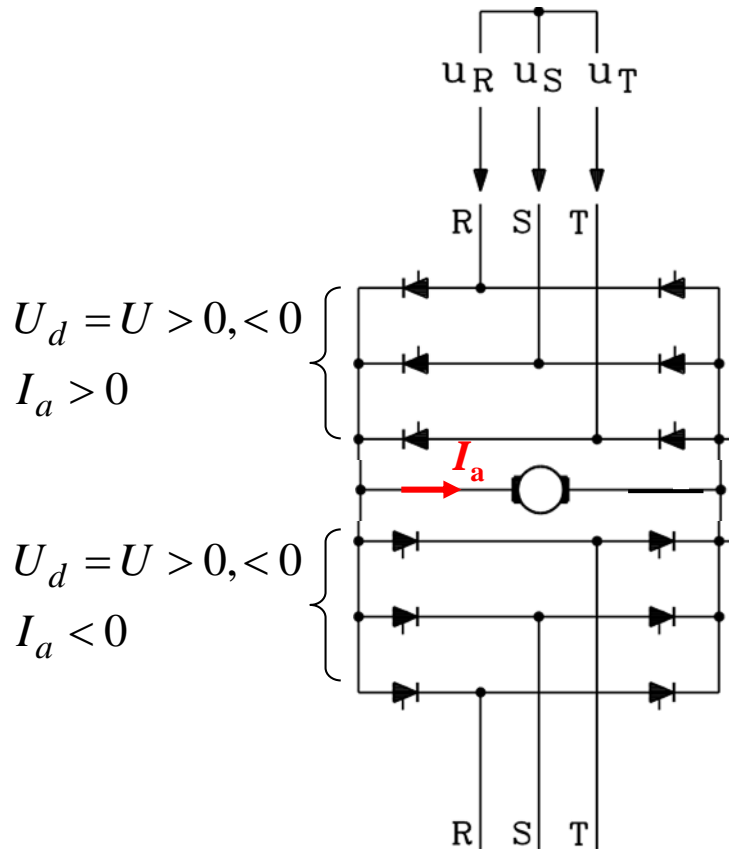


## Veränderung der Ankerspannung über den Zündzeitpunkt $\Delta t$ (Zündwinkel $\alpha$ ):

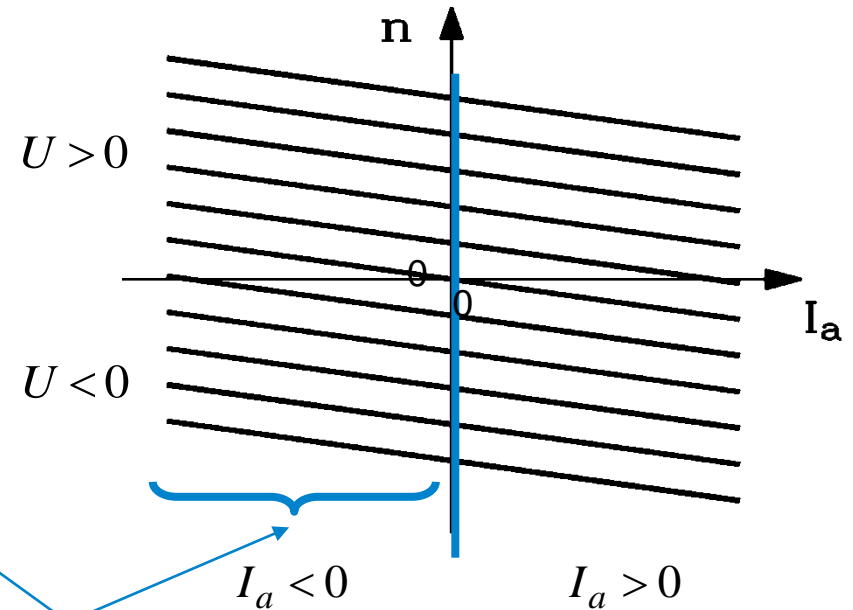
"Zündwinkel"  $\alpha = \omega \cdot \Delta t$ ,  $\omega = 2\pi f_{\text{Netz}}$   $U_d = U_{d,\text{max}} \cdot \cos \alpha$ ,  $U_{d,\text{max}} = \sqrt{2} U_{\text{Netz}} \cdot \frac{3}{\pi}$   $\begin{cases} U_{\text{Netz}} = 400\text{V} \\ U_{d,\text{max}} = 560\text{V} \end{cases}$

$\alpha = 0$ : max. Spannung,  $\alpha = 90^\circ$ : Spannung  $U_d$  ist Null,  $\alpha = 180^\circ$ : max. negative Spannung

# (B6C)A(B6C)- Zwei antiparallele Thyristorbrücken



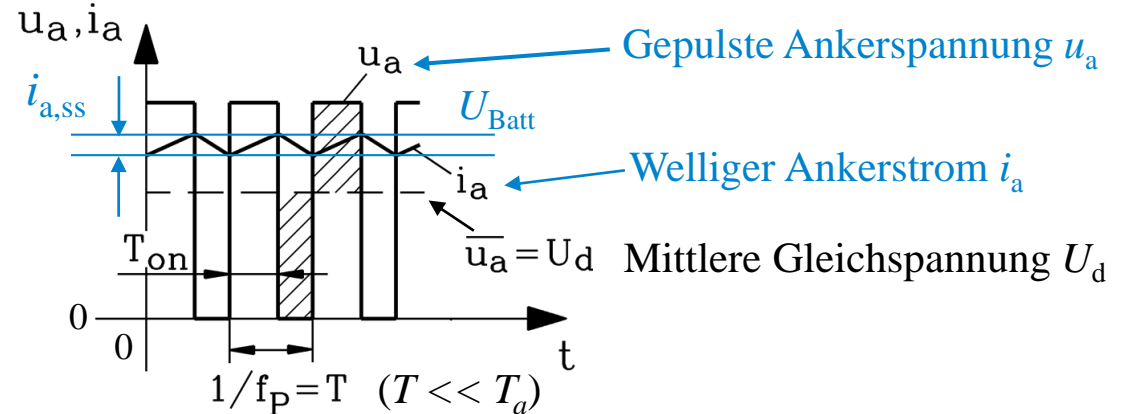
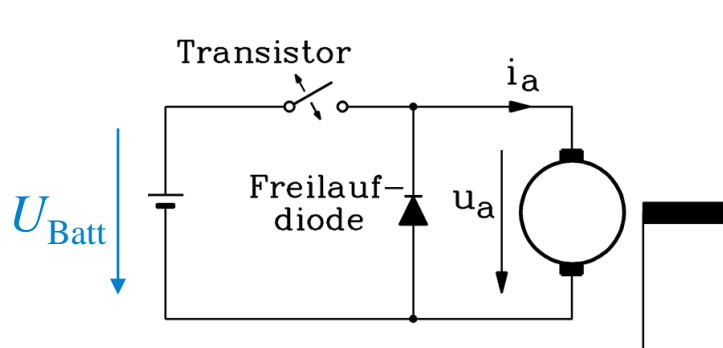
Für Stromumkehr  $I_a < 0$  ist ein **zweiter, antiparalleler** Stromrichter nötig.



antiparalleler Stromrichter

**Nachteil des Thyristor-Stromrichters B6C:** Gleichspannung und -Strom haben Welligkeit mit 6-facher Netzfrequenz: z.B.: bei 50 Hz:  $6 \cdot 50 = 300\text{Hz}$

- **Gleichstromsteller (Chopper):** Aus konstanter Gleichspannung (Batterie, Diodengleichrichter,  $u_a = U_{Batt}$ ) wird durch **Pulsweitenmodulation (PWM)** eine gepulste Spannung  $u_a$  mit veränderbarem Mittelwert  $U_d$  erzeugt



Beispiel:  $k = T_{on} / T = 0.6$

- **Freilaufdiode** erforderlich, da auf Grund der Anker-Zeitkonstante  $T_a = L_a / R_a$  (= gespeicherte magn. Energie  $W_m = L_a \cdot i_a^2 / 2$ ) nach dem Abschalten des Transistors der Ankerstrom  $i_a$  weiter fließen will.



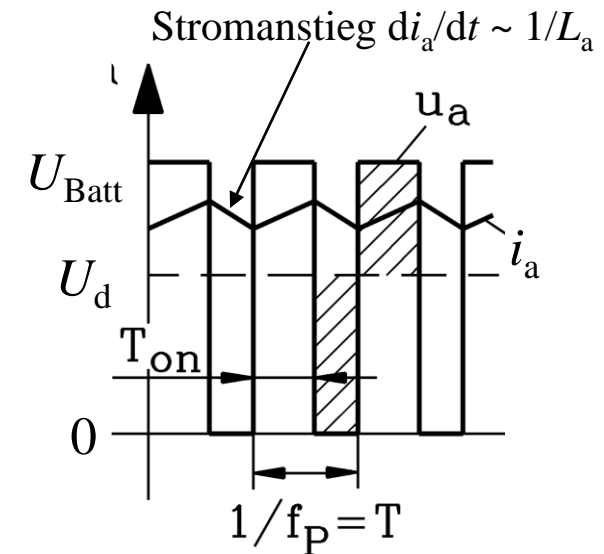
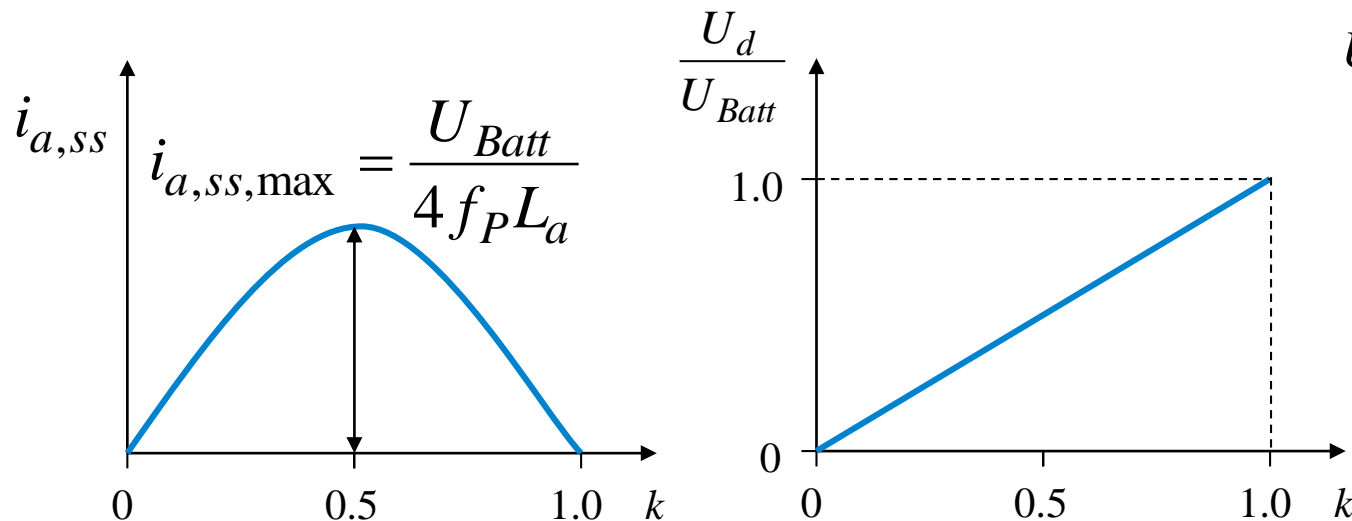
# Stromwelligkeit beim Transistor-Gleichstromsteller

- Mittlere Gleichspannung  $U_d \sim k$ :  $k = U_d / U_{Batt} = T_{on} / T$

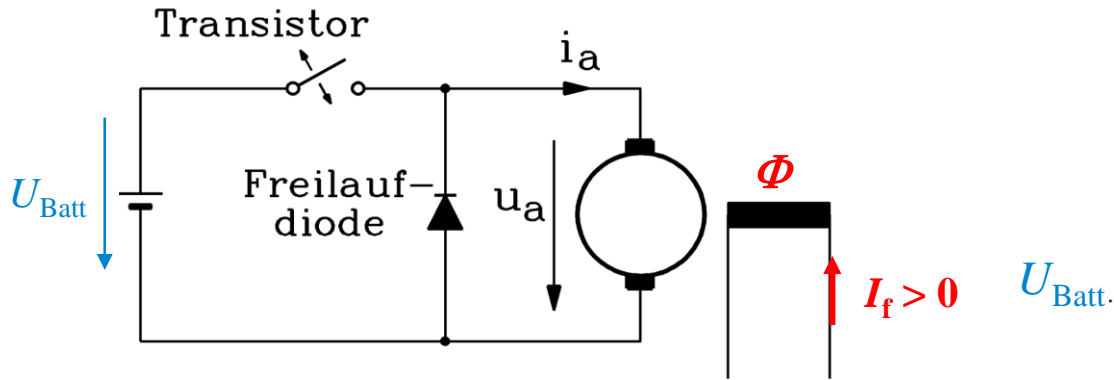
$$R_a \approx 0: U_i = U_d, \quad di_a / dt = \begin{cases} (U_{Batt} - U_i) / L_a = \Delta i_{a,ss} / T_{on} > 0 \\ -U_i / L_a = -\Delta i_{a,ss} / (T - T_{on}) < 0 \end{cases}$$

- Hohe Transistorschaltfrequenz (z. B.  $f_p = 2$  kHz)  $\Rightarrow$  **kleine Stromwelligkeit  $i_{a,ss}$  !**  
Stromwelligkeit maximal bei Aussteuergrad  $k = 0.5$

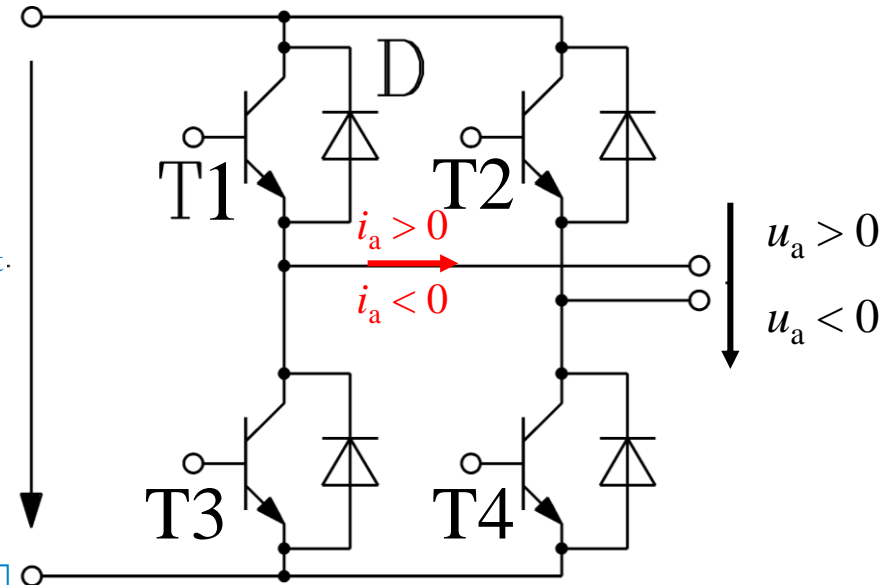
$$R_a \approx 0: i_{a,ss} = U_{Batt} \cdot (1 - k) \cdot k / (f_p L_a)$$



# Vier-Quadranten-Transistor-Gleichstromsteller

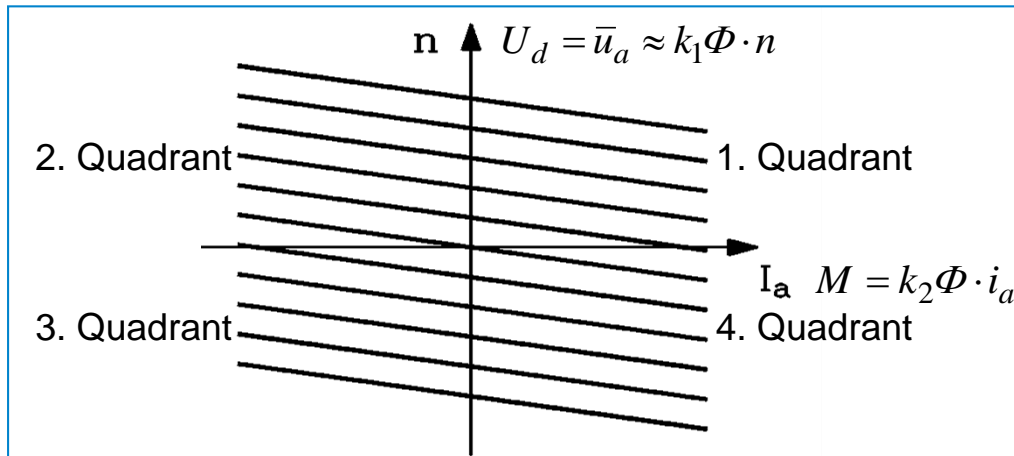


Einquadranten-Steller:  $i_a > 0, u_a > 0$   
 $M > 0, n > 0$



Vierquadranten-Steller:

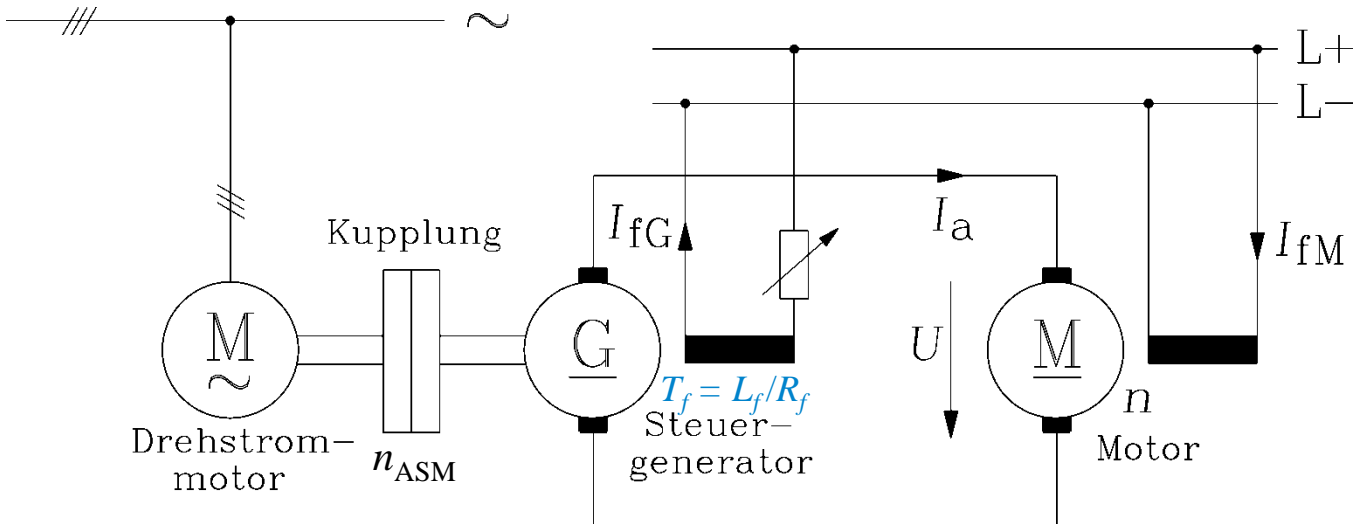
T1-T4:  $u_a > 0, \quad T2-T3: u_a < 0$   
 $n > 0 \quad \quad \quad n < 0$   
 $i_a > 0, i_a < 0$   
 $M > 0, M < 0$



# WARD-LEONARD-Maschinensatz (-Umformer)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



- Vorteile:  
**keine Netzverzerrung**  
**keine Steuerblindleistung**

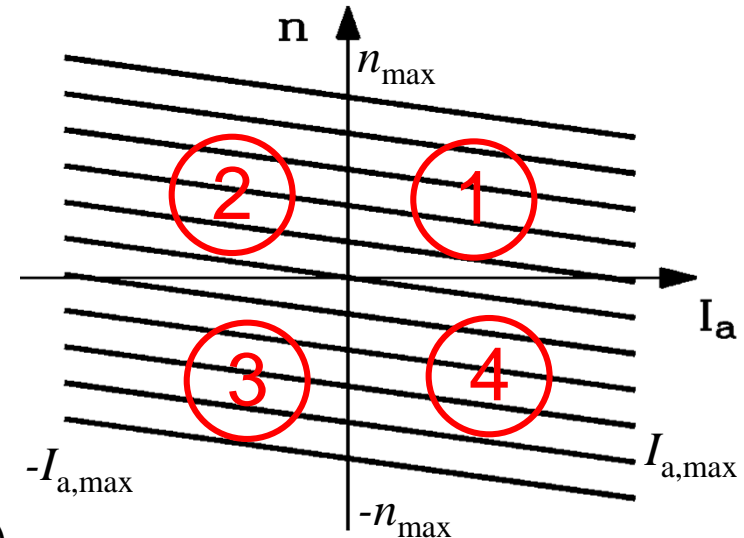
$$n \sim U \sim I_{fG}$$

- Drehstrom-Asynchronmotor am Drehstromnetz (Drehzahl  $n_{ASM}$ ) treibt **Steuergenerator**
- **Steuergenerator** fremderregt: Erregerstrom  $I_{fG}$  z. B. aus Batterie (Klemmen L+, L-)
- Steuergenerator erzeugt über  $I_{fG}$  **variabel einstellbare Ankerspannung  $U$**
- $U$ -gespeister GS-Motor **kann drehzahlveränderbar betrieben werden:  $n \sim U \sim I_{fG}$**
- **Nachteile:**
  - a) **drei Mal** die Nenn-Maschinenleistung installiert (teuer!)
  - b) **drei Mal** Verluste, z. B. Wirkungsgrad je Maschine 90 %: gesamt  $0.9^3 = 0.73 = 73$  %.
  - c) **geringe Dynamik:**  $U$ -Änderung langsam, da Feldzeitkonstante  $T_f = L_f / R_f$  groß



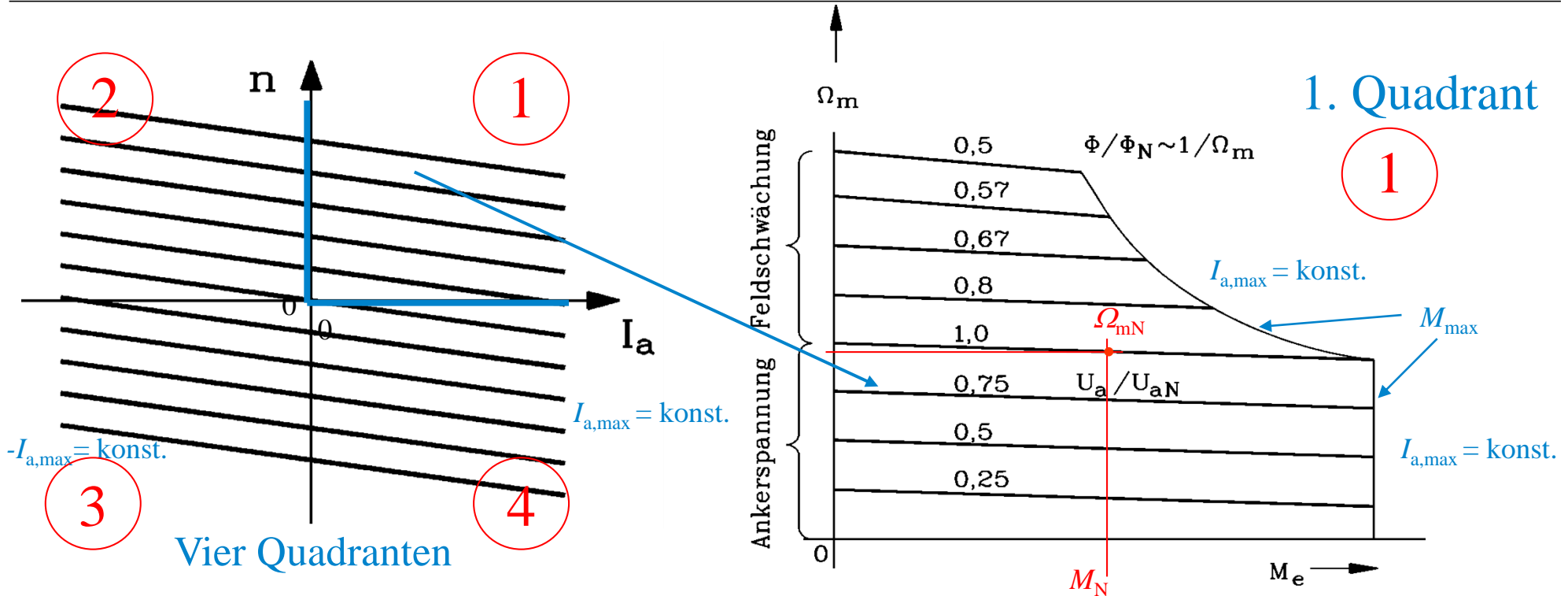
# Vierquadranten-Gleichstromantrieb

- **Drehzahlumkehr** durch
  - (A) Umpolen der Ankerspannung von  $+U$  auf  $-U$  oder
  - (B) Umpolen des Flusses  $\Phi$  auf  $-\Phi$ .(A) **schneller als (B)**, da Anker-Zeitkonstante  $T_a = L_a/R_a$  deutlich kleiner als Feld-Zeitkonstante  $T_f = L_f/R_f$ .
- **Betriebsgrenzen:**  
maximale Drehzahl  $n_{\max}$ , maximaler Ankerstrom  $I_{a,\max}$
- **Vierquadrantenbetrieb:** (Verbraucher-Zählpfeilsystem)



<p><b>2. Quadrant:</b> <math>n &gt; 0, M &lt; 0: U &gt; 0, I_a &lt; 0</math> <b>GENERATOR</b></p>	<p><b>1. Quadrant:</b> <math>n &gt; 0, M &gt; 0: U &gt; 0, I_a &gt; 0</math> <b>MOTOR</b></p>
<p><b>3. Quadrant:</b> <math>n &lt; 0, M &lt; 0: U &lt; 0, I_a &lt; 0</math> <b>MOTOR</b></p>	<p><b>4. Quadrant:</b> <math>n &lt; 0, M &gt; 0: U &lt; 0, I_a &gt; 0</math> <b>GENERATOR</b></p>

# Vierquadranten-GS-Antrieb mit Feldschwächung



**1) Ankerstellbereich:**  
**Verändern der Ankerspannung**  
 $U_a \Rightarrow n(I_a)$ -Kennlinien parallel  
 verschoben = Drehzahlveränderung  
 (Fluss  $\Phi$  ist konstant).

**2) Feldschwächbereich:**  
 Bei maximaler Ankerspannung  $U_{aN}$ : weitere  
 Drehzahlerhöhung durch **Feldschwächung**.  
 Bei konstantem Ankerstrom  $I_a$  sinkt das Drehmoment.

# Vierquadranten-Gleichstrom-Betrieb

**1) Ankerstellbereich:** Verändern der Ankerspannung  $U$ , Fluss  $\Phi = \Phi_N = \text{konst.}$

$$U = U_i + I_a \cdot R_a, U_i = k_1 \cdot n_0 \cdot \Phi_N \Rightarrow n_0 = U / (k_1 \cdot \Phi_N) \approx n: \boxed{n \sim U}$$

$$M_e = k_2 \Phi_N \cdot I_a \sim I_a \Rightarrow M_{\max} \sim I_{a,\max} \text{ (z.B. } I_{a,\max} = 2I_N)$$

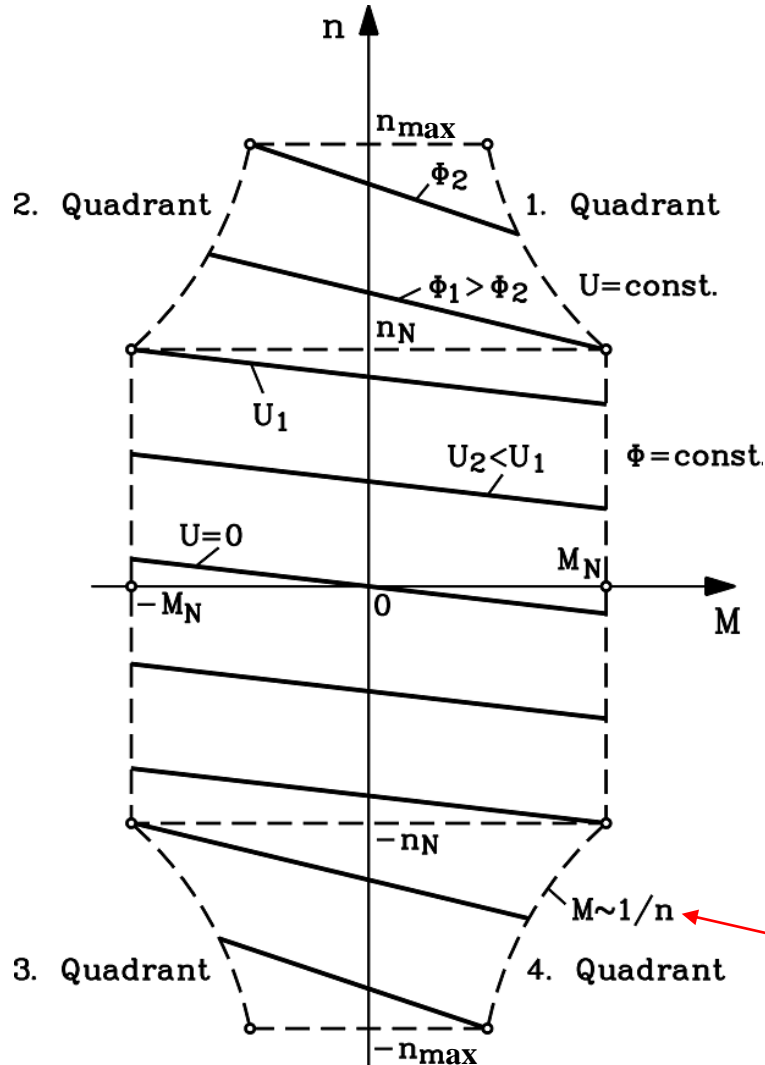
**2) Feldschwächbereich:** Ankerspannung  $U = U_{\max} = U_{aN} = \text{konst.}$ , Fluss  $\Phi$  verringert

$$U = U_{\max} = \text{konst. (z.B. } : U_{aN}) \quad n_{0N} = U_{aN} / (k_1 \cdot \Phi_N)$$

$$n_0 / n_{0N} = \Phi_N / \Phi \Rightarrow \Phi \sim 1/n_0 \approx 1/n \quad \boxed{\Phi \sim 1/n}$$

$$M_{\max} (I_{a,\max}) = k_2 \cdot I_{a,\max} \cdot \Phi \sim 1/n \quad \boxed{M_{\max} \sim 1/n}$$

# Vier-Quadrantenbetrieb am Stromrichter



- $n(M)$ -Kennlinie:**

$$n = \frac{U}{k_1 \cdot \Phi} - \frac{M_e \cdot R_a}{k_1 \cdot k_2 \cdot \Phi^2}$$

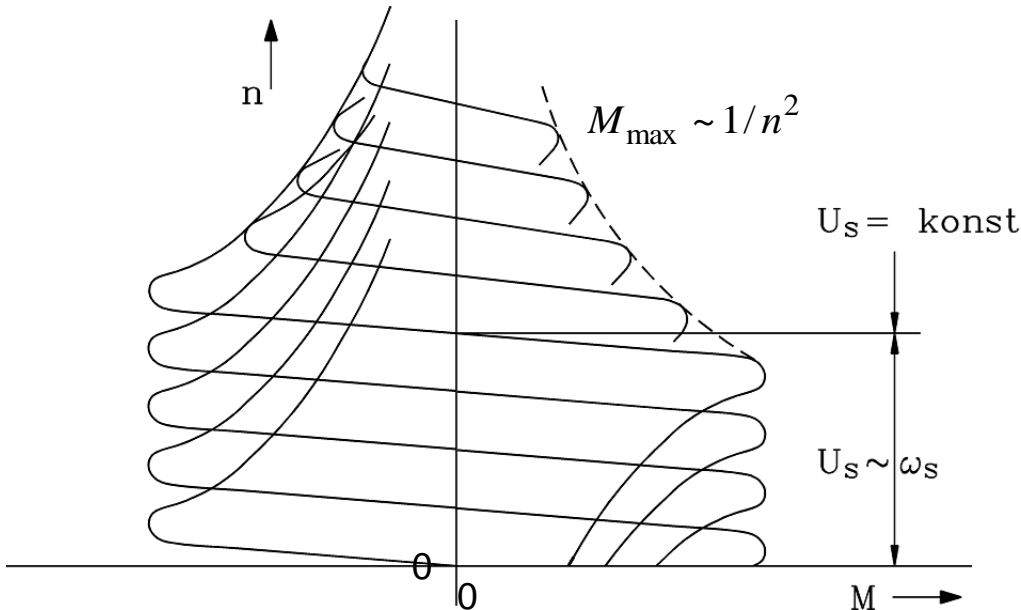
- Weil über Stromrichter  $U = U_d$  variabel ist, wird **Drehzahl  $n$**  über variables  $U_d$  **verändert** zwischen  $+U_{d,max}$  und  $-U_{d,max}$ .
- Bei  $-U_d$  kehrt sich die Drehzahl  $n$  um auf  $-n$  (**Drehrichtungswechsel**).
- Drehzahl  $n_0 = U_{d,max} / (k_1 \Phi)$  kann erhöht werden, wenn  $\Phi$  verringert wird (**Feldschwächung**). Es nimmt aber  $M_{max}$  ab.

$$M_{max} = k_2 \Phi \cdot I_{a,max} \downarrow \text{ wenn } \Phi \downarrow$$

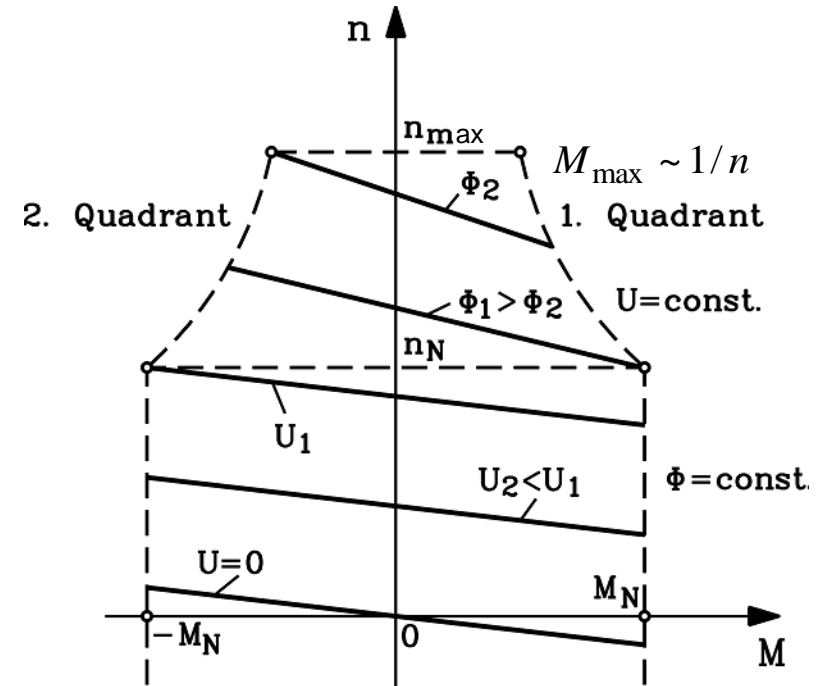


# Stromrichter gespeiste FE Gleichstrommaschine vs. Umrichter gespeiste Asynchronmaschine

Asynchronmaschine

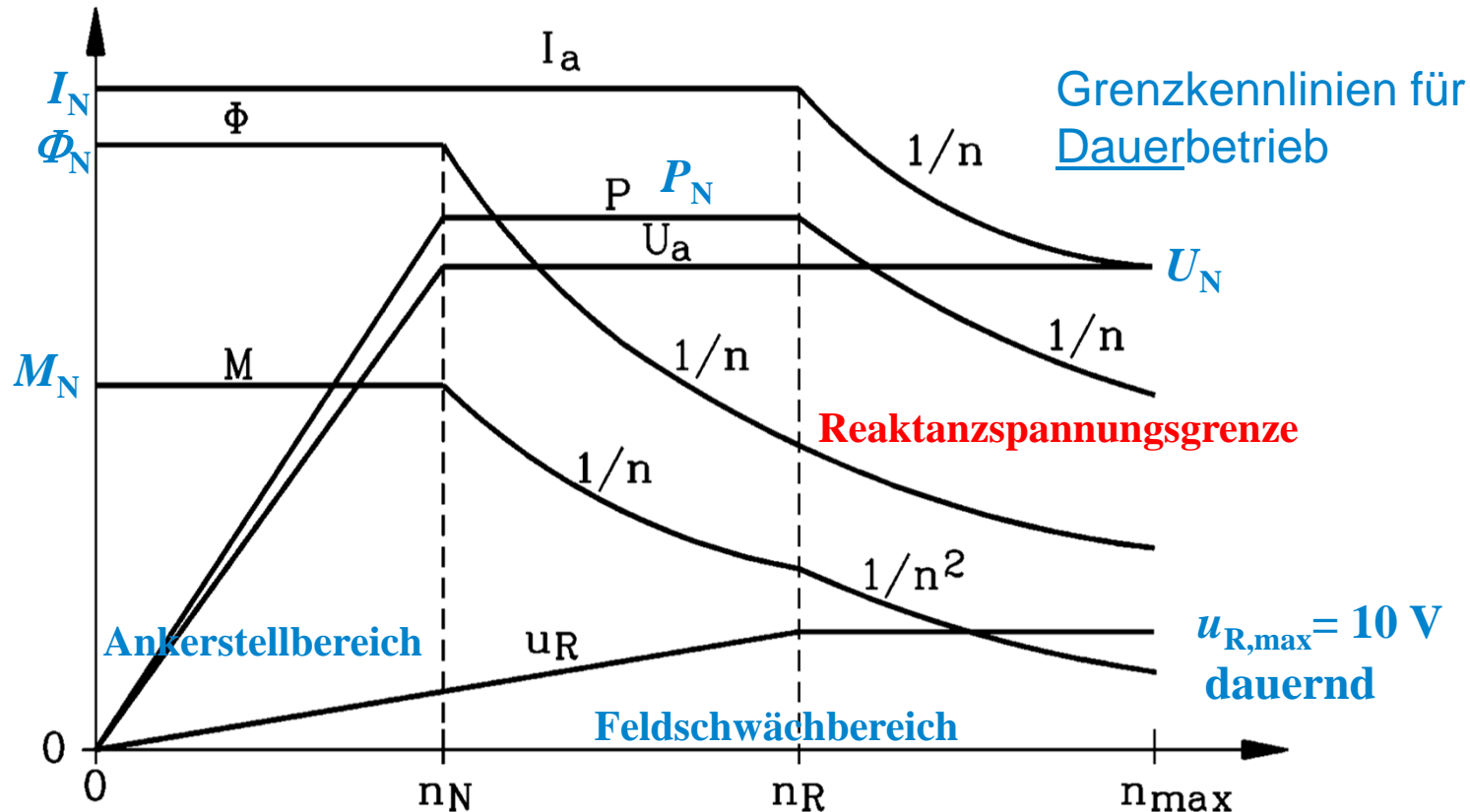


Gleichstrommaschine



- **Ähnliche Kennlinienscharen** bei Asynchron- und FE-Gleichstrommaschine.
- **Asynchronmaschine** kann **dynamischer** als Gleichstrommaschine geregelt werden (ASM mit „feldorientierter Regelung“, ASM hat geringeres Trägheitsmoment)
- **Asynchronmaschine** ist **robuster**, erlaubt:  
höhere Drehzahlen, höheren Wirkungsgrad, geringere Massen

# Fremderregter Gleichstromantrieb: Grenzkennlinien (1)



$n < n_N$  :  $n$  über Ankerspannung  $U_a \sim n$  erhöhen

$n > n_N$  : Für  $n$ -Erhöhung muss Fluss  $\Phi \sim 1/n$  geschwächt werden.

$n > n_R$  : Reaktanzspannung  $u_R \sim I_{a,max} \cdot n$  zu hoch = zu starkes „Bürstenfeuer“ trotz

Wendepole  $\rightarrow u_R = 10\text{ V}$  begrenzt durch Ankerstromverringern  $I_{a,max} \sim 1/n$

# Fremderregter Gleichstromantrieb: Grenzkennlinien (2)

- **Grenzkennlinien** = Maximalwerte der Betriebsparameter  
z. B.:  $M_{max}(n)$ -**Grenzkennlinie** = Einhüllende der  $M(n)$ -Kennlinienschar

$$\eta = 1: P = U_a \cdot I_a = 2\pi \cdot n \cdot M$$

## 1) Ankerstellbereich:

$$\Phi = \Phi_{max} = \Phi_N, U_a \sim n$$

$$M_{max} = k_2 \cdot \Phi_N \cdot I_{a,max} \sim I_{a,max}$$

$$P = U_a \cdot I_{a,max} \sim n \cdot I_{a,max} \sim n$$

$$P = 2\pi \cdot n \cdot M_{max} \sim n$$

## 2) Feldschwächbereich: $U_{a,max} = U_N$

$$\Phi \sim 1/n \quad M \sim I_{a,max} / n$$

$$P_{max} = U_{a,max} \cdot I_{a,max} = \text{konst.}$$

$$P_{max} = 2\pi \cdot n \cdot M \sim n \cdot (1/n) = \text{konst.}$$

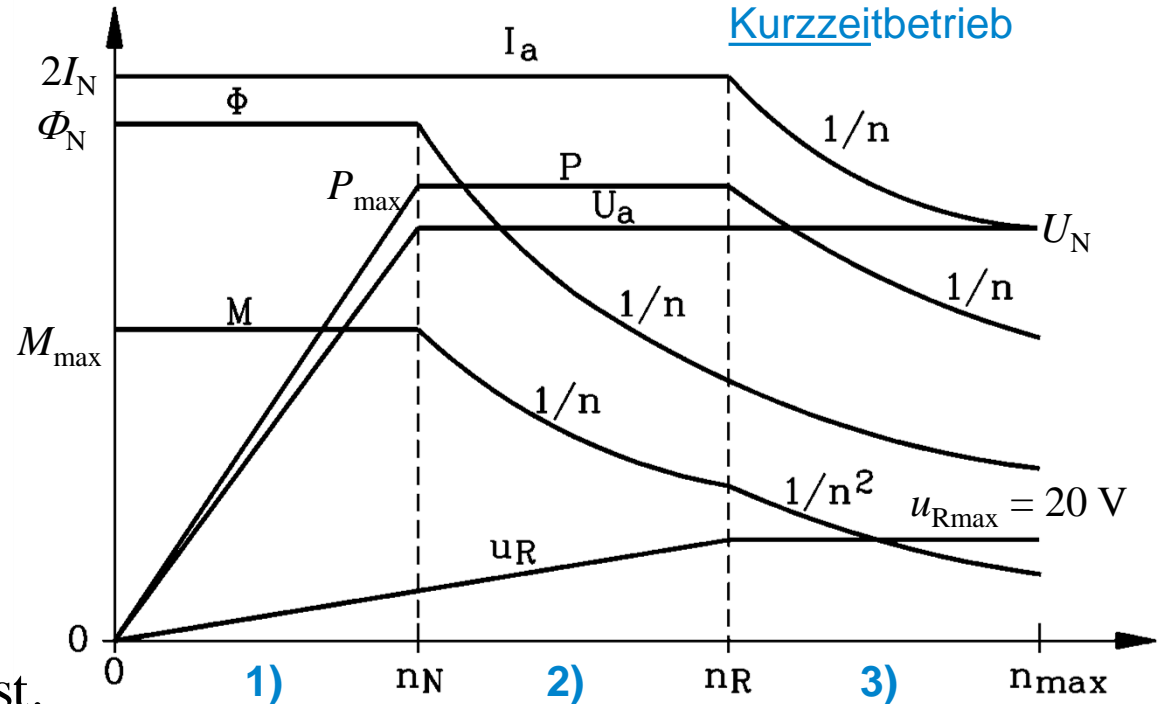
## 3) Reaktanzspannungsgrenze: $I_a \sim 1/n$

$$M = k_2 \Phi \cdot I_a \sim (1/n) \cdot (1/n) = 1/n^2$$

$$P = U_{a,max} \cdot I_a \sim 1/n$$

$$P = 2\pi \cdot n \cdot M \sim n \cdot (1/n^2) \sim 1/n$$

## Grenzkennlinien für Kurzzeitbetrieb



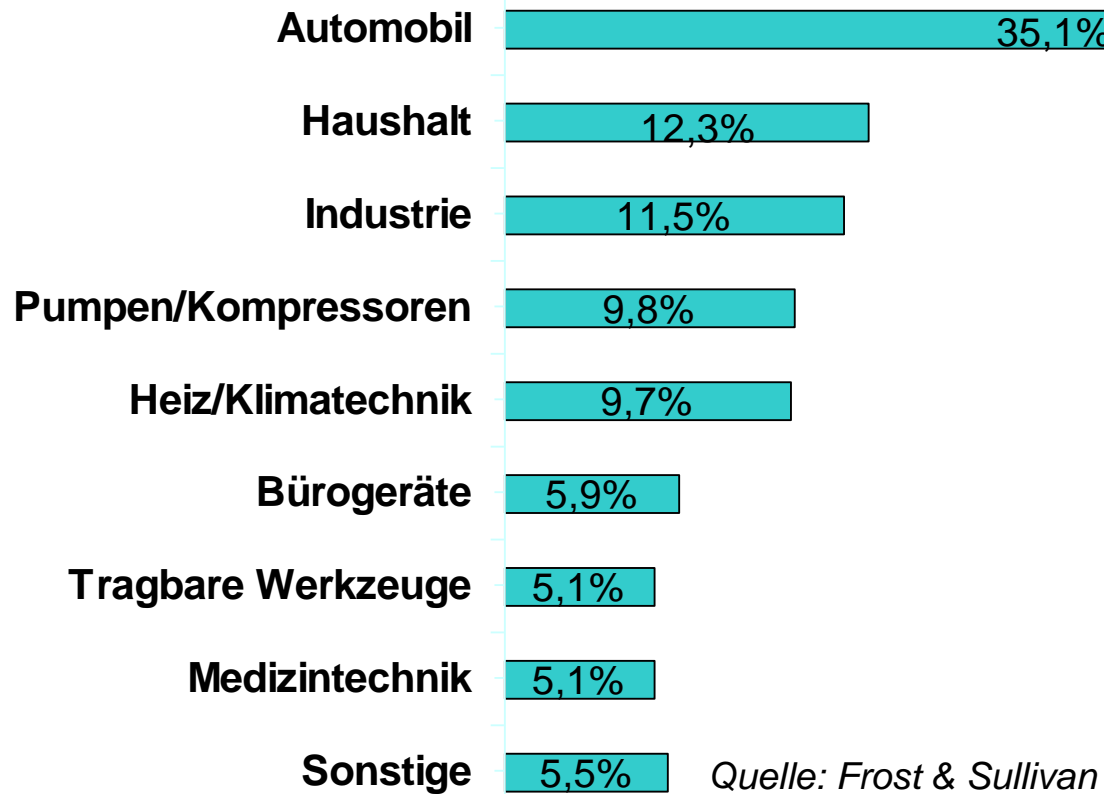
## Zusammenfassung: Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb

- Hauptsächlich fremderregter Gleichstrommotor im Einsatz
- Drehzahlveränderung über 1) Ankerspannung (Grunddrehzahlbereich) oder 2) Hauptflussänderung (Feldschwächbereich)
- Fluss-Schwächung für hohe Drehzahlen, z. B.  $P_N = 100 \text{ kW}$ ,  $n_N = 2000/\text{min}$ ,  $n_{\text{max}} = 5000/\text{min}$
- Ankerspannung über Thyristor-Stromrichter oder Transistor-Chopper verändert
- Ein- oder Vierquadrantenbetrieb
- Prüffeld: WARD-LEONARD-Umformer fallweise im Einsatz

## 10. Gleichstromantriebe

- 10.1 Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine
- 10.2 Ankerwicklungen
- 10.3 Induzierte Spannung und elektromagnetisches Drehmoment
- 10.4 Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung
- 10.5 Kommutierung des Ankerstroms und die Funktion der Wendepole
- 10.6 Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine
- 10.7 Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb
- 10.8 Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine**

# Einsatzbereiche der Kleinmotoren (DC, AC)



Quelle: Faulhaber  
Permanenterregte zweipolige Gleichstrom-  
Kleinmotoren für Präzisionsantriebe der  
Feinwerktechnik

**Gleichstrommaschinen** dominieren im Kleinmotor-  
Sektor (z. B. Automobilanwendung) oder als  
Universalmotor

- Die je Maschineneinheit baubare Leistung (**“Einheitsleistung”**) ist durch den **Kommutator** auf ca. 10 ... 12 MW bei 80 ... 100/min begrenzt.



Quelle: Fa. Brenner,  
Bürstadt

- **Grenzen:**
  - **Fliehkraftbegrenzung**, sonst Deformation des Kommutators, Bürsten “hüpfen”  $\Rightarrow$  starke Abnutzung
  - **Kommutierung**: Reaktanzspannung  $u_R < 10 \text{ V}$  dauernd,  $< 20 \text{ V}$  „stoßweise“ (= kurzzeitig), sonst zu starkes Bürstenfeuer trotz Wendepole,
  - **Bürstenstromdichte**: dauernd  $J_b < 12 \text{ A/cm}^2$ ,  $< 20 \text{ A/cm}^2$  stoßweise, sonst Ausglühen der Bürsten,
  - **Segmentspannungsgrenze**: im Mittel  $U_{s,av} < 20 \text{ V}$ ,  
lokale Segmentspannung ohne Kompensationswicklung  $< 35 \text{ V}$ , sonst Überschlag („Rundfeuer“)!)
- Bei unregelmäßigem Betrieb: **Stabilitätsgrenze**: Fremderregter GS-Motor darf i. A. nur im Bereich der  $n(M)$ -Kennlinie mit negativer Steigung betrieben werden



- Mit **steigender** Nenndrehzahl  $n_N$  **sinkt** die wirtschaftlich maximal baubare Leistung  $P_{N,grenz}$  rasch ab.

- „Faustregel“: 
$$P_{N,grenz}^{[MW]} \approx \frac{20 \text{ MW/s}}{n_N^{[1/s]}} \quad n_N \geq 80 / \text{min}$$

- **Beispiel:**

$$n_N = 100 / \text{min} = 1.67 / \text{s} : P_{N,grenz}^{[MW]} \approx \frac{20 \text{ MW/s}}{1.67 / \text{s}} = 12 \text{ MW} \Rightarrow M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 1144 \text{ kNm}$$

$$n_N = 2000 / \text{min} = 33.33 / \text{s} : P_{N,grenz}^{[MW]} \approx \frac{20 \text{ MW/s}}{33.33 / \text{s}} = 600 \text{ kW} \Rightarrow M_N = 2.87 \text{ kNm}$$

# Grenzen für $U_N$ , $I_N$ großer Gleichstrommaschinen

- Mit steigender Nennleistung  $P_{N,\text{grenz}}$  muss die Anker-Nennspannung  $U_N$  erhöht werden, um den Anker-Nennstrom  $I_N$  zu begrenzen.

- Beispiel:

$$P_N \leq 0.4 \text{ MW} \Rightarrow U_N = 250 \text{ V} : I_N = P_N / U_N \leq 1600 \text{ A}$$

$$P_N \leq 1.0 \text{ MW} \Rightarrow U_N = 600 \text{ V} : I_N \leq 1600 \text{ A}$$

$$P_N \leq 2.0 \text{ MW} \Rightarrow U_N = 900 \text{ V} : I_N \leq 2200 \text{ A}$$

$$P_N \leq 12.0 \text{ MW} \Rightarrow U_N = 1300 \text{ V} : I_N \leq 9200 \text{ A}$$

# Walzwerksantrieb: Stromrichter gespeister FE-Gleichstrommotor vs. Umrichter gespeister Vollpol-Synchronmotor



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Synchronmaschine

Quelle: Siemens AG,  
Deutschland

Nennleistung:  
10.9 MW,  
58.5 ... 112.5/min



Gleichstrommaschine

Nennleistung:  
12 MW

Tandem-  
Anordnung:  
2 x 12 MW  
90 ... 150/min

- **Synchronmaschine** kann **dynamischer** als Gleichstrommaschine geregelt werden („feldorientierte Regelung“, geringeres Trägheitsmoment)
- **Synchronmaschine ist robuster**: Höhere Drehzahlen & Wirkungsgrad, kleinere Massen, wartungsärmer
- **Keine Tandembauweise** bei Synchronmaschinen nötig, um hohes  $M_N$  zu erreichen !



- Große Gleichstrommotoren werden durch
  - a) stromrichter gespeiste Synchronmotoren (z. Zt. bis 100 MW)
  - und
  - b) Asynchronmotoren (z. Zt. bis ca. 40 MW) abgelöst.
- Auch im unteren Leistungsbereich Ablösung des stromrichter gespeisten Gleichstromantriebs durch den wartungsärmeren Käfigläuferasynchronmotor mit Umrichterspeisung und ggf. feldorientierter Regelung.
- Im Kleinmotorenbereich (Automobilanwendung) aber hohe Stückzahlen bei DC-Motoren für Batteriespannungen 12 V bzw. 24 V (LKW-Bereich)

## Zusammenfassung: Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine

- Kommutator begrenzt Leistung pro Maschine wegen Segmentspannungsgrenze und Stromgrenze je Ankerwicklungs-Parallelzweig
- Drehzahlbegrenzung durch Kommutator (Fliehkraft, Bürstenkontakt)
- Größte Bemessungsleistung je DC-Maschine meist  $< 10$  MW
- Großer Einsatzbereich der Gleichstrommaschine als Kleinmotor
  - a) mit PM-Erregung (Ferrite) zwei- oder vierpolig z. B. im Automobil und als
  - b) Reihenschluss als Universalmotoren (meist zweipolig) im Einphasen-Haushaltsnetz

# Industrielle E-Antriebe – Überblick

<b>Festdrehzahlantrieb</b>	<b>Drehzahlveränderbarer Antrieb</b>		
<u>Drehstrom</u>	<u>Gleichstrom</u>	<u>Drehstrom</u>	
Netzspeisung	Stromrichter	Umrichter	Umrichter
Käfigläufer-Asynchronmotor	fremderregter Gleichstrom-M.	Käfigläufer-Asynchronm.	Permanentmagnet-Synchronmotor
Ungeregelt	einfache Kaskadenregel.	feldorientierte Regelung	feldorientierte Regelung
Wirkungsgrad: gut	mittel	gut	sehr gut
Sehr robust	Wartung	robust	robust
Genormte Größen	herstellerspezifische Ausführungen		
Motor: billig kein Umrichter	sehr teuer Umrichter: billig	billig ... teuer teurer	teuer teurer
groß	groß	kompakt	sehr kompakt

# That's all, folks !

