

Energietechnik

Inhalt des Vorlesungsteils

I Elektrische Energiewandler

Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

Repetitorium: Grundlagen der Elektrotechnik

1. Elektrische Energiewandlung - Einführung

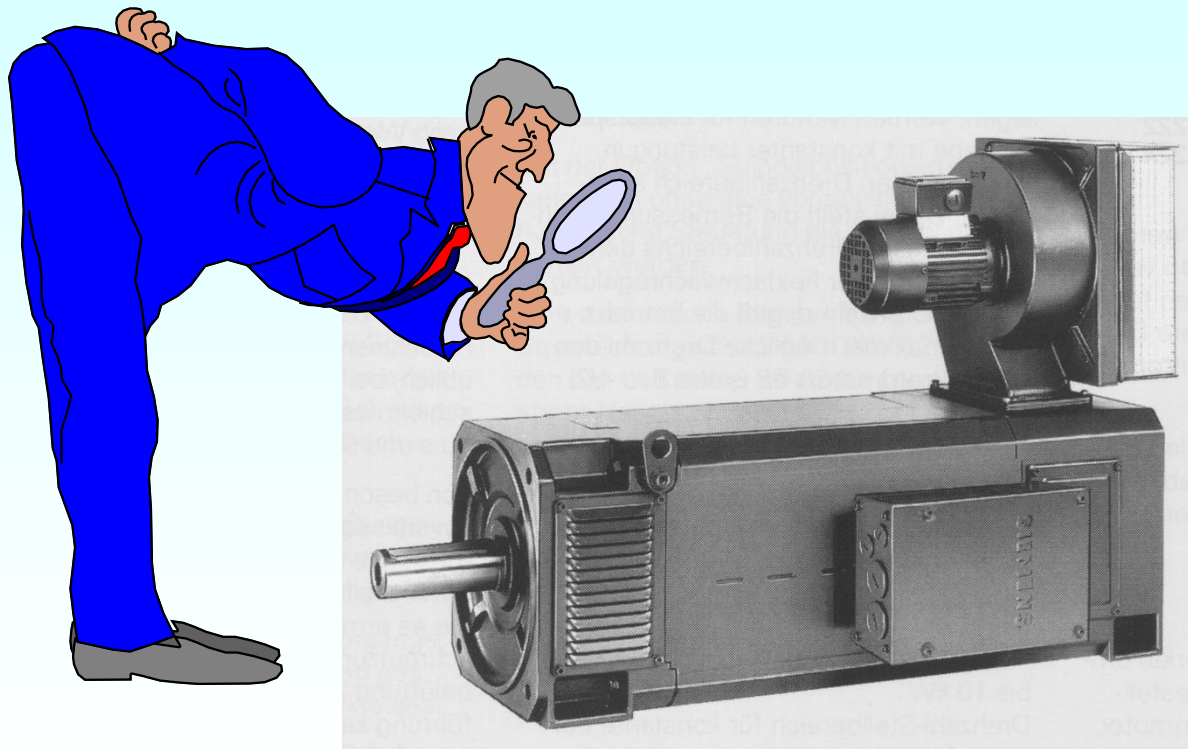
2. Transformatoren

3. Gleichstrommaschinen

4. Drehfeldmaschinen



3. Gleichstrommaschinen



Quelle: Siemens AG

3. Gleichstrommaschinen

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

3.2 Ankerwicklung

3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

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).



Kleine permanentmagneterregte Gleichstrommaschinen



*Quelle: Faulhaber,
Germany*

Gleichstrom-Kleinstmotoren für Präzisionsantriebe



Zweipoliges Erregerfeld der Gleichstrommaschine

$$\Theta_f = N_{f,Pol} I_f$$

Beispiel für geschlossene Kurve C

Hauptpol elektrisch erregt mit Polspule

I_f : Erregerstrom (Feldstrom) DC

$N_{f,Pol}$: Windungszahl je Polspule

Ankerspule

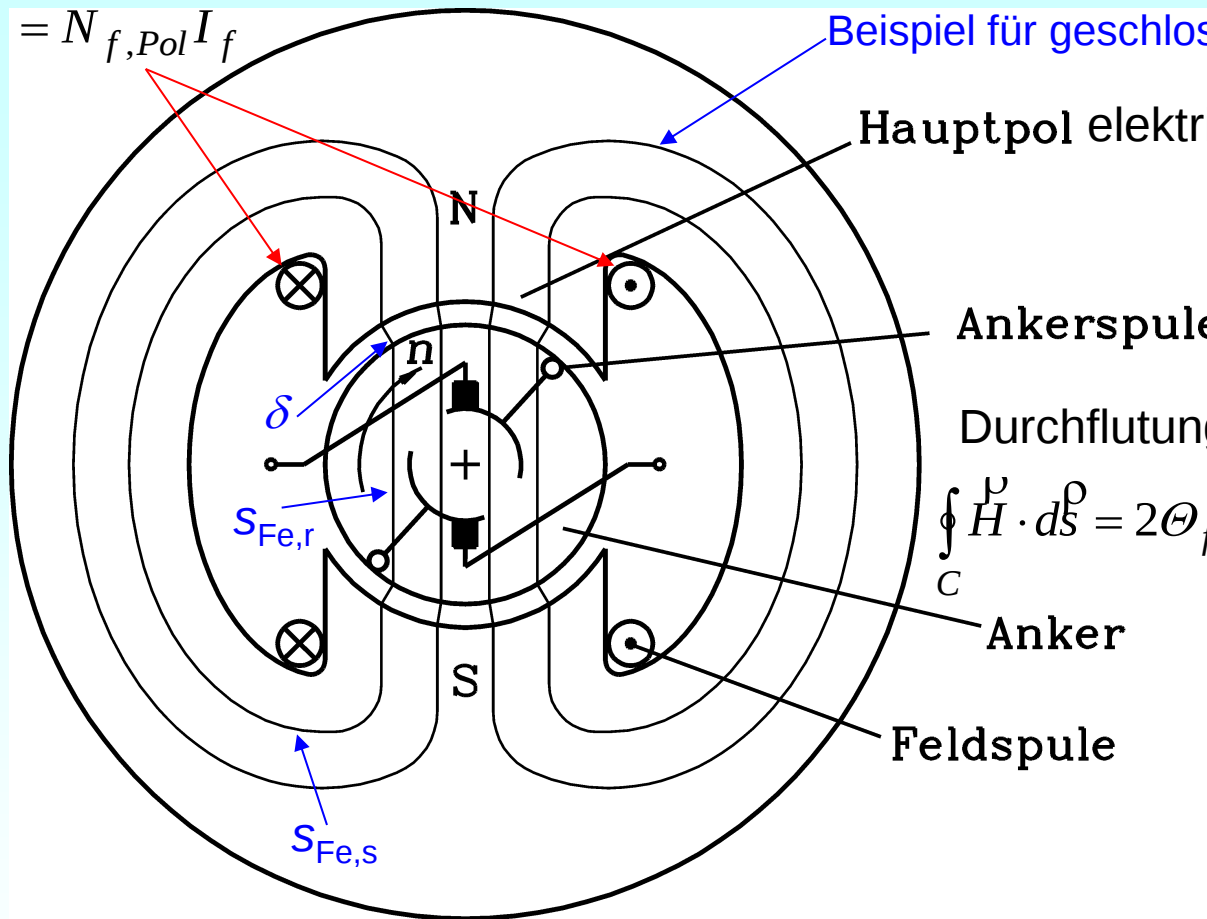
Durchflutungssatz für geschlossene Kurve C:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2\Theta_f = H_{Fe,s} \cdot s_{Fe,s} + H_{Fe,r} \cdot s_{Fe,r} + 2H_\delta \cdot \delta$$

Für $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ ist $H_{Fe} \approx 0$:

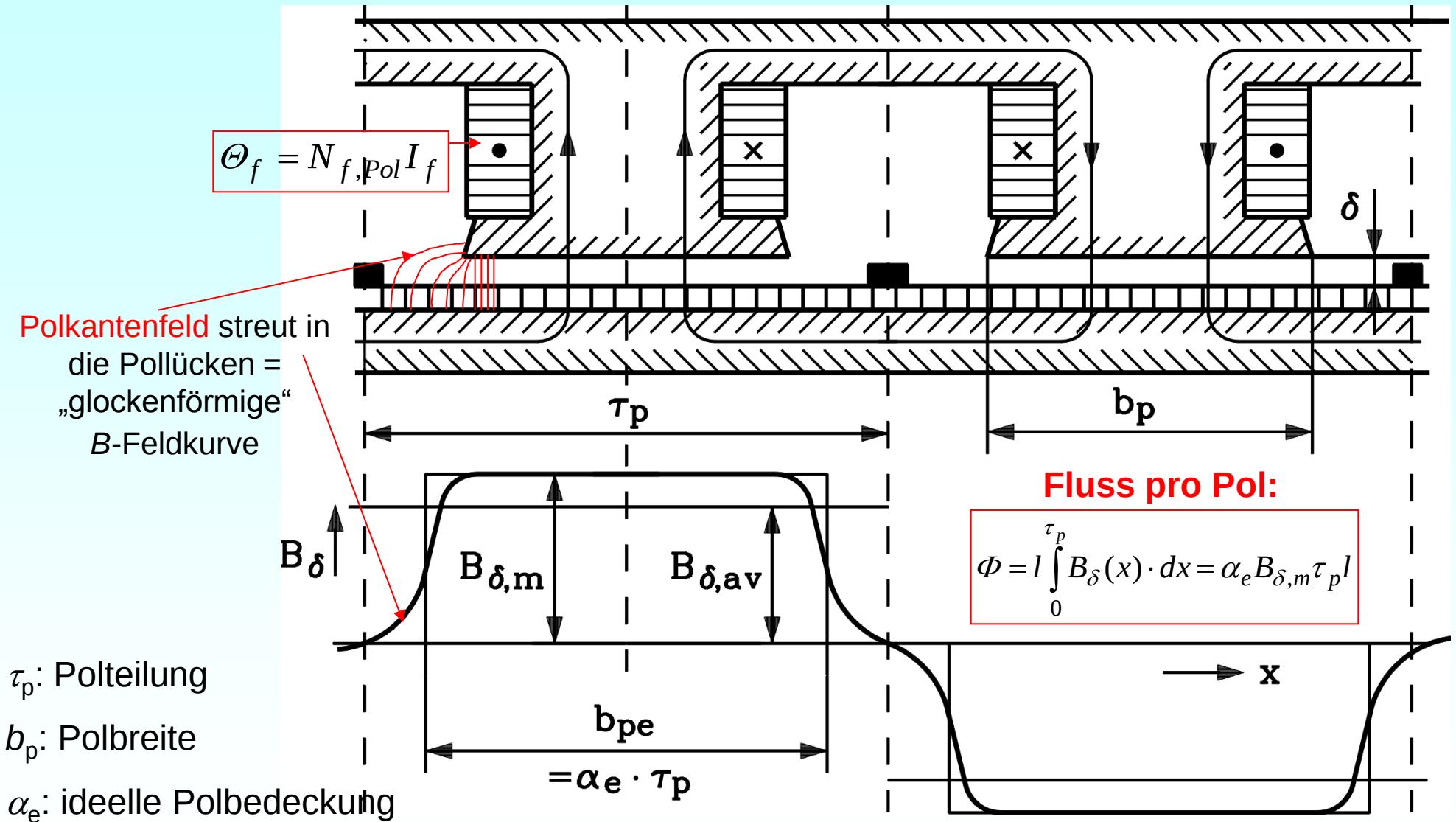
$$H_\delta \cdot \delta = \Theta_f$$

$$B_\delta = \mu_0 \Theta_f / \delta = B_{\delta,m}$$

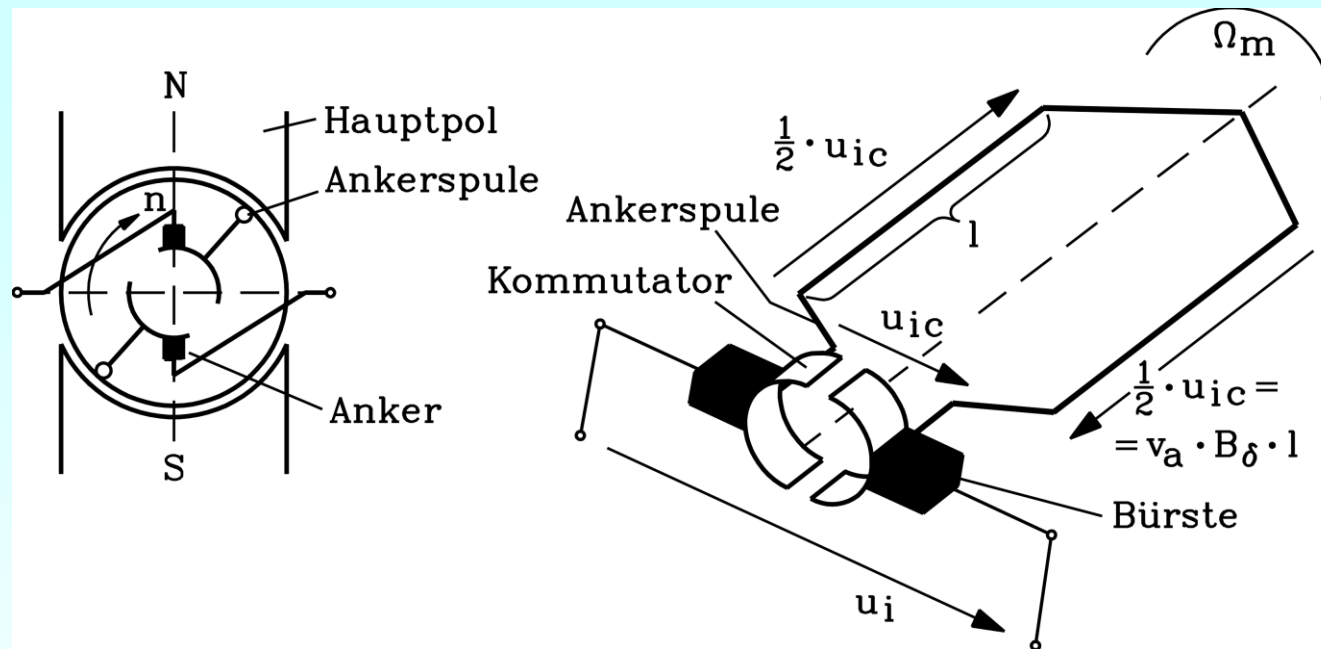


- Zwei Hauptpole (**$2p = 2$, p : Polpaarzahl**) erregen Luftspaltfeld $B_\delta(x)$, eine Ankerspule rotiert mit Drehzahl n , zwei Kohlebürsten als Anschlüsse

Luftspaltfeldverteilung unter den Hauptpolen



Funktionsweise der Gleichstrommaschine



Ankerumfangsgeschwindigkeit:

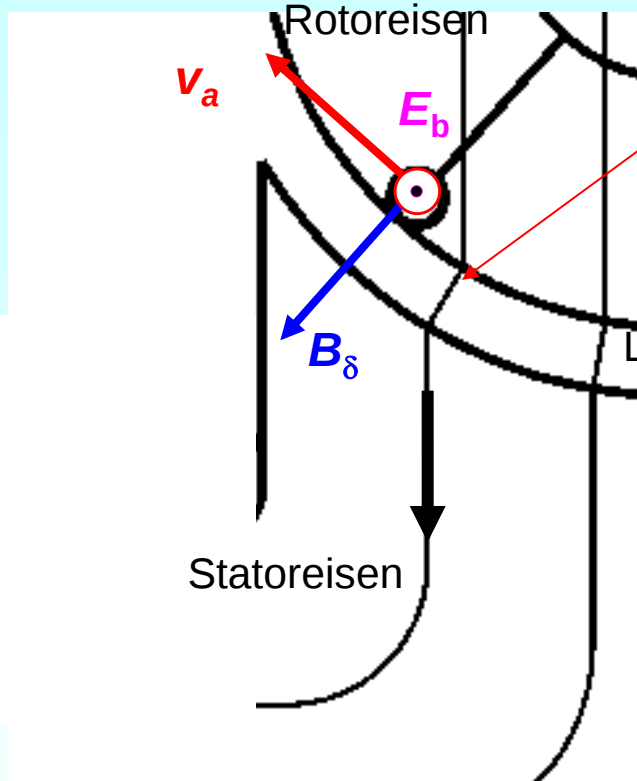
$$v_a = d_{si} \cdot \pi \cdot n$$

Ankerfrequenz:

$$f_a = n \cdot p$$

- **Vereinfachte** Gleichstrommaschine: zwei Hauptpole ($2p = 2$) erregen Luftspaltfeld $B_\delta(x)$, eine Ankerspule rotiert mit Drehzahl n , zwei Kohlebürsten als Anschlüsse
- **Bewegungsinduktion** der Ankerspule im Feld B_δ : je Spulenseite: $u_{i,c}/2 = v_a B_\delta l$ als Wechselspannung (Frequenz f_a) induziert, Stator-Innendurchmesser d_{si}
- Kommutator und Bürsten **richten** $u_{i,c}$ **gleich** als Gleichspannung u_i

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_δ senkrecht zueinander gerichtet

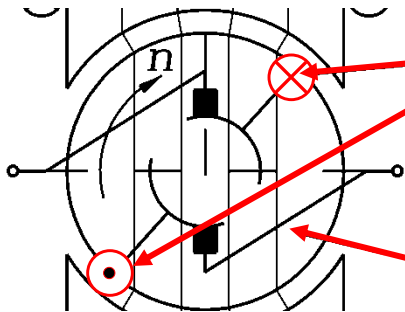
$$\vec{E}_b = \vec{v}_a \times \vec{B}_\delta \quad \vec{E}_b = v_a \cdot B_\delta \cdot \vec{e}_z$$

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

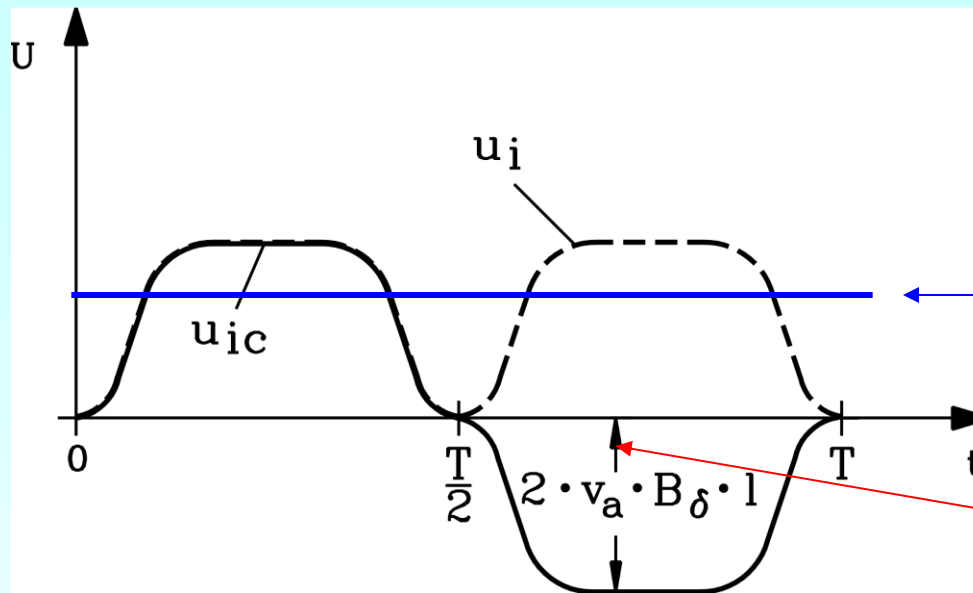
Induzierte Spannung je Spulenseite (Länge l):

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

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



Kurvenform der induzierten Ankerspulenspannung



$$u_{i,av} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,av} \cdot l$$

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

- 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: $\hat{U}_{i,c} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,m} \cdot l$ Mittelwert entspricht einer Spannungsinduktion im mittleren Feld (ohne Pollücken): $u_{i,av} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,av} \cdot l$
- **Einbrüche** der Spannung im Abstand $T/2$ „unschön“ ($f_a = 1/T$ „Ankerfrequenz“).

Zusammenfassung

Funktionsweise der Gleichstrommaschine

- 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



3. Gleichstrommaschinen

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

3.2 Ankerwicklung

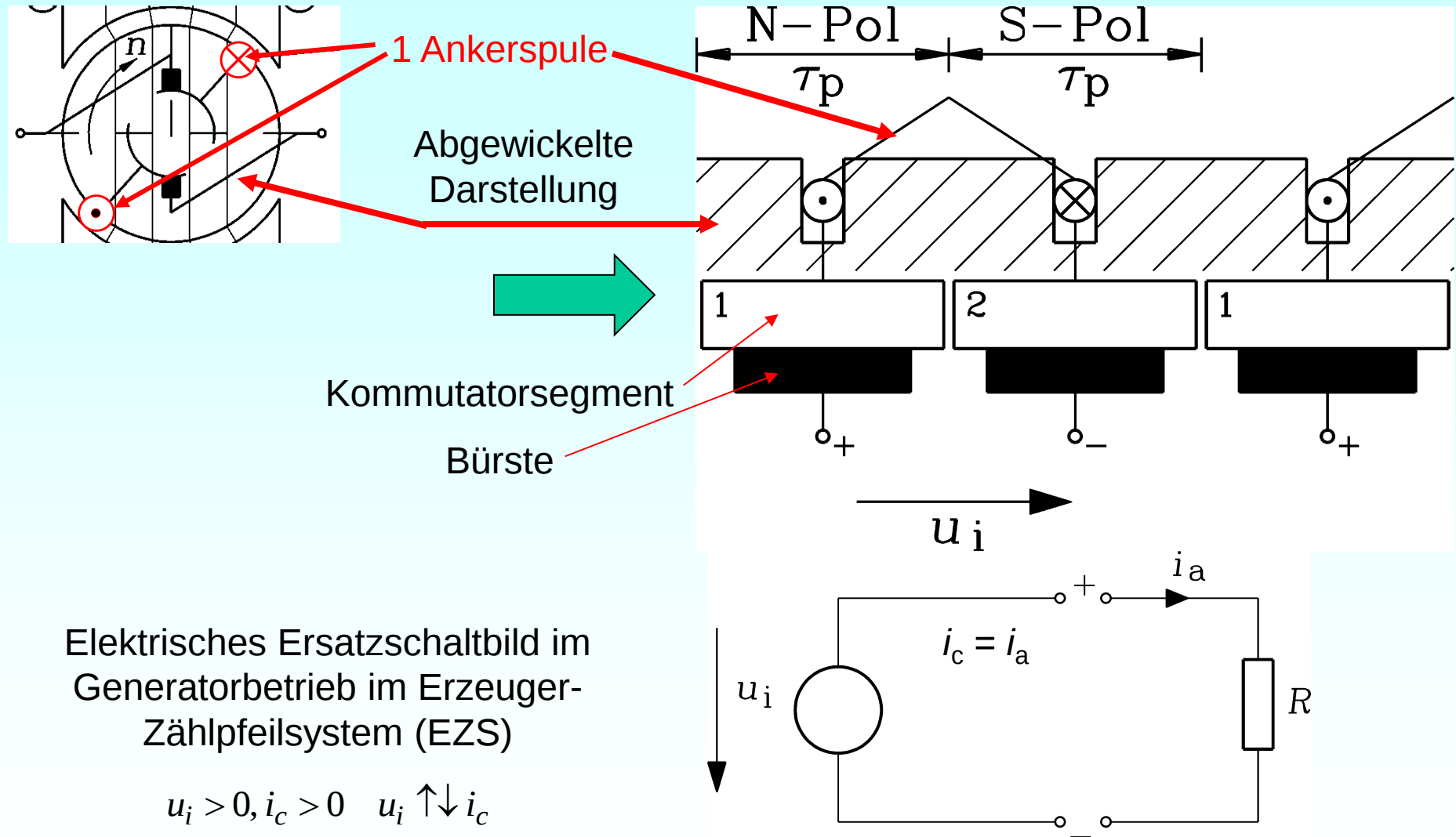
3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

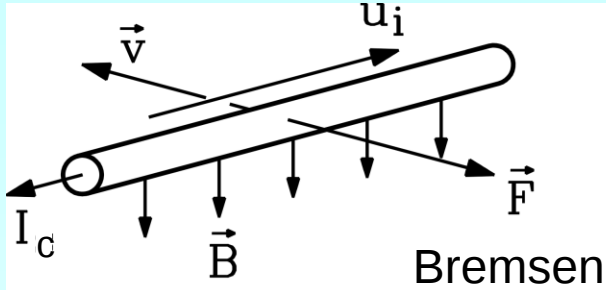
3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

Induzierte gleichgerichtete Ankerspulenspannung

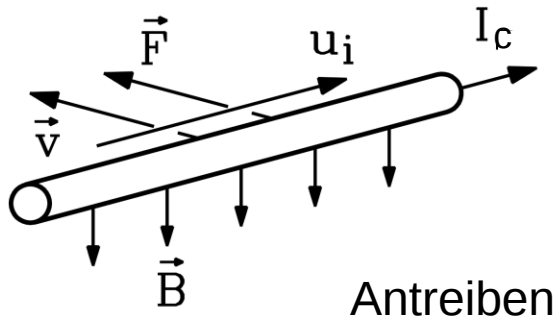


Die LORENTZ-Kraft auf einen Ankerleiter



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

Die LORENTZ-Kraft F wirkt gegen die Ankerumfangsgeschwindigkeit $v = v_a$; sie bremst!



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

Die LORENTZ-Kraft F wirkt in Richtung der Ankerumfangsgeschwindigkeit v ; sie treibt an!

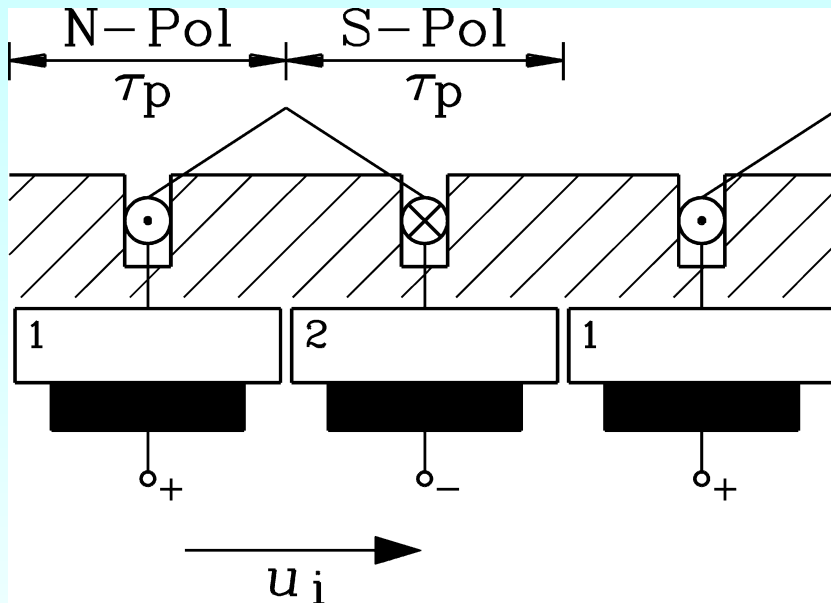
$$\vec{F} = \int_l I_c \cdot d\vec{s} \times \vec{B}$$

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

$$\vec{F} = \int_0^l I_c (d\vec{s} \times \vec{B}) \rightarrow F = \int_0^l I_c \cdot ds \cdot B = I_c \cdot B \cdot l \quad N_c \text{ Windungen je Ankerspule: } F = N_c I_c \cdot B \cdot l$$

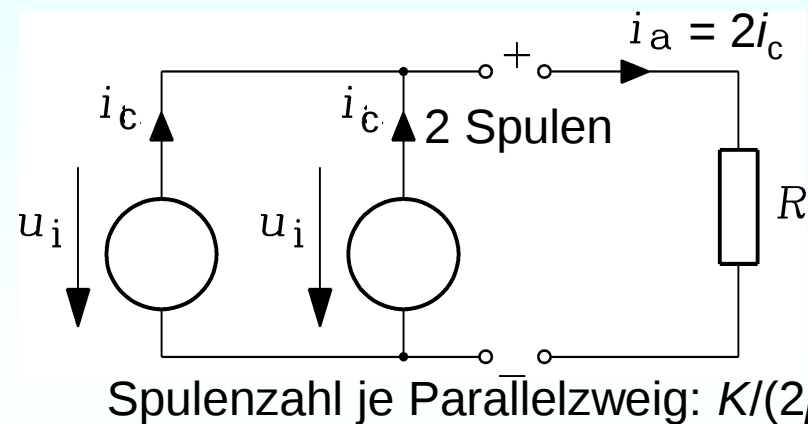
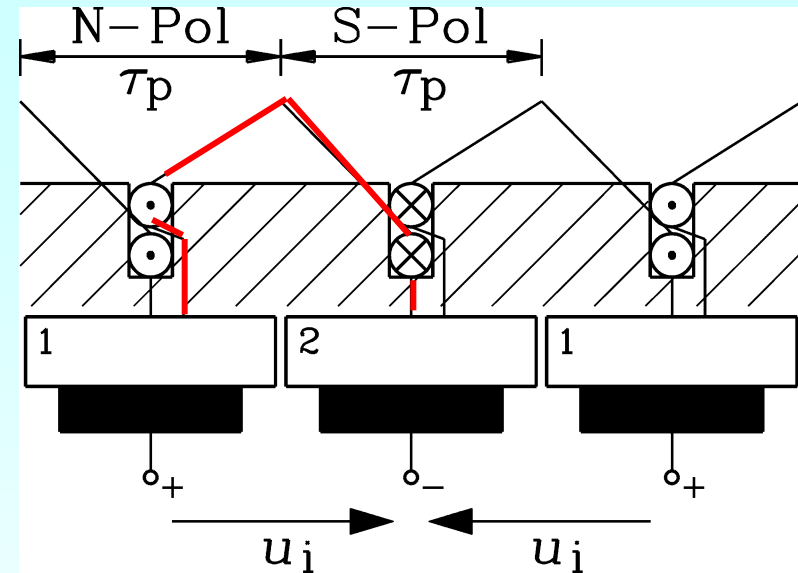
Zweischichtwicklung im Anker

Einschichtwicklung



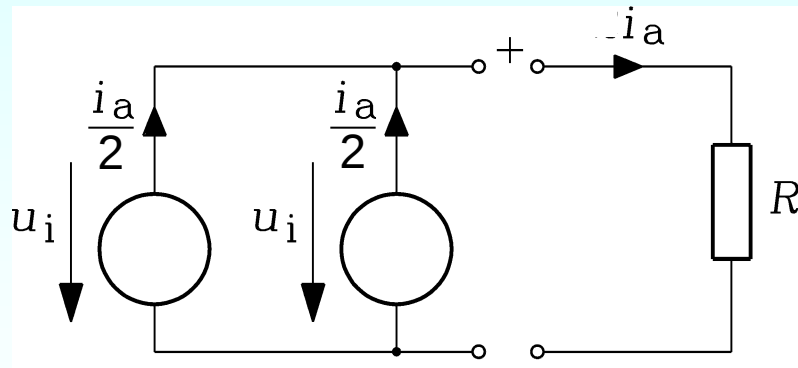
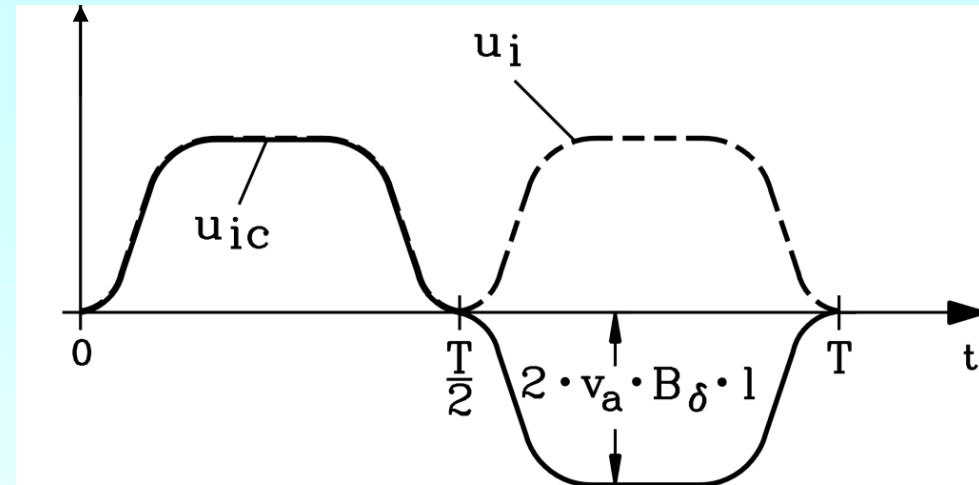
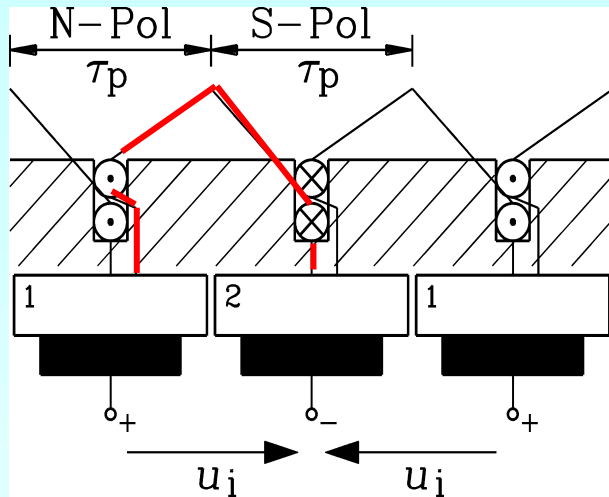
$K = 2, 2p = 2, K$: Kommutatorstegzahl

Zweischichtwicklung: doppelte Spulenzahl

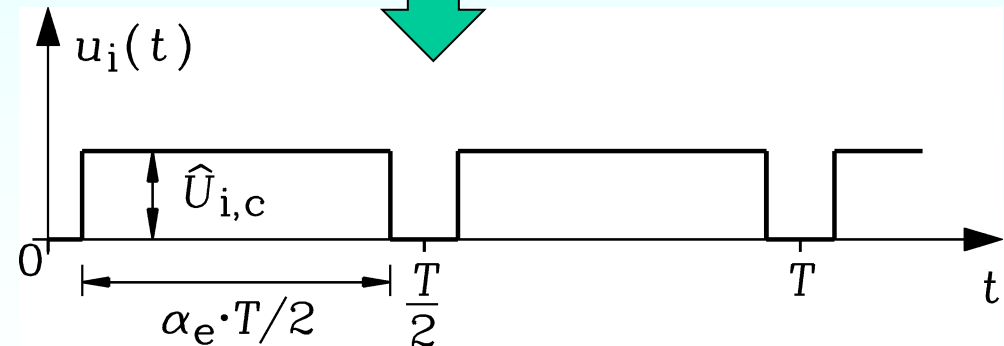


Spulenzahl je Parallelzweig: $K/(2p) = 1$

Spannungskurvenform der Ankerspannung

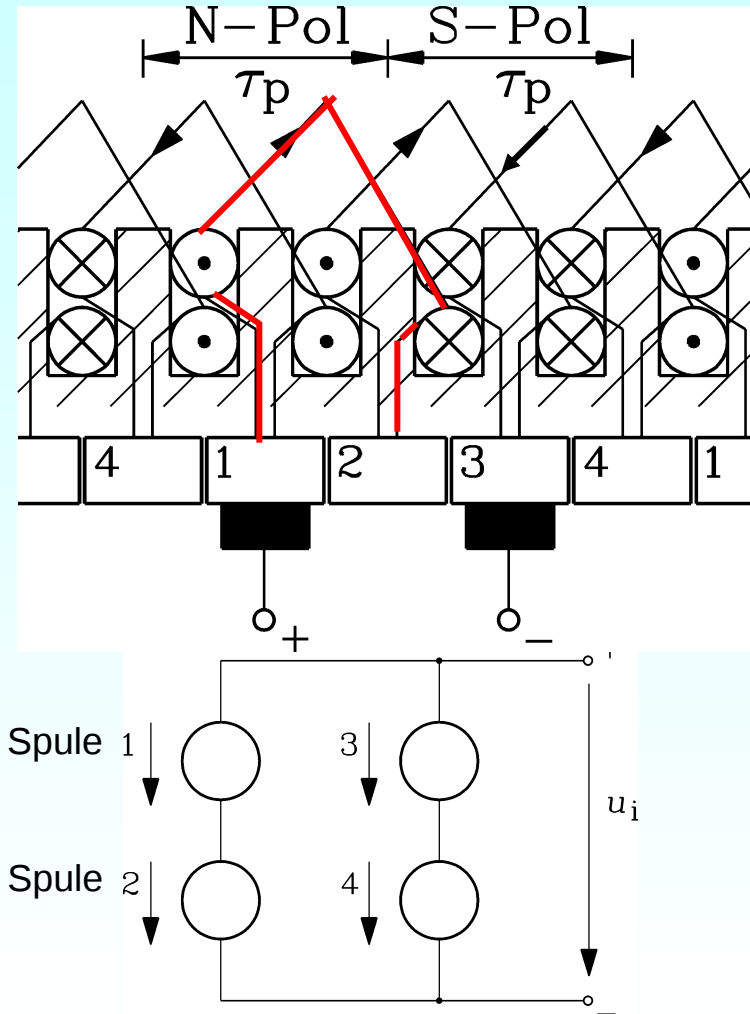


Vereinfachter
Kurvenverlauf:

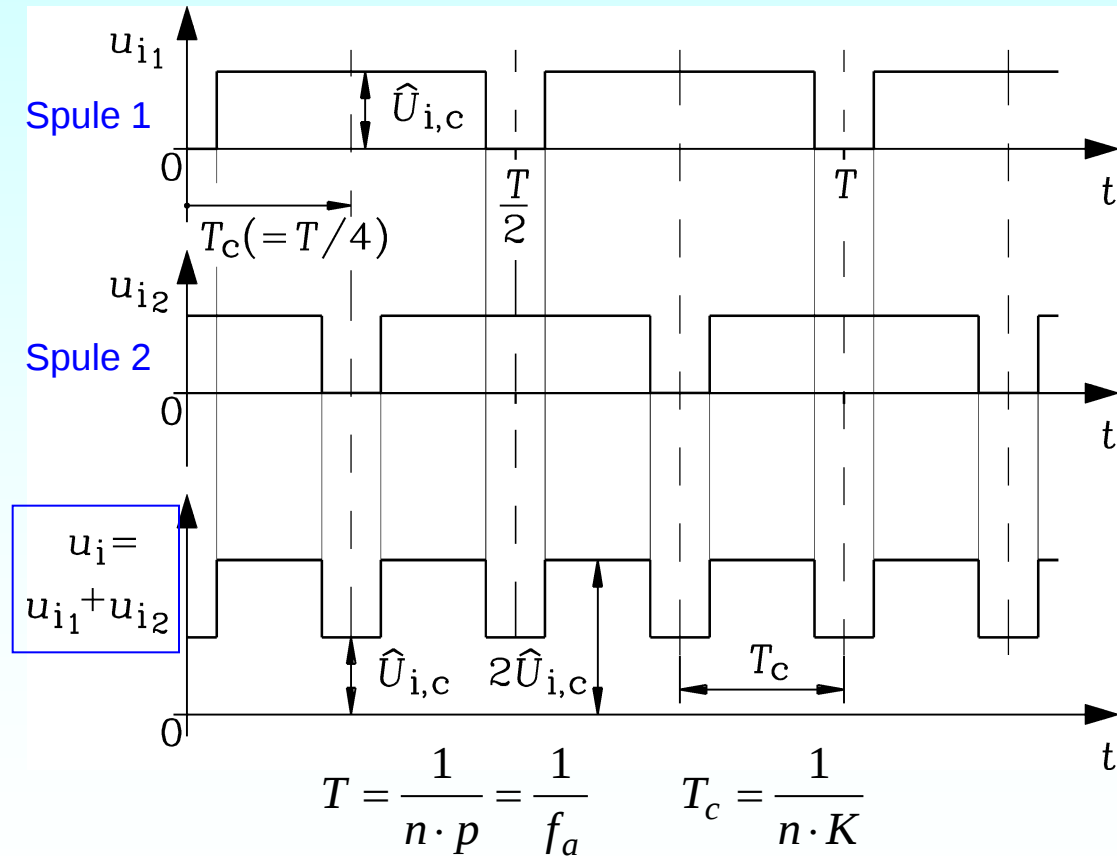


Erhöhung der Spulenzahl im Anker

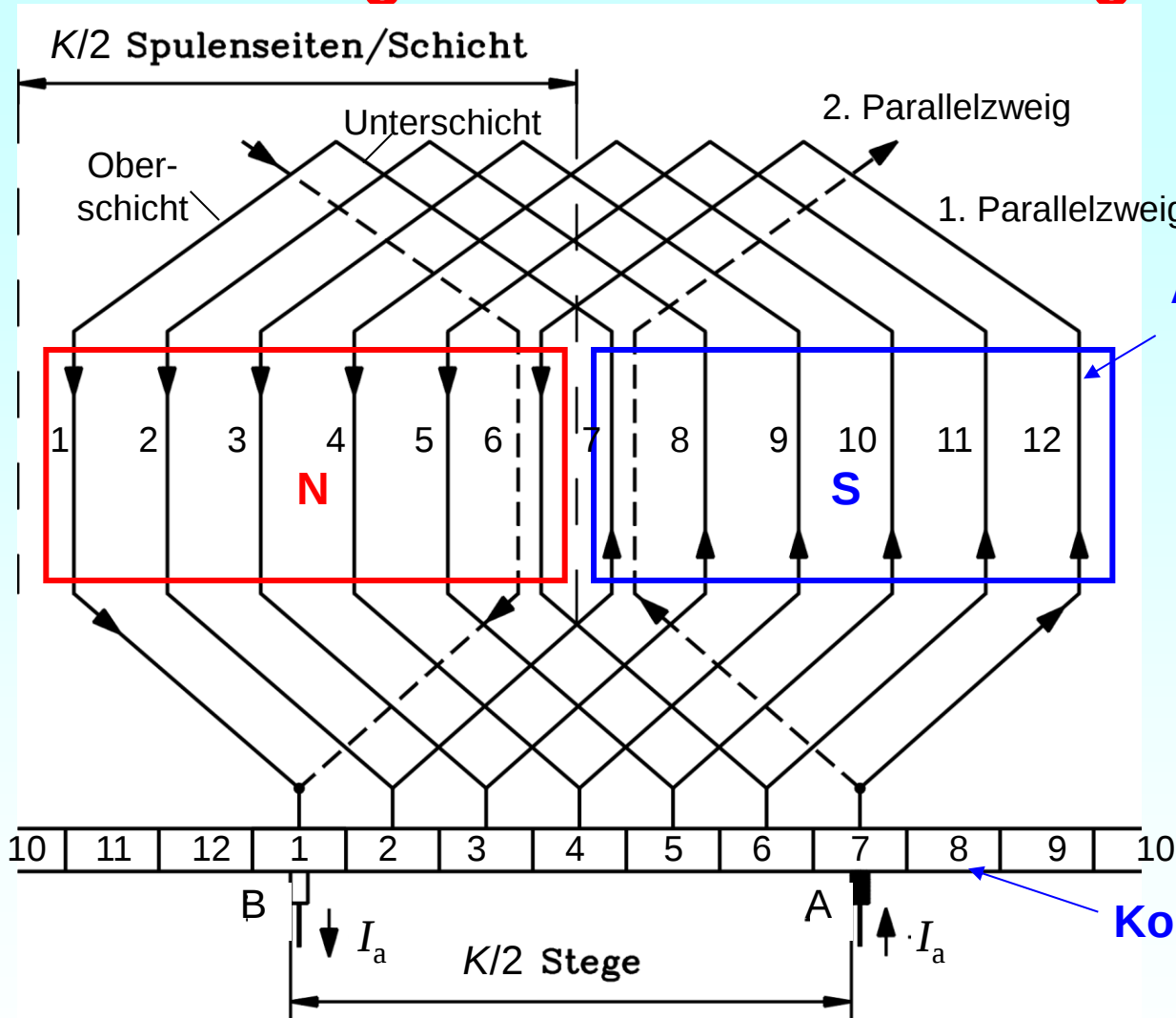
Beispiel: $K = 4$, $2p = 2$: Spulenzahl $K = 4$, Spulenzahl je Parallelzweig: $K/(2p) = 2$



„Vergleichmäßigung“ der gleichgerichteten induzierten Spannung



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



“Glättung” der induzierten Ankerspannung

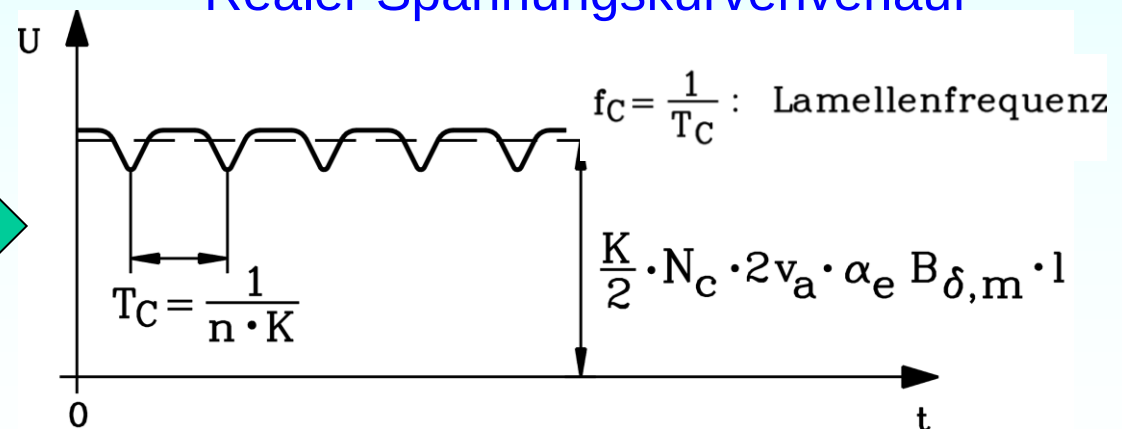
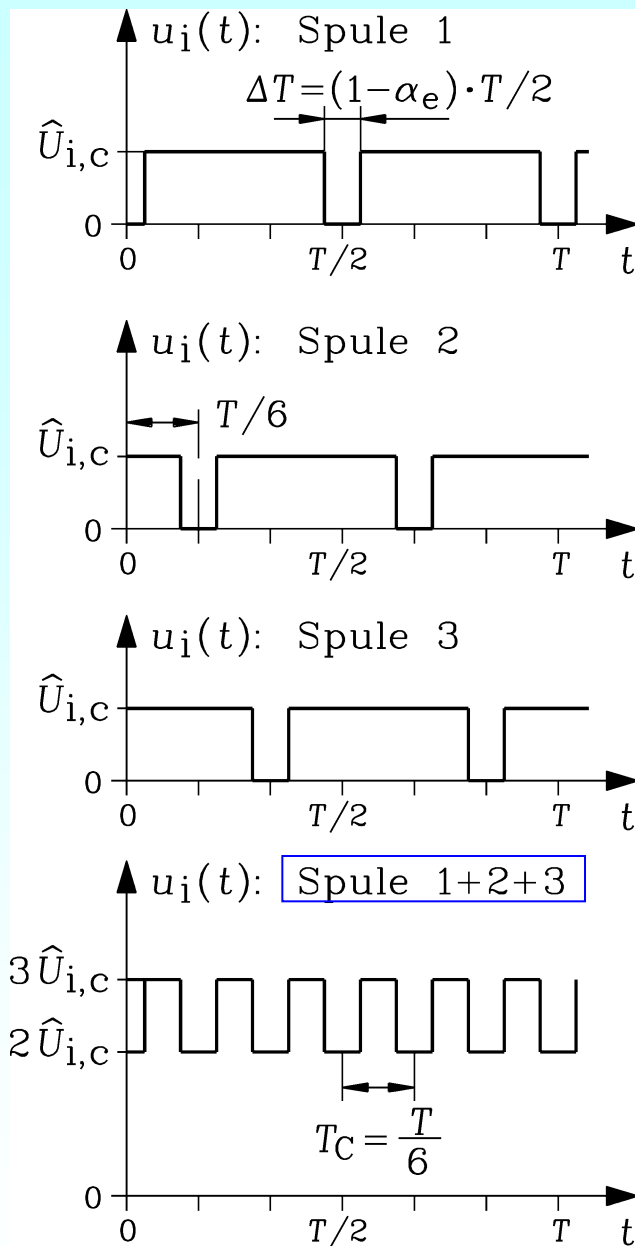
- Mehrere Spulen werden **in Serie geschaltet** und an gegeneinander isolierte Kommutatorsegmente (“Lamellen”, „Stege“) geschaltet (“**Schleifenwicklung**”).
- In den Spulen wird die Spannung **nacheinander** induziert. Die Serienschaltung (Spannungssumme) “**verschmiert**” die Einbrüche der gleichgerichteten Spannung.
- 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 !

Erzeugung einer glatten induzierten Spannung durch Serienschaltung von Ankerspulen

Beispiel: $K = 6$, $2p = 2$: Spulenzahl $K = 6$,
Spulenzahl je Parallelzweig: $K/(2p) = 3$,
 $Q = 6$ Ankernuten

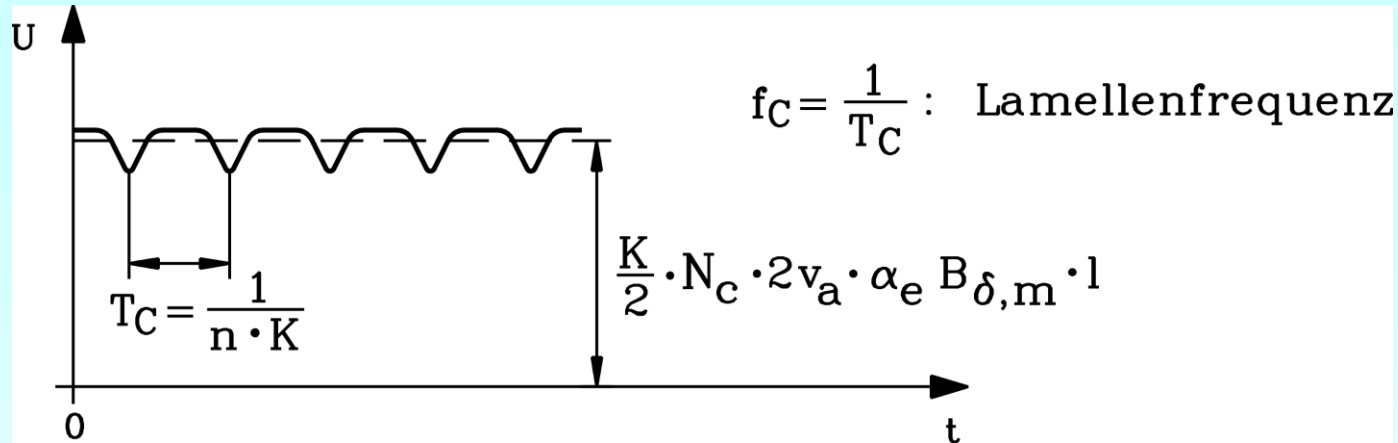
N_c : Windungszahl je Spule

Realer Spannungskurvenverlauf



Geglättete induzierte Ankerspannung

Zweipolig:
 $2p = 2$



- $N_c = 1$: Mittelwert der geglätteten Spannung zwischen zwei Bürsten: $u_{i,av} = \frac{K}{2} \cdot 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,av} \cdot l$
- **Mittelwertfaktor**: $\alpha_e = B_{\delta,av} / B_{\delta,m}$: Anschauliche Deutung: Der Hauptpol erzeugt im Mittel gleichmäßig über die “**Polteilung**” τ_p verteilt das Magnetfeld $B_{\delta,av}$ oder auf dem Teil $\alpha_e \tau_p$ das Feld $B_{\delta,m}$. ($\alpha_e = \text{ca. } 0.7$, $\tau_p = d_{si} \pi / (2p)$).
- Induzierte Spannung bei N_c Windungen/Spule: $U_i = u_{i,av} = \frac{K}{2} N_c \cdot 2 \cdot v_a \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot l$
- **Fluss pro Pol**: $\Phi = l \int_0^{\tau_p} B_{\delta}(x) \cdot dx = \alpha_e B_{\delta,m} \tau_p l$

$$U_i = \frac{K}{2} \cdot N_c \cdot \frac{2v_a}{\tau_p} \cdot \Phi$$

Ankerspulen in Läuferkarten

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

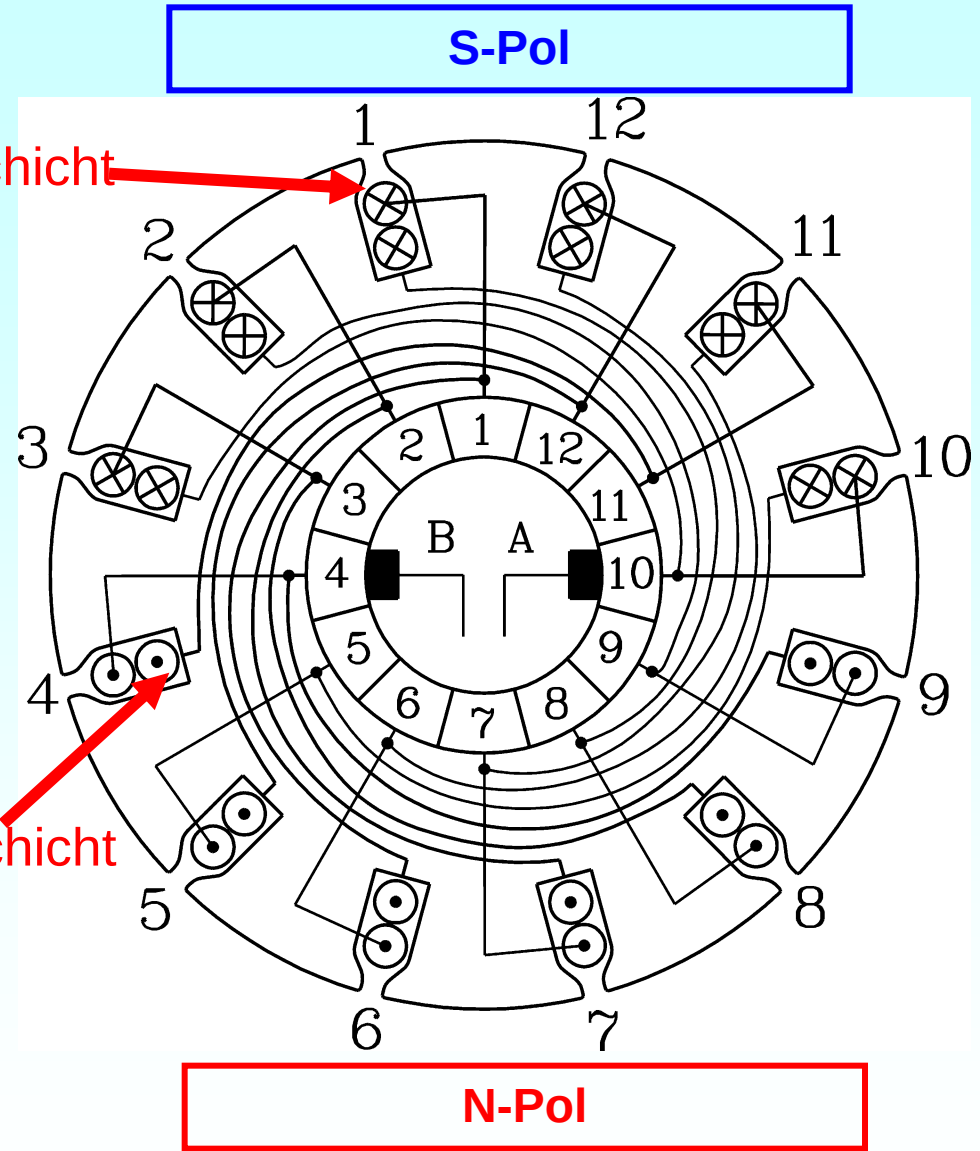
12. Spule: 12 OS – 6 US

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

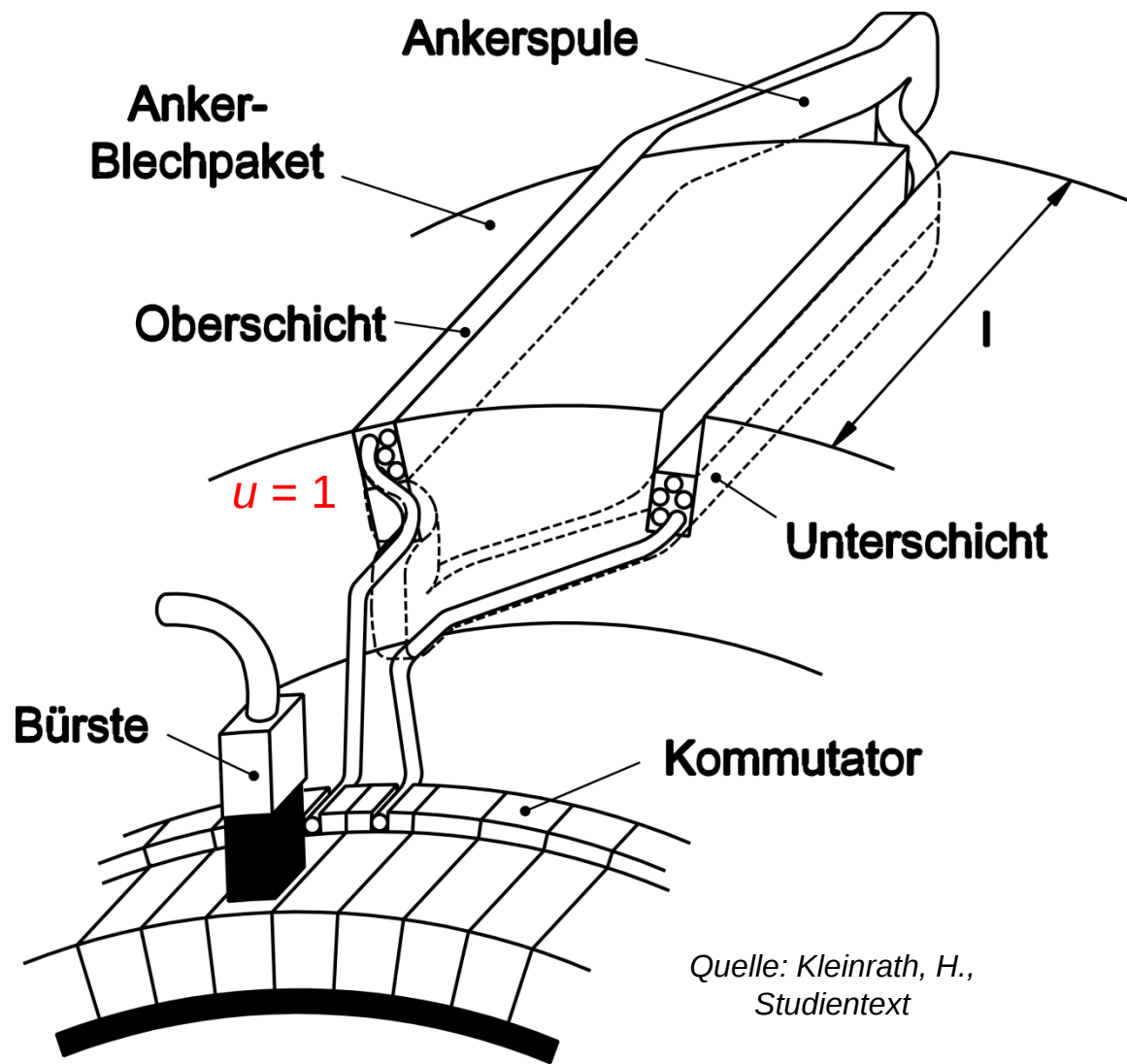
$$\begin{aligned} 1 \text{ OS} &\xrightarrow{+6} 7 \text{ US} \xrightarrow{-5} 2 \text{ OS} \\ 2 \text{ OS} &\xrightarrow{+6} 8 \text{ US} \xrightarrow{-5} 3 \text{ OS} \end{aligned}$$

OBER-Schicht
(OS)

UNTER-Schicht
(US)



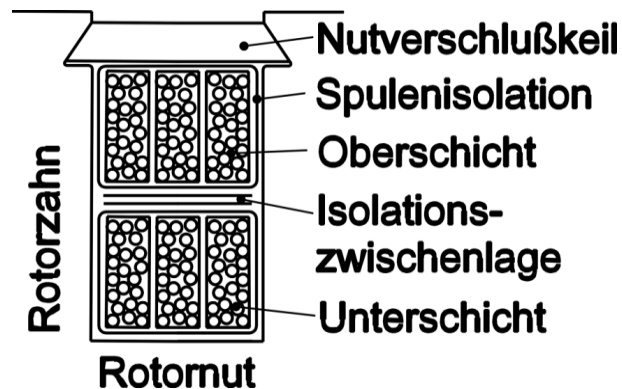
Ankerspulen in Nut-Unter- und Oberschicht



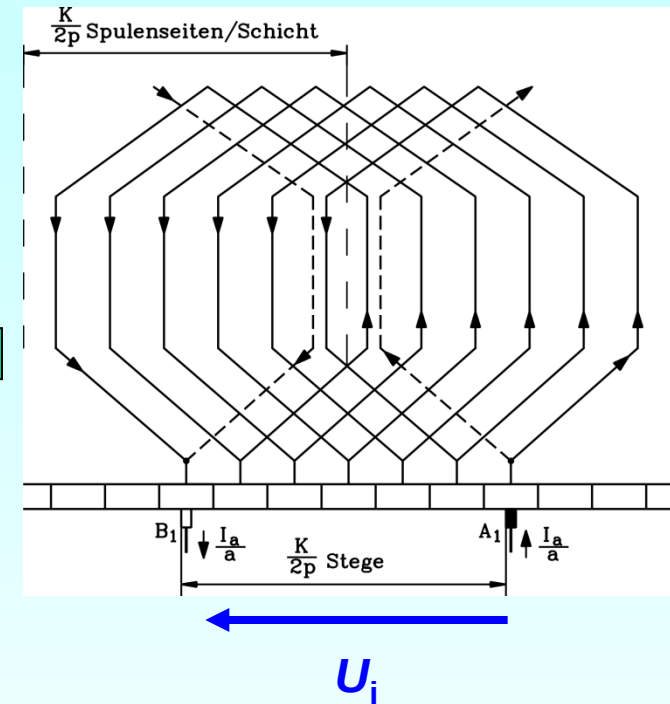
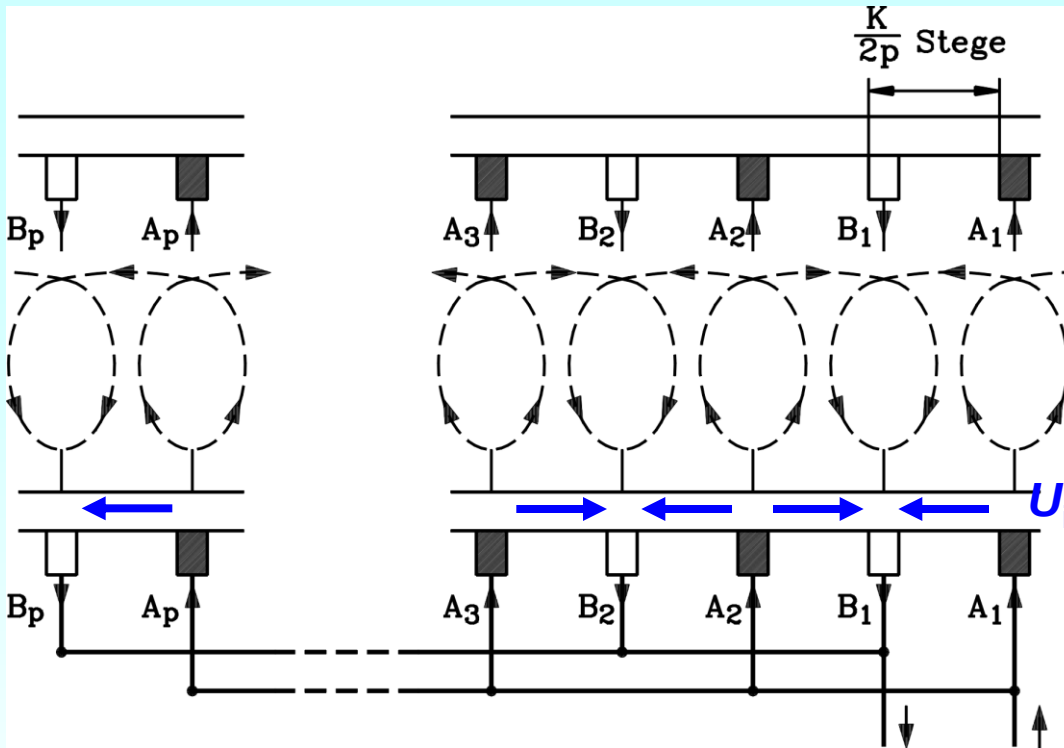
Quelle: Kleinrath, H.,
Studententext

- **Spulen-Gesamtzahl:**
 K Spulen - mit ihren
Enden an K Kommutator-
segmente angelötet.

Beispiel: $u = 3$ Spulenseiten je
Nut und Schicht; verringert die
Nutenzahl $Q = K/u$



Höherpolige Ankerwicklung

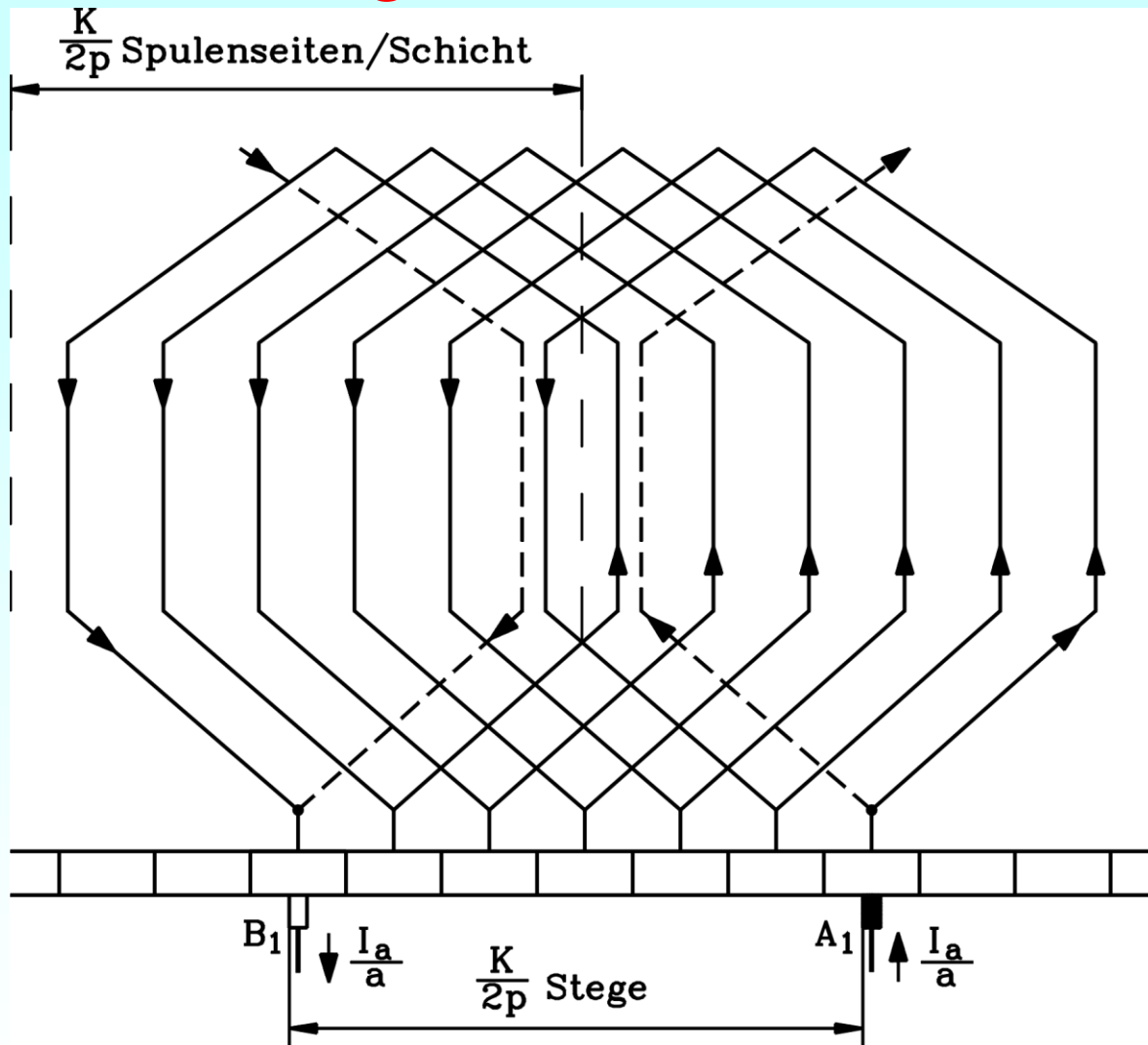


- Bei mehr als zwei Polen:
 - Wicklungsschema wird fortgesetzt: Polfolge N – S – N – S
 - Spannungsinduktion $+ U_i, - U_i, + U_i, - U_i \dots$
 - Spannungen über Plus- und Minusbürsten **parallel** geschaltet.

$$2a = 2p$$

Es entstehen $2a = 2p$ parallele Ankerzweige.

Abgewickelte Ankerwicklung je Polpaar



Zweischichtwicklung:

2a parallele Ankerwicklungszweige

2p Pole

Beispiel:

Spulenzahl je Parallelzweig:

$$K/(2p) = 6$$

– Jede Spule beginnt/endet an einem Kommutatorsegment: Segmentzahl K

Induzierte Ankerspannung (1)

Maximale Spannung pro Spule:

$$u_{i,c,m} = 2v_a B_{\delta,m} N_c l$$

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

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

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

Mittlere Spannung pro Spule:

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

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

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

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

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

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

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

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



Induzierte Ankerspannung (2)

- Induzierte Spannung:

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

Merkformel:

$$\underline{\underline{U_i = k \cdot \Omega_m \cdot \Phi}}$$

- Maschinenkonstante:

$$k = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a}$$

- Beispiel:

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

- Beispiel:

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

Beispiel: Gleichstrommaschinenparameter

- **Rotor** = Läufer = Anker, **Stator** = Ständer
- **Windungszahl** je Ankerspule: N_c (z. B.: 5), ideale Polbedeckung: z.B.: $\alpha_e = 0.7$
- **Fluss** pro Pol: $\Phi = \alpha_e \tau_p l B_{\delta,m}$ z.B: $B_{\delta,m} = 0.95$ T, Polteilung $\tau_p = 0.1$ m, Länge $l = 0.12$ m, daher $\Phi = 0.7 \cdot 0.1 \cdot 0.12 \cdot 0.95 = 0.008 \text{ Wb}$
- 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. 4)
- Ankerumfang: $2p \tau_p = d_{si} \pi$ (z. B. $4 \cdot 0.1 \text{ m} = 0.4 \text{ m}$),
Ankerumfangsgeschwindigkeit: $v_a = 2p \tau_p \cdot n : v_a = 0.4 \cdot (4500/60) = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$

Zusammenfassung Ankerwicklung

- Zweischicht-Ankerwicklung in den Läufernten
- Mehrere Spulen pro Pol für möglichst glatte gleichgerichtete Ankerspannung
- Alle Ankerspulen in Serie = „endlos geschlossenes Band“ = Schleifenwicklung
- Bürsten „zapfen“ Schleifenwicklung im Abstand einer Polteilung an = Ankergleichstrom kann fließen
- Tangentiale LORENTZ-Kraft auf Ankerstrom im Statorfeld
- Merkformel: Induzierte Ankerspannung $\sim$ Fluss pro Pol $\times$ Drehzahl



3. Gleichstrommaschinen

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

3.2 Ankerwicklung

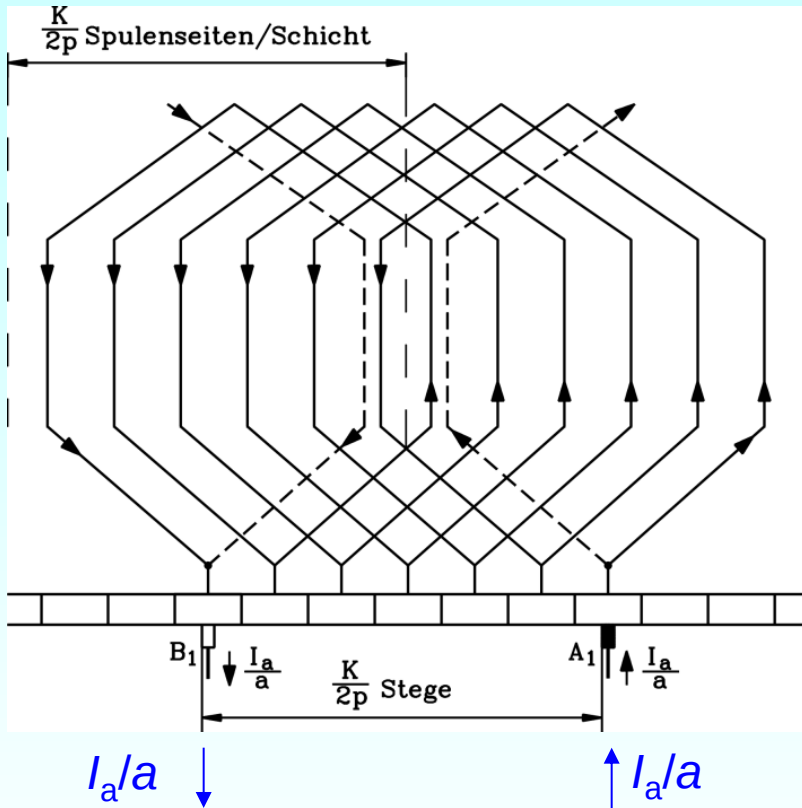
3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

Stromfluss in der Gleichstrommaschine



- Maschine über Bürsten bestromt: **Ankerstrom** I_a teilt sich auf je $a = p$ Plus- und Minusbürsten auf.
- Je Bürste fließt Bürstenstrom I_a/a
- Von der Bürste teilt sich der Strom nach links und rechts in die Spulen: Je Spule fließt Spulenstrom $I_c = I_a/(2a)$
- **Beispiel:** $I_a = 50 \text{ A}$, $a = 2$: $I_a/a = 25 \text{ A}$
 $I_a/(2a) (= 12.5 \text{ A})$
- Spulen drehen weiter, erhalten abwechselnd als Strom $+I_a/(2a)$ und $-I_a/(2a)$: es fließt **Spulenwechselstrom** i_c .
- Frequenz von i_c ist Ankerfrequenz $f_a = n \cdot p$!

Elektromagnetisches Drehmoment

- Spulenstrom $I_c = I_a/(2a)$ fließt unter Nord- und Südpol in entgegengesetzte Richtung.
- Mittlere LORENTZ-Kraft je Leiter:
 $F = I_a/(2a) \cdot (\alpha_e B_{\delta,m}) \cdot l$
- Alle LORENTZ-Kräfte am Umfang wirken in EINE Richtung

- **Summenkraft:** $z \cdot F$, mit: $d_{si} \pi = 2p \tau_p$

$$M_e = (d_{si} / 2) \cdot z \cdot F = \frac{p \tau_p}{\pi} \cdot z \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot (\alpha_e B_{\delta,m}) \cdot l$$

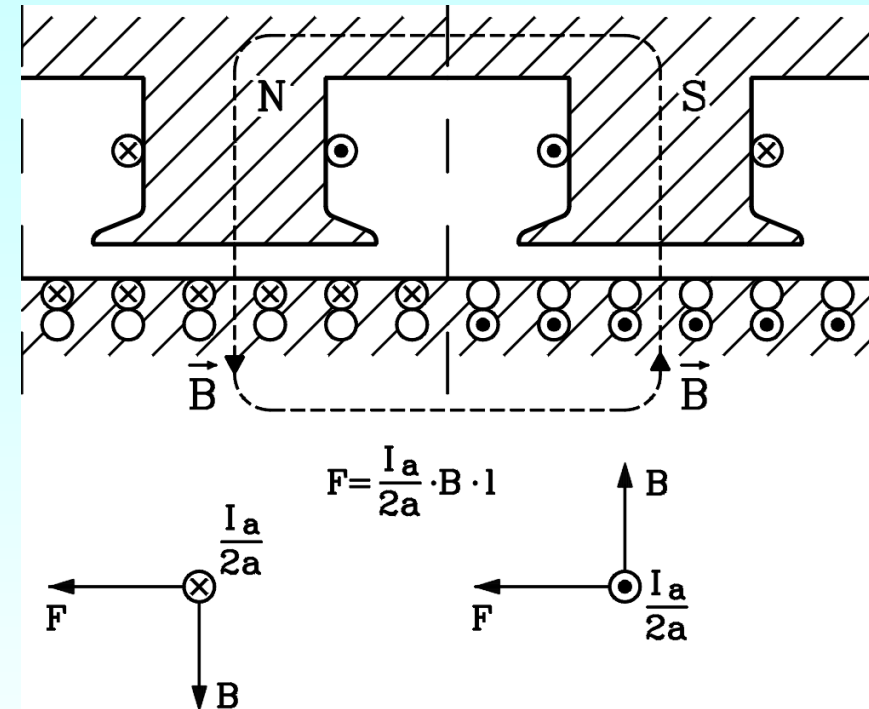
$$M_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \cdot \Phi \cdot I_a = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

- **Merkformel:**

$$\underline{\underline{M_e = k \cdot I_a \cdot \Phi}}$$

Vernachlässigung u. A. des Reibungsmoments:

$M_e \approx M$: Motor-Wellenmoment



Beispiel: $kl/(2p) = 6$

Zusammenfassung

Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

- Tangentiale LORENTZ-Kraft auf Ankerstrom im Statorfeld weist unter allen Polen in dieselbe Richtung
- Tangential-Summenkraft führt zu Drehmoment proportional zum Ankerstrom
- Merkformel: Drehmoment $\sim$ Fluss pro Pol $\times$ Ankerstrom



3. Gleichstrommaschinen

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

3.2 Ankerwicklung

3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

Elektromagnetische Energiewandlung der Gleichstrommaschine

- **Drehmoment:** Alternative Berechnung aus der **Luftspalt-Leistung P_δ** :

$$P_\delta = U_i I_a = k \Omega_m \Phi \cdot I_a = \Omega_m \cdot M_e = \Omega_m \cdot (k \Phi I_a)$$

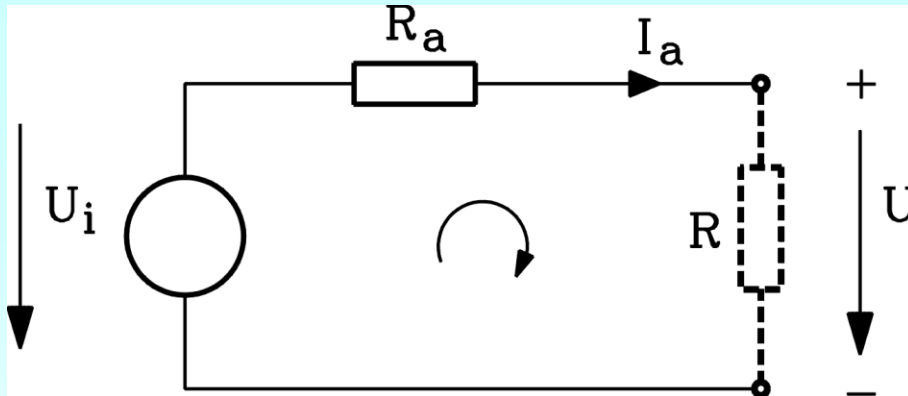
$$M_e = P_\delta / \Omega_m$$

$$M_e = k \Phi I_a$$

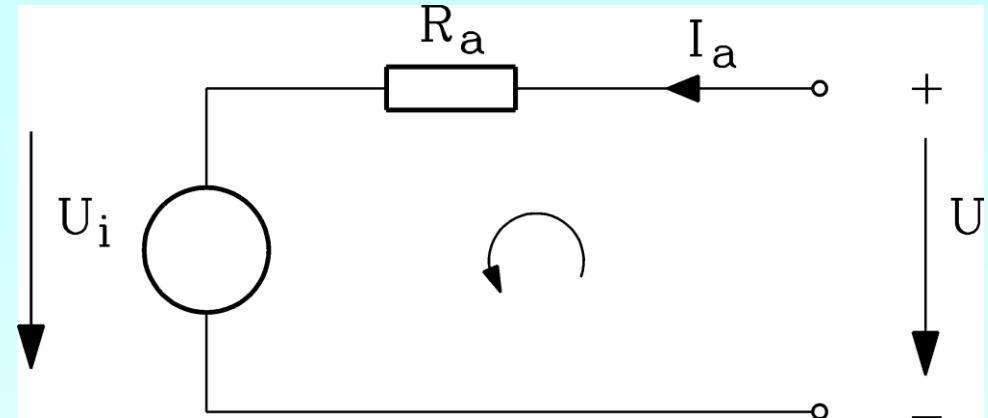
- **Merkformel:**

$$\underline{\underline{M_e = k \cdot I_a \cdot \Phi}}$$

Ersatzschaltbild der Gleichstrom-Ankerwicklung



Generatorbetrieb (EZS)



Motorbetrieb (VZS)

Ersatzschaltbild der Ankerwicklung besteht aus:

- Gleichspannungsquelle U_i (induzierte Spannung)
- Innenwiderstand = Ankerwicklungswiderstand R_a
- Bürstenspannungsfall $U_b = \text{ca. } 2 \text{ V}$ wird hier vernachlässigt

- **Maschengleichung im VZS:**

$$\underline{\underline{U = U_i + I_a R_a (+U_b)}}$$

Zusammenfassung

Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

- Luftspaltleistung = induzierte Ankerspannung x Ankerstrom
- Luftspaltleistung $\sim$ Drehmoment x Drehzahl
- Drehmoment direkt aus Ersatzschaltbild berechenbar



3. Gleichstrommaschinen

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

3.2 Ankerwicklung

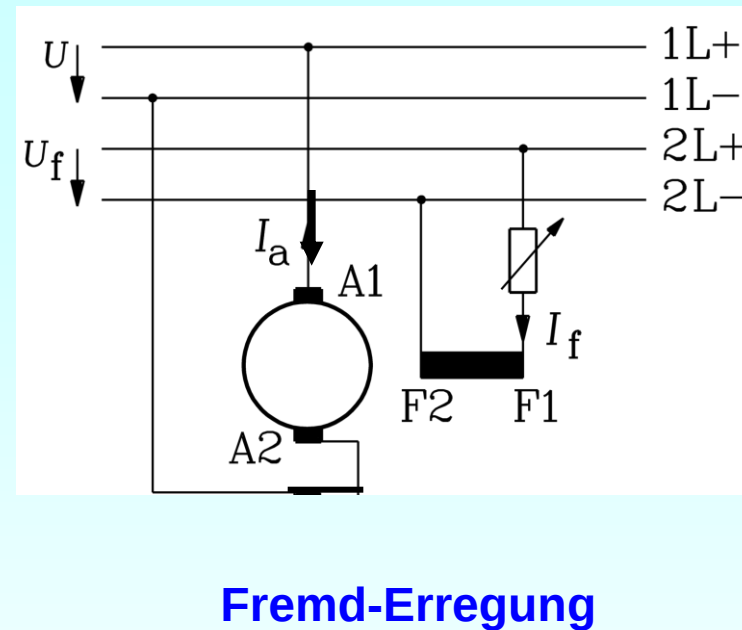
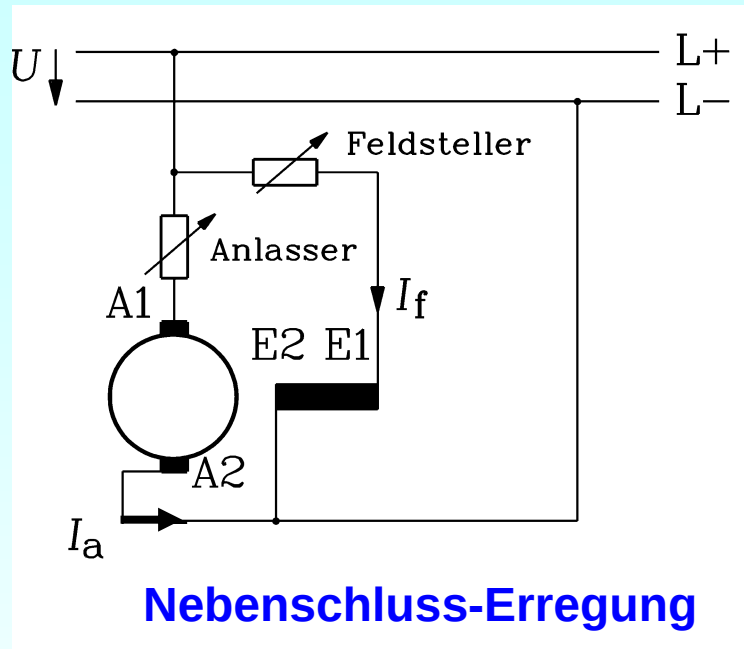
3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

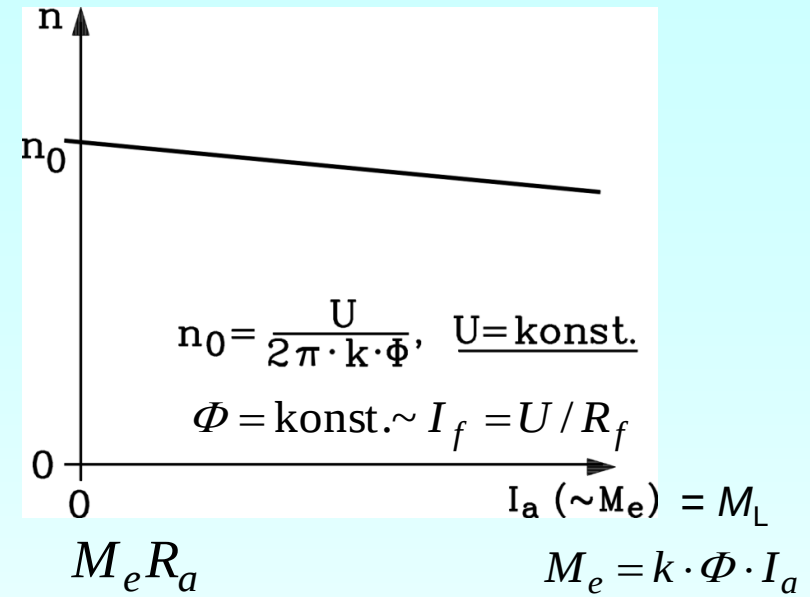
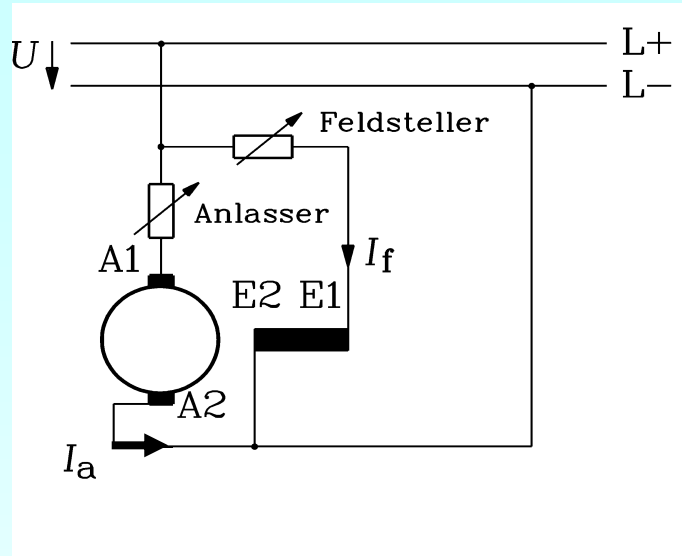
Nebenschluss-Schaltung des Gleichstrommotors



- Gleichspannungsnetz U mit Klemmen L+ und L-
- **Erregerspulen** (Klemmen E1-E2) mit **Feldsteller-Widerstand**: Veränderung des Feldstroms I_f (= des Magnetfelds und damit Hauptflusses Φ) **UNABHÄNGIG** vom Ankerstrom; wirkt deshalb wie eine **FREMDERREGUNG**!
- **Ankerklemmen** (Bürsten A1-A2) an Netzspannung U = Ankerspannung U_a .

Wir verwenden das VZS!

$n(M)$ -Kennlinie des Gleichstrom-Nebenschlussmotors



$$U = U_i + I_a R_a = k \Omega_m \Phi + \frac{M_e}{k \Phi} R_a \rightarrow \underline{\underline{\Omega_m}} = \frac{U}{k \Phi} - \frac{M_e R_a}{(k \Phi)^2} = 2\pi n$$

$$\underline{\underline{n}} = \frac{U}{2\pi \cdot k \Phi} - \frac{R_a}{2\pi \cdot (k \Phi)^2} \cdot \underline{\underline{M_e}} = n_0 - \frac{R_a}{2\pi \cdot (k \Phi)^2} \cdot \underline{\underline{M_L}}$$

Stationärer Betrieb ($n = \text{konst.}$): Belastungsmoment $M_L = \text{Motormoment } M_e$

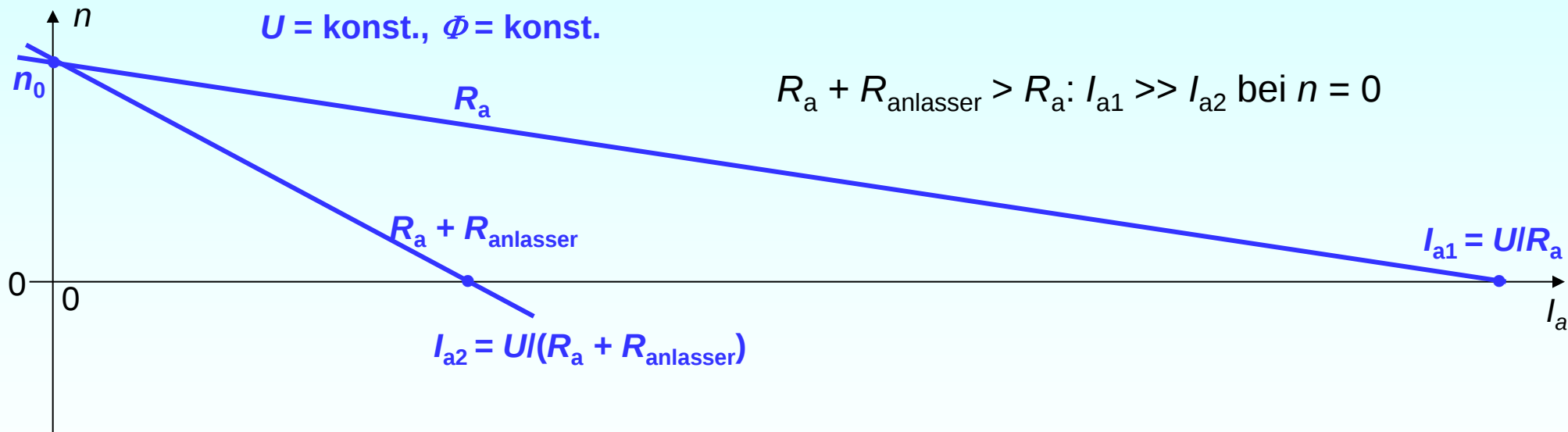
Leerlauf: $M_L = 0$: „**Leerlaufdrehzahl**“:

$$\underline{\underline{n_0}} = \frac{U}{2\pi \cdot k \Phi}$$

Anlasswiderstand im Ankerkreis zum Anfahren

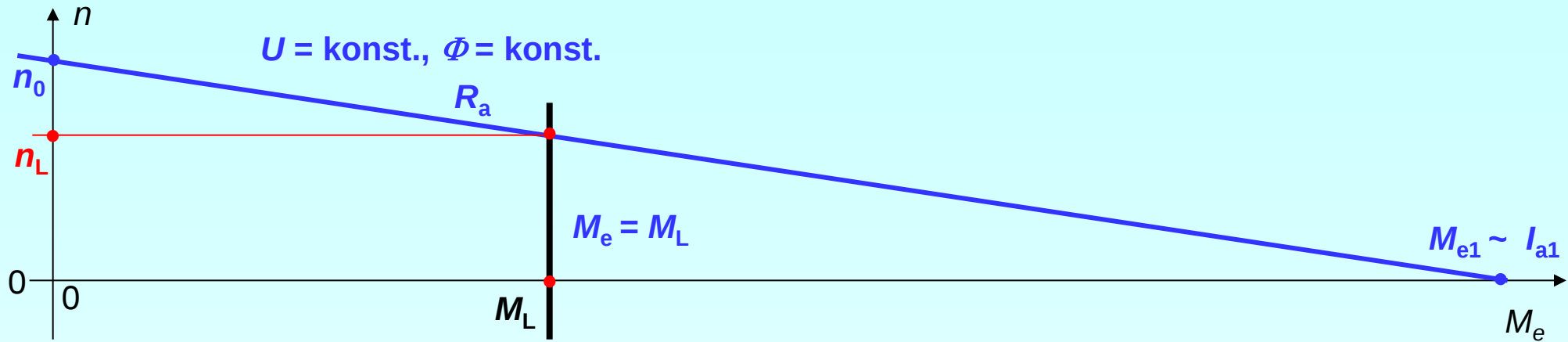
$$n = \frac{U - I_a R_a}{2\pi k \cdot \Phi(I_f)} = \frac{U}{2\pi k \cdot \Phi} - \frac{I_a R_a}{2\pi k \cdot \Phi} \Rightarrow n = n_0 - \frac{R_a + R_{\text{anlasser}}}{2\pi k \cdot \Phi} \cdot I_a$$

Leerlaufdrehzahl n_0 konstant, **Neigung** von $n(I_a)$ wird größer mit steigendem R_{anlasser} , (= Anfahren mit "Anlasser,,)



- **Einschalten** des Motors bei $n = 0$, (daher $U_i = 0$): $I_{a1} = U/R_a$ sehr groß, da R_a sehr klein. Würde Motor zerstören, daher **Vorwiderstand (Anlasser)** zur Strombegrenzung nötig.

Gleichstrommotor am Batterienetz



- Auf welche Drehzahl läuft Motor hoch ?

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

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

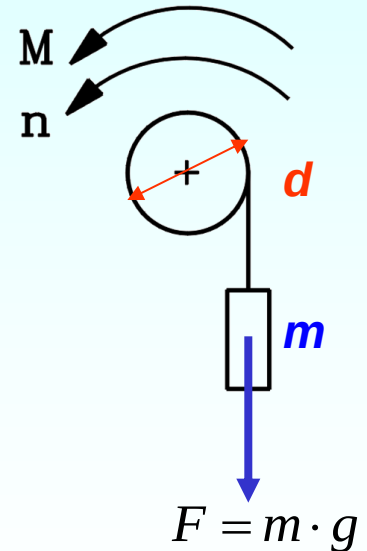
Beispiel: Last heben:

Lastmoment ist UNabhängig von der Drehzahl:

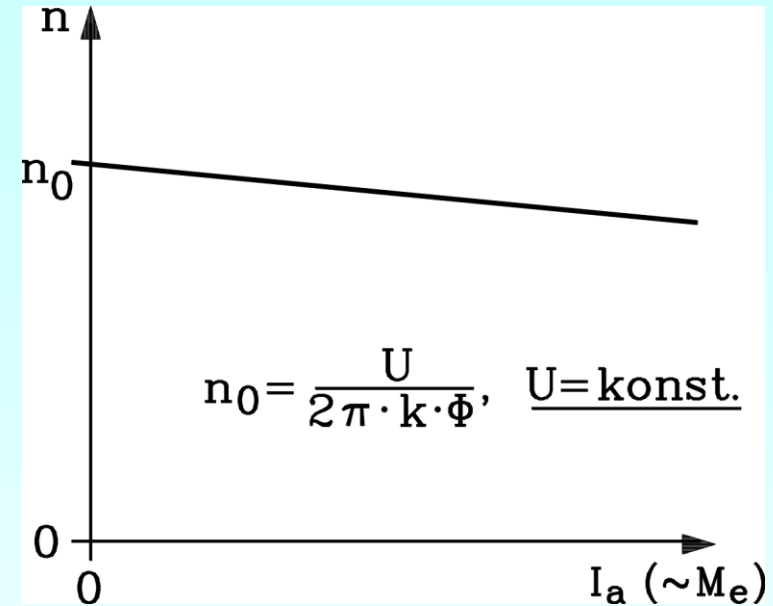
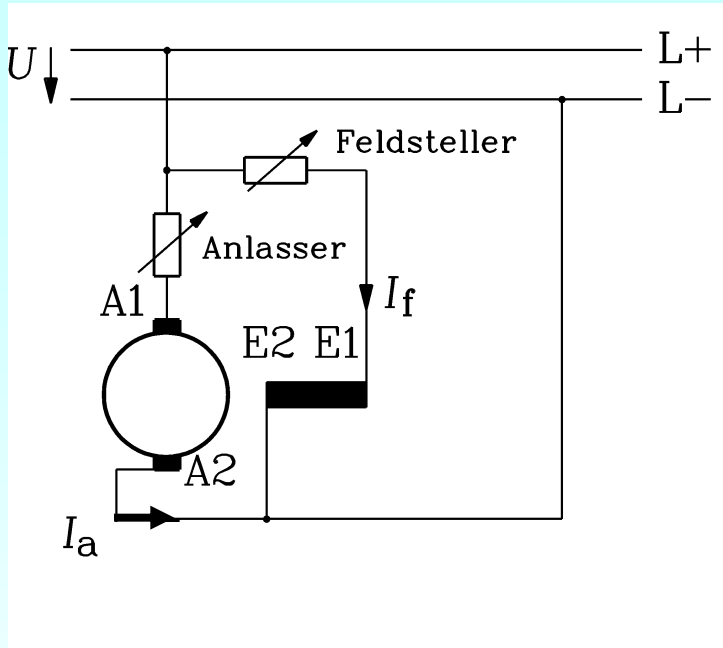
$$M_L = m \cdot g \cdot \frac{d}{2}$$

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

Die Lastdrehzahl n_L ist kleiner als die Leerlaufdrehzahl n_0 !



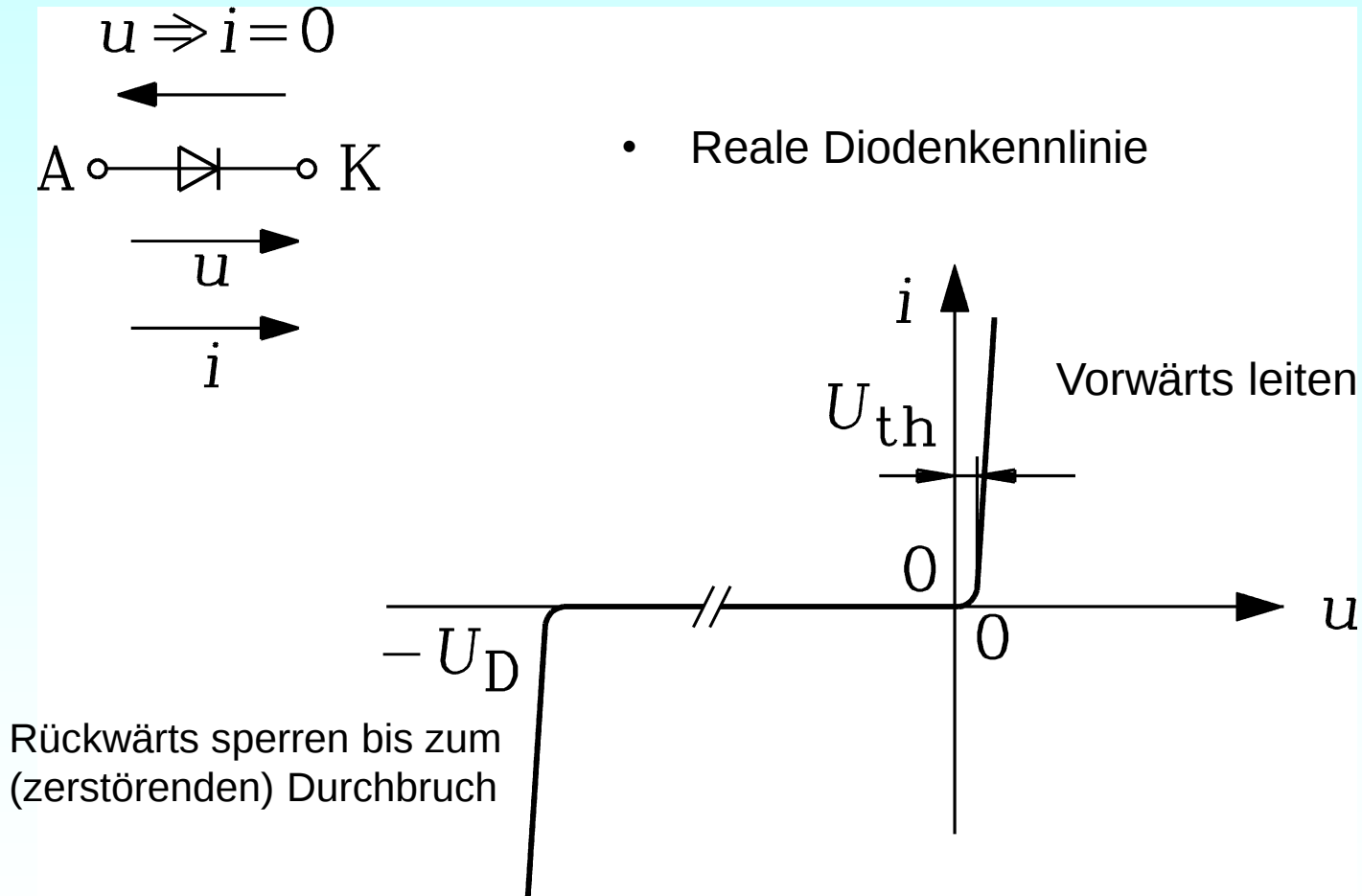
Gleichstrom-Nebenschluss-Motorkennlinie $n(M_e)$



- $n(M_e)$ -Kennlinie:
$$\underline{\underline{\Omega_m}} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_e R_a}{(k\Phi)^2} = 2\pi n$$
- **Leerlauf:** $M_L = 0$, daher $M_e = 0$, daher $I_a = 0$: **Drehzahl ist maximal** = Leerlaufdrehzahl n_0 !
Senkt man I_f und damit Φ , so steigt n_0 : DREHZAHL-ERHÖHUNG möglich.
- Bei **Belastung** $M_L > 0$, daher $M_e > 0$, daher $I_a > 0$; es SINKT die Drehzahl ab, aber wenig, da R_a klein ist !

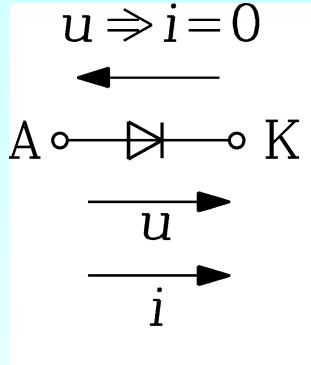
Die Diode

- Wirkungsweise der Diode (idealisiert: $U_{th} = 0.7 \text{ V} \approx 0$, $U_D \rightarrow \infty$):

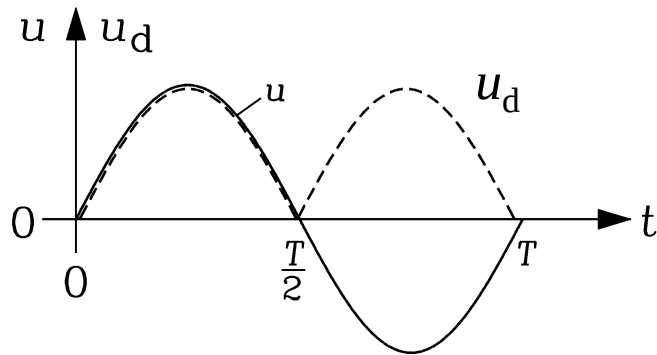


Diodengleichrichter für Einphasen-Wechselspannung (H-Brücke bzw. GRAETZ-Brücke)

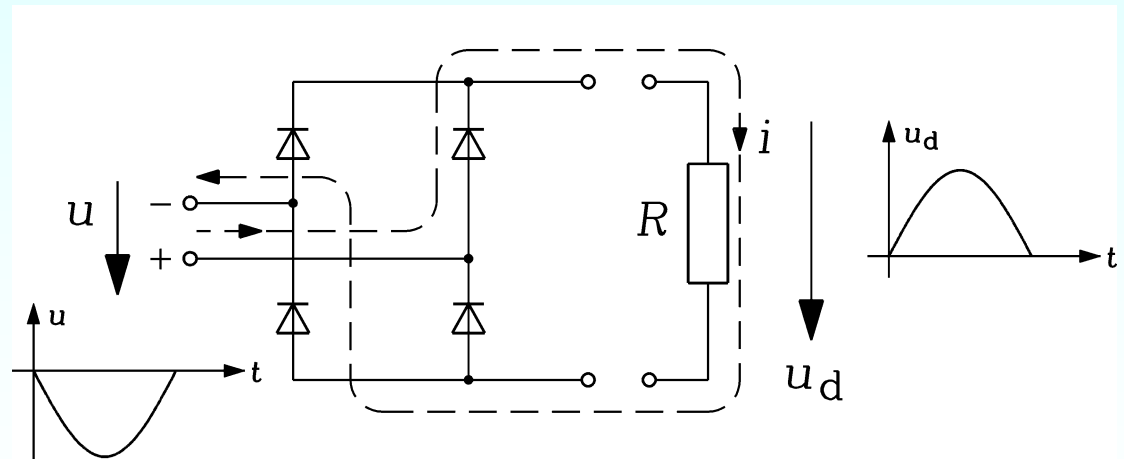
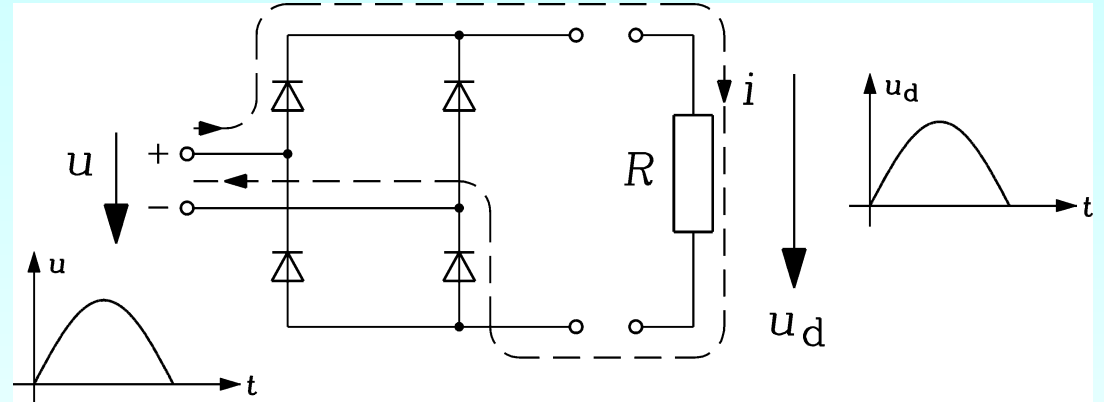
- Idealisierte Diode:



- Wechselspannung u und gleichgerichtete Spannung u_d :

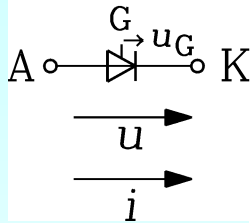


- Wirkungsweise des Diodengleichrichters:



Thyristorgleichrichter für Einphasen-Wechselspannung

- Wirkungsweise des Thyristors (idealisiert):



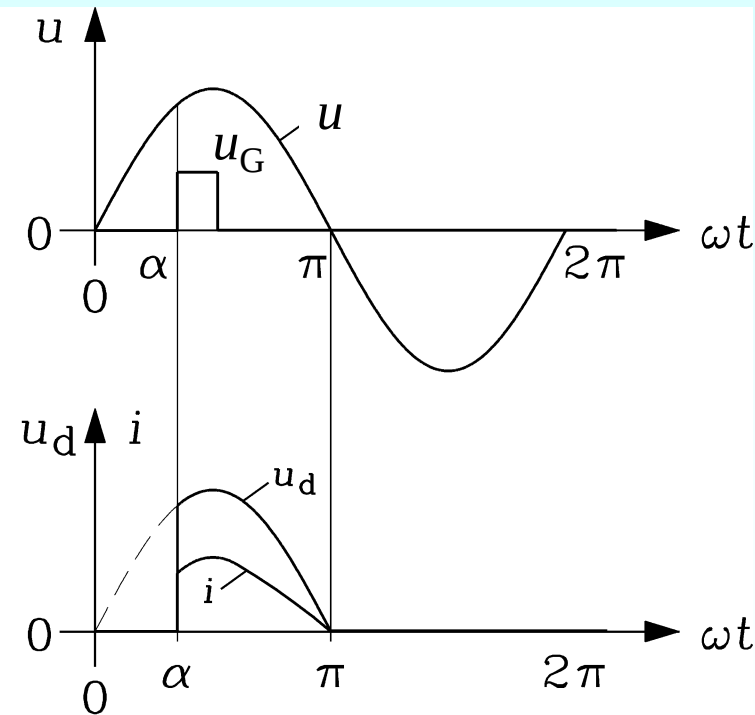
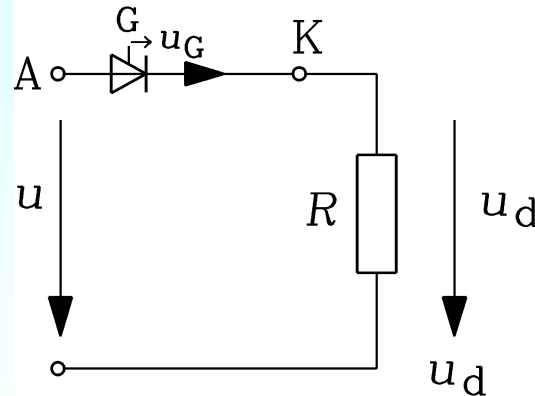
$$u > 0 \wedge u_G > 0 \Rightarrow i > 0$$

$$u > 0 \wedge u_G \leq 0 \Rightarrow i = 0$$

$$u < 0 \Rightarrow i = 0$$

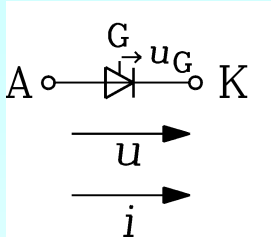
Strom i fließt weiter, auch wenn u_G wieder abgeschaltet wird!

- Wechselspannung u , Gate-Spannung u_G und gleichgerichtete Spannung u_d :



Thyristorgleichrichter: GRAETZ-Brücke

- Wirkungsweise des Thyristors (idealisiert):

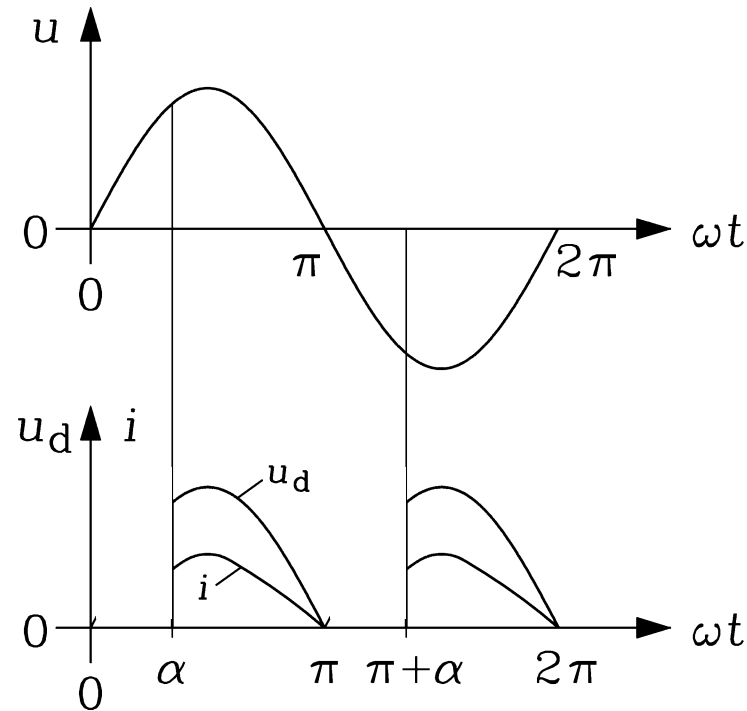
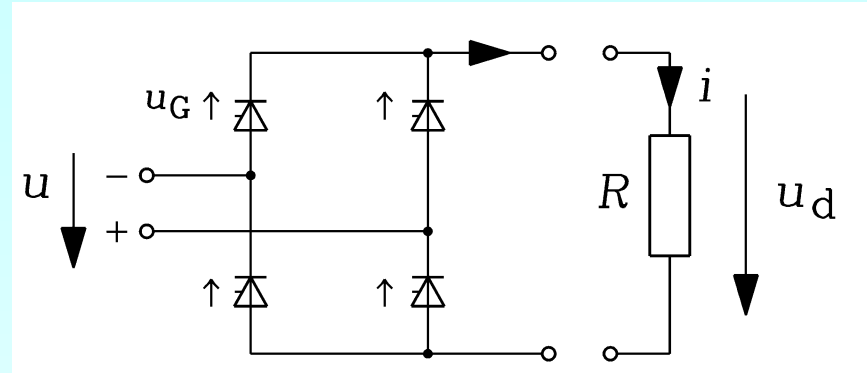


$$u > 0 \wedge u_G > 0 \Rightarrow i > 0$$

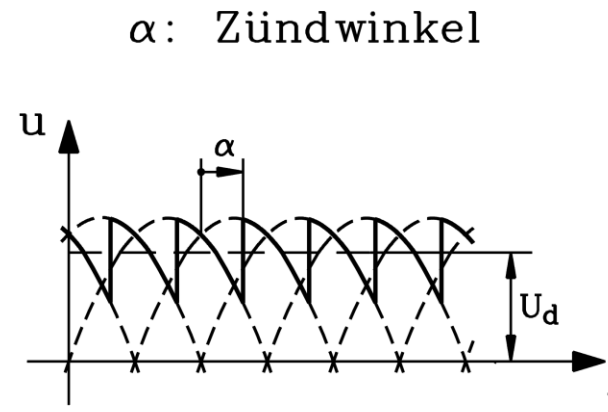
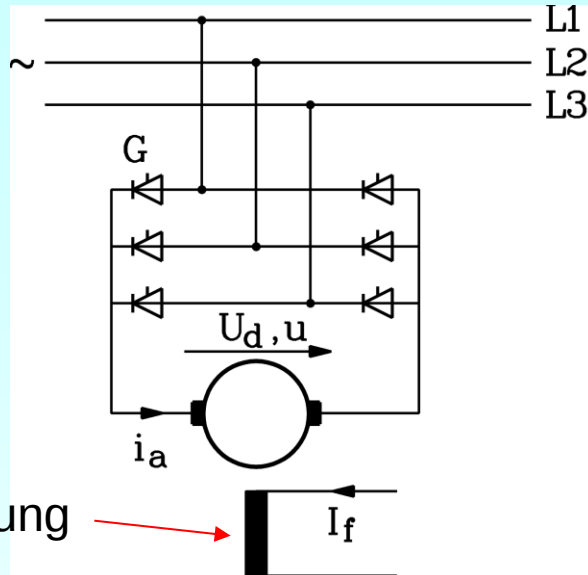
$$u > 0 \wedge u_G \leq 0 \Rightarrow i = 0$$

$$u < 0 \Rightarrow i = 0$$

- Thyristorgleichrichter in Brückenschaltung: α : „Zündwinkel“
- Wechselspannung u , gleichgerichteter Strom i und gleichgerichtete Spannung u_d : „Phasenanschnittsteuerung“:
- Veränderlicher Mittelwert von u_d !



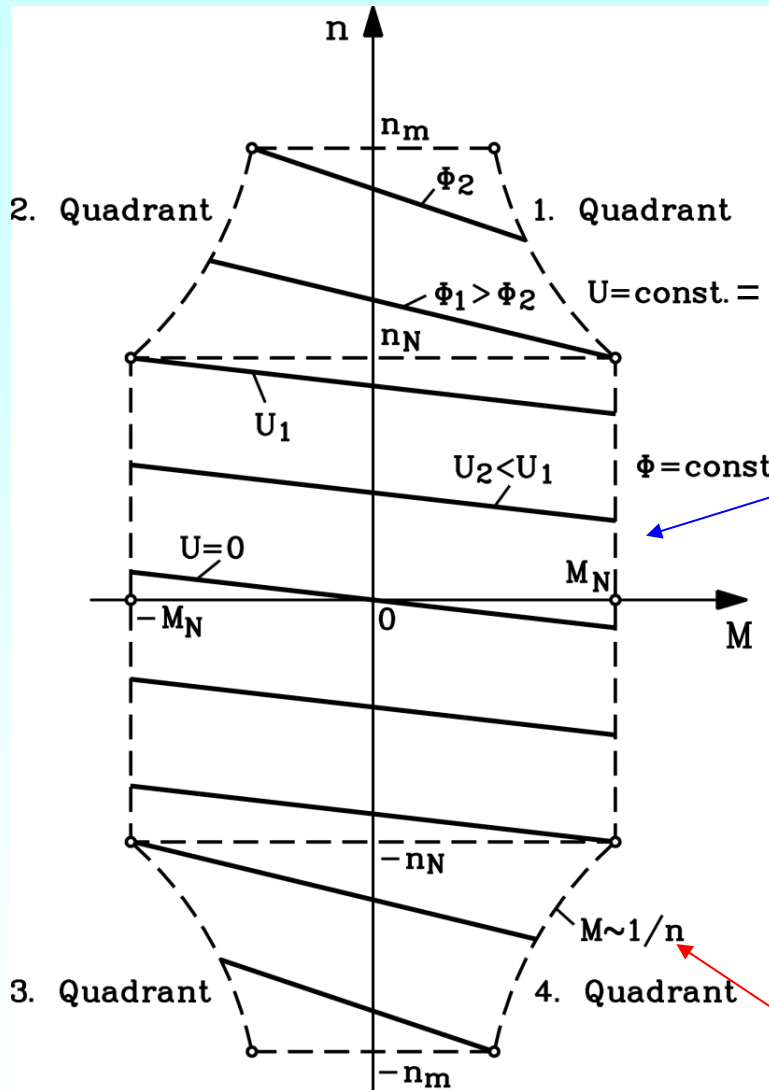
Gleichstrommotor fremderregt am **Drehstromnetz**



Schaltung für nur eine
Ankerstromrichtung!

- “Drehspannung” u_U, u_V, u_W (Klemmen L1, L2, L3): Über sechspulsigen Brücken-Gleichrichter in “**wellige**” Gleichspannung U_d als **Ankerspannung** umgeformt.
- Stromrichterventile (**Thyristoren**) mit verzögertem Einschaltzeitpunkt (“**Schaltwinkel**” α) über Zündimpuls am Gate G erlauben eine Absenkung von U_d .
- Bei $\alpha = 0^\circ$ ist $U_d = U_{d,max}$, maximal, die Thyristoren wirken wie **Dioden**.
- “Ventile” lassen Strom nur in **EINER** Richtung fließen ($+i_a$) und **SPERREN** in der anderen Richtung. Für $-i_a$ ist ein **zweiter antiparalleler** Gleichrichter nötig.

Drehzahländerung: Vier-Quadrantenbetrieb



• $n(M)$ -Kennlinie:

$$n = \frac{U}{2\pi k \Phi} - \frac{M_e R_a}{2\pi (k \Phi)^2}$$

$M_e \approx M$: Wellenmoment

• Ankerspannungsbereich:

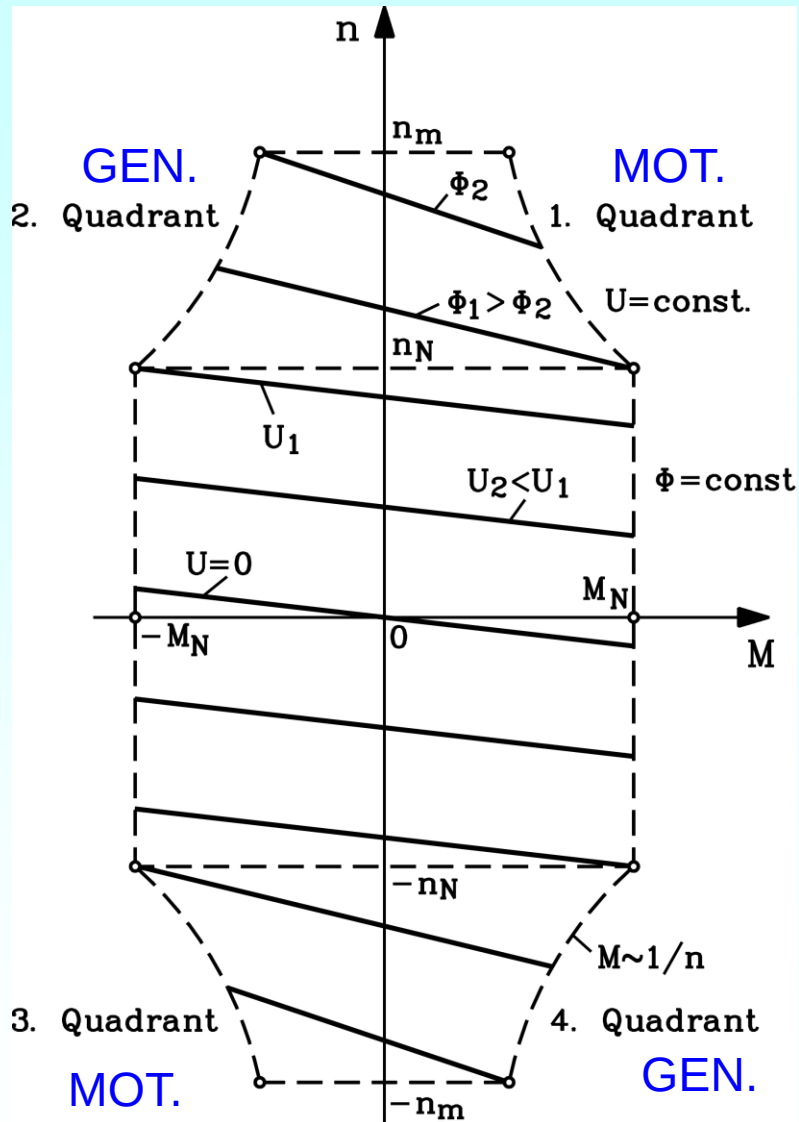
Weil über α des Stromrichters $U = U_d$ variabel ist, kann die **Drehzahl** über variables U_d **verändert** werden zwischen $+U_{d,max}$ und $-U_{d,max}$. Bei $-U_d$ kehrt sich die Drehzahl um (**Richtungswechsel**).

• $M_{e,max} = k \cdot \Phi \cdot I_{a,max} = M_N$ (hier: $I_{a,max} = I_{a,N}$)

• **Feldschwächbereich:** Die Drehzahl $n_0 = U_{d,max} / (2\pi k \Phi)$ kann erhöht werden, wenn Φ verringert wird. Es nimmt aber $M_{e,max} = k \cdot \Phi \cdot I_{a,max} = k \cdot \Phi \cdot I_{a,N} \sim 1/n$ ab.



Vier-Quadrantenbetrieb (2)



- Umkehr des Drehmoments von $+M$ zu $-M$:
Die **Stromrichtung kehrt sich um**: $-I_a$.
- Daher ist
 $P_e = U \cdot (-I_a) < 0$: **GENERATOR-Betrieb** (2. Quad.)
- 1. und 3. Quadrant: **MOTOR-Betrieb**
2. und 4. Quadrant: **GENERATOR-Betrieb**
- **GENERATOR:**
Bei $U = \text{konst.}$ und $-M$ STEIGT die Drehzahl an !

$$n = \frac{U}{2\pi k\Phi} - \frac{M_e R_a}{2\pi(k\Phi)^2}$$

Zusammenfassung

Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

- Parallelschaltung von Anker- und Erregerwicklung = Nebenschluss
- Leicht fallende (= nahezu konstante) Drehzahl über dem Lastmoment („Nebenschlussverhalten“)
- Drehzahländerung über die Ankerspannung oder den Hauptfluss
- Motorbetrieb am Drehstromnetz: Thyristorgleichrichter für veränderliche Ankergleichspannung
- Leistungselektronische Schaltungen werden genauer im 2. Vorlesungsteil erklärt
- Vier-Quadrantenbetrieb (Generator/Motor, pos./neg. Drehzahl) mit Ankerspannungsstellbereich und Feldschwächbereich
- Im Feldschwächbereich stärkere Neigung der n -Kennlinie = Motor schwächer

3. Gleichstrommaschinen

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

3.2 Ankerwicklung

3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

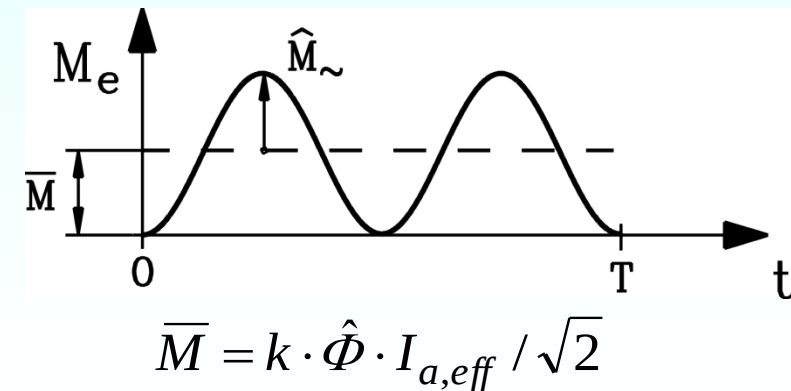
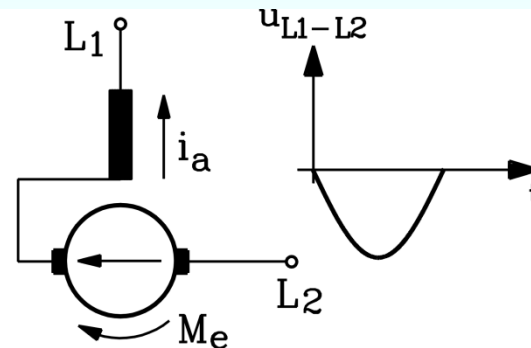
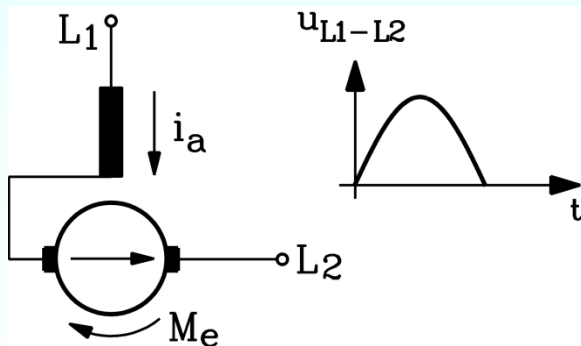
3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

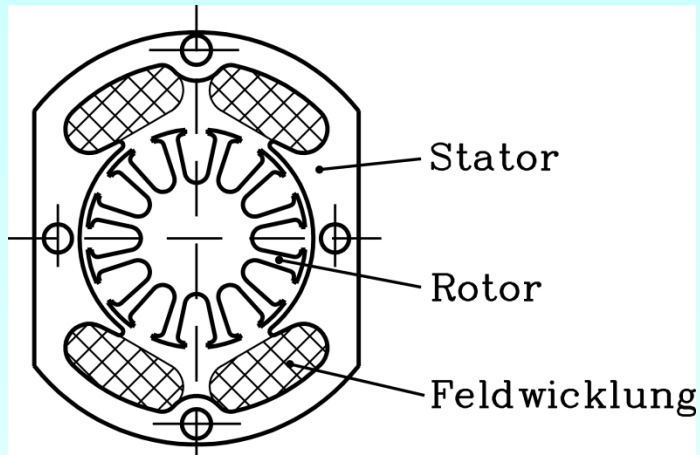
3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

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 Φ , daher pulsiert Φ im Takt mit i_a : Φ 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 $2f$** .



Universalmotor



- Kleiner, zweipoliger Motor für hohe Drehzahlen (typisch bis 30 000 /min), **Billigausführung** für Massenproduktion, keine Wendepole (geringe Betriebsstundenzahl in Haushaltsgeräten).
- Betrieb am Haushalts-Einphasen-Netz 230V, daher ist Ankerstrom Wechselstrom mit Netzfrequenz $f = 50 \text{ Hz}$. $i_a(t) = \hat{I}_a \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

- Ankerwicklung und Feldwicklung in Serie geschaltet (**Reihenschluss**). Der Ankerstrom ist auch Erregerstrom für den Fluss $\Phi \sim i_a$. Beide wechseln gleichzeitig ihre Polarität mit 50 Hz und erzeugen daher ein positives, **aber mit $2f = 2 \times 50 = 100 \text{ Hz}$ PULSIERENDES** Moment.

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

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

- **Mittelwert** $\bar{M} = k \cdot \hat{\Phi} \cdot I_{a,\text{eff}} / \sqrt{2}$ kann **genutzt** werden.

Zusammenfassung

Wechselstrom-Kommutatormaschinen

- Serienschaltung von Anker- und Erregerwicklung = Reihenschluss
- Ankerstrom = Erregerstrom: Auch bei Stromumkehr positives Drehmoment
- Reihenschluss-Motor auch am Wechselstromnetz einsetzbar als „Universalmotor“, aber pulsierendes Drehmoment
- Momentenpulsation mit doppelter Speisefrequenz
- Einsatz i. A. nur bei Kleinmotoren (z. B. Staubsauger, Handbohrmaschine, ...)
- Ausnahme: Ältere Lokomotivantriebe:
Wechselstrom-Reihenschluss bis ca. 1 MW: Deshalb hat das Bahnnetz meist niedrigere Frequenz (in D, CH, A, Norwegen 16.7 Hz = 50/3 Hz)