

# Elektrische Antriebssysteme und Aktorik

## Teil 1 – Leistungselektronik, Maschinen und Labor

Christoph Tenten

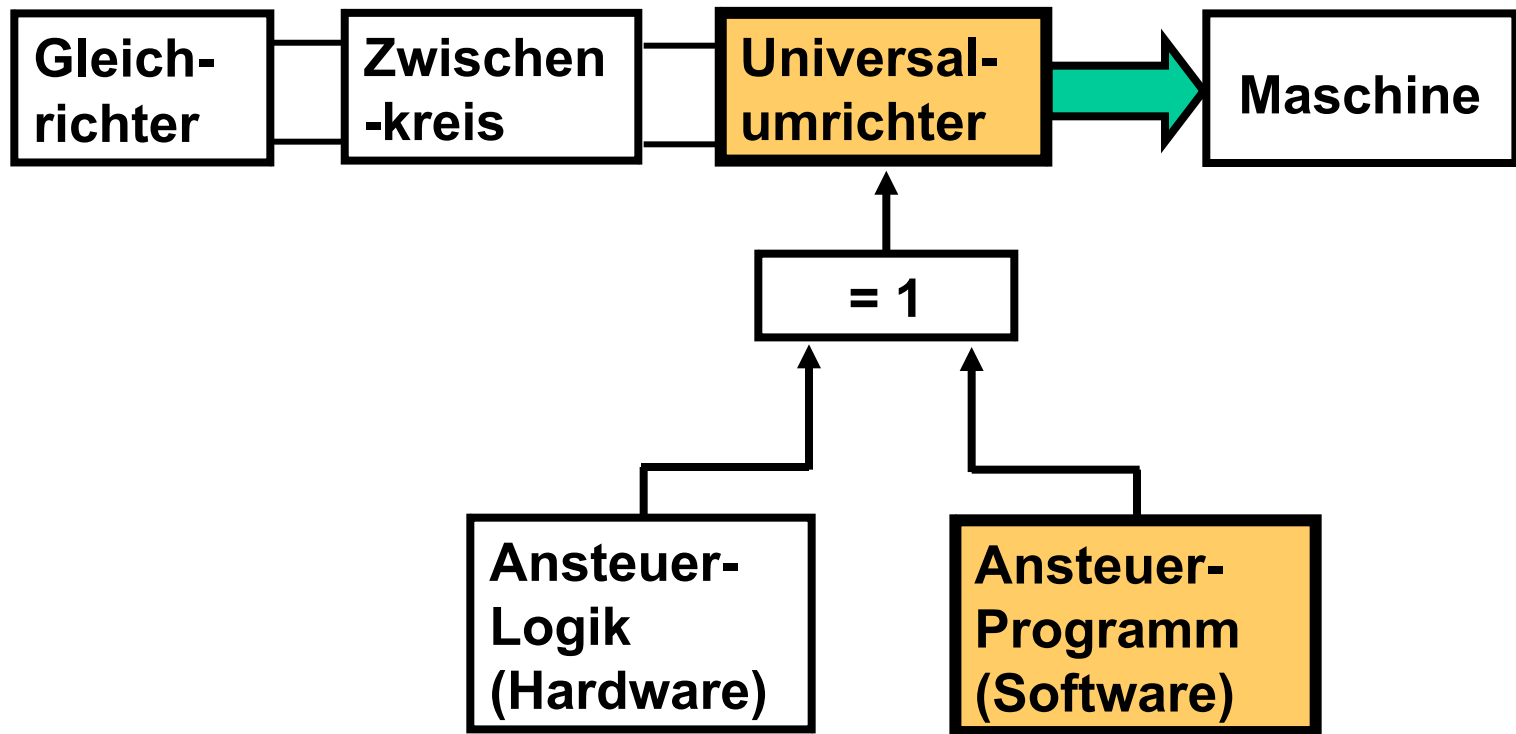
[www.dhbw-stuttgart.de](http://www.dhbw-stuttgart.de)

# **Elektrische Maschinen ersetzen die Muskelkraft, wandeln also elektrische Energie in mechanische.**

## **Ziel der Vorlesung:**

- **Kennenlernen unterschiedlicher elektrischer Energiewandler**
- **Erzeugung von Drehmoment und Leistung**
- **Steuerverfahren von elektrischen Maschinen**
- **Einblicke in die Leistungselektronik**
- **Dynamisches Verhalten von elektrischen Maschinen**
- **Modellerstellung von elektrischen Maschinen (Scilab/Matlab-Simulink)**

# Moderne Antriebstruktur



# Antriebstechnik

Gleichstrom-  
motor-  
Ansteuerung

DASM  
DSM-  
Ansteuerung

DC- Servo-  
motor-  
Ansteuerung

Schrittmotor-  
Ansteuerung

= 1

Universalumrichter

H- Brücke

Frequenz-  
umrichter

Stellglied

Stellglied

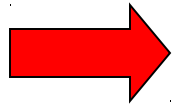
Gleichstrom-  
motor

DASM/ DSM

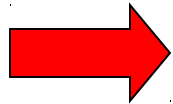
DC- Servo-  
motor

Schrittmotor

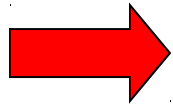
# Grundlagen elektrischer Maschinen



Hauptgleichungen



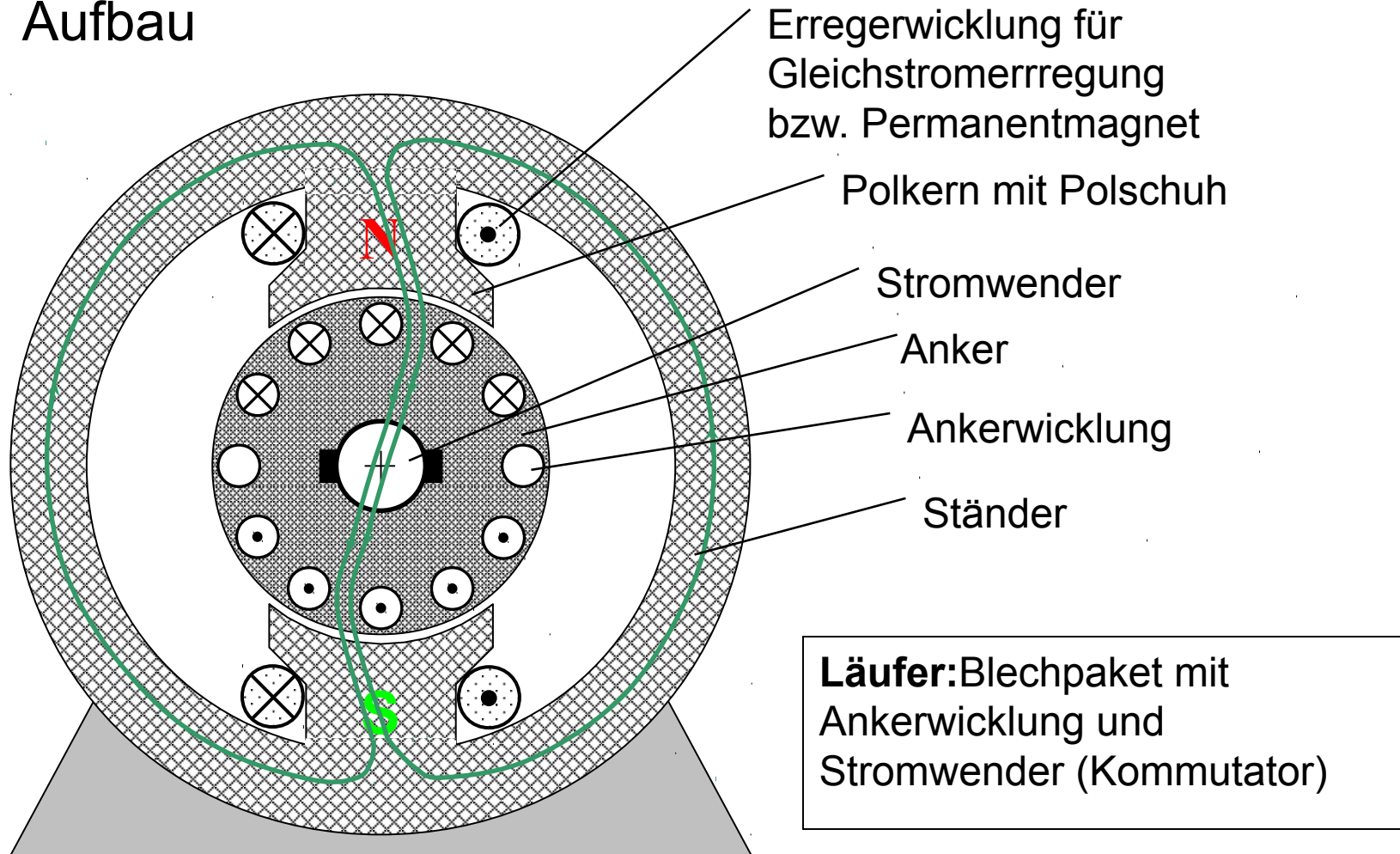
Gleichstrommaschine



Elektronikmotor

# Grundlagen der Gleichstrommaschine

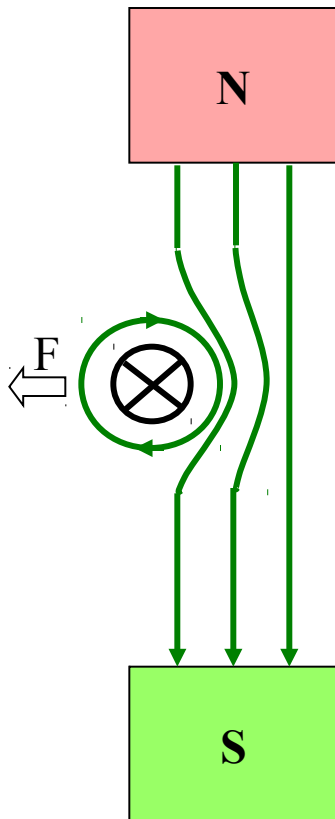
Aufbau



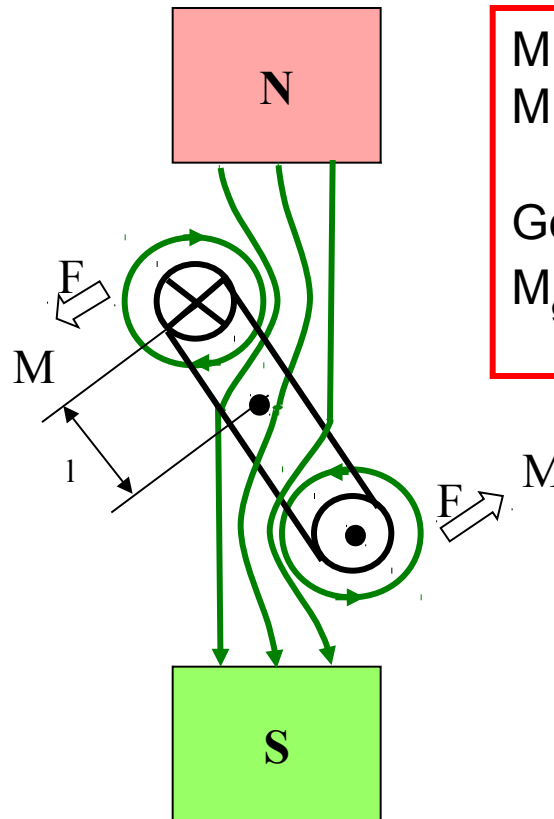
# Grundlagen der Gleichstrommaschine

## Funktionsprinzip

Kraft F



Drehmoment M

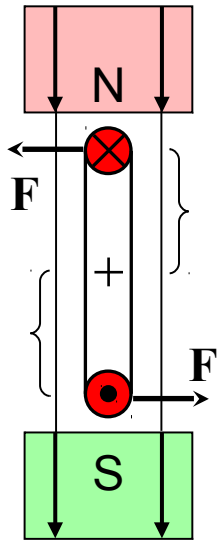


$$M = \text{Kraft} \times \text{Hebelarm}$$
$$M = F \times l$$

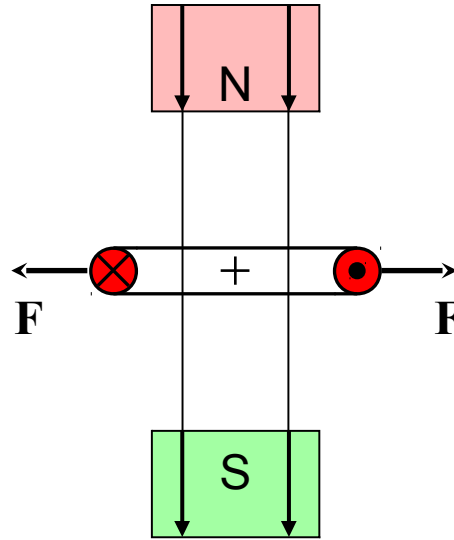
$$\text{Gesamtes Moment } M_g$$
$$M_g = 2 \times M = 2 \times F \times l$$

# Grundlagen der Gleichstrommaschine

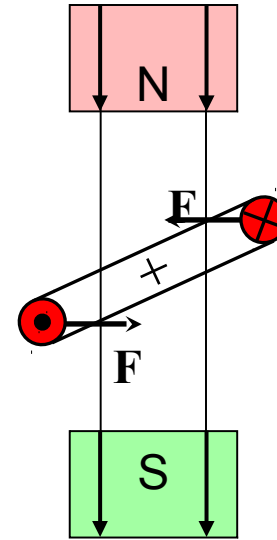
## Entstehung der Drehbewegung



Leiterschleife  
beginnt sich zu  
drehen



Leiterschleife kommt  
zum Stillstand  
→ Stromwendung  
notwendig



nach der Stromwendung  
dreht sich die Leiterschleife  
weiter  
→ Stromrichtung unter  
dem Pol ist immer gleich

**Drehrichtungsumkehr: → Ankerstrom umpolen**



# Grundlagen der Gleichstrommaschine

## Drehmomentengleichung

### Kraft auf stromdurchflossenen Leiter

$$F = B * I_A * l$$

### Drehmoment eines Leiters

$$M = F * r = B * I_A * l * r$$

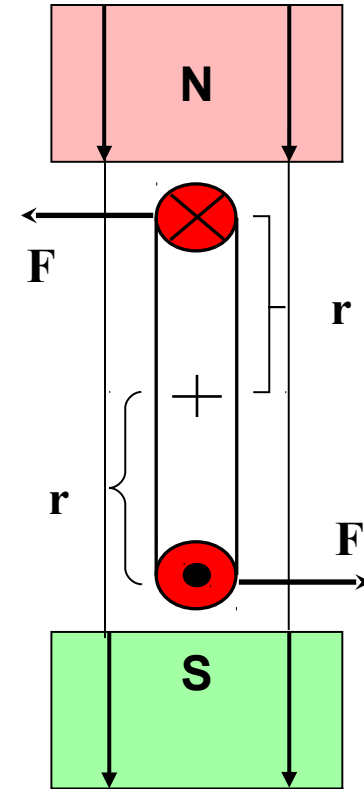
### Drehmoment aller Leiter (Z= Leiterzahl)

$$M = B * I_A * l * r * Z$$

mit  $B = \phi / A$

$$M = \underbrace{l * r * Z / A}_{C_M} * I_A * \phi$$

$C_M$  Maschinenkonstante, für  
das Drehmoment



$$M = C_M * I_A * \phi$$

# Grundlagen der Gleichstrommaschine

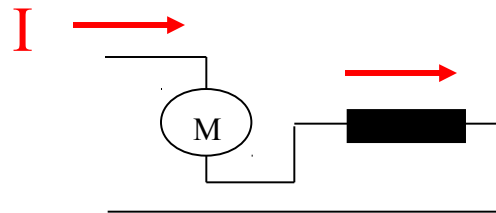
## Konsequenzen aus Drehmomentengleichung

$$M = C_M * I_A * \phi$$

gilt für alle Maschinen

Nebenschlussmaschine:  $\rightarrow \phi = \text{Konst.} \rightarrow M \sim I$

Reihenschlussmotor:  $\phi_E = C * I_A \rightarrow M = C_M * C * I_A * I_A$



# Grundlagen der Gleichstrommaschine

## Spannungsgleichung

induzierte Spannung  $U_i$  in einem Leiter

$$U_i = B * l * v$$

$U_i$  bei Z-Leitern

$$U_i = B * l * v * Z \text{ mit } v = 2 * \pi * r * n$$

$$U_i = B * l * 2 * \pi * r * n \text{ mit } B = \phi / A$$

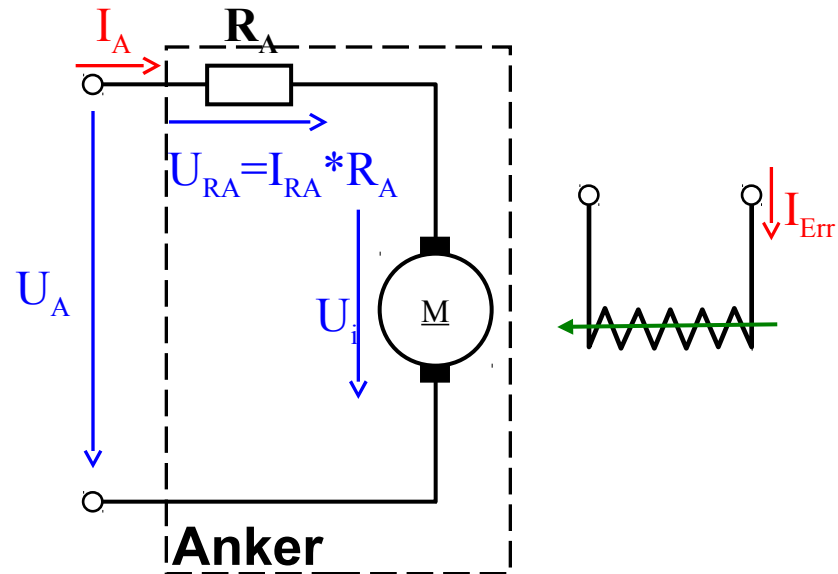
$$U_i = l * 2 * \pi * r * 1/A * n * \phi$$

$$U_i = C_u * n * \phi$$

$C_u$  . Maschinenkonstante

$$U_A = I_A * R_A + U_i$$

Ankerersatzschaltbild der GM



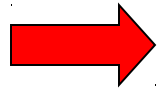
Anker (Leiter) dreht sich im Magnetfeld (Erregerfeld)

→  $U_i$  wird induziert.

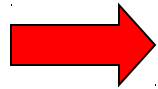
$U_i$  wirkt der angelegten Spannung  $U_A$  entgegen (Pfeilung beachten).

# Grundlagen der Gleichstrommaschine

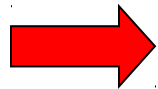
## Konsequenzen aus Spannungsgleichung



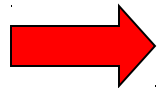
**Drehzahl wird von angelegter Spannung bestimmt**



**Beim Anlauf bestimmen angelegte Spannung und Ankerwiderstand den Anlaufstrom  $\rightarrow$  da  $R_A$  klein  $\rightarrow$  Anlaufstrom hoch**

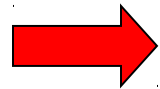


**Bei Belastung sinkt die Drehzahl ab  $\rightarrow$   $U_i$  sinkt  $\rightarrow$  Ankerstrom steigt an**



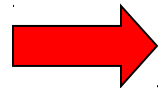
**Drehzahländerung erfolgt über Ankerspannungsänderung**

# Grundgleichungen elektrischer Maschinen



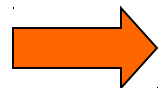
**Momentengleichung**

$$M = C_M * I * \phi$$



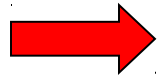
**Spannungsgleichung** (für induzierte Spannung)

$$U_i = C_U * n * \phi$$



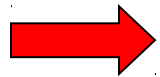
**Mit diesen Gleichungen lassen sich alle elektrischen Maschinen beschreiben**

# Ansteuern der Gleichstrommaschine



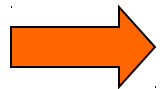
**Wunsch:**

Rechts-Linkslauf → H- Brücke



**Wunsch:**

Drehzahlsteuerung → PWM- Ansteuerung



**Wunsch:**

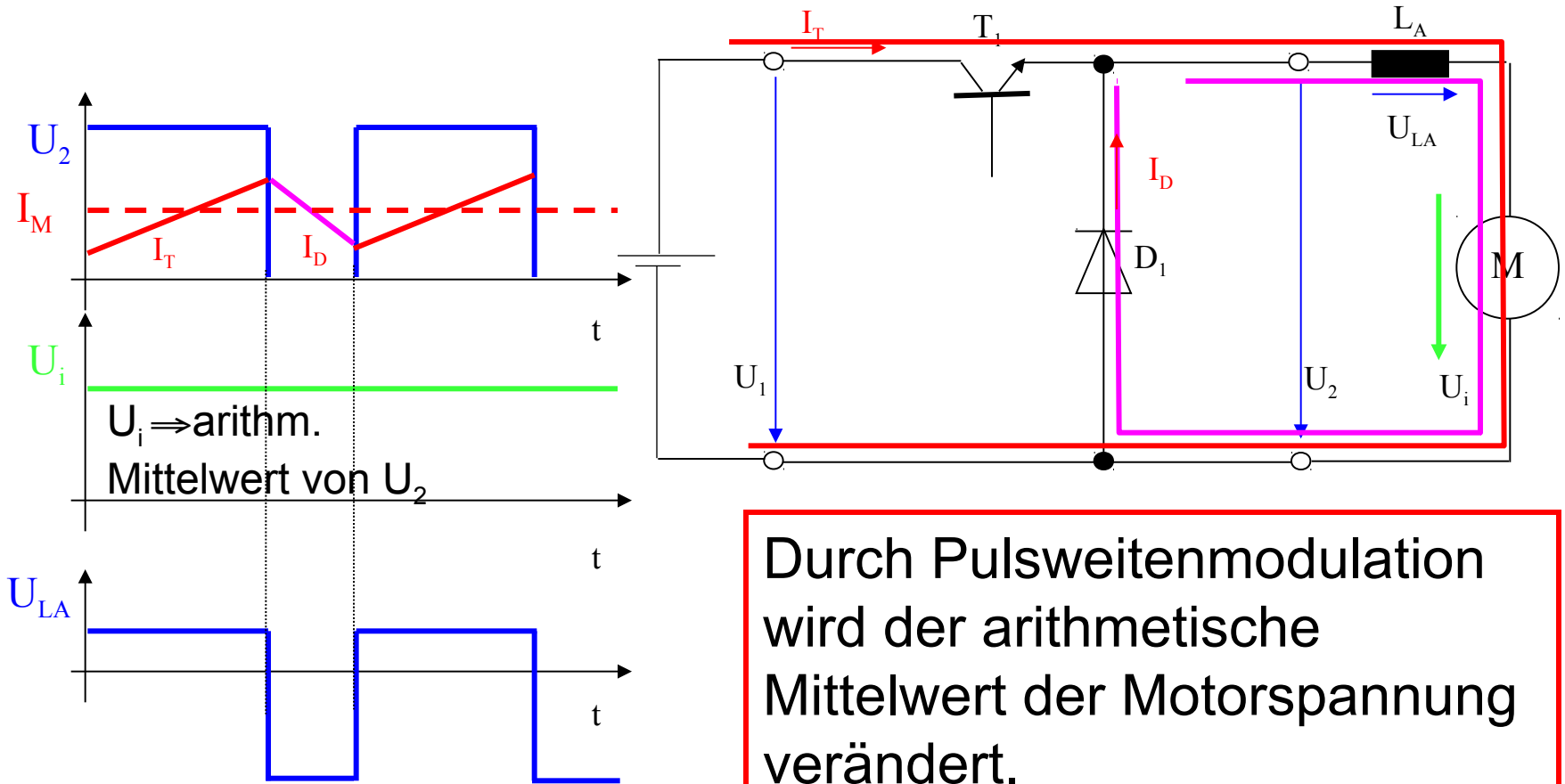
Rechts-Linkslauf und  
Drehzahlsteuerung

→ H- Brücke mit PWM- Ansteuerung



# Grundlagen der Gleichstrommaschine

Motorbetrieb → Tiefsetzsteller (PWM)



Durch Pulsweitenmodulation wird der arithmetische Mittelwert der Motorspannung verändert.

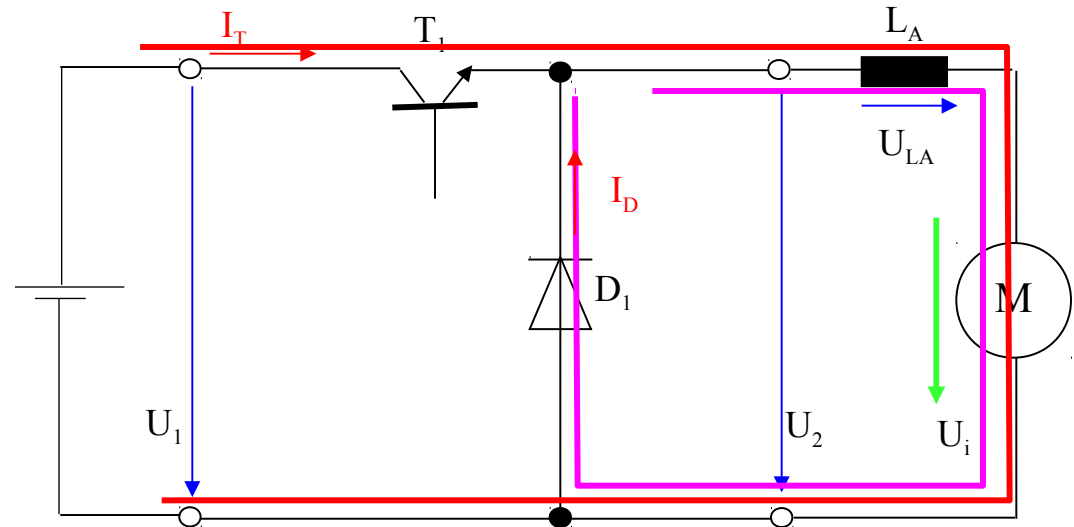
$$U_2 = U_i + U_{LA}$$

$U_{LA} \Rightarrow$  Wechselspannungsanteil von  $U_2$

# Grundlagen der Gleichstrommaschine

Motorbetrieb → Tiefsetzsteller (PWM)

Zum Betrieb des Gleichstromstellers wird  $T_1$  in schneller Folge ein- und ausgeschaltet



Der Strom steigt mit der Steilheit:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_d - U_L}{L}$$

Im ausgeschalteten Zustand ist  $U_L = 0$  V und der Strom  $i_L$  -durch die Drosselspule getrieben- über die Freilaufdiode  $D_1$  weiter.

Für die Stromsteilheit gilt:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-U_L}{L}$$



## Step down Converter Schaltphasen (lückender Betrieb)

Stromaufbau wird bestimmt durch  $U_1 - U_2, L_1$

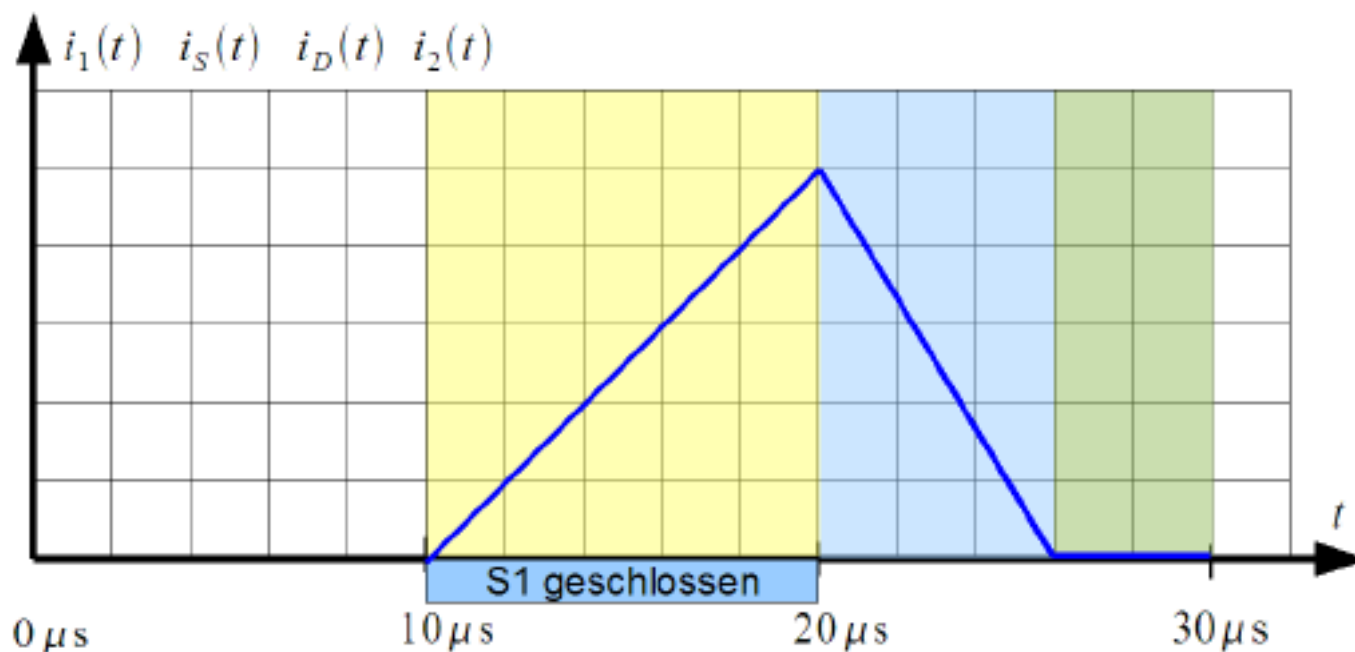
$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_1 - U_2}{L_1}$$

Stromabbau wird bestimmt durch  $U_2 - U_D, L_1$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_2 - U_D}{L_1}$$

Danach ist der Strom 0

$$i_1 = 0$$



## Step down Converter Energie/Leistung (lückender Betrieb)

Die in der Induktivität gespeicherte Energie beträgt  $W_{LI_{max}} = \frac{1}{2} L_1 I_{max}^2$

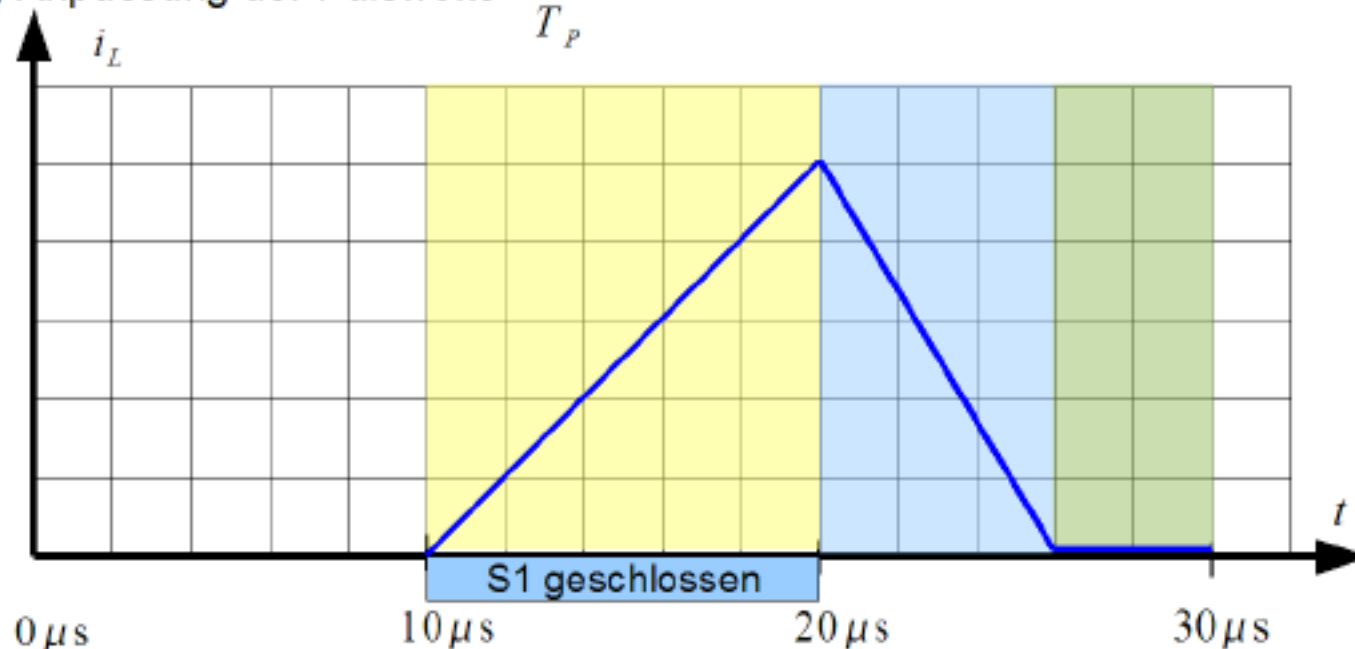
Die Leistung (= Energie / Zeit) beträgt  $P = W_{LI_{max}} f = \frac{1}{2} L_1 I_{max}^2 f$  mit  $f = \frac{1}{T_P}$

Erhöhung der Leistung bedeutet:

a) Erhöhung der Schaltfrequenz  $f$

b) Erhöhung des Maximalstromes  $I_{max}$  durch Verringerung der Induktivität  $L_1$  oder Erhöhung der Eingangsspannung  $U_1$

c) Anpassung der Pulsweite  $\frac{T_1}{T_P}$

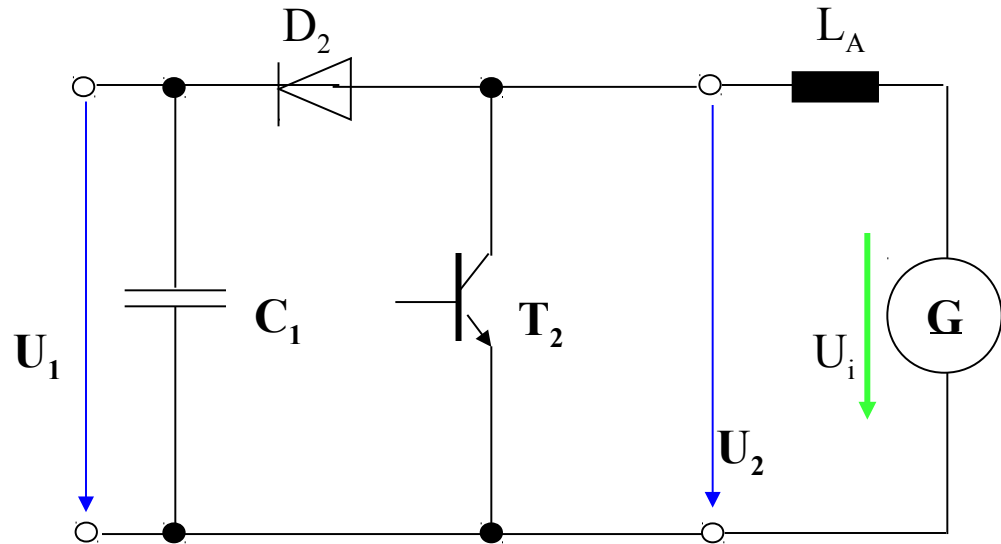


# Grundlagen der Gleichstrommaschine

Generatorbetrieb → Hochsetzsteller (PWM)

## Problem:

Wie kann in den Zwischenkreis zurückgespeist werden, wo  $U_i$  doch betragsmäßig immer kleiner ist als die Zwischenkreisspannung  $U_1$ ?



## Abhilfe:

Hochsetzsteller → DC/DC- Aufwärtswandler

# Grundlagen der Gleichstrommaschine

Generatorbetrieb → Hochsetzsteller (PWM)

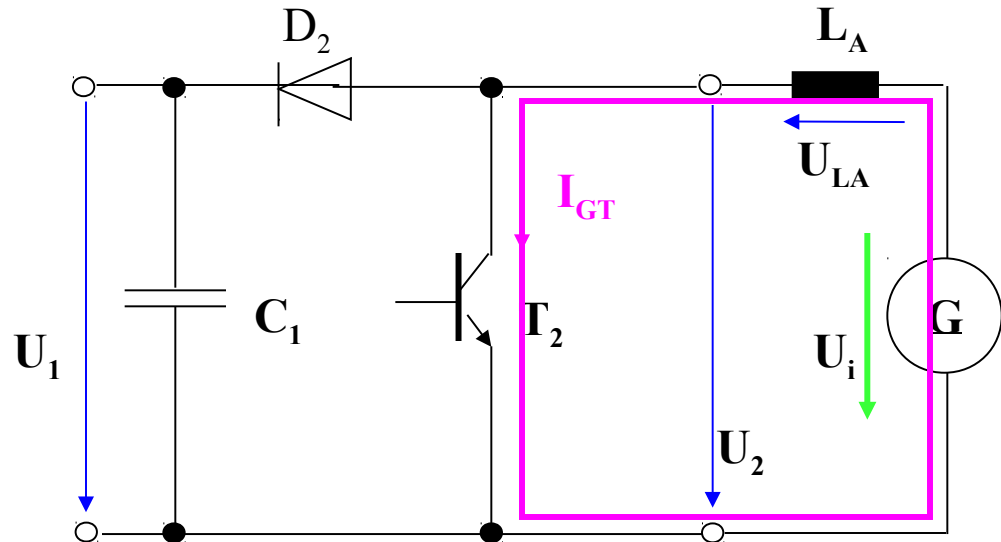
## 1. Phase:

T2 durchgesteuert

→  $U_i$  ist treibende Spannung

→  $I_{GT}$  fließt

→  $L_A$  speichert Energie



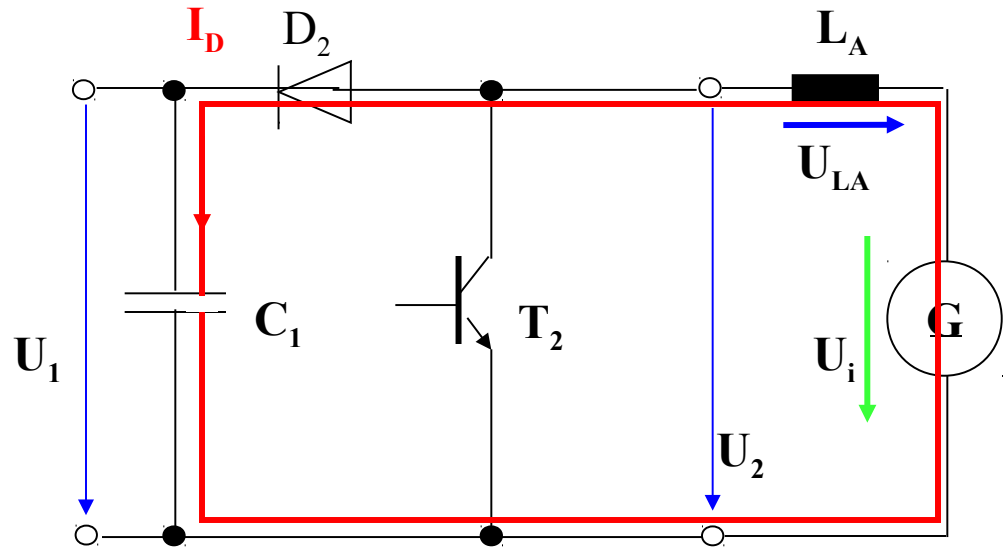
# Grundlagen der Gleichstrommaschine

Generatorbetrieb → Hochsetzsteller (PWM)

## 2. Phase:

T2 sperrt:

- $U_i$  ist treibende Spannung
- $L_A$  gibt gespeicherte Energie ab, wird zur Quelle →  $U_{LA}$  dreht sich um
- $U_i + U_{LA}$  größer als  $U_1$
- $I_D$  fließt
- Rückspeisung in den Zwischenkreis



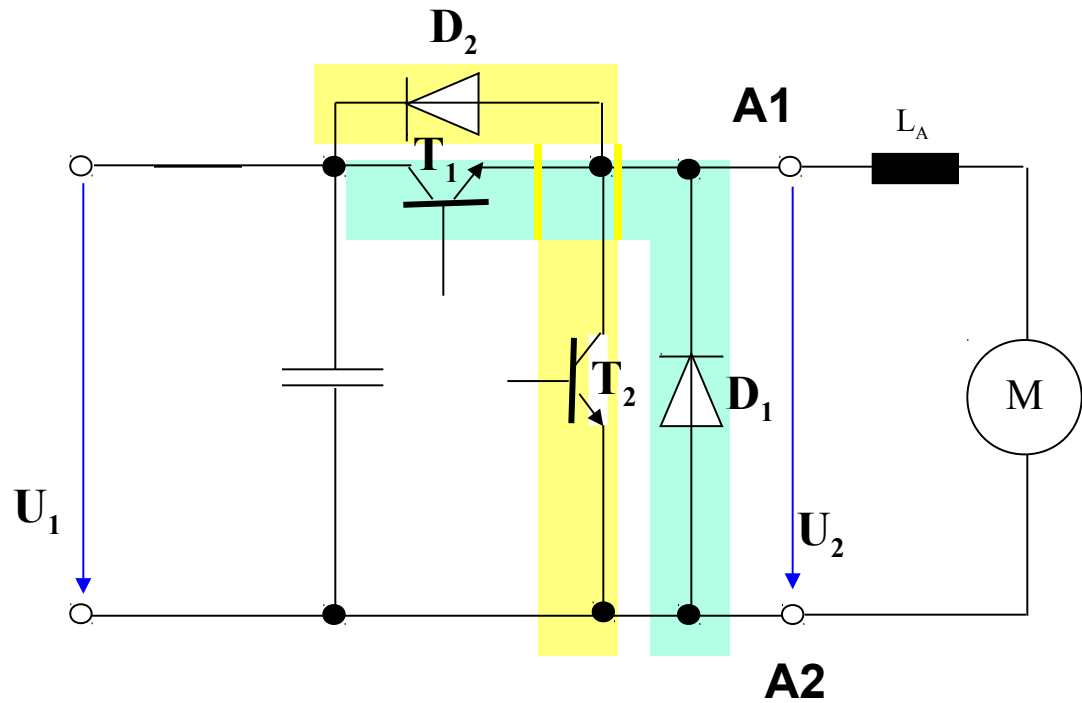
Zwischenkreisspannung steigt an

Abhilfe: Bremschopper oder

Einspeise/Rückspeise- Modul

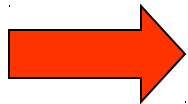
# Halbbrücke 1

Hoch- Tiefsetz- Steller



# Halbbrücke 2

Hoch- Tiefsetz- Steller

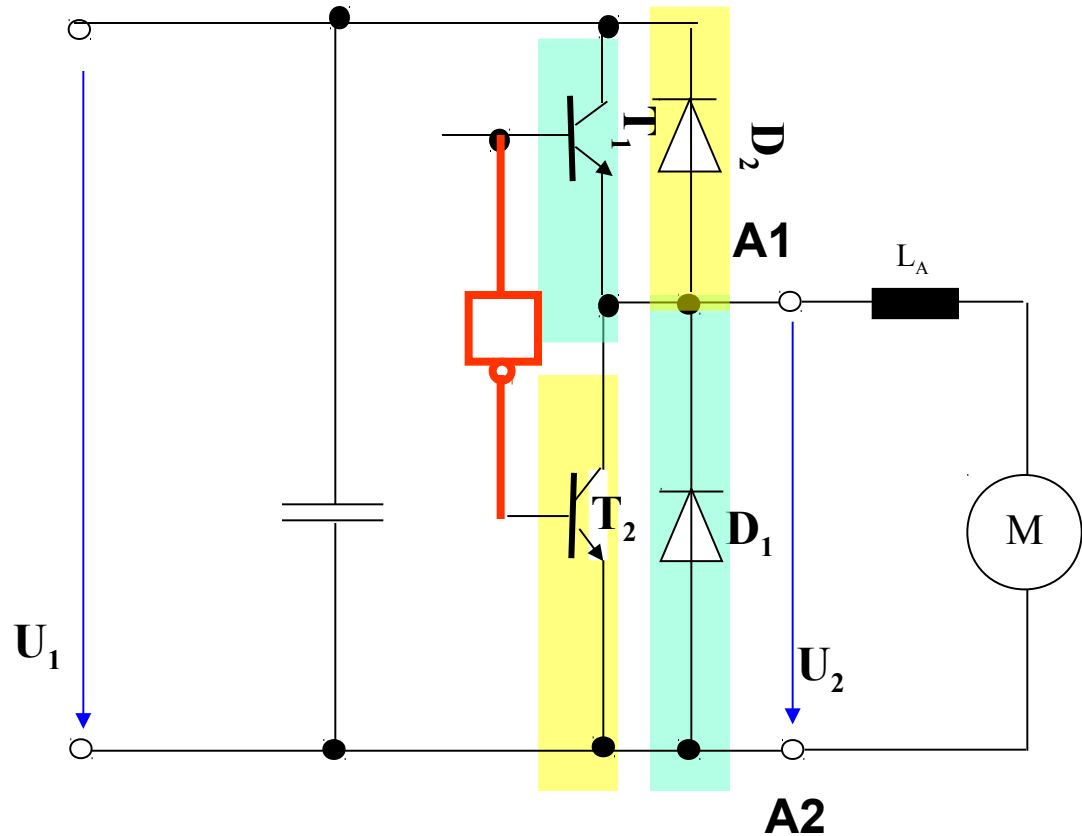


Umzeichnen → Halbbrücke

**Achtung!!!!**

Ansteuerung der  
beiden Transistoren  
muss invertiert  
erfolgen, ansonsten

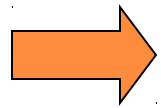
**Kurzschluss des  
Zwischenkreises**



# Halbbrücke 3

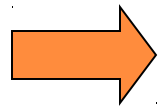
## FAZIT

**Mit einer Halbbrücke kann in eine Drehrichtung sowohl Motorbetrieb als auch Generatorbetrieb realisiert werden**



**2- Quadrantenbetrieb**

**Mit zwei Halbbrücken kann in beiden Drehrichtungen sowohl Motorbetrieb als auch Generatorbetrieb realisiert werden**



**4- Quadrantenbetrieb**





# Elektronikmotor 1

## Anforderungen an einen Servoantrieb

- hohe Dynamik
- guter Rundlauf, auch bei kleinsten Drehzahlen
- hohe Positioniergenauigkeit
- großer Drehzahlstellbereich
- geringes Volumen und Gewicht
- hoher Wirkungsgrad
- wartungsfreundlich
- hohe Schutzart

# Vom Gleichstrommotor zum EC-motor

## **Vorteile der Gleichstrommotors:**

- einfach regelbar
- gute dynamische Eigenschaften

## **Nachteile der Gleichstrommotors:**

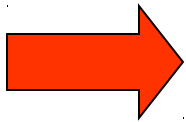
- Stromzuführung über Bürsten
- Verschleiß
- Bürstenfeuer
- Explosionsschutz nur mit hohem Aufwand machbar
- Die wesentlichen Verluste entstehen im Läufer, wo sie schwer abzuführen sind.

————→ **Überlegung**

physikalischen Funktionen von Anker und  
Erregerfeld räumlich vertauschen

# Elektronikmotor 2

**Welcher Motor erfüllt diese Anforderungen am besten?**



**die Gleichstrommaschine**

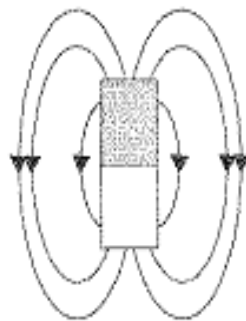
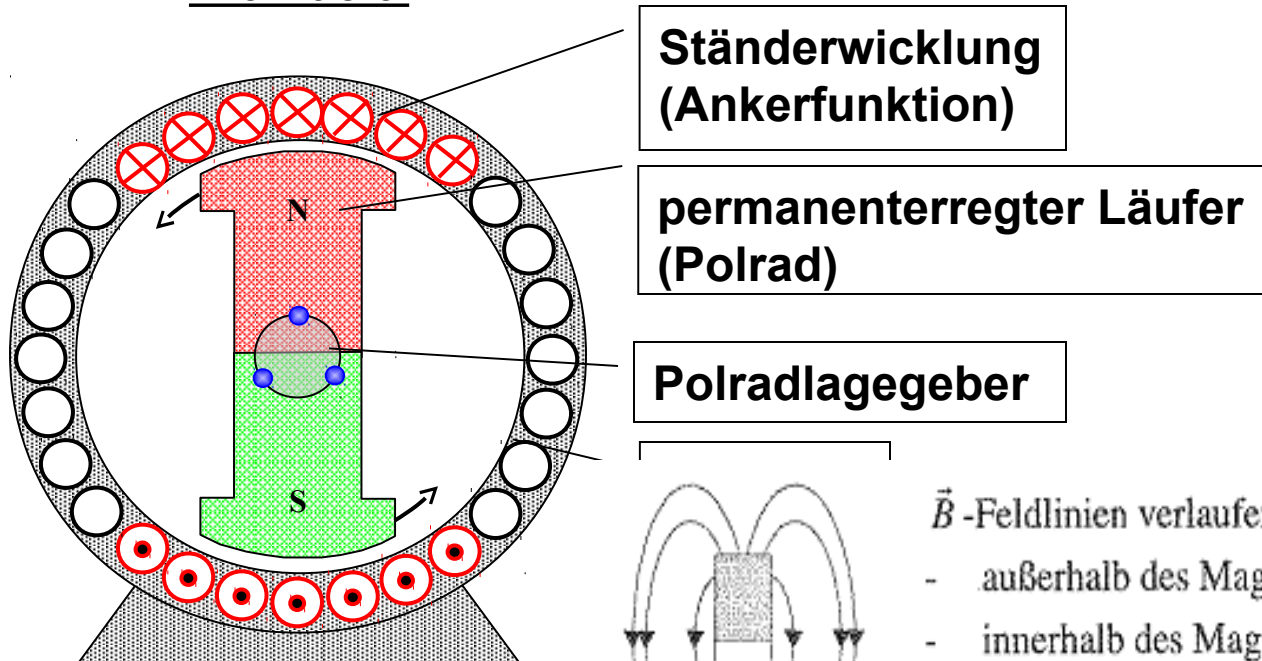
- ABER:**
- Bürsten und Kommutator → Verschleiß → Wartung
  - Mechanische Kommutierung begrenzt Dynamik
  - Bei hoher Belastung und hohen Drehzahlen → Bürstenfeuer
  - Drehmomentabgabe im Stillstand → Bürsteneinbrennen
  - Bei Belastung entsteht Verlustleistung im Anker → Wärmeabführung problematisch

**Lösung:** **Ankerfunktion in Ständer verlegen und Ständerfunktion in Läufer**

# Elektronikmotor 3

## Elektronikmotor (bürstenlose Gleichstrommaschine)

### Aufbau



$\vec{B}$ -Feldlinien verlaufen

- außerhalb des Magneten von N nach S
- innerhalb des Magneten von S nach N.

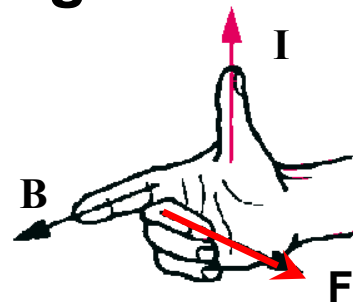
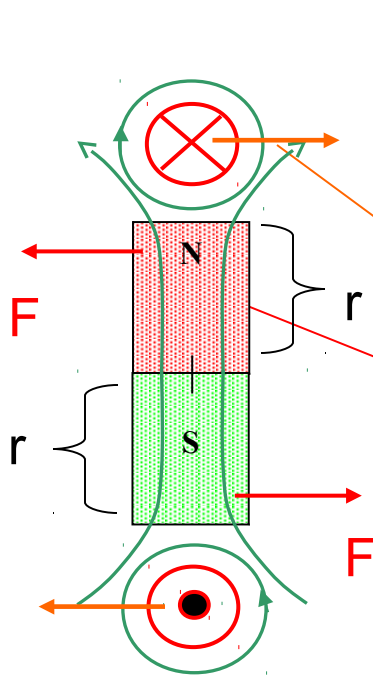
### Wirkungsweise

Polradlagegeber meldet die Läuferposition an die Auswertelogik → Ansteuerung des Stellgliedes für die Ständerbestromung so, dass sich stromdurchflossene Leiter über den Polen befinden → Drehung

# Elektronikmotor 4

## Elektronikmotor (bürstenlose Gleichstrommaschine)

### Drehmomentbildung



Daumen: Ursache ( I )  
Zeigefinger: Vermittlung ( B )  
Mittelfinger: Wirkung ( F )

**Kraft** auf stromdurchflossenen  
Leiter bewirkt eine **Drehung** des  
beweglichen Rotors

Drehmoment:  $M = \text{Kraft} \times \text{Hebelarm}$

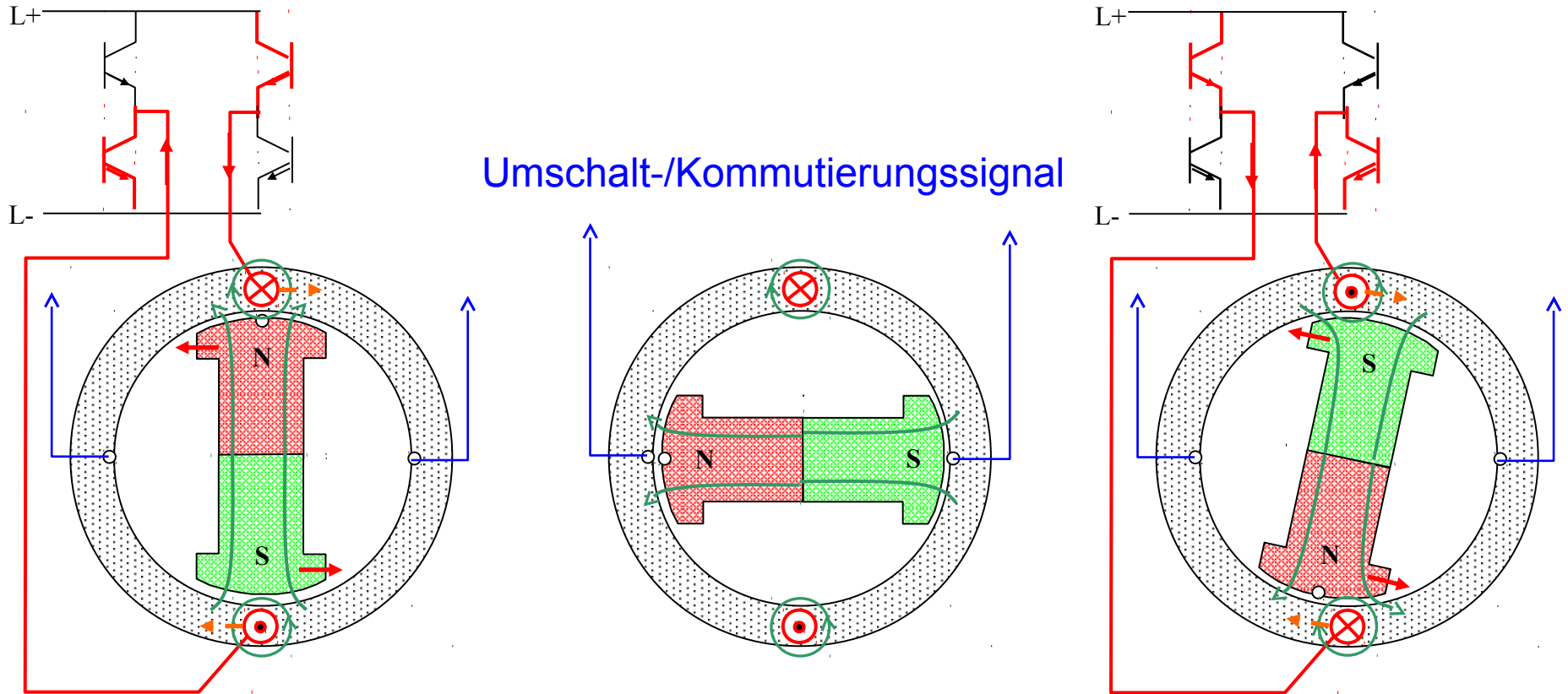
gesamtes Moment:  $M_g = 2 * F * r$  (vgl. GM.)

### Drehzahlveränderung

über die angelegte Spannung !!!(vergl. Ankerspannung bei GM)

# Elektronikmotor 5

## Entstehung der Drehbewegung beim Elektronikmotor



Umschalt-/Kommutierungssignal

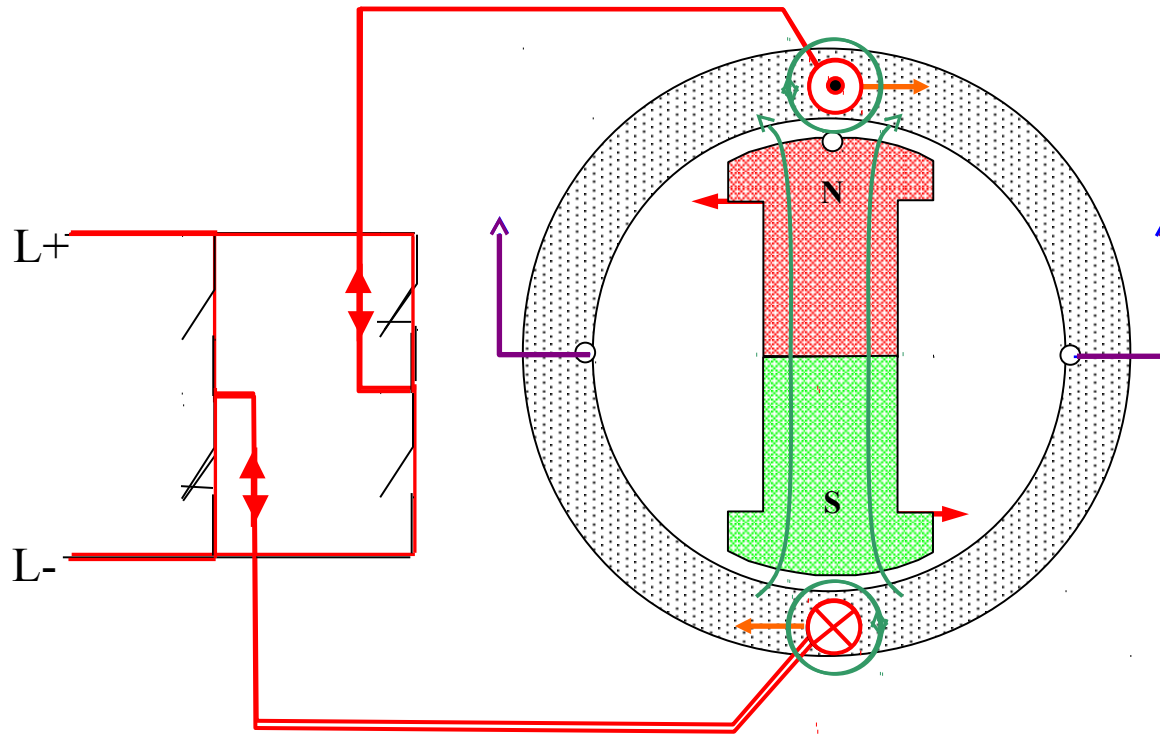
**Kraft auf stromd.  
Leiter bewirkt eine  
Drehung des Polrads**

**Stillstand  
→ Stromwendung  
erforderlich**

**nach Stromwendung (im  
Ständer) dreht sich der Läufer  
weiter → Stromrichtung über  
dem Pol ist immer gleich**

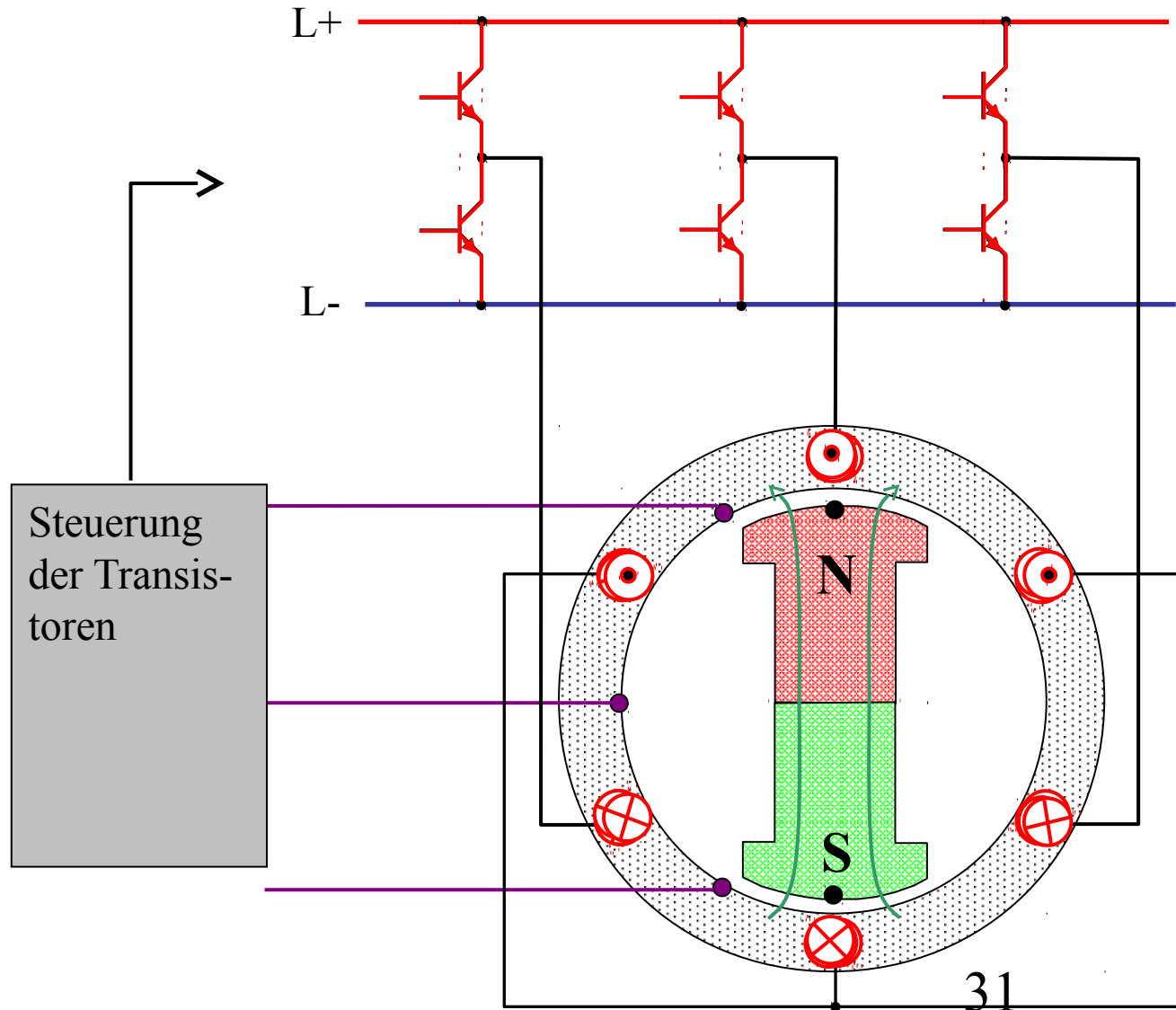
**Drehrichtungsänderung: Ständerstrom umpolen**

# Bürstenloser Gleichstrommotor



**Kraft auf  
stromd. Leiter  
bewirkt eine  
Drehung des  
Ankers**

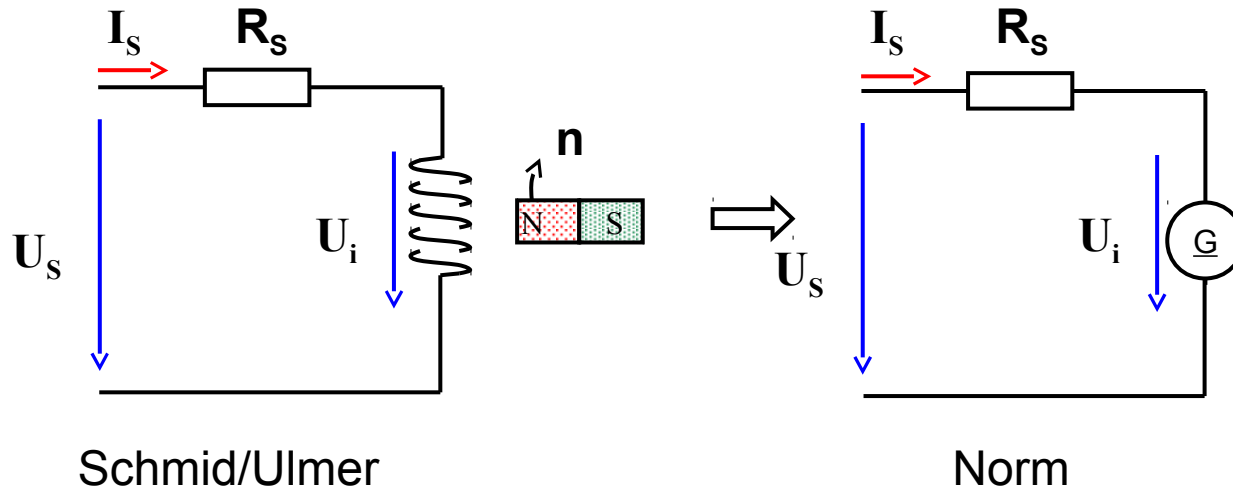
# Bürstenloser Gleichstrommotor 3-strängig





# Elektronikmotor 6

## Vereinfachtes Ständer-Ersatzschaltbild



$$U_i = C_U * n * \phi$$

$C_U$  : Maschinenkonstante

$$U_s = I_s * R_s + U_i$$

(vgl. GM.)

# Elektronikmotor 7

## Der dreisträngige, sechspulsige Elektronikmotor

- **Synchronmaschinen mit permanenterregtem Rotor**
- **meist Zylinderläufer**
- **Ständerwicklung dreisträngig**
- **Durch außenliegende Statorwicklung ausgezeichnetes thermisches Verhalten**
- **Speiseeinrichtung (Stellglied) hat Ständerstränge so zu bestromen, dass resultierende Durchflutungsachse immer senkrecht zur Erregerfeldachse steht**

# Elektronikmotor 8

Der dreisträngige, sechspulsige Elektronikmotor

Ständerspeisungsarten

```
graph TD; A[Ständerspeisungsarten] --> B[Blockspeisung/Blockkommutierung]; A --> C[Sinusspeisung/Sinuskommutterung]; B --> D["BL- DC- Servomotor  
EC- Gleichstrommotor"]; C --> E["AC- Servomotor  
Drehstromservomotor"];
```

Blockspeisung/Blockkommutierung



BL- DC- Servomotor  
EC- Gleichstrommotor

Sinusspeisung/Sinuskommutterung



AC- Servomotor  
Drehstromservomotor

# Elektronikmotor 9

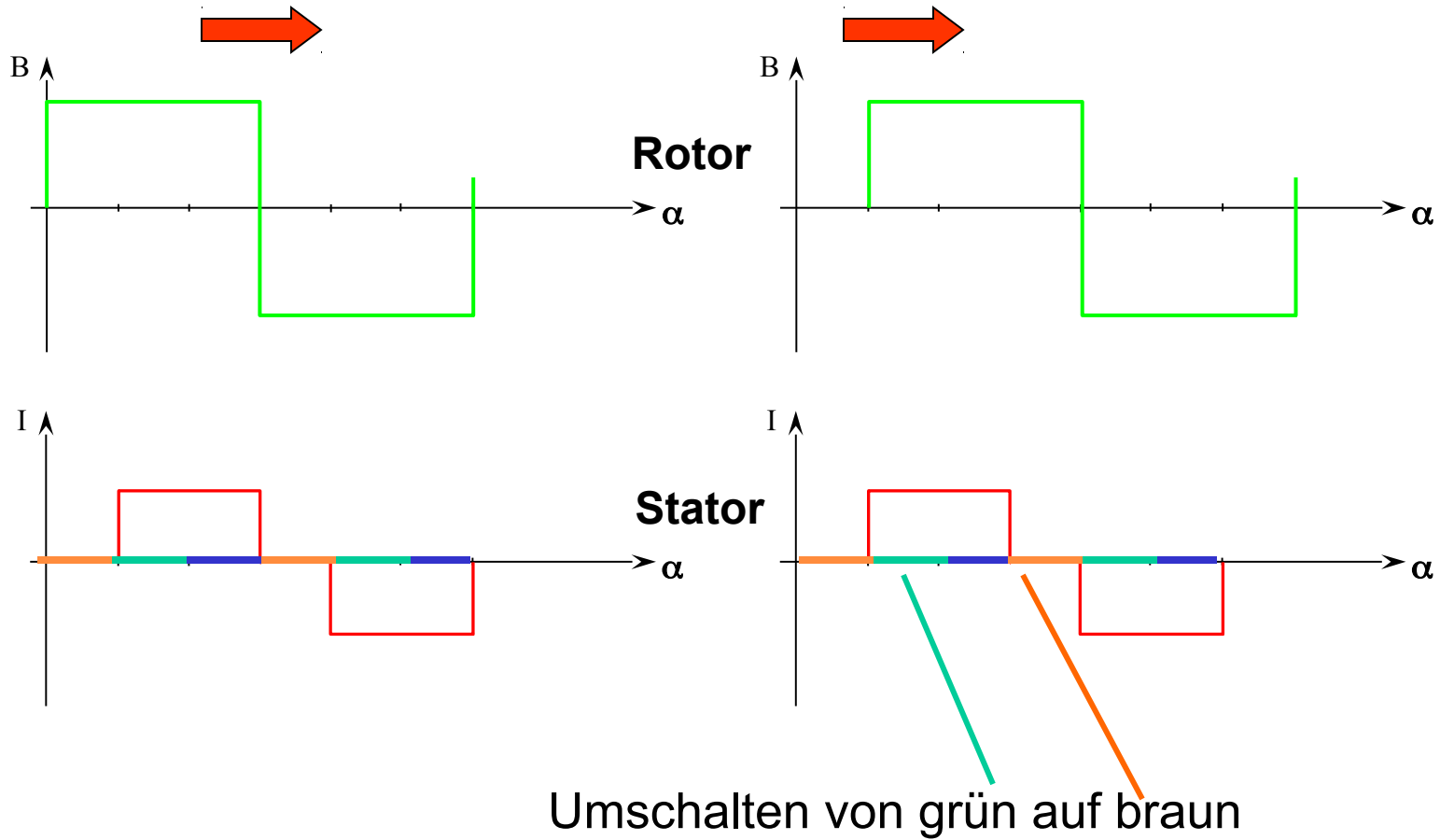
## Blockspeisung/Blockkommutierung



- ➔ Immer nur zwei Stränge bestromt → Gesamtstrom wird zyklisch auf die drei Stränge verteilt
- ➔ Bestromung nimmt innerhalb einer Periode sechs diskrete Zustände an (springende Drehdurchflutung)
- ➔ Rotorlageerfassung mit Hallgebern oder optischen Gebern → Auflösung muss nicht hoch sein, da lediglich sechs Zustände
- ➔ Rotor radial magnetisiert → konstante Luftspaltinduktion

# Elektronikmotor 10

## Induktionsverteilung und wirksame Stromverteilung



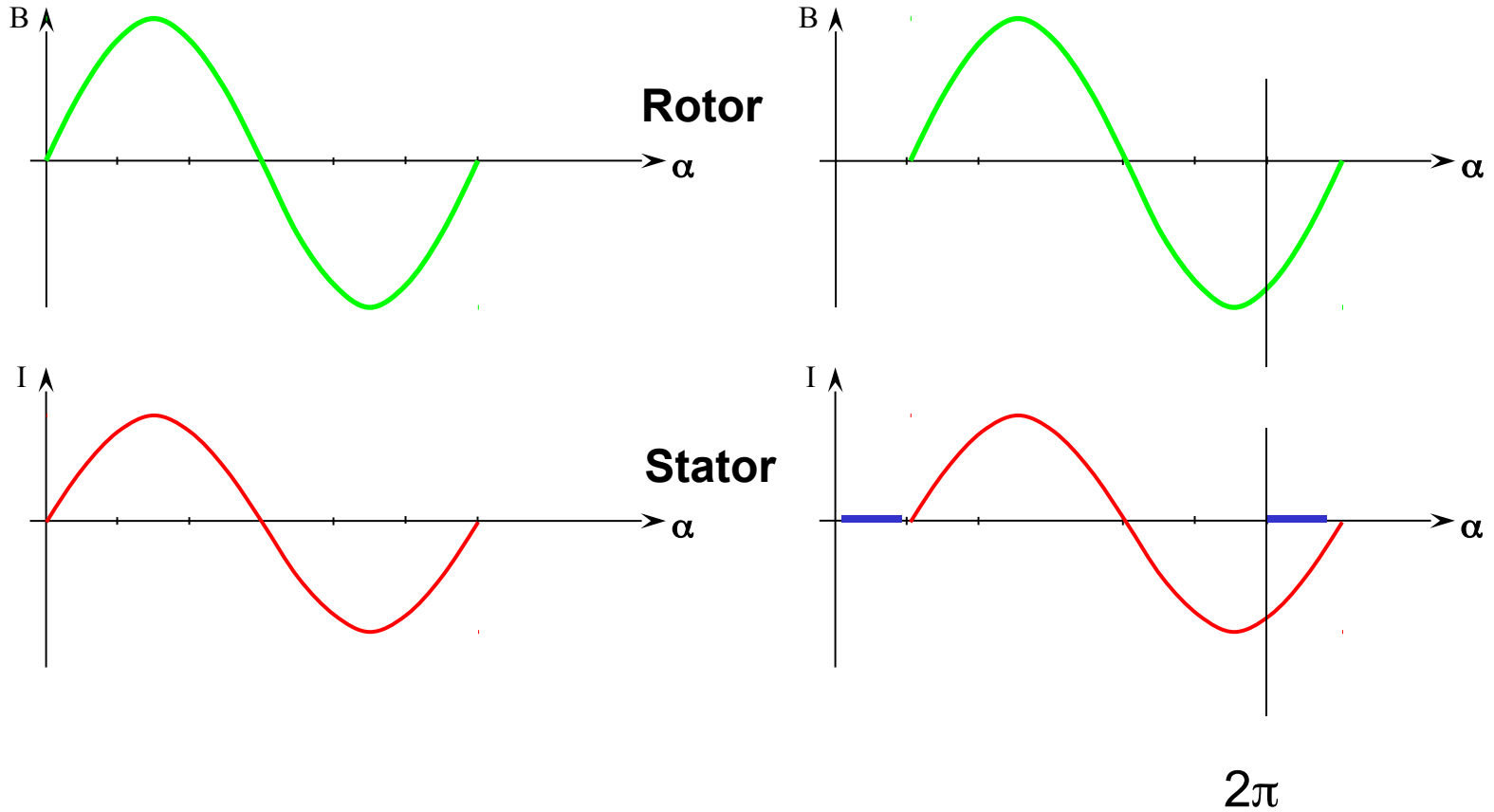
# Elektronikmotor 11

## Sinusspeisung/Sinuskommutterung

- ➔ Alle drei Stränge werden abhängig von Rotorlage sinusförmig bestromt
- ➔ Rotor ist *linear* magnetisiert → sinusförmige Luftspaltinduktion
- ➔ Rotorlage muss absolut, mit hoher Auflösung erfasst werden → i.d.R. Resolver
- ➔ Auch bei extrem niederen Drehzahlen ist ein absolut ruhiger Rundlauf gegeben
- ➔ *Läuferfeld* und *Ständerfeld* stehen senkrecht aufeinander

# Elektronikmotor 12

## Induktionsverteilung und wirksame Stromverteilung



# Kennlinien und Steuerung von Gleichstrommaschine

Nach der Drehmoment/Drehzahlbeziehung  
einer Gleichstrommaschine

$$n = \frac{U_a}{c \cdot \Phi} - \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{(c \cdot \Phi)^2}$$

**Ziel:**

Drehzahl und Drehmoment so zu  
verstellen, dass ein „vertretbarer“ Arbeitspunkt  
gefunden wird.

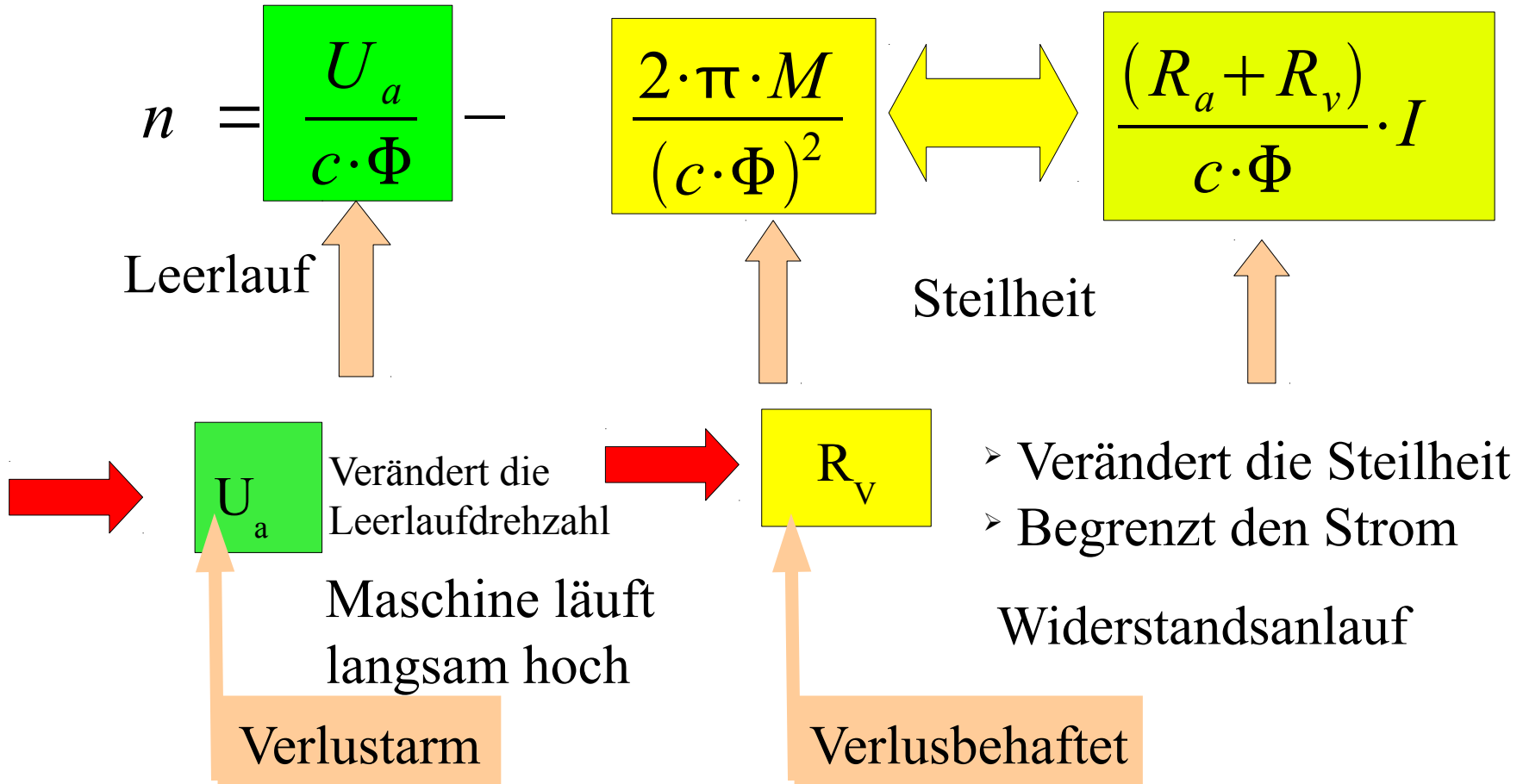
**Warum?**

**Unter Vollast können unzulässig hohe  
Drehmomente erzeugt werden.**

**Es können unzulässig hohe Ströme fließen  
Die Arbeitsmaschine kann Präzidieren**



# Welche Parameter kann man verändern?



# Welche Parameter kann man verändern?

$$n = \frac{U_a}{c \cdot \Phi} - \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{(c \cdot \Phi)^2}$$

Leerlauf

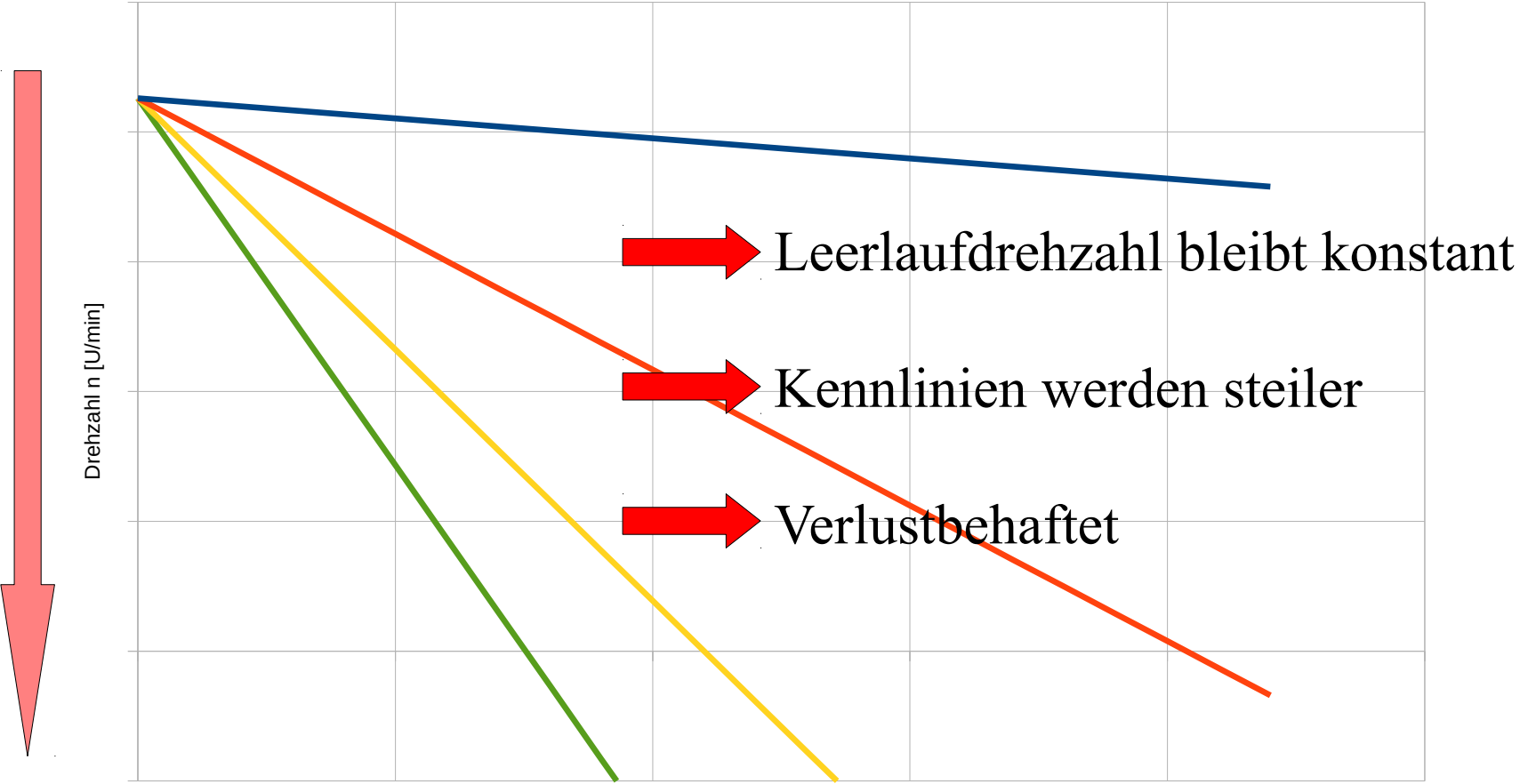
Steilheit

Veränderung  
 $c \cdot \Phi$

Verlustarm

Wirkt auf die  
Leerlaufdrehzahl und die  
Steilheit der Kennlinie

Änderung der Vorwiderstände



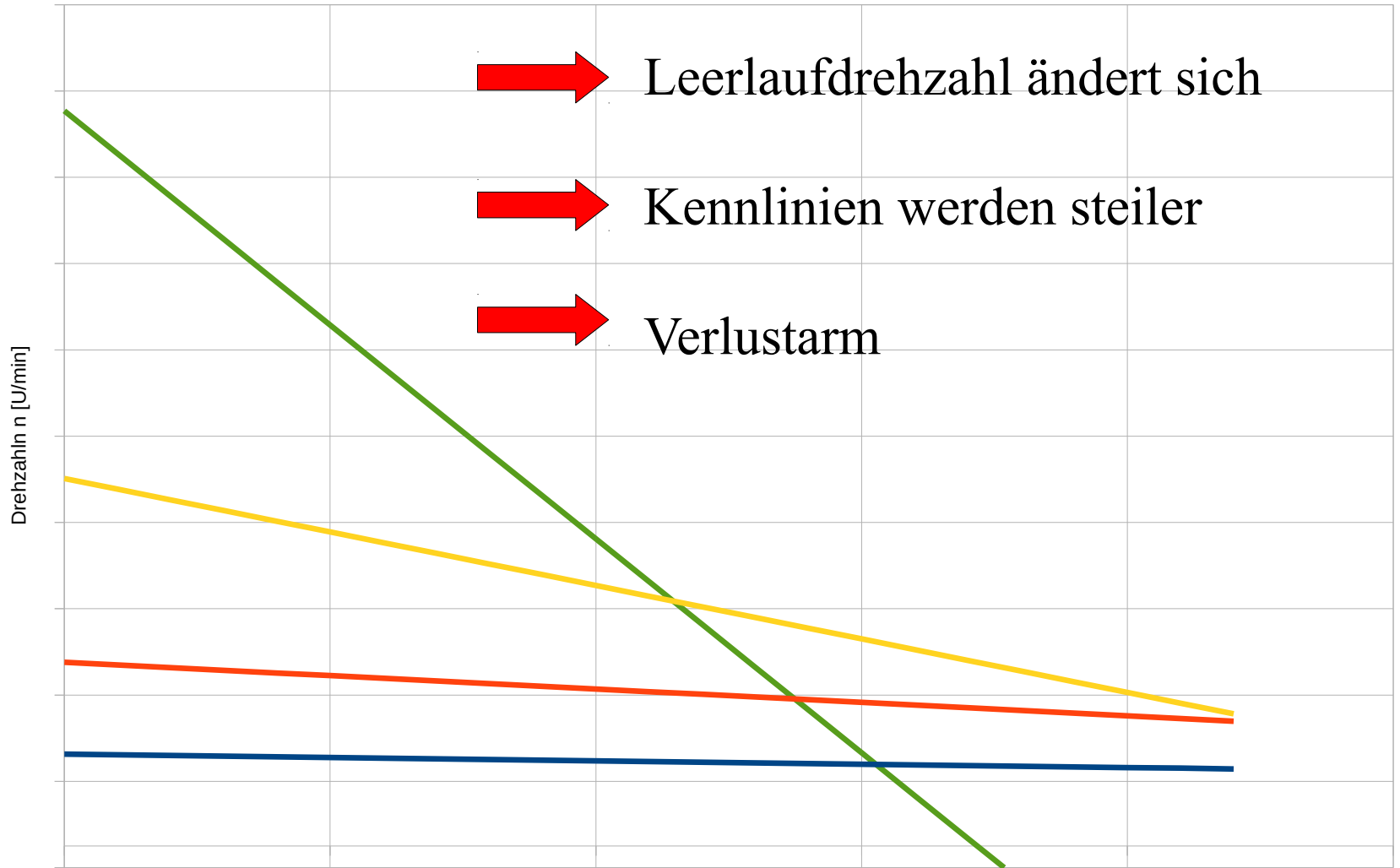
Zunehmend

Feldschwächung

➔ Leerlaufdrehzahl ändert sich

➔ Kennlinien werden steiler

➔ Verlustarm

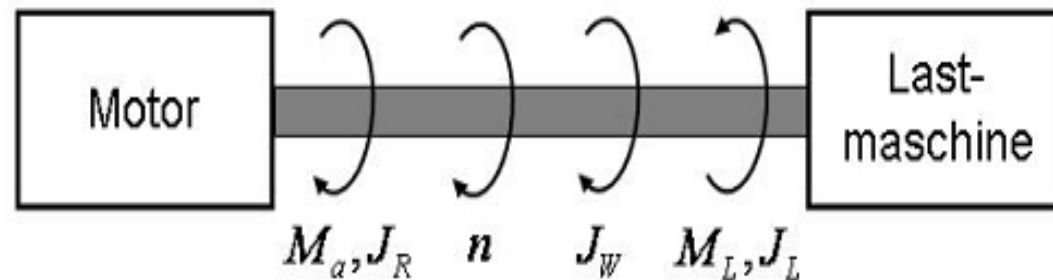


Zunehmend

Drehmoment  $M$  [Nm]

# Dynamisches Verhalten von Gleichstrommaschinen

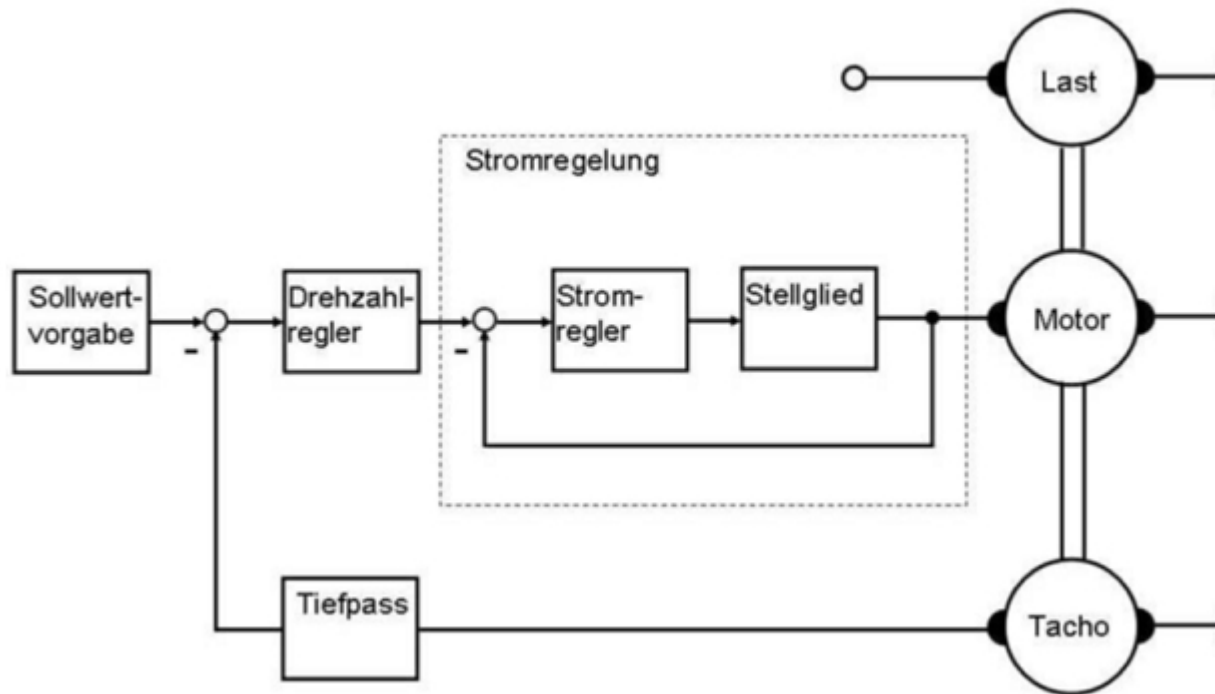
Wie ändert sich der Betriebszustand bei Änderungen von Parametern im Betrieb?



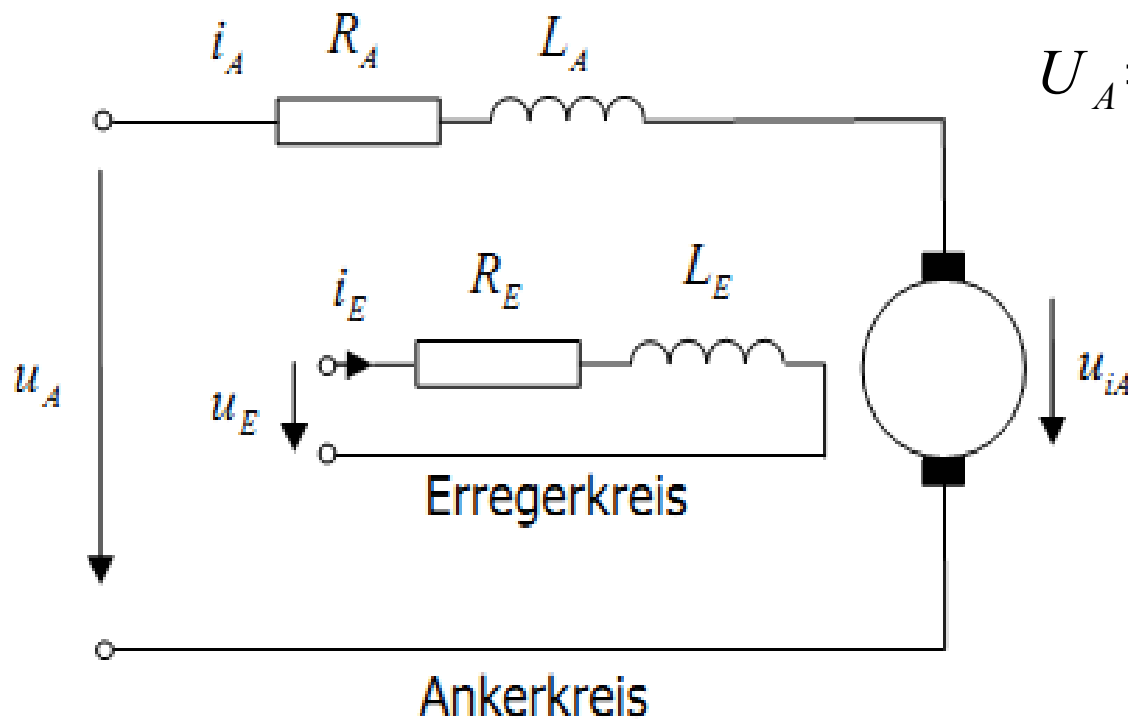
**Problem:** Ein Lastaufzug soll mit mehreren Personen genauso schnell sein, wie mit einer Person oder im leeren Zustand

Bedeutung: Drehzahl wirkt auf das Drehmoment  
Also lastabhängige Drehzahlregelung

# Dynamisches Verhalten von Gleichstrommaschinen



# Gleichstrommaschine



$$U_A = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + U_i$$

$$U_E = R_E \cdot i_E + L_E \cdot \frac{di_E}{dt}$$

$$\Psi = N_E \cdot \Phi_E = L_E \cdot i_E$$

Hiermit ist das elektrische Ersatzschaltbild für dynamische Vorgänge vollständig.

# Mechanische Beschreibung der Gleichstrommaschine

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_M - M_L - M_{Stör})$$

Änderung der Drehzahl

Trägheitsmoment des Systems

Aufzubringendes Moment

Störgröße durch z.B. Wind

The diagram shows the equation  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_M - M_L - M_{Stör})$  with four blue arrows pointing upwards to the terms. The first arrow points to  $\frac{d\omega}{dt}$  (red box), the second to  $\frac{1}{J}$  (yellow box), the third to the entire right-hand side expression  $(M_M - M_L - M_{Stör})$  (red box), and the fourth to  $M_{Stör}$  (black text). Below each arrow is a descriptive label in German.



# Darstellung der dynamischen Vorgänge

Über die Kopplung der Mechanischen und elektrischen Größen ist es nun möglich ein Simulationsmodell zu erstellen, mit dessen Hilfe die Dynamik dargestellt werden kann.

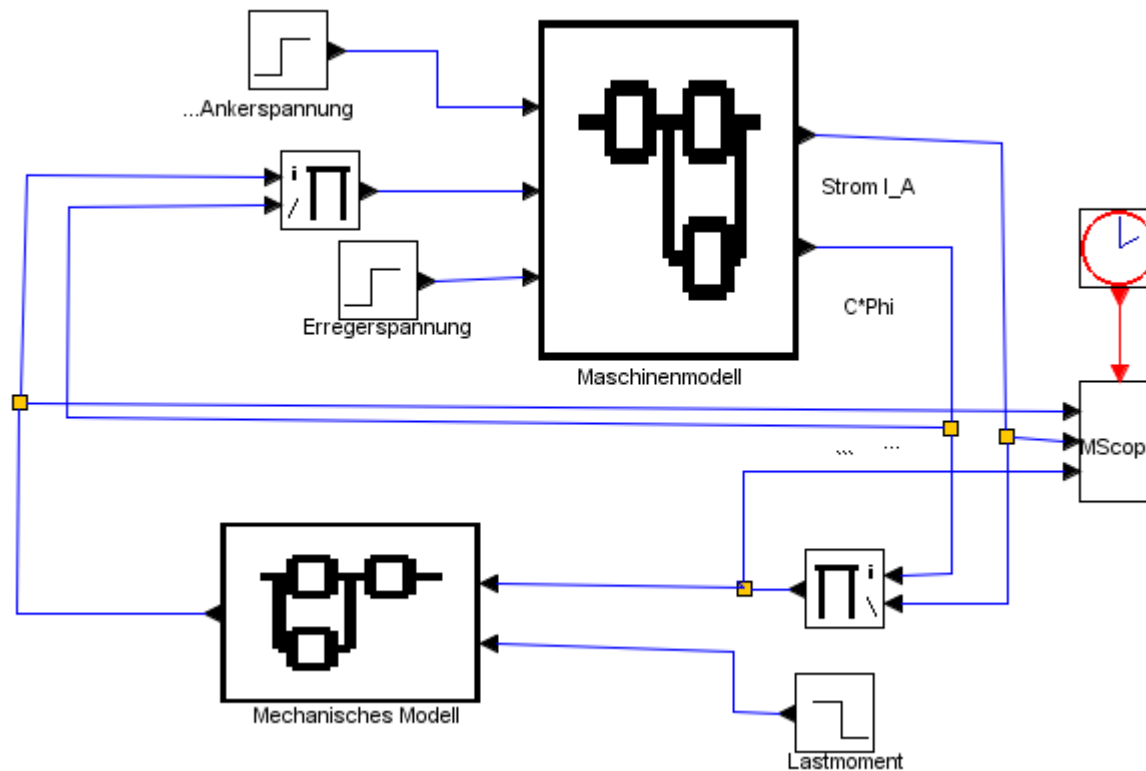
$$U_a = c \cdot \Phi \cdot n$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60s}$$

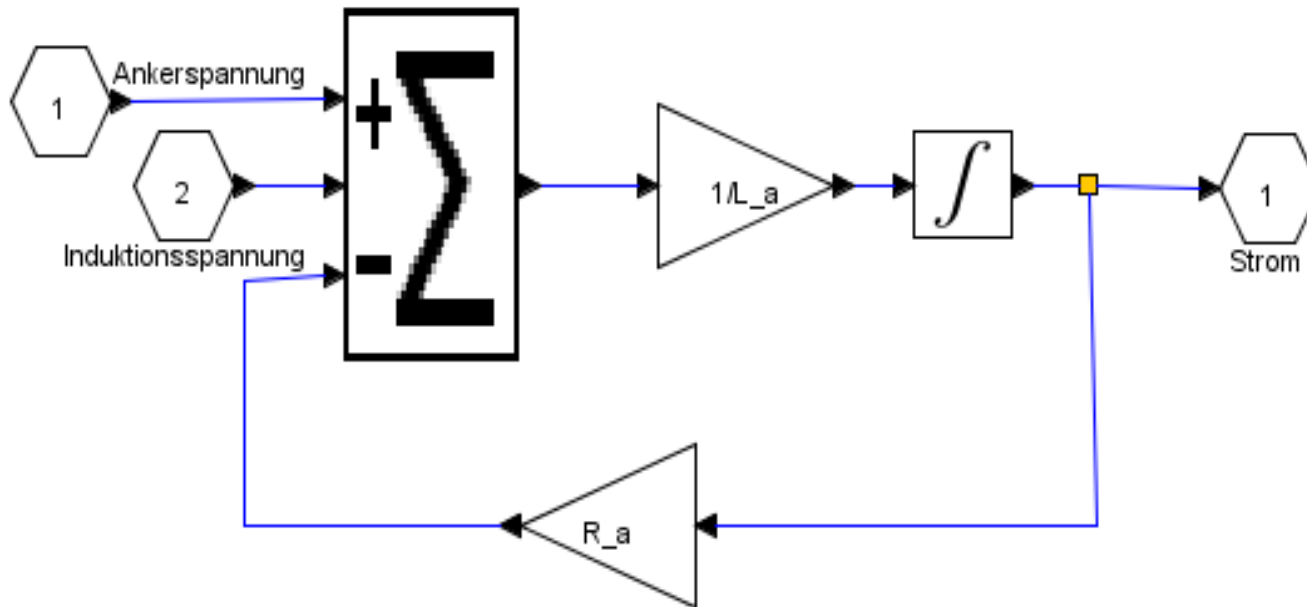
$$M = c \cdot \Phi \cdot I_A$$

Mit Hilfe der Laplacetransformation  
Ist es nun möglich in Matlab/Simulink oder Scicos  
Ein Simulationsmodell zu erstellen

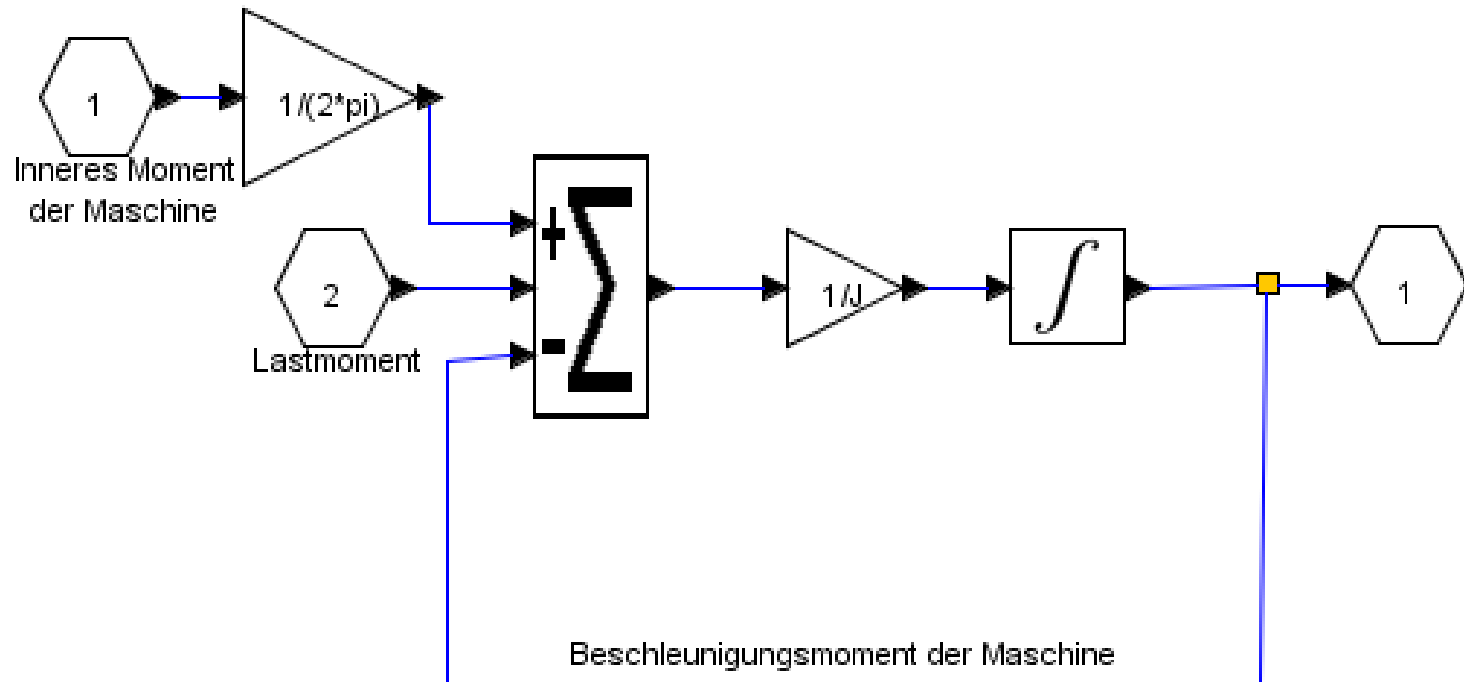
# Das Simulationsmodell



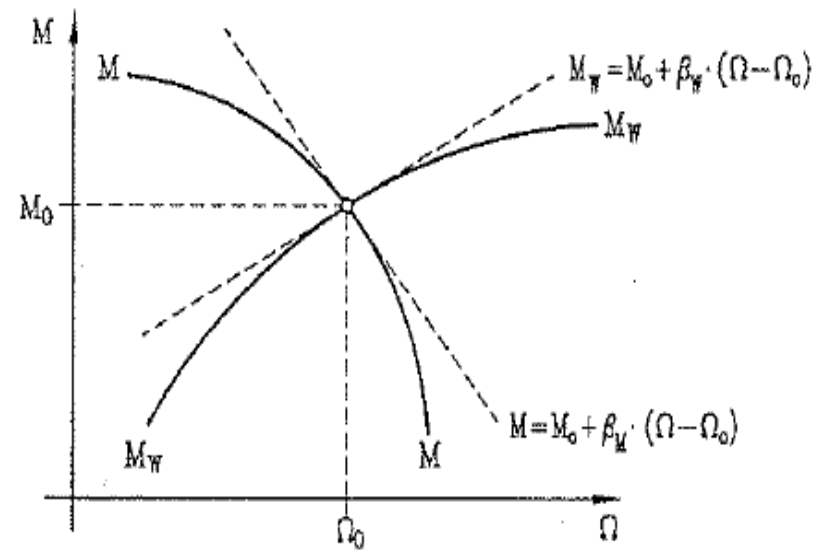
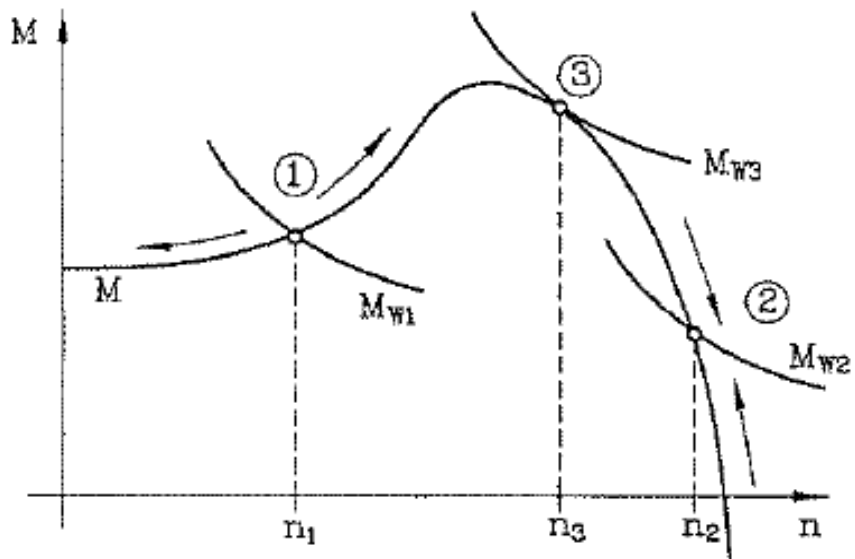
# Der Ankerkreis



# Einbezug des Trägheitsmomentes der Maschine



# Stabilitätsbedingung für einen Arbeitspunkt



# Stabilitätsbedingung für einen Arbeitspunkt

- Punkt 1: Falls  $n > n_1 \longrightarrow M > M_{W1} \longrightarrow$  weitere Beschleunigung  
Falls  $n < n_1 \longrightarrow M < M_{W1} \longrightarrow$  weitere Bremsung  
Beschleunigung und Bremsung wirken vom Arbeitspunkt weg. Dieser  
Arbeitspunkt ist deswegen **instabil**.
- Punkt 2: Falls  $n > n_2 \longrightarrow M < M_{W2} \longrightarrow$  Bremsung  
Falls  $n < n_2 \longrightarrow M > M_{W2} \longrightarrow$  Beschleunigung  
Beschleunigung und Bremsung wirken auf den Arbeitspunkt zu. Dieser  
Arbeitspunkt ist deswegen **stabil**.
- Punkt 3: Falls  $n > n_3 \longrightarrow M < M_{W3} \longrightarrow$  Bremsung (stabil)  
Falls  $n < n_3 \longrightarrow M < M_{W3} \longrightarrow$  Bremsung (instabil)  
Der Arbeitspunkt liegt an der Grenze zwischen stabilem und instabilem Verhalten.

# Die Gleichstrommaschine wird aufgeschnitten

Warum gibt es überhaupt Bürstenfeuer?

Weil eine Spannungsdifferenz wegen der  
Kommutierung auftritt.

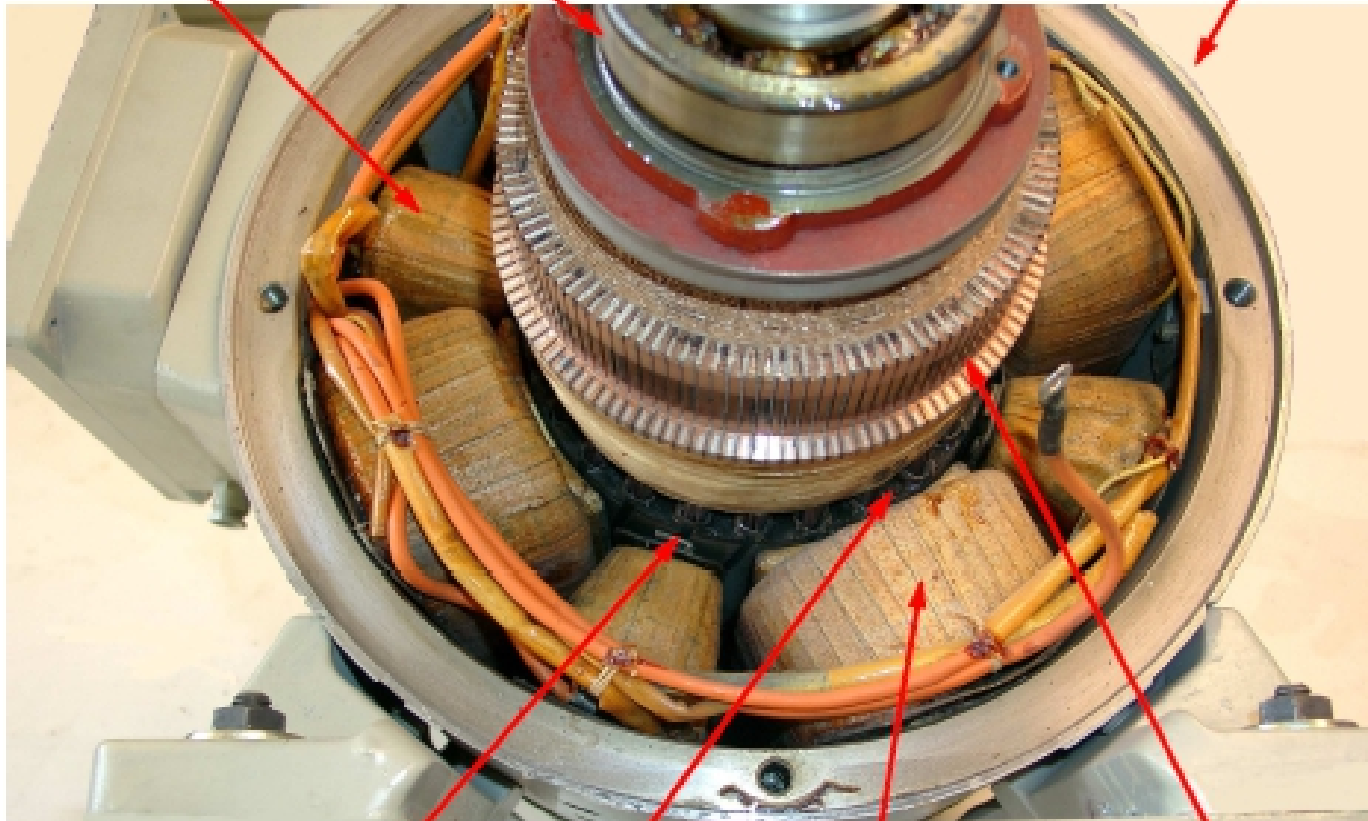
Forderung: kein Bürstenfeuer

Diese Forderung ist technisch nicht  
realisierbar, aber man kann dies  
verringern!

Wendepolwicklung

Lager

Joch



**Wir sehen: eine Gleichstrommaschine hat mehr Wicklungen, als wir bislang kennengelernt haben**

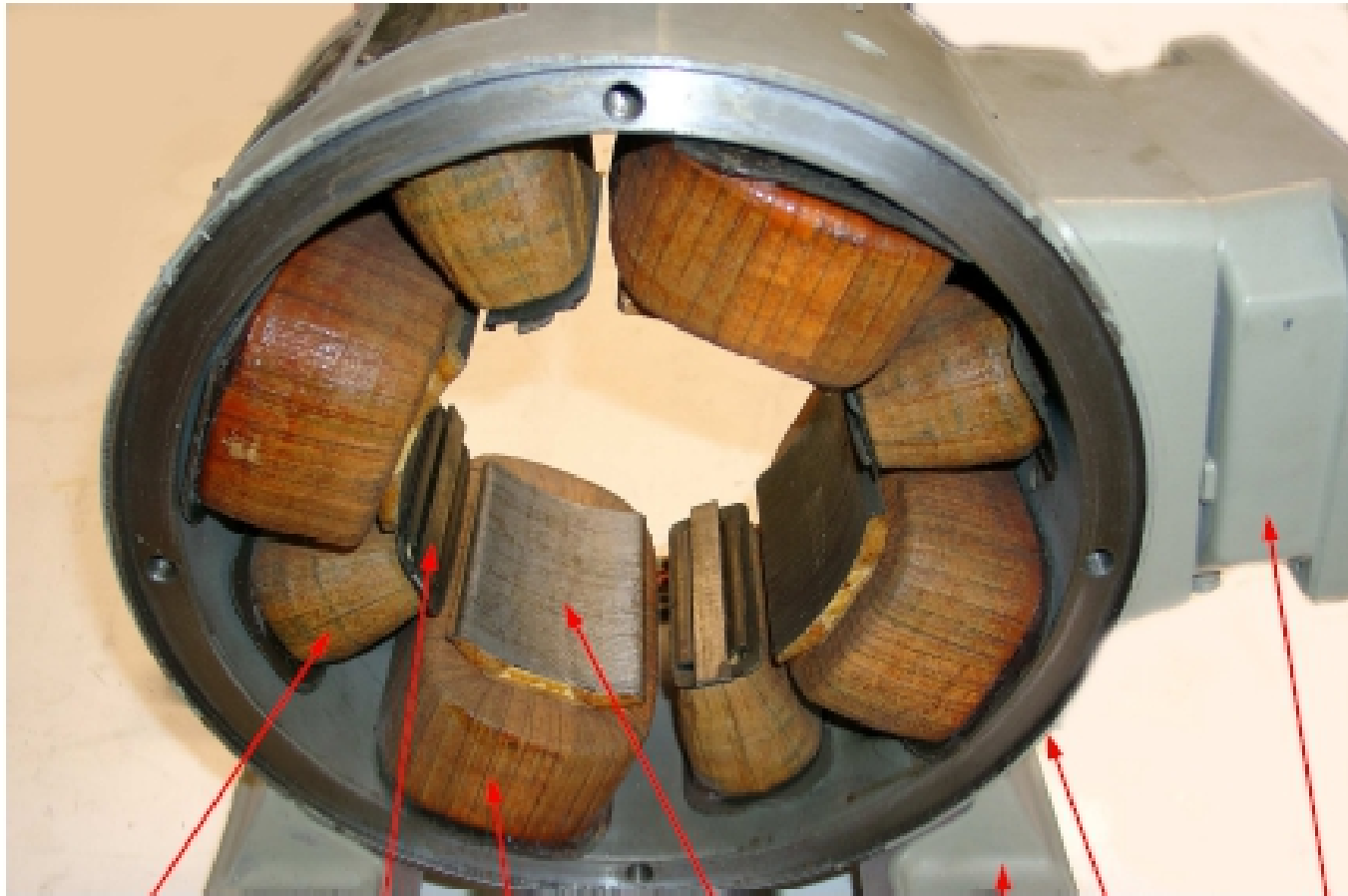
Wendepol

Hauptpol

Erregerwicklung

Kommutator





Wendepol-  
wicklung

Wendepol

Erreger-  
wicklung

Hauptpol

Montage-  
fuß

Joch

Anschluss-  
kasten

Wir haben also keine Gleichmäßige Flussverteilung!

# Erregerfeld und Ankerrückwirkung

$$\Phi = \int_0^{\tau_p} B_{Lx} \cdot l \cdot dx$$

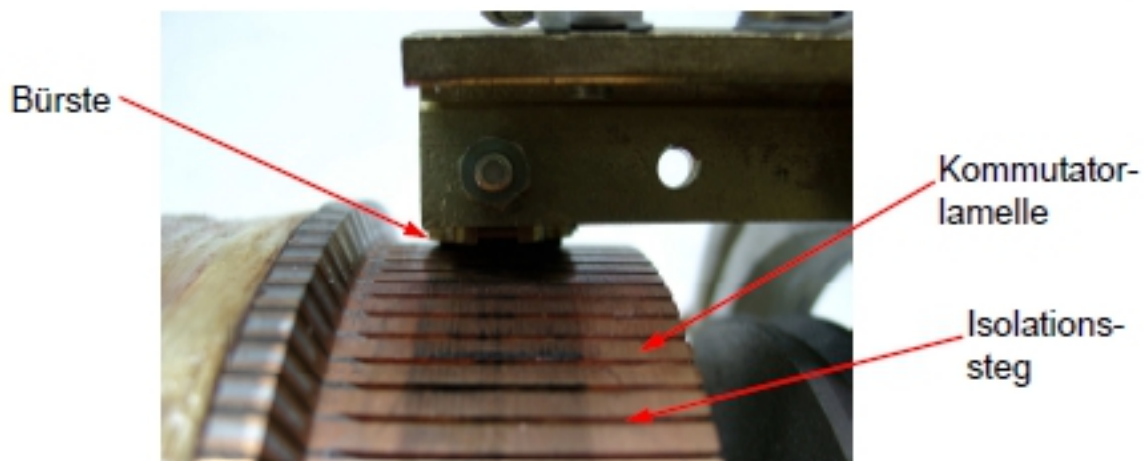
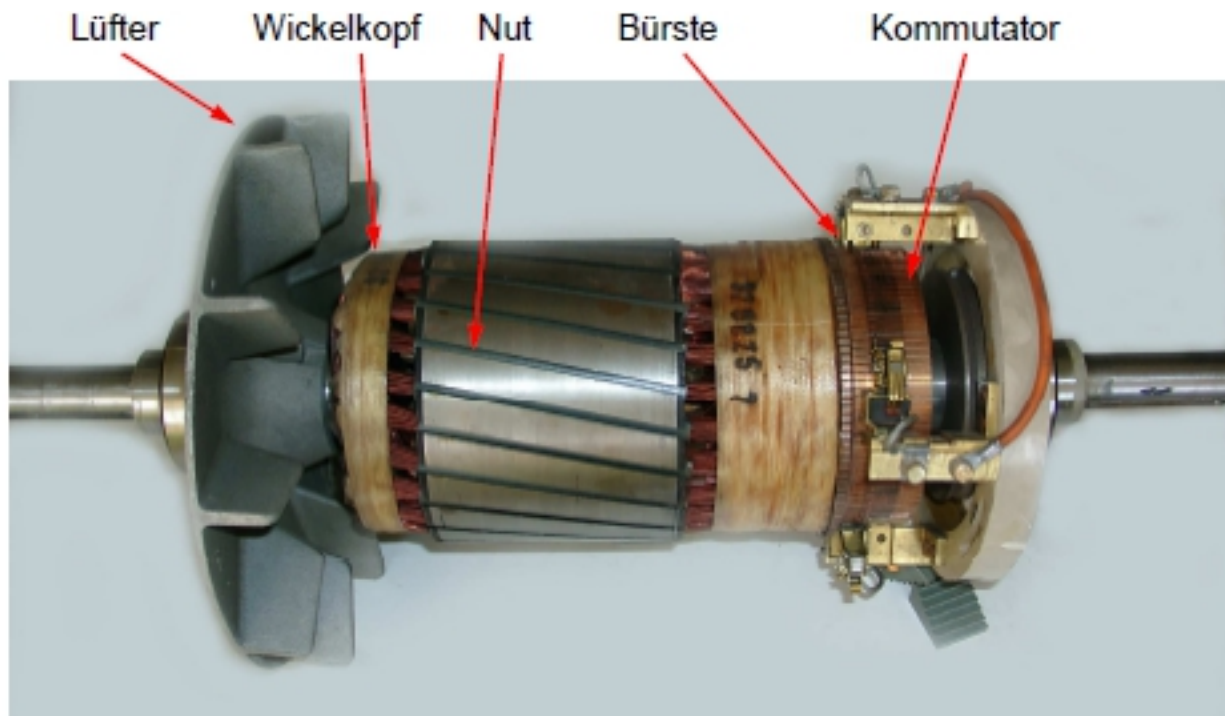
Im Leerlauf besteht nur das Magnetfeld der Hauptpole, das als Erregerfeld bezeichnet wird.

Berechnet man das Integral durch Ersatz eines flächengleiches Rechteck, dann folgt:

$$\Phi = B_m \cdot l \cdot \tau_p = \alpha \cdot B_L \cdot l \cdot \tau_p$$

Der Quotient:  $\alpha = \frac{B_m}{B_L}$  Ist der Polbedeckungsfaktor

Würde man den Flussdichteverlauf z.B. mit einer Hallsonde aufnehmen, würde man eine starke Schwankung des Flussdichte  $B_{Lx}$  im Wechsel Zahn-Nut-Zahn



# Ankerstrombelag

Im Betrieb tritt im Anker der Laststrom  $I_A$

→ Eigenes Magnetfeld

Zur Darstellung des Magnetfeldes muss die Durchflutung der stromdurchflossenen Ankerwicklung bekannt sein.

→ Definition des Ankerstrombelages  $A$

→ Der Strom verteilt sich auf sämtliche Leiterstäbe  $z_A$

→ Alle Stäbe führen den selben Strom  $I_s$

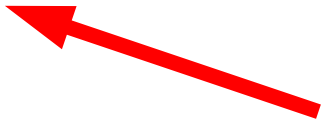
# Ankerstrombelag

$$A = \frac{I_S \cdot z_A}{d_A \cdot \pi}$$

$$A = \frac{I_A \cdot z_A}{2a \cdot d_A \cdot \pi}$$

mit

$$I_S = \frac{I_A}{2a}$$



Anzahl der parallelen  
Ankerzweigpaare

# Ankerquerfeld

Die Folge des Strombelages ist eine Ankerdurchflutung



Magnetfeld, das sich über die  
Polschuhe schließen kann



Die Flussdichte des Feldes wird  
durch den Verlauf der  
Felderregerkurve bestimmt.

# Ankerrückwirkung

Die Stromverteilung bewirkt eine gleichmäßige Durchflutung  $\Phi$  .

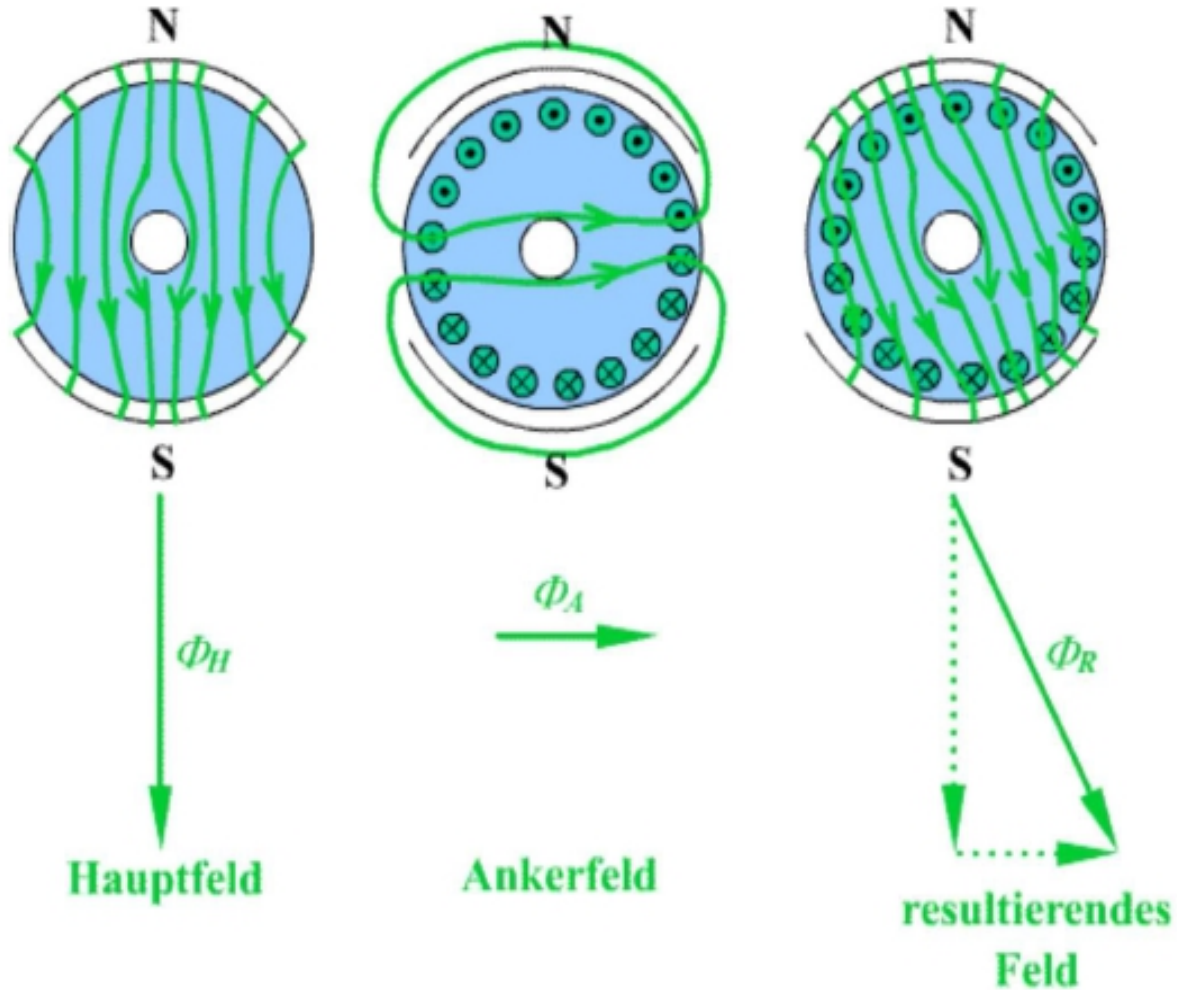
Die Induktion stellt sich gemäß der Reluktanz ein.  
In den Polrücken ist die Reluktanz am größten.

BA überlagert sich mit  $B_f \implies$  Feldverzerrung

$B_{res}$  ist nicht mehr 0

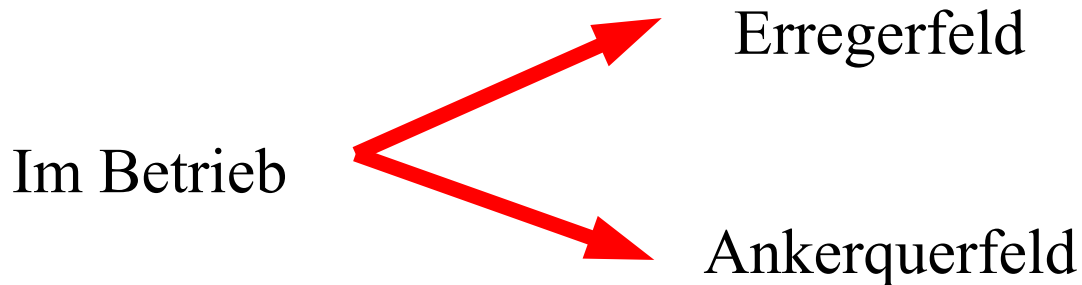
Resultierend: Bürstenfeuer

# Ankerrückwirkung





# Ankerrückwirkung



Das resultierende Feld stimmt nicht ganz mit der Addition der beiden Felder überein, wegen der magnetischen Sättigung

→ Beeinflussung des Feldverlaufes  
innerhalb einer Polteilung

1) Die im Leerlauf symmetrische Induktion wird verzerrt:

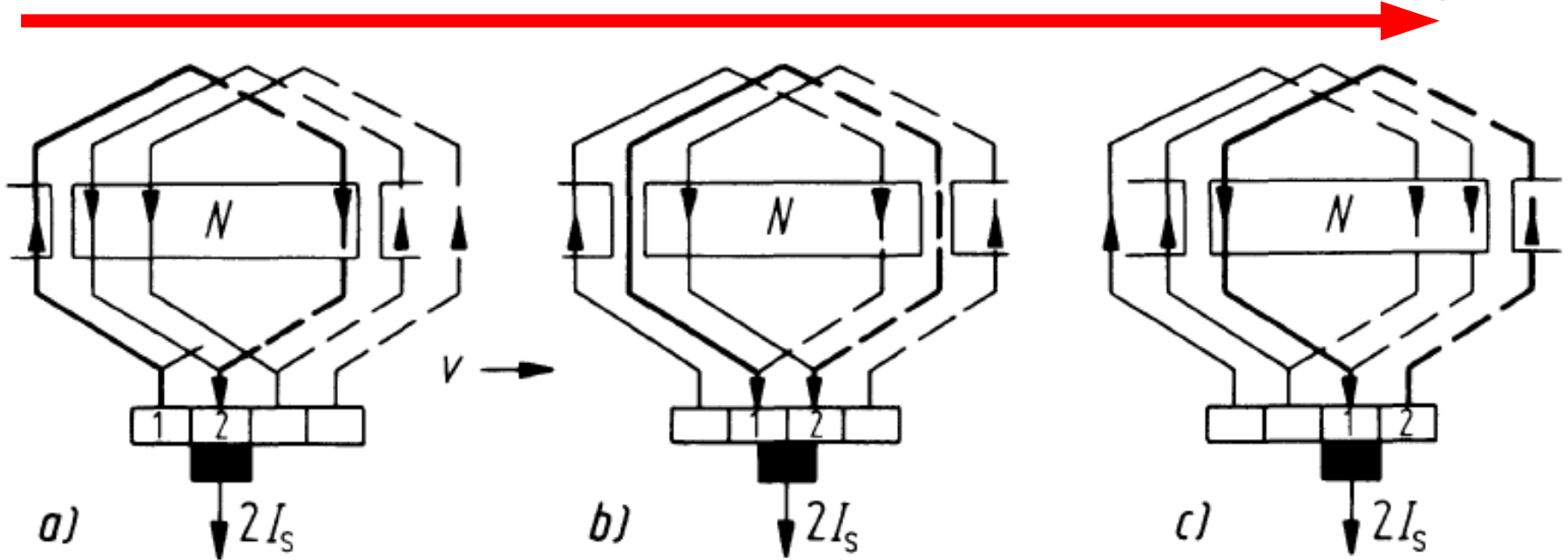
$$B_{\max} > B_L$$

2) Wegen der magnetischen Sättigung  $\implies$  Feld in der einen Polhälfte weniger verstärkt als in der anderen Geschwächt

$\Phi < \Phi_0 \implies$  Gesamtfeld ist kleiner als im Leerlauf

# Stromwendung

Kommutierungszeit

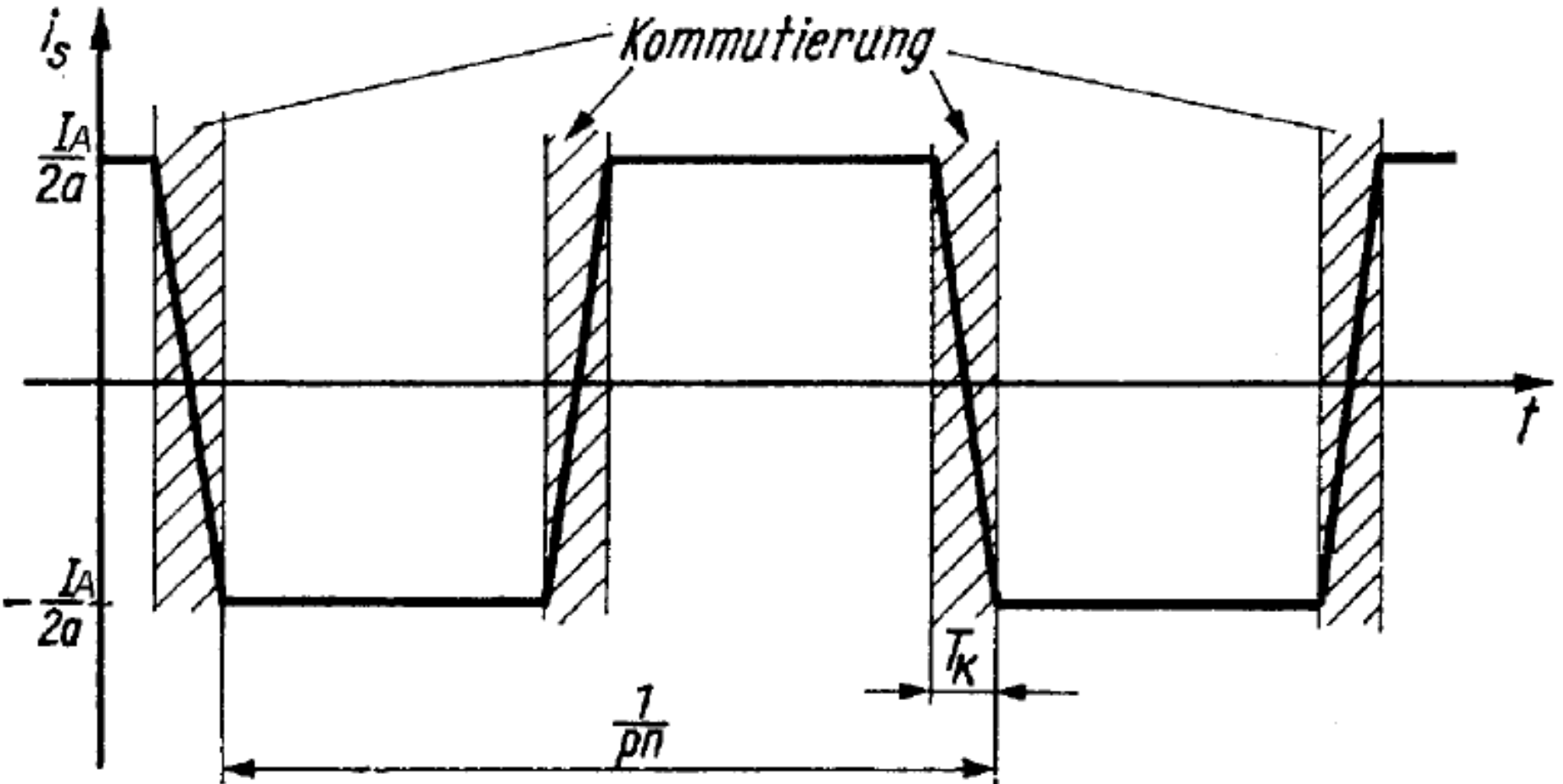


Die **Kommutierungszeit**  $T_K$  errechnet sich aus der Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators  $v_K$  und der Bürstenbreite  $b_B$  zu

$$T_K = \frac{b_B}{v_K}.$$

# Stromwendung

Spulenstrom



# Stromwendung

$$U_r = 2 \cdot N_S \cdot A \cdot \tau_Q \cdot l \cdot \lambda_\sigma \cdot \frac{v_A}{b_w} \quad \text{Pickelmayer Formel}$$

$$U_r = 2 \cdot N_S \cdot l \cdot \xi \cdot A \cdot v_A$$

$$\xi = \frac{\lambda_\sigma \cdot \tau_Q}{b_w}$$



Während der Kommutierungszeit  $t_k$  legt die Nut eine Wendezone  $b_w = t_k \cdot v_A$  genannte Strecke am Ankerumfang zurück

# Bürstenfeuer

Ist Folge einer Unterkommutierung

Für die Stromdichte unter den beiden Teilflächen der Kohlebürste zur Lamelle 1 und 2 ergibt sich:

$$J_1 = \frac{i_1}{l_B \cdot v_k \cdot t} = \frac{I_S - i_k}{l_B \cdot b_B \cdot \frac{t}{t_K}}$$

# Bürstenfeuer

Ist Folge einer Unterkommutierung

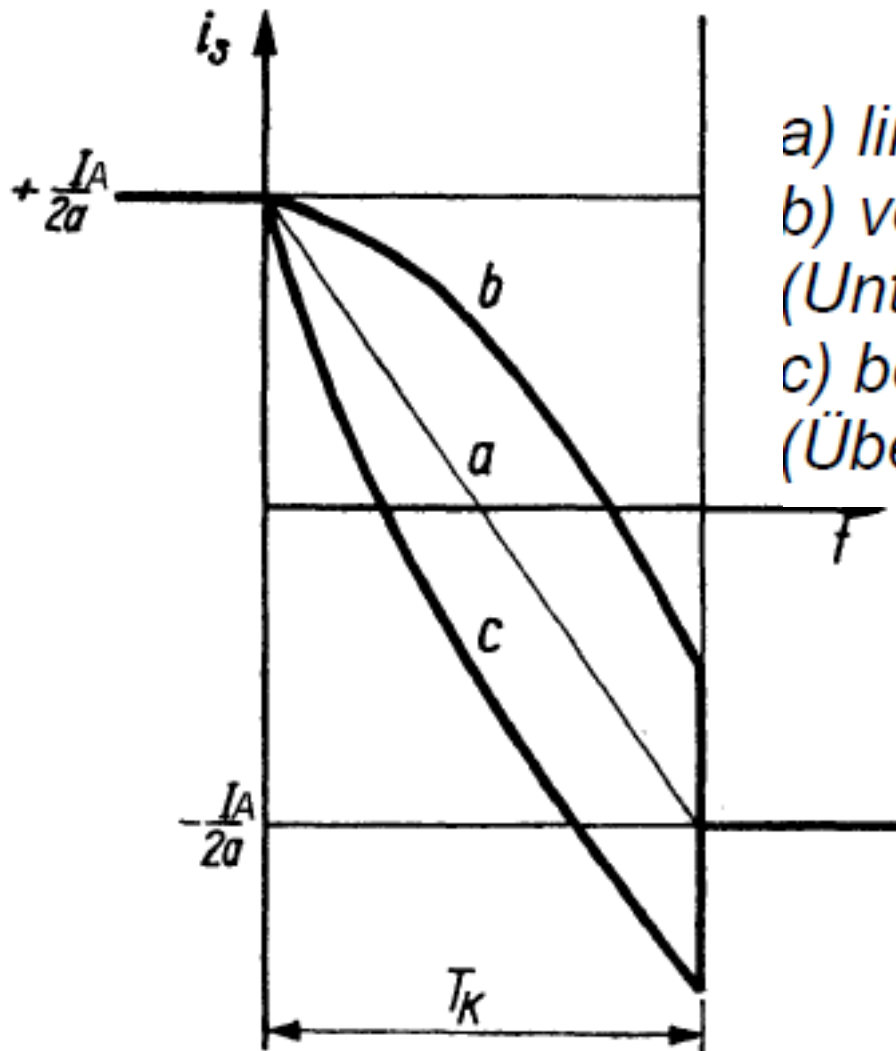
Für die Stromdichte unter den beiden Teilflächen der Kohlebürste zur Lamelle 1 und 2 ergibt sich:

$$J_1 = \frac{i_1}{l_B \cdot v_k \cdot t} = \frac{I_S - i_k}{l_B \cdot b_B \cdot \frac{t}{t_K}} \quad \longrightarrow \quad J_1 = J_B \cdot \frac{I_S - i_k / 2I_S}{t/t_K}$$

$$J_2 = \frac{i_2}{l_B \cdot (b_B - v_k \cdot t)} = \frac{I_S + i_k}{l_B \cdot b_B \cdot (1 - \frac{t}{t_K})} \quad \longrightarrow \quad J_2 = J_B \cdot \frac{I_S + i_k / 2I_S}{1 - t/t_K}$$

$$J_B = \frac{2I_S}{l_B \cdot b_B} \quad \text{Mittlere Stromdichte}$$

# Bürstenfeuer



- a) *lineare Kommutierung*
- b) *verzögerte Kommutierung (Unterkommutierung)*
- c) *beschleunigte Kommutierung (Überkommutierung)*

# Bürstenfeuer

Während der gesamten Kurzschlusszeit  $t_K$ .

Die Stromdichte der ablaufenden Bürstenkante,  
d.h. bei Lamelle 2  $> J_B$

Überschreitet die Überhöhung einen Grenzwert



Bürstenfeuer

Die verzögernde Wirkung von  $U_r$  ist so stark, dass

zur Zeit  $t = t_K$  ist  $i_2$  noch nicht null

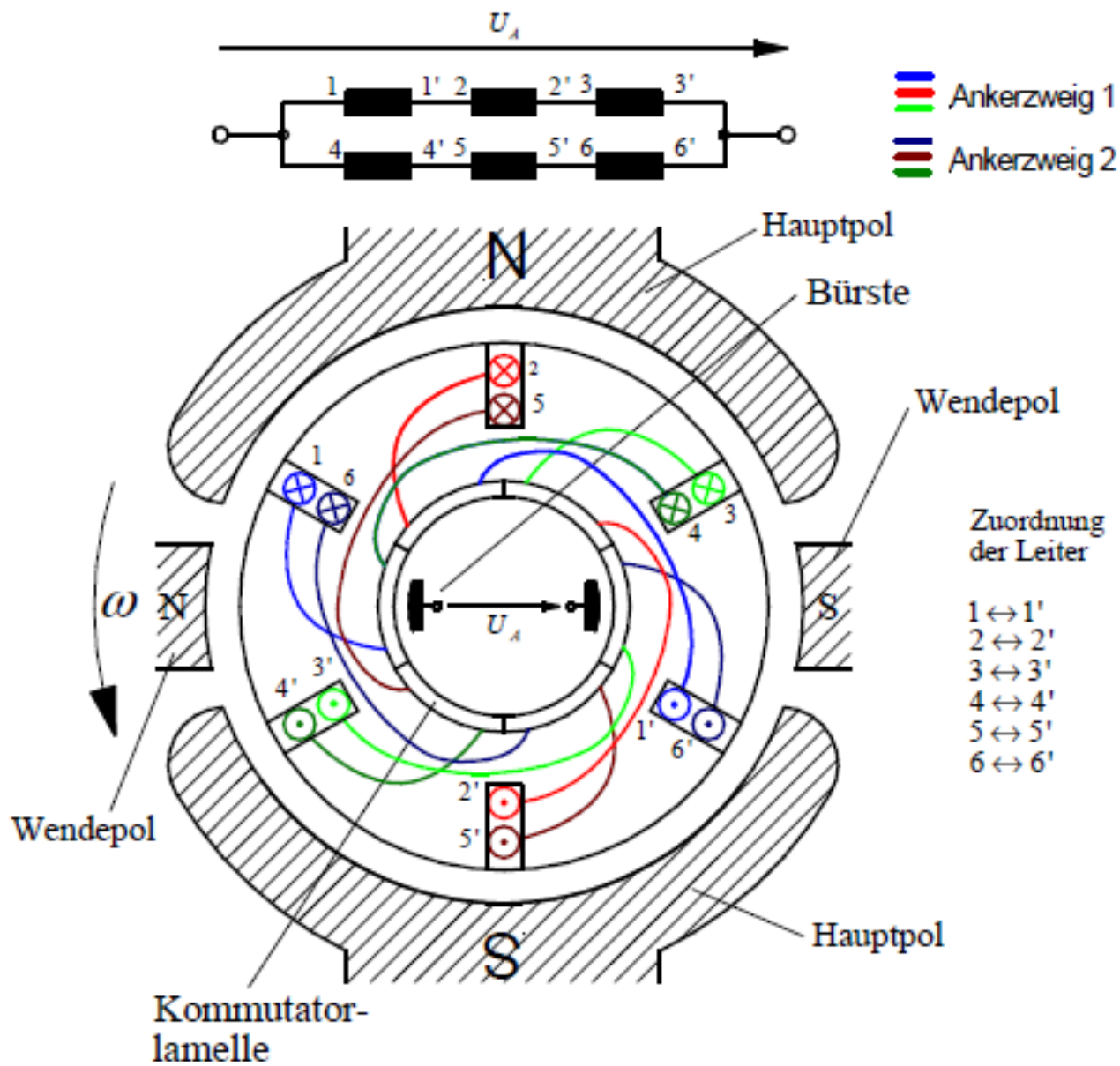


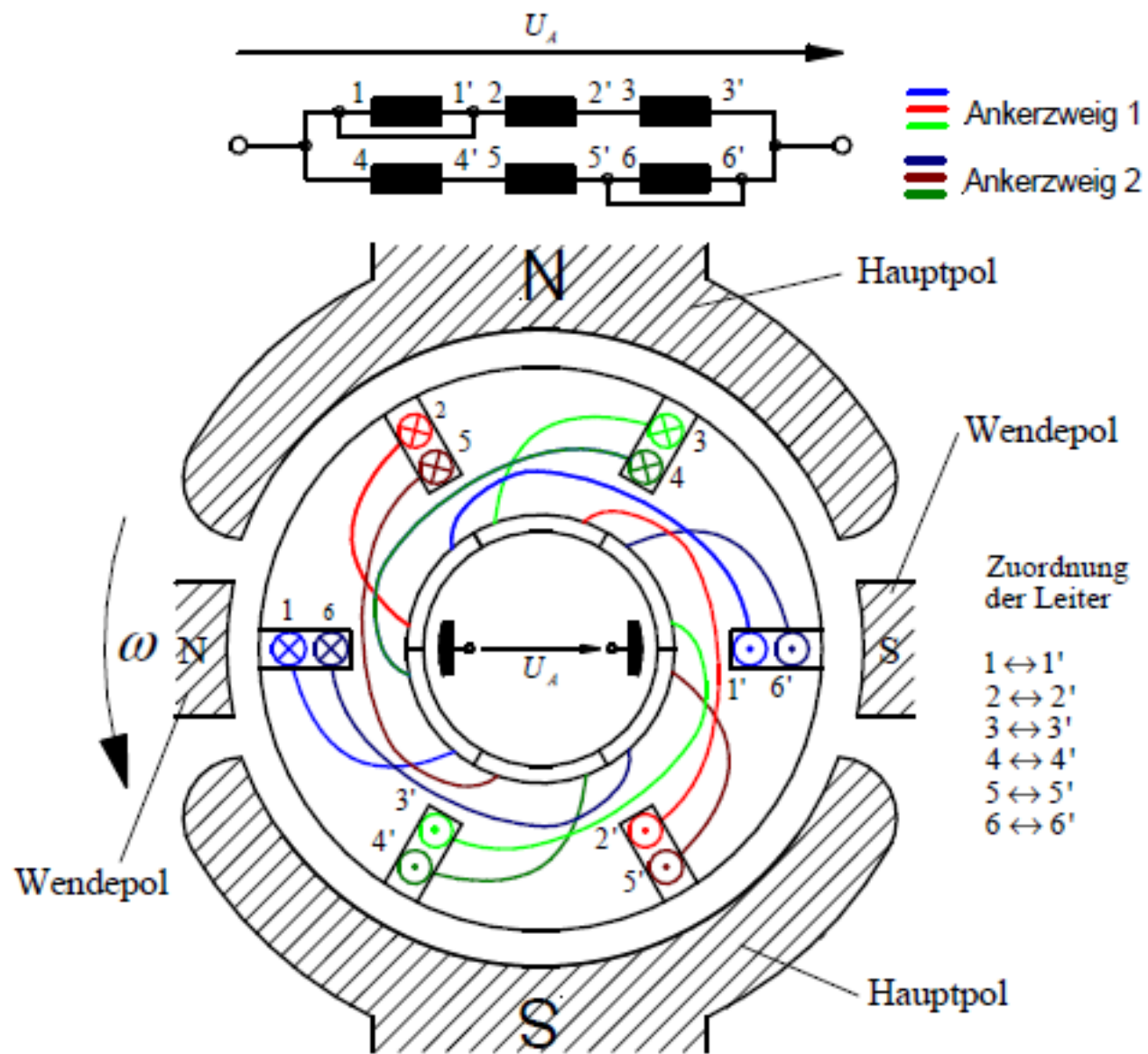
Wird durch Abriss des Kontaktes erzwungen



Entstehung eines Lichtbogens: Abbau der Energie







# Querfeldspannung

→ Wegen des Ankerquerfeldes

→ In der geometrisch neutralen Zone tritt die Flussdichte  $B_A$  auf

Mit der Windungszahl  $N_S$  folgt für die induzierte Bewegungsspannung

$$U_b = 2 \cdot N_S \cdot B_A \cdot l \cdot v_A$$

# Wendefeldspannung

Die gleichsinnige Wirkung der beiden Spannungen  $U_r$  und  $U_b$  zeigt bereits die Möglichkeit auf, die unerwünschte Unterkommutterung zu vermeiden.

→  $B_A$  in der Polücke beseitigen

$$U_w = 2 \cdot N_S \cdot B_w \cdot l \cdot v$$

→ Durch ein entgegengesetztes Feld  $B_w$

$$U_r + U_w = 0$$

In der Praxis:  $U_r + U_w < 0$  → leicht beschleunigte Stromwendung

# Wendepole

Aufbau von Hilfs- oder Wendepolen in der neutralen Zone

- Wicklungen müssen gegensinnig vom Ankerstrom durchflossen werden
- Kompensation der magnetischen Spannung  $V_A$  des Ankerquerfeldes
- Die erforderliche Flussdichte  $B_w$  bestimmt sich aus der Forderung  $U_r + U_w = 0$

# Kompensationswicklung

Die neutrale Zone ist nun neutralisiert

Aber das Ankerquerfeld hat auch Einfluss auf das Feld unterhalb der Polschuhe

Problem: Feldschwächebetrieb nicht möglich

Wird bei voller Erregung (Aufbau des Luftspaltfeldes) ein Grenzwert überschritten



Funkenüberschlag in der Stromwendeisolation

**Kann bei Feldschwächung  
Rundfeuer einleiten**

# Kompensationswicklung

Dies wird vermieden, in dem man unter die Hauptpole eine weitere Wicklung anbringt, die in Reihe zur Wendepolwicklung liegt.

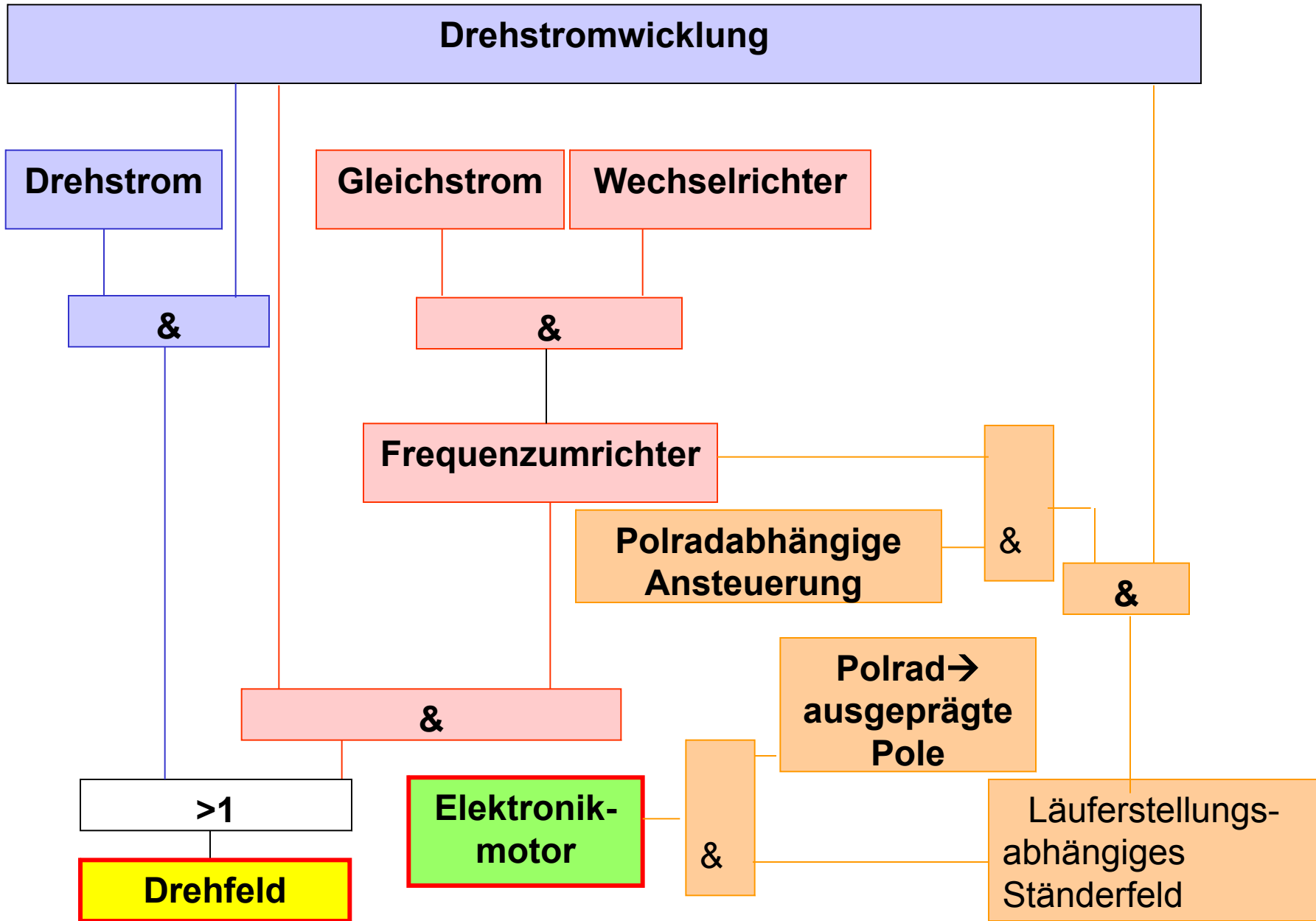
Diese sind auch vom Ankerstrom durchflossen  
Idealerweise ist das Ankerquerfeld vollständig neutralisiert

# Anschlussbezeichnungen der Gleichstrommaschine

Wicklung	Anschlußbezeichnung
Ankerwicklung	A1 - A2
Wendepolwicklung	B1 - B2
Kompensationswicklung	C1 - C2
Erregerwicklung (Reihenschluß)	D1 - D2
Erregerwicklung (Nebenschluß)	E1 - E2
Erregerwicklung (Fremderregung)	F1 - F2

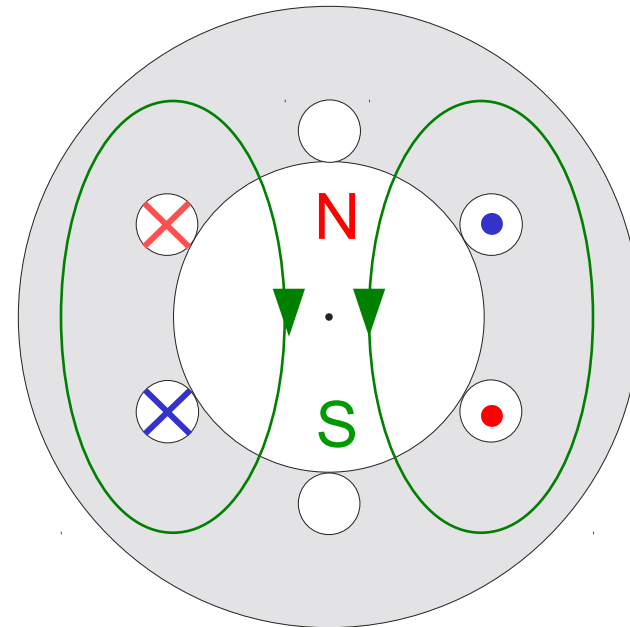
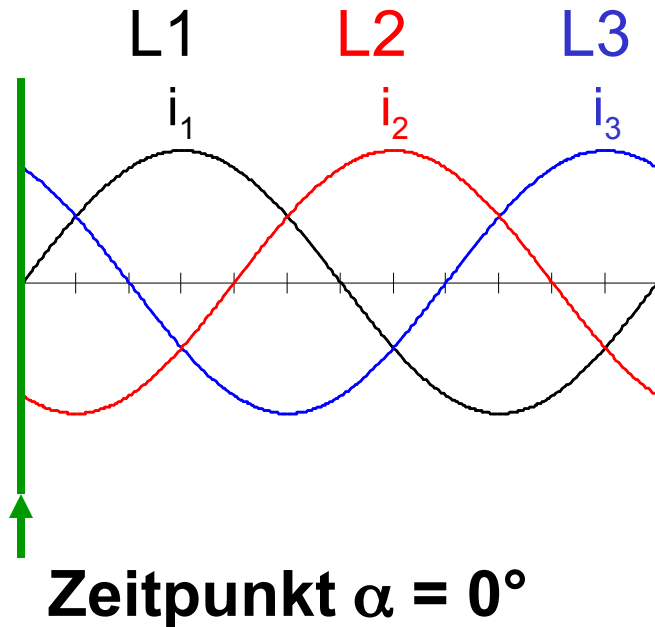


# Drehfelderzeugung



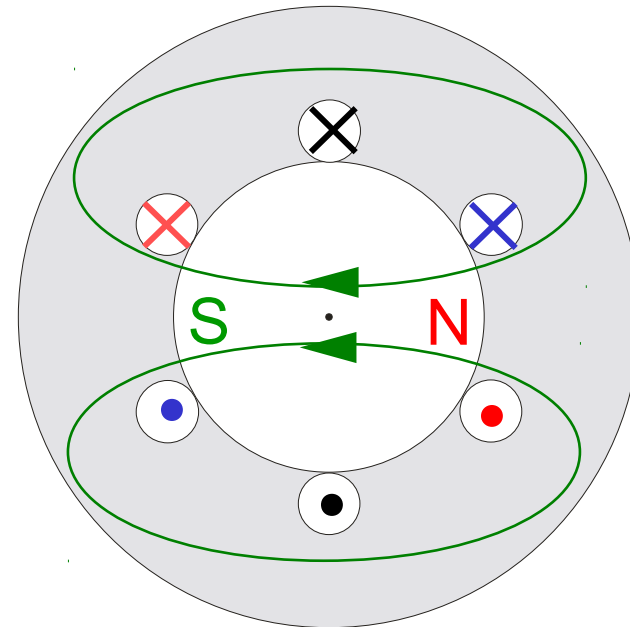
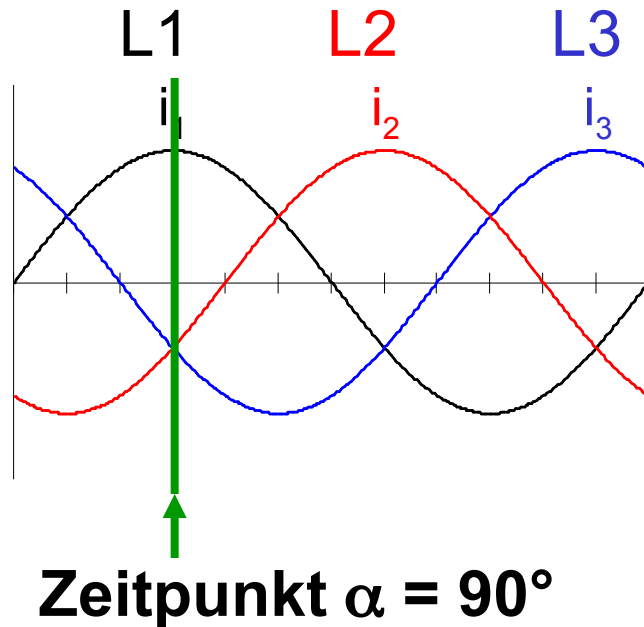
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

Resultierende Magnetfelder in den drei Wicklungen  
eines Drehfeldmotors:



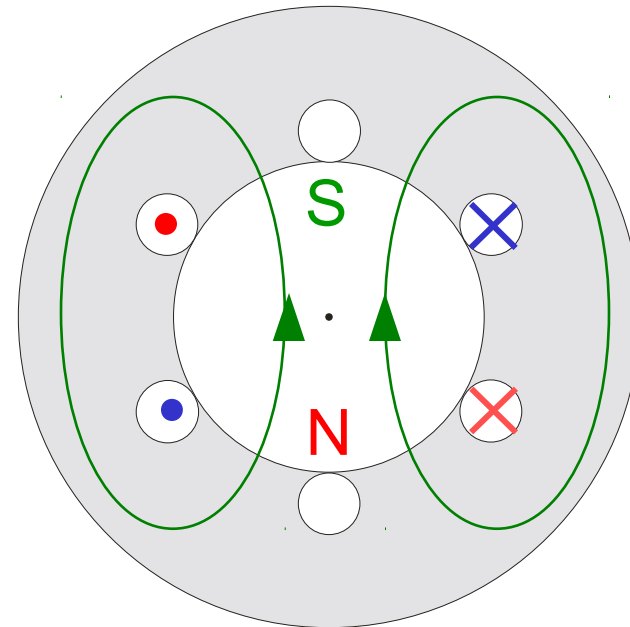
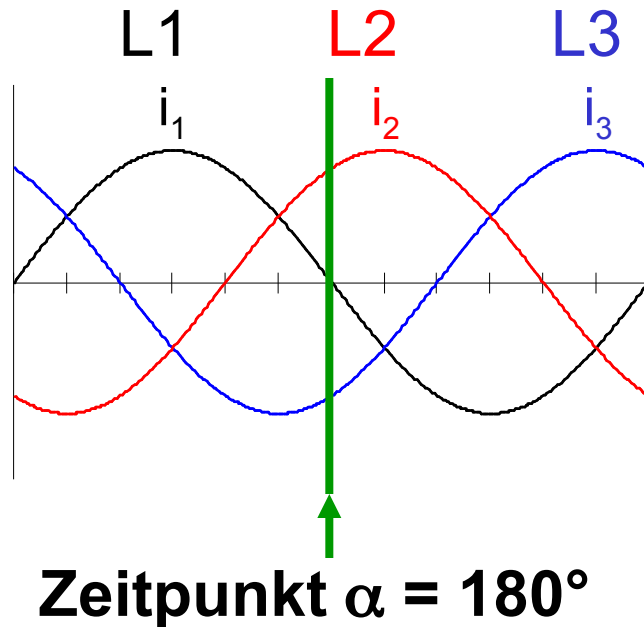
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

Resultierende Magnetfelder in den drei Wicklungen  
eines Drehfeldmotors:



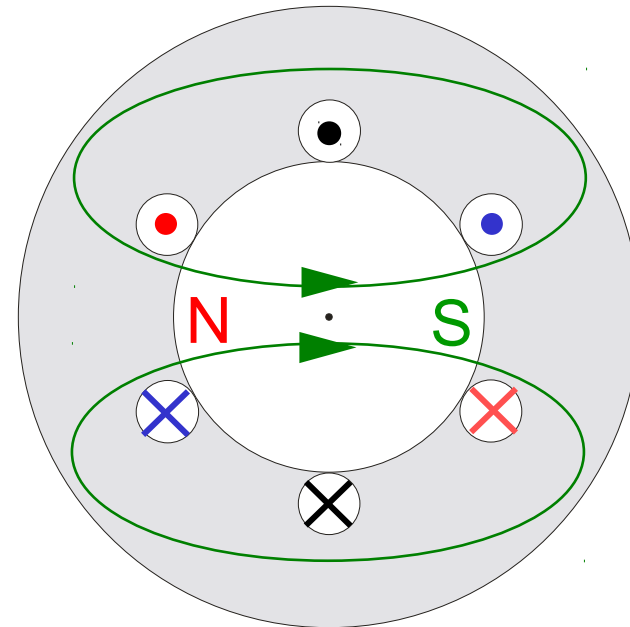
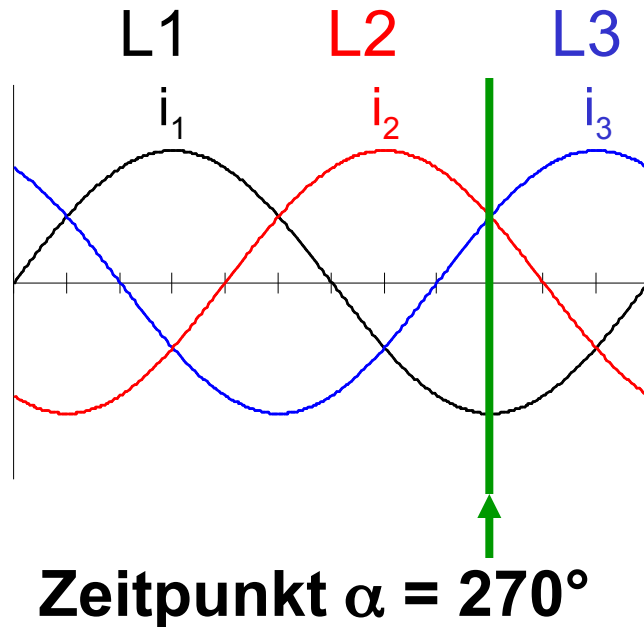
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

Resultierende Magnetfelder in den drei Wicklungen  
eines Drehfeldmotors:



# Drehfelderzeugung an Drehstrom

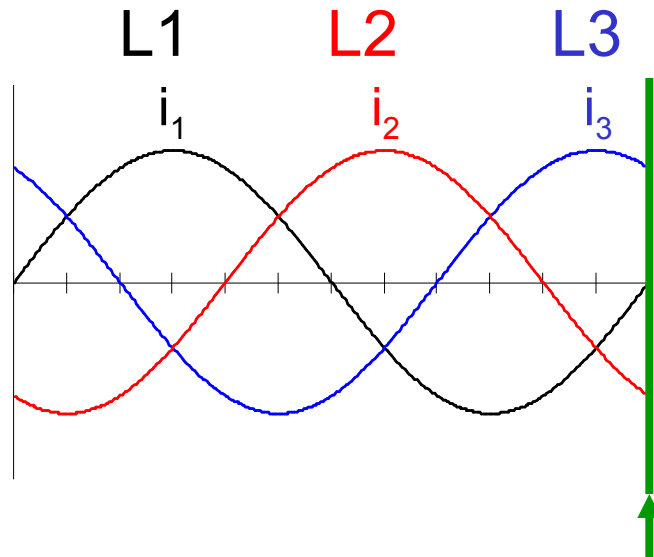
Resultierende Magnetfelder in den drei Wicklungen  
eines Drehfeldmotors:



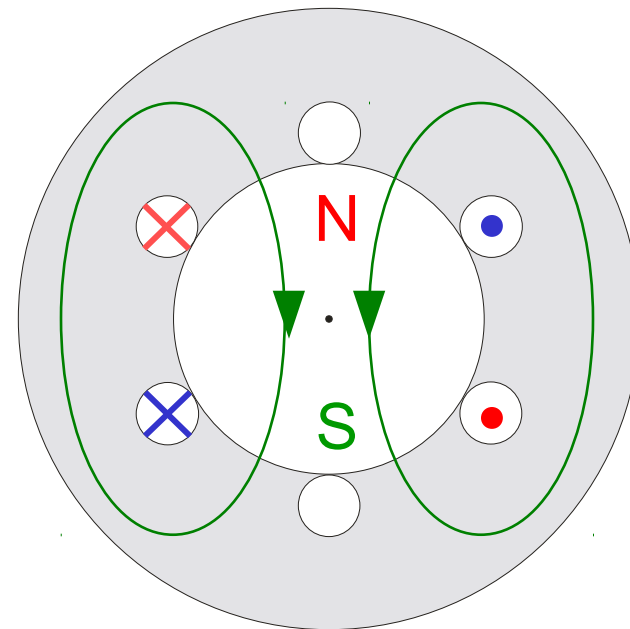
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

Resultierende Magnetfelder in den drei Wicklungen  
eines Drehfeldmotors:

=> magnetisches Drehfeld



Zeitpunkt  $\alpha = 360^\circ$



# Drehfelderzeugung an Drehstrom

## Berechnung der Drehfelddrehzahl $n_s$

(Umdrehungsfrequenz des Ständerdrehfeldes)

- Das Drehfeld macht während einer Periode eine Umdrehung  $\Rightarrow n_s \sim f$

$\Rightarrow$  Bei einer Netzfrequenz von  $f = 50$  Hz:

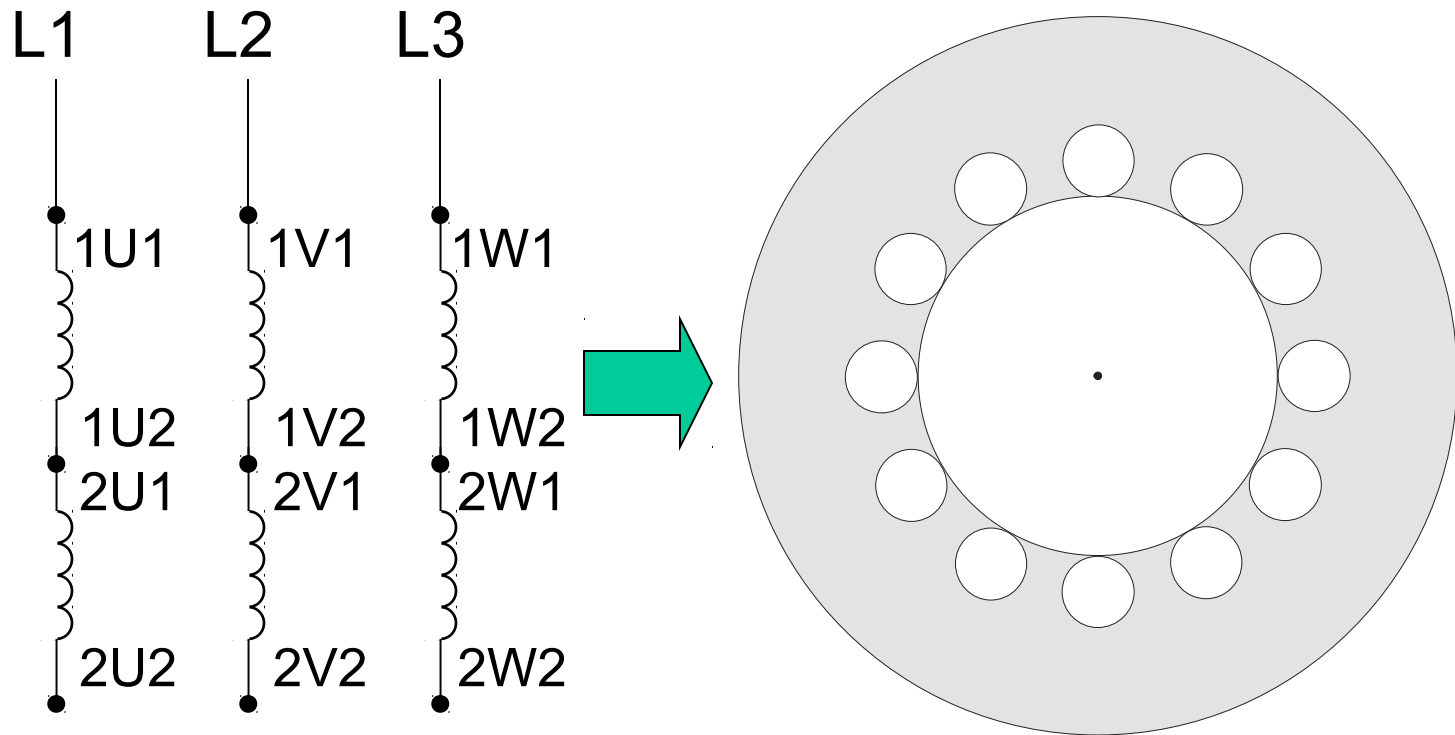
$$n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$$

**? Wie kann die Drehfelddrehzahl verändert werden ?**

# Drehfelderzeugung an Drehstrom

## Veränderung der Drehfelddrehzahl $n_s$

=> Die drei Wicklungen U, V und W werden geteilt

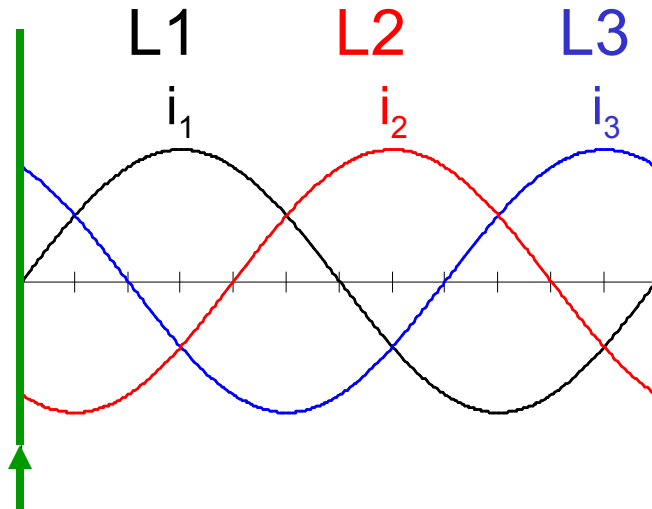




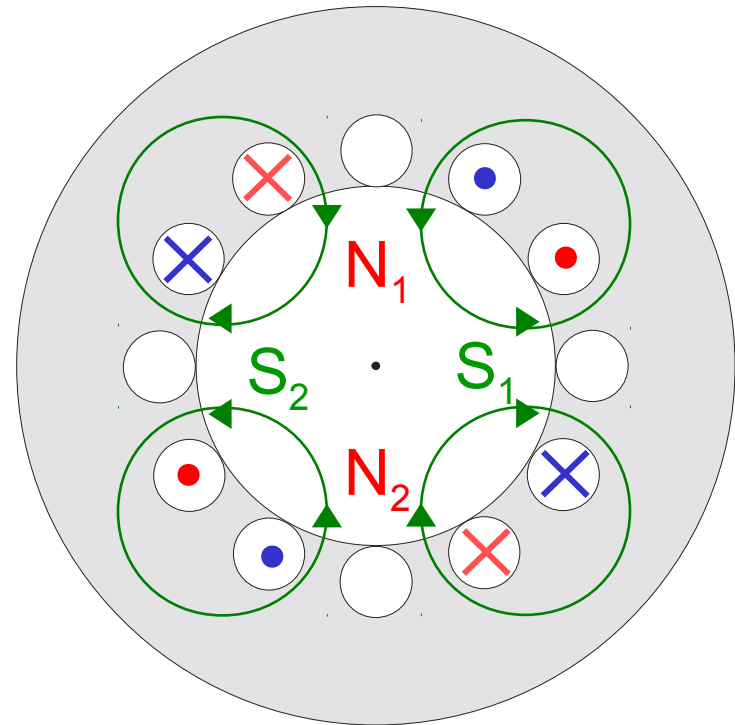
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

## Veränderung der Drehfelddrehzahl $n_s$

=> resultierende Magnetfelder in den sechs Wicklungen eines Motors:



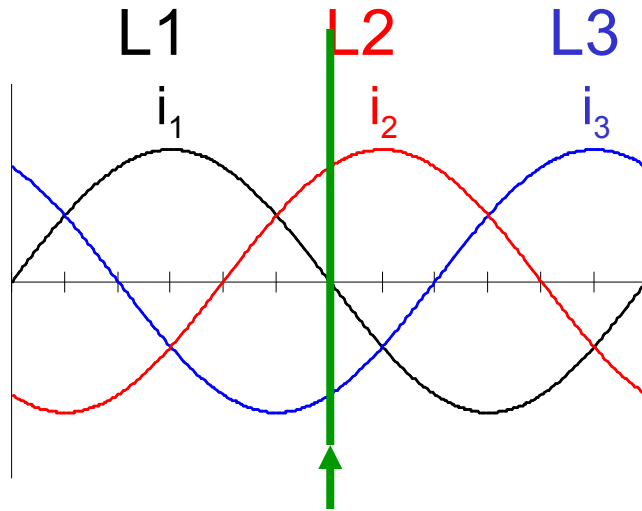
Zeitpunkt  $\alpha = 0^\circ$



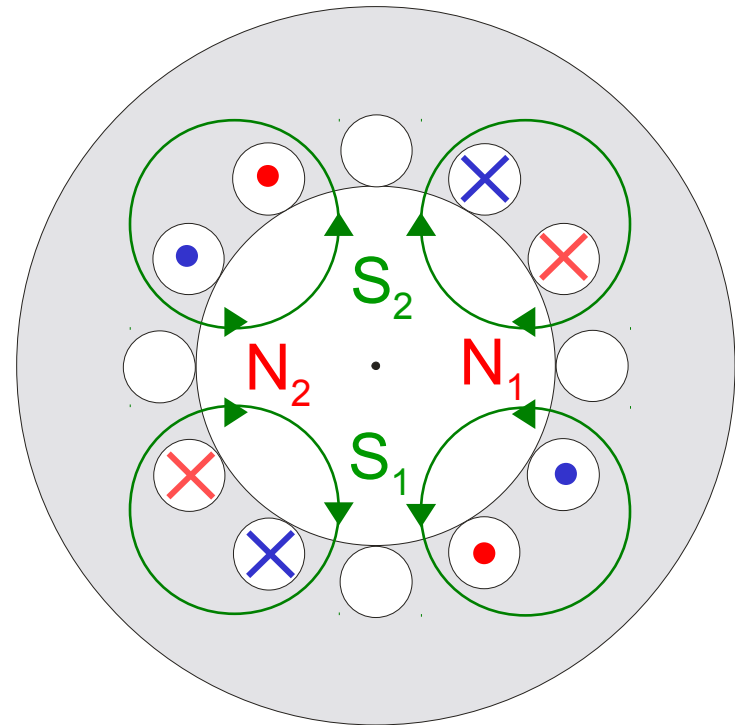
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

## Veränderung der Drehfelddrehzahl $n_s$

=> resultierende Magnetfelder in den sechs Wicklungen eines Motors:



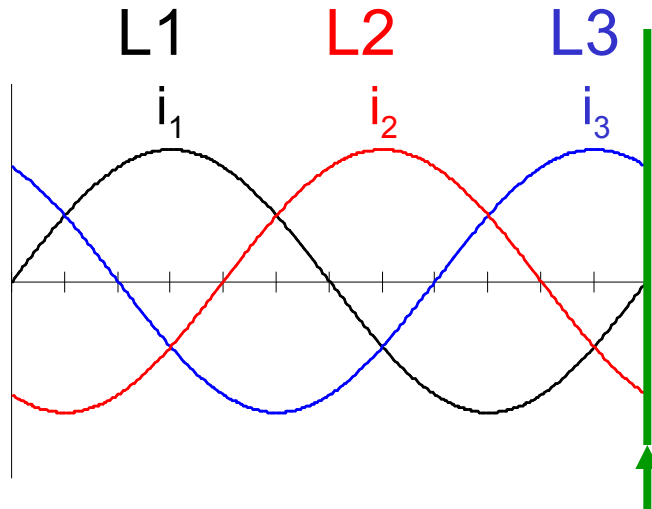
Zeitpunkt  $\alpha = 180^\circ$



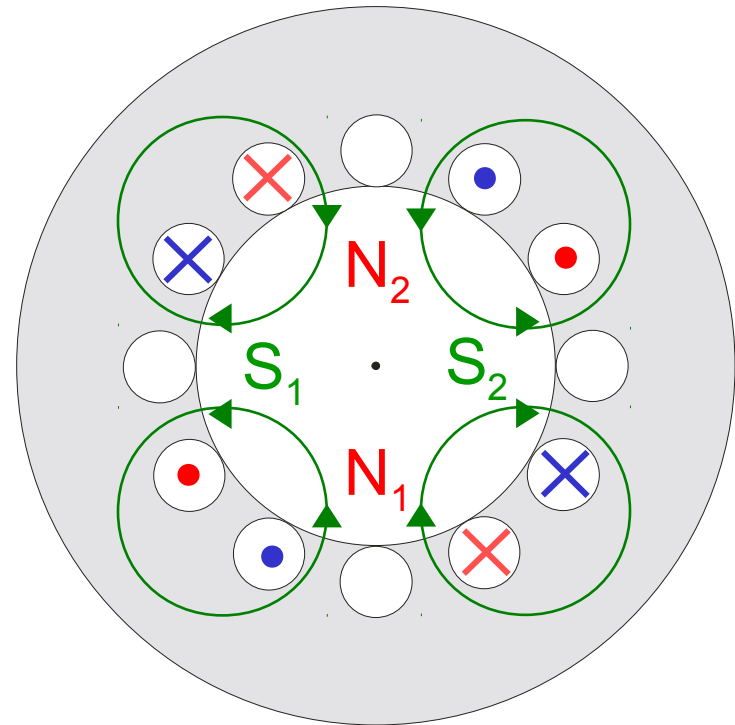
# Drehfelderzeugung an Drehstrom

## Veränderung der Drehfelddrehzahl $n_s$

=> resultierende Magnetfelder in den sechs Wicklungen eines Motors:



Zeitpunkt  $\alpha = 360^\circ$



# Drehfelderzeugung an Drehstrom

## Berechnung der Drehfelddrehzahl $n_s$

- Das Drehfeld macht während einer Periode nur eine halbe Umdrehung  $\Rightarrow n_s \sim f / 2$

$\Rightarrow$  Bei einer Netzfrequenz von  $f = 50$  Hz:

$$n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$\Rightarrow n_s$  nur noch halb so groß

wie bei drei Wicklungen

Warum??

# Drehfelderzeugung an Drehstrom

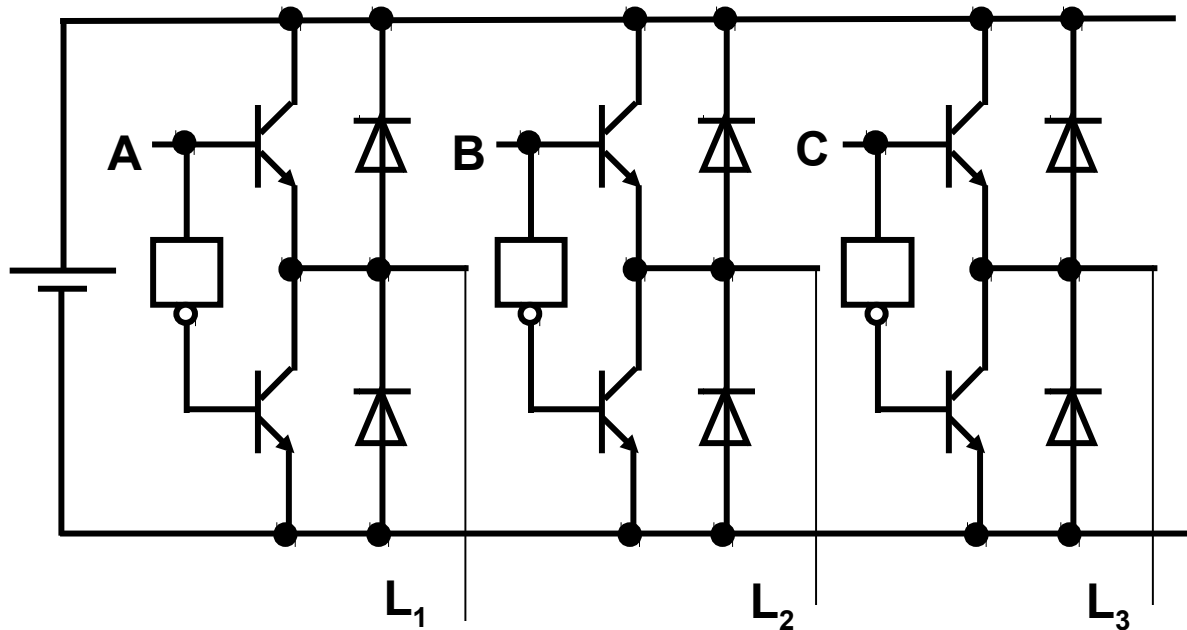
## Formel zur Berechnung der Drehfelddrehzahl $n_s$

- Bei drei Spulen bilden sich zwei Magnetpole aus  $\Rightarrow$  1 Polpaar ( $p = 1$ ).
- Bei sechs Spulen bilden sich vier Magnetpole aus  $\Rightarrow$  2 Polpaare ( $p = 2$ ).

$\Rightarrow n_s$  von der Polpaarzahl und von der Frequenz abhängig

$$\Rightarrow n_s = f / p \quad [n_s = \text{min}^{-1}]$$

# Drehfelderzeugung mit Frequenzumrichter nach dem Raumzeigerverfahren

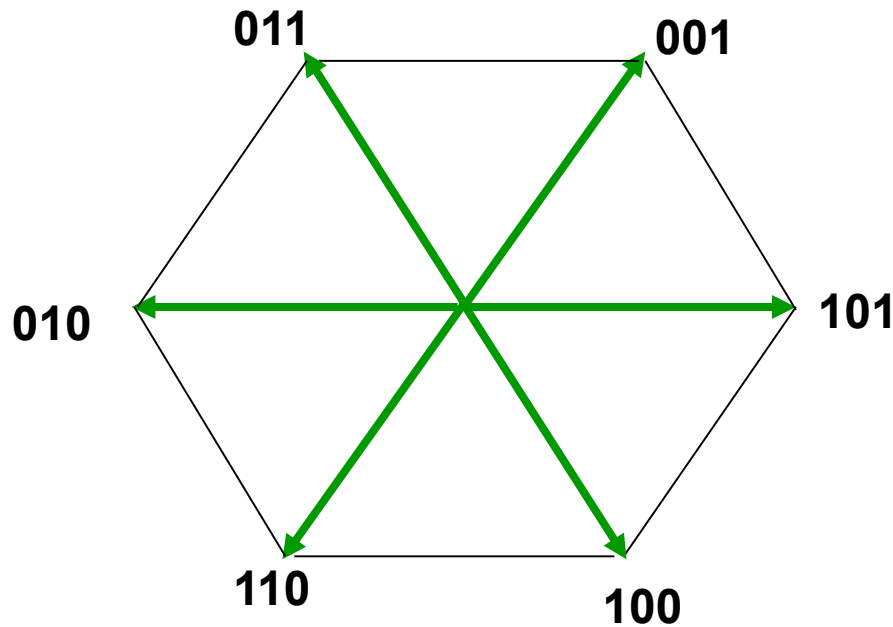


- ➔ Drei Halbbrücken werden über A, B und C angesteuert
- ➔ Mögliche Schaltzustände  $\rightarrow 8 \rightarrow$  relevant nur 6
- ➔ Aufrufen der sechs relevante Zustände  $\rightarrow$  Drehfeld entsteht



# Drehfelderzeugung mit Frequenzumrichter nach dem Raumzeigerverfahren

**Ergebnis:** Drehfeld ist sechseckig → Oberwellen → ungünstig

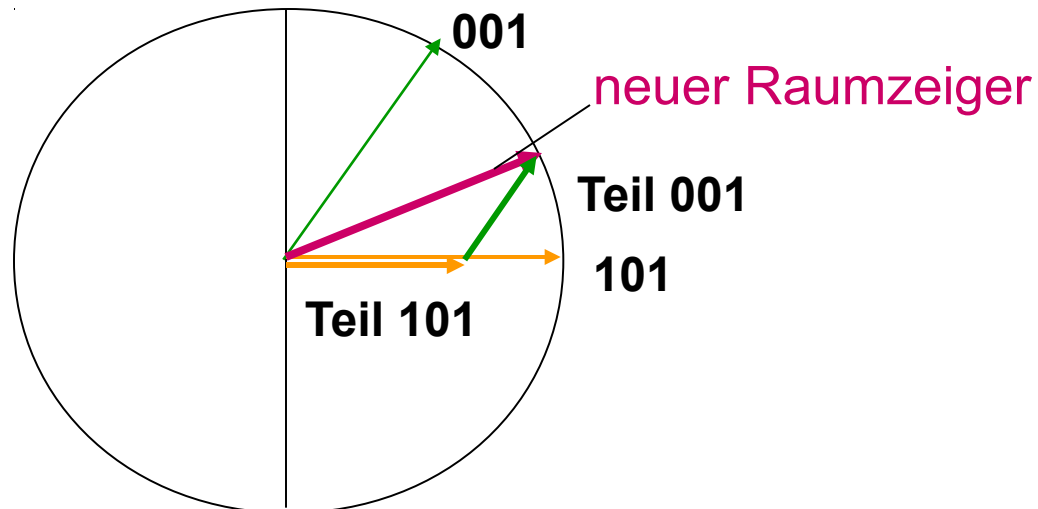


Abhilfe ??????

# Drehfelderzeugung mit Frequenzumrichter nach dem Raumzeigerverfahren

Wie kann ein kontinuierlicher kreisförmiger Verlauf des Raumzeigers erreicht werden ?

Durch PWM wird die Länge benachbarter Zeiger verändert  $\rightarrow$  Vektoraddition  $\rightarrow$  neuer vom Pulsverhältnis der beiden Raumzeiger abhängiger Raumzeiger ist entstanden

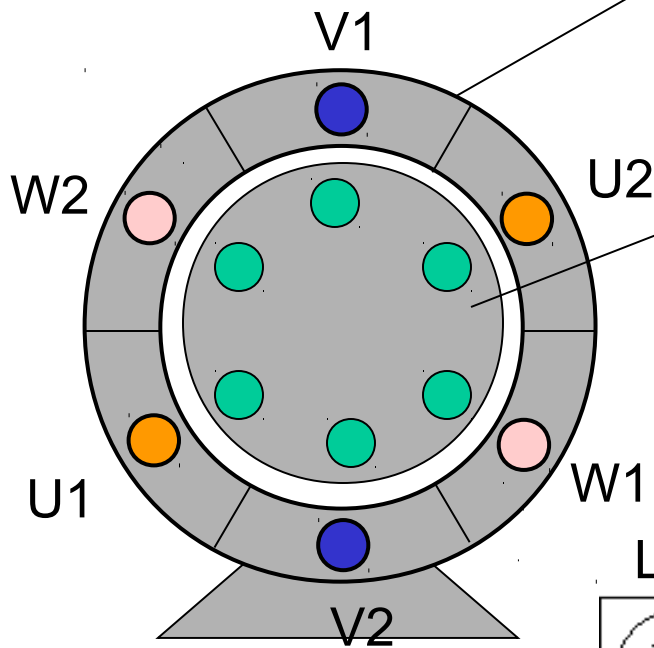




# Drehstromasynchronmotor

Asynchron → Läufer dreht sich langsamer als Drehfeld

Aufbau



Ständer (Stator)

Drehstromwicklung am Drehstromnetz erzeugt Drehfeld

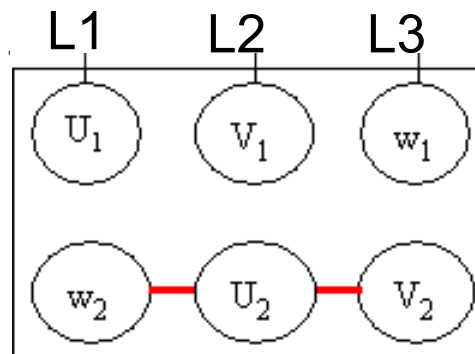
Läufer (Rotor)

Blechpaket in das die Läuferwicklung eingelassen ist

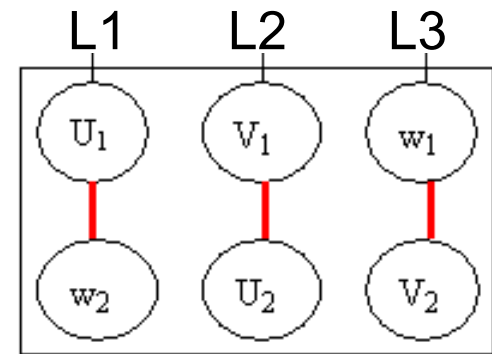
Man unterscheidet

- Kurzschlussläufer (Läuferstäbe)
- Schleifringläufer (echte Wicklung)

Klemmbrett →



Sternschaltung

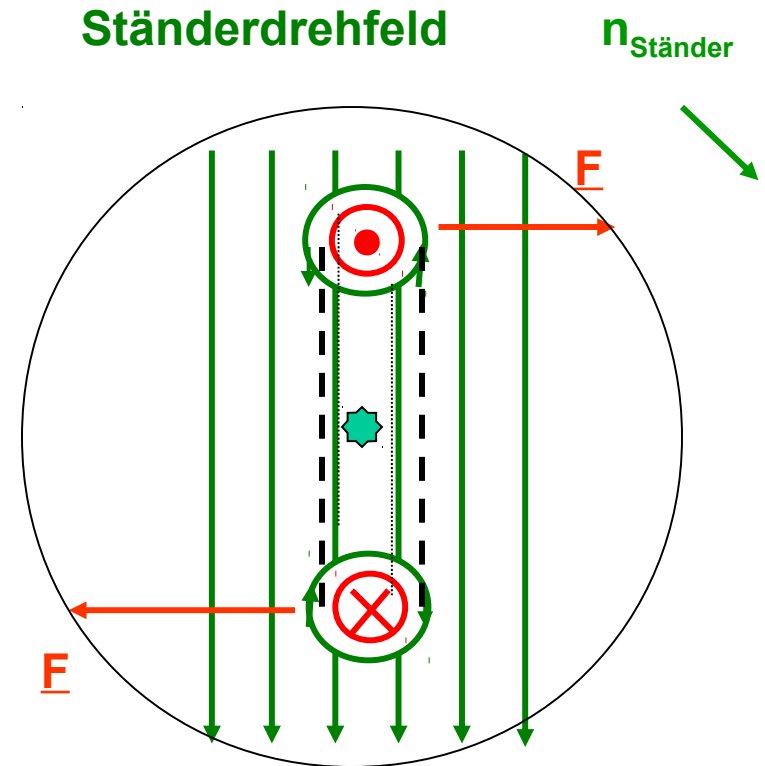


Dreieckschaltung

# Drehstromasynchronmotor

Wirkungsweise (Vereinfacht nur eine Windung gezeichnet)

1. Ständerdrehfeld schneidet Leiter → Feldlinien werden geschnitten
2. Läufer Spannung wird induziert
3. Läufer spule ist kurzgeschlossen => Läuferstrom fließt
4. Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld → Ablenkung → Drehbewegung



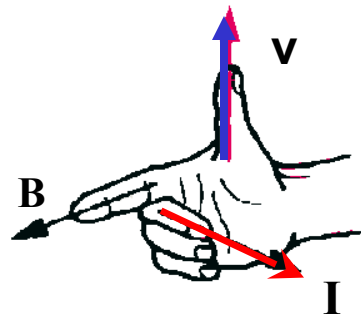
Schlupfdrehzahl = Drehfelddrehzahl - Läuferdrehzahl

Ohne Schlupf kein Schneiden von Feldlinien → Keine Induktionsspannung  
→ kein Induktionsstrom → keine Kraftwirkung → keine Drehbewegung

# Drehstromasynchronmotor

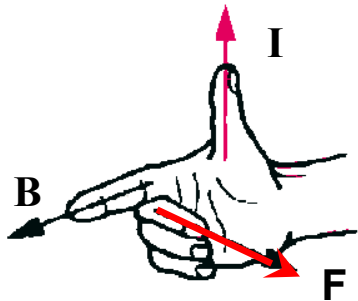
Wirkungsweise (mit UVW- Regel erklärt)

## 1. Induktionsspannung

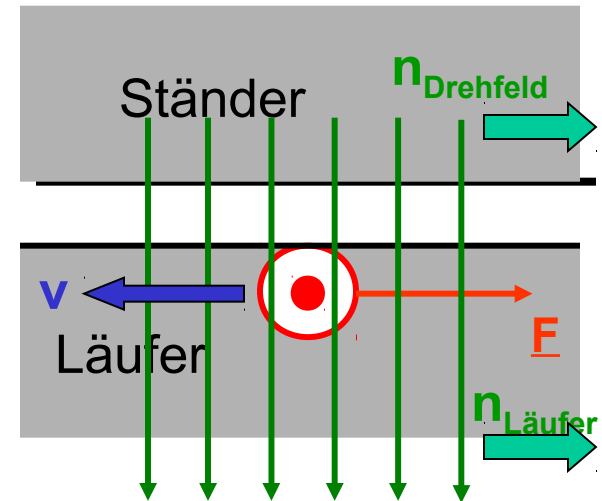


Daumen: Ursache (  $v$  )  
Zeigefinger: Vermittlung (  $B$  )  
Mittelfinger: Wirkung (  $I$  )

## 2. Kraftwirkung



Daumen: Ursache (  $I$  )  
Zeigefinger: Vermittlung (  $B$  )  
Mittelfinger: Wirkung (  $F$  )



# Drehstromasynchronmotor

## Beziehungen

### 1. Induktionsspannung

Motorhauptgleichung →

$$U_i = C_U * n * \phi$$

$C_U$  : Maschinenkonstante

→ modifiziert für DASM

→ Relevante Drehzahl für induzierte Spannung = Schlupfdrehzahl

→

$$U_i = C_U * n_{\text{Schlupf}} * \phi$$

$C_U$  : Maschinenkonstante

→ Im Stillstand größte induzierte Spannung

→ größter Strom im Läufer → hoher Anlaufstrom

# Drehstromasynchronmotor

## Beziehungen

### 2. Drehmoment

Motorhauptgleichung  $\longrightarrow$   $M = C_M * I * \phi$

$\longrightarrow$  modifiziert für DASM

$\longrightarrow$  Drehmomenten bildender Strom im Läufer ist Wirkstromanteil

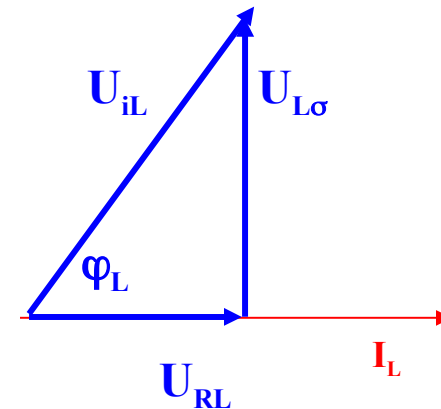
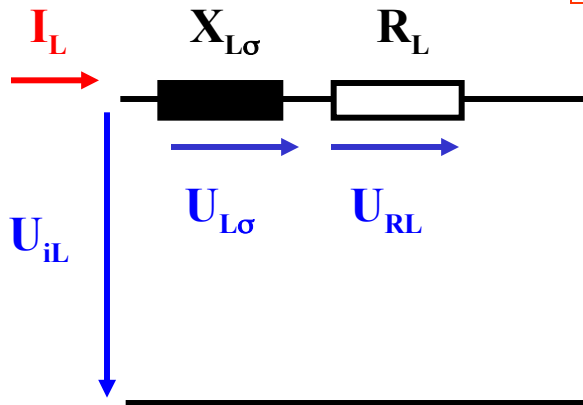
$\longrightarrow$   $M = C_M * I_{\text{Läufer}} * \phi * \cos\varphi_{\text{Läufer}}$

$\longrightarrow$  **Wovon hängt der  $\cos\varphi$  des Läufers ab??**

# Drehstromasynchronmotor

Ersatzschaltbild des Läufers

$$X_{L\sigma} = s \cdot X_{1\sigma\text{Stillstand}}$$



Im Stillstand ist der Schlupf maximal  $\rightarrow X_{L\sigma}$  maximal  $\rightarrow \cos\varphi_{\text{Läufer}}$  sehr schlecht  $\rightarrow$  resultiert Missverhältnis zwischen hohem Anlaufstrom und **bescheidenem** Anlaufmoment


# Drehstromasynchronmotor


Konstante Schlupfdrehzahl  $\rightarrow$  konstanter  $x_{L\sigma}$   $\rightarrow$  Konstanter  $\cos\varphi_{\text{Läufer}}$   
 $\rightarrow$  konstanter Wirkstromanteil im Läufer, sofern  $U_{iL}$  konstant ist.

$U_{iL}$  ist konstant, wenn der Fluss konstant ist.

Konstanter Wirkstromanteil im Läufer und konstanter Fluss führen zu einem konstanten Drehmoment.

**Fazit:** Für alle Vorgänge in der Maschine ist der Schlupf und der Fluss entscheidend!

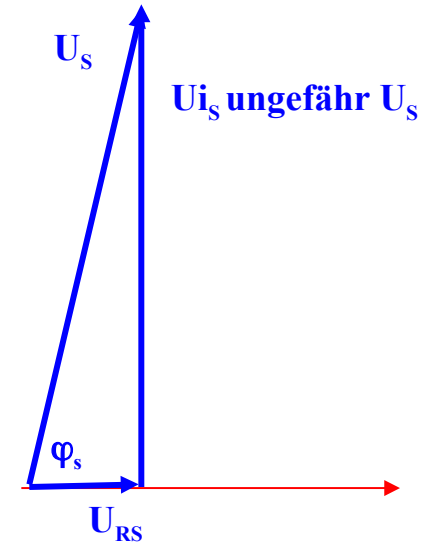
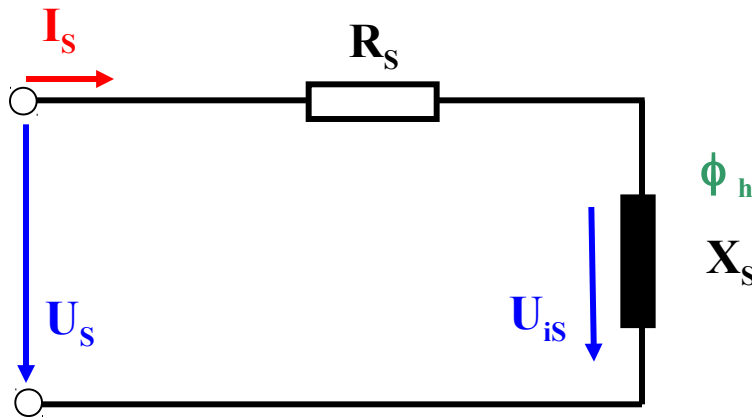
 Es ist gleichgültig von welchen Drehzahlen die Schlupfdrehzahl gebildet wird, nur die Differenz ist entscheidend (z.B.  $3000 \text{ min}^{-1} - 2800 \text{ min}^{-1} = 200 \text{ min}^{-1}$  oder  $1000 \text{ min}^{-1} - 800 \text{ min}^{-1} = 200 \text{ min}^{-1}$ )

 Konstantes Drehmoment bei gleicher Schlupfdrehzahl, aber unterschiedlichen Läuferdrehzahlen!!

# Drehstromasynchronmotor

## Wovon hängt der Fluss in der Maschine ab ?

- ➔ Ständerbetrachtung → einfachster Fall: Leerlaufbetrachtung  
→ Problem reduziert sich auf einfache Spulenbetrachtung



Annahme:  $\phi_h$  ist konstant, wenn  $I_s$  konstant ist

$I_s$  ist konstant, wenn  $U_{is}/X_s = \text{konstant}$  ist →

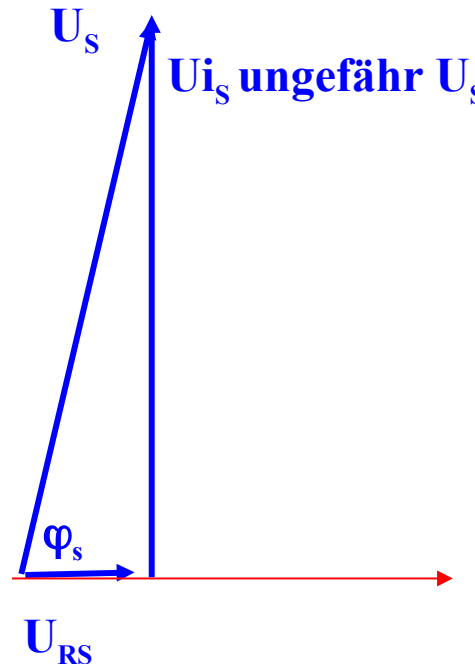
mit  $X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \rightarrow U_{is} \sim f$



# Drehstromasynchronmotor



Für Frequenzen größer 15 Hz gilt  $U_{i_s}$  ungefähr  $U_s$



Angelegte Spannung bestimmt den Fluss



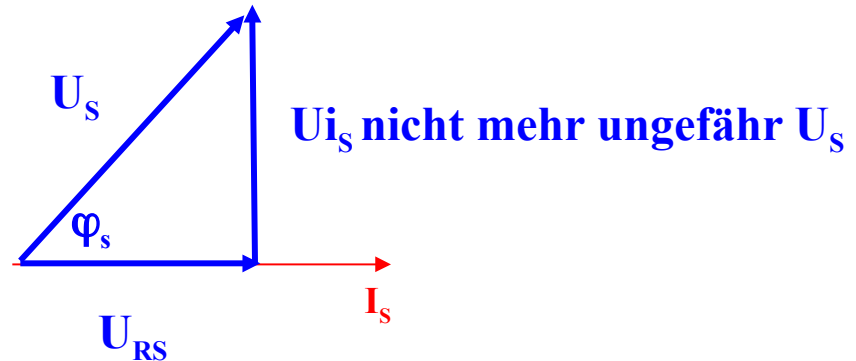
Wird  $U/f$  konstant gehalten, bleibt der Fluss konstant  
→ Frequenzumrichter muss  $U \sim f$  verändern

# Drehstromasynchronmotor



Verhältnisse bei niedrigen Frequenzen

$X_s$  wird mit sinkender Frequenz immer kleiner  $\rightarrow$  Verhältnis  $U_{RS}$  zu  $U_i$  ändert sich gravierend  $\rightarrow U_s \neq U_i$



Wenn weiterhin  $U_s \sim f$  verändert wird, sinkt der Fluss



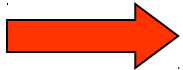
Soll der Fluss konstant gehalten werden, muss im unteren Frequenzbereich die Eingangsspannung  $U_s$  um den Spannungsfall  $U_{RS}$  angehoben werden  $\rightarrow$  man spricht dann Boost.

# Drehstromasynchronmotor

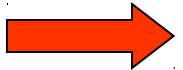
## FAZIT:



Der Frequenzumrichter muss nicht nur die Frequenz, sondern auch die Spannung verändern, um den Fluss in der Maschine konstant zu halten.



Bis ca. 15 Hz  $U$  proportional  $f$



Bei Frequenzen unter 15 Hz sollte  $U$  individuell angehoben werden (überproportional)  $\rightarrow U/f$ - Kennlinie

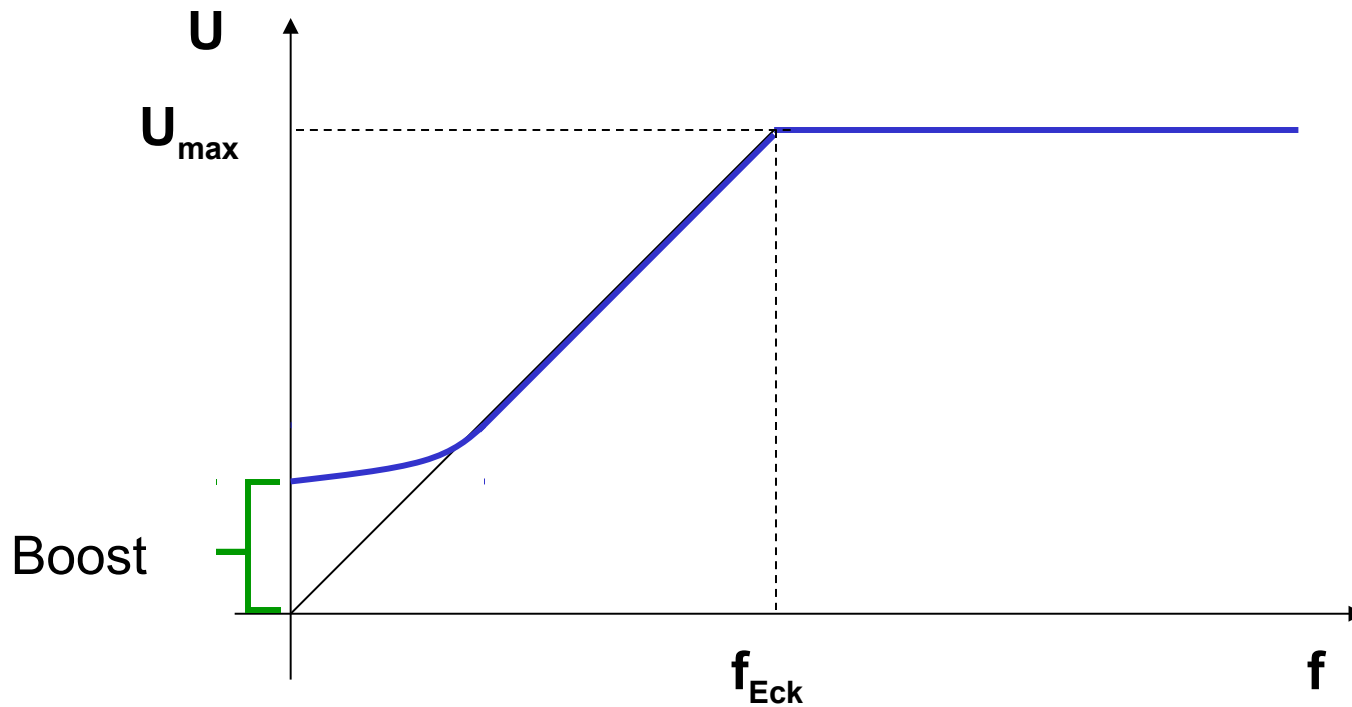
Grund: Wirkwiderstand der Ständerwicklung



Um auch bei Belastung den Fluss konstant zu halten wird die Spannung in Abhängigkeit vom Ständerstrom angehoben  $\rightarrow I \times R$ - Kompensation.

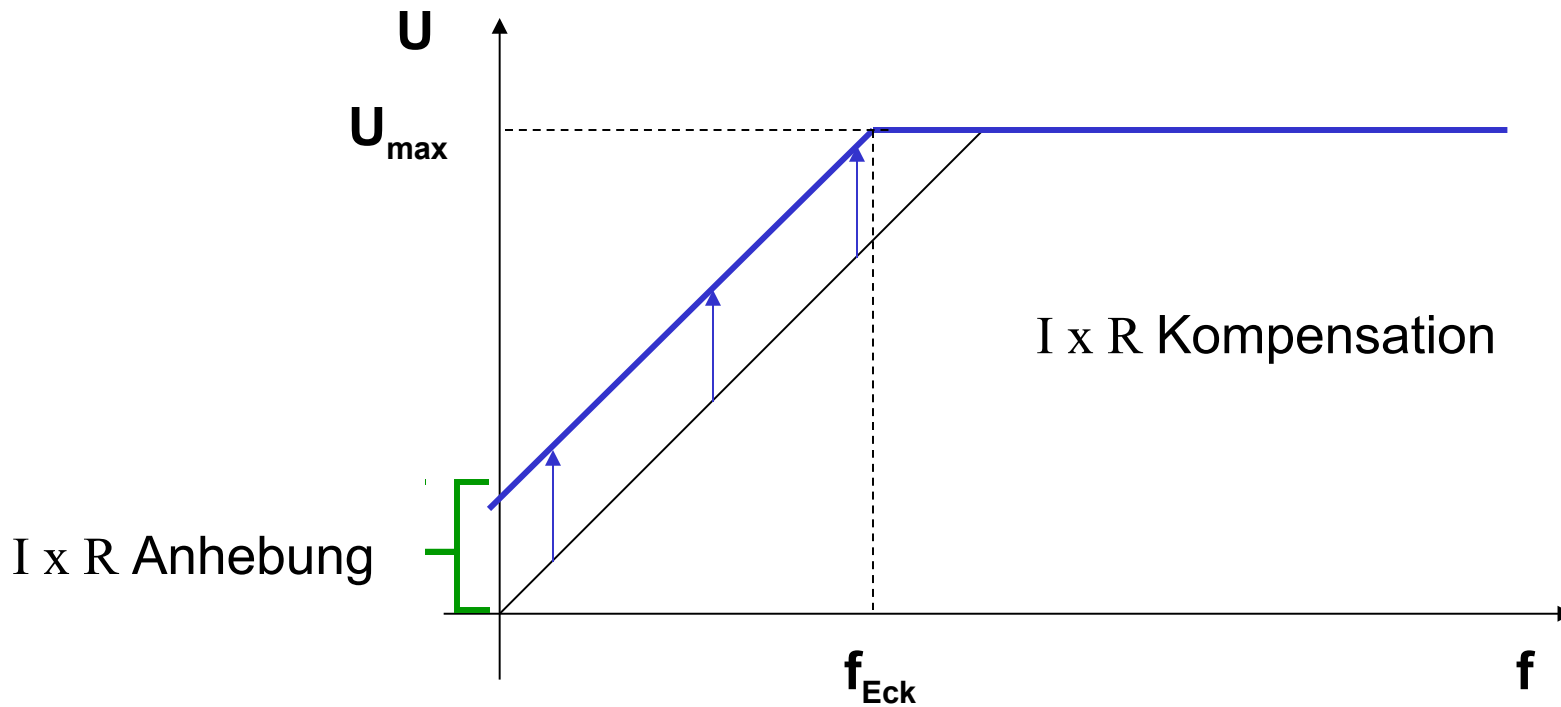
# Drehstromasynchronmotor

## U/f- Kennlinie



# Drehstromasynchronmotor

## U/f- Kennlinie



# Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

