

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

Kapitel 2: Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Inhalt Kapitel 3 : Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

3.2 Kräfte an Zahnflanken

3.3 Kommutierung

3.4 Aufbau bei Polpaarzahl 2

3.5 Drehmoment und induzierte Spannung

3.6 Ersatzschaltbild und Energiebilanz

3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

Beispiel einer 2.2kW-Maschine

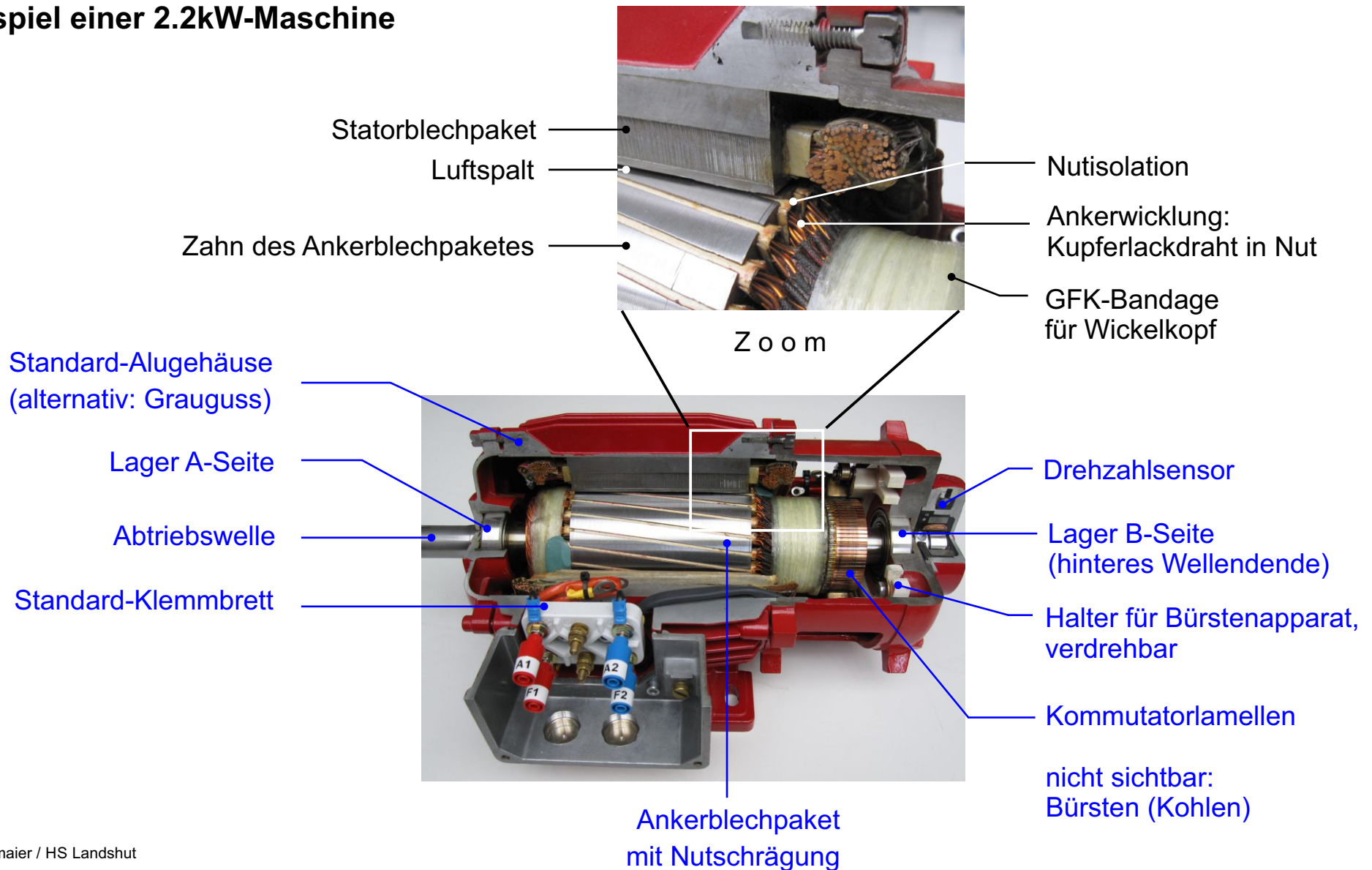
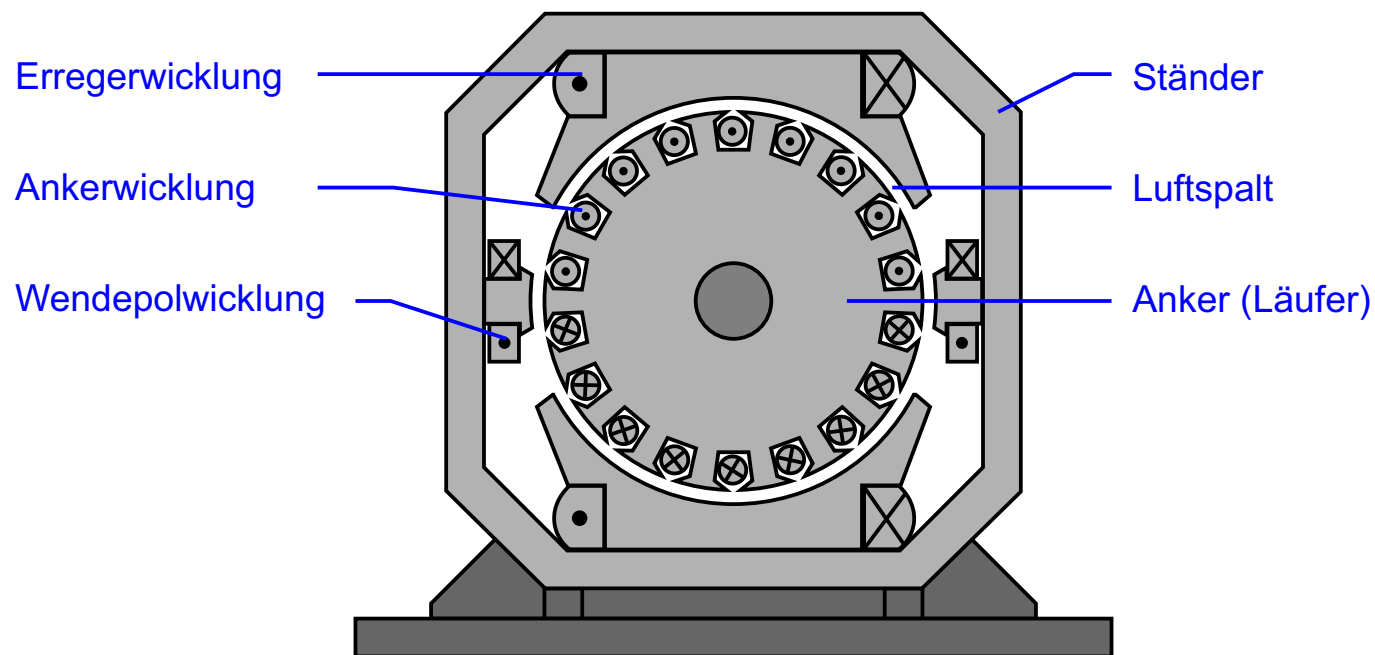


Bild: A. Kleimaier / HS Landshut

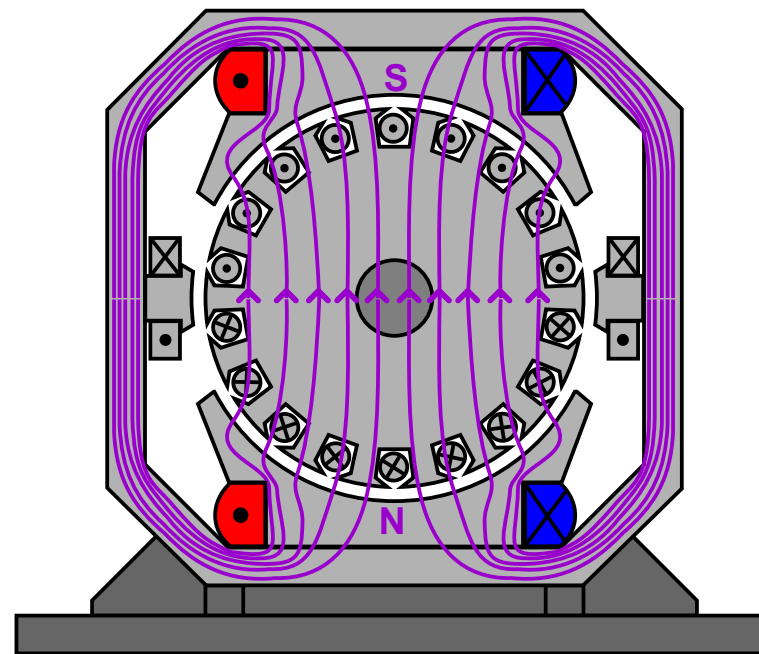
3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

Grundaufbau



3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

Maschine erregt: Feldlinien im Eisenkreis



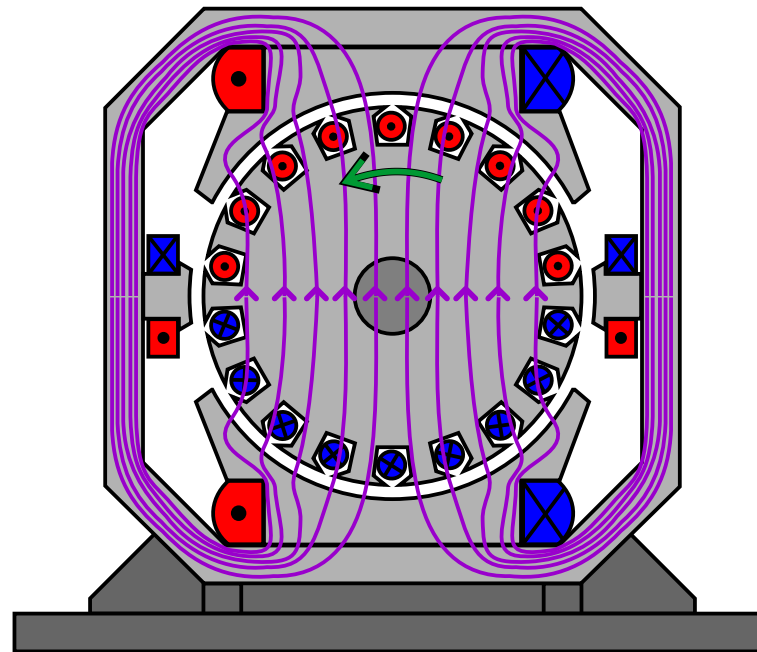
- Erregerwicklung bestromt
- Feldlinien laufen im Eisenkreis der Maschine (Prinzipzeichnung!)
- Anker dreht sich im Hauptfeld: Eisen geblecht, sonst Wirbelströme
- Antriebe mit hoher Dynamik: Maschine vollständig geblecht

3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

Maschine erregt, Ankerkreis bestromt

Hinweise:

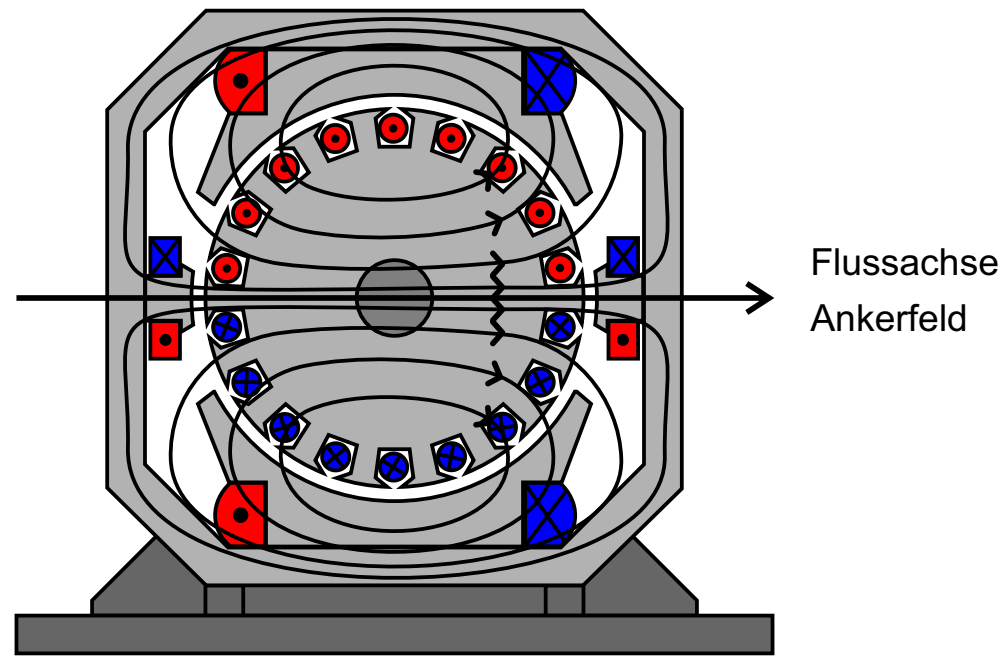
- nur Erregerfeld eingezeichnet
- **Kommutierung**: sorgt dafür, dass die Leiter im Anker wie dargestellt bestromt werden
- Wendepolwicklung erleichtert die **Kommutierung**



- Erregerwicklung bestromt
- Ankerkreis bestromt (Anker- und Wendepolwicklung)
- Leiter der Ankerwicklung befinden sich im Erregerfeld
- **Tangentialkräfte**: erzeugen ein Drehmoment

3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

auch der Anker erzeugt ein Feld...



3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

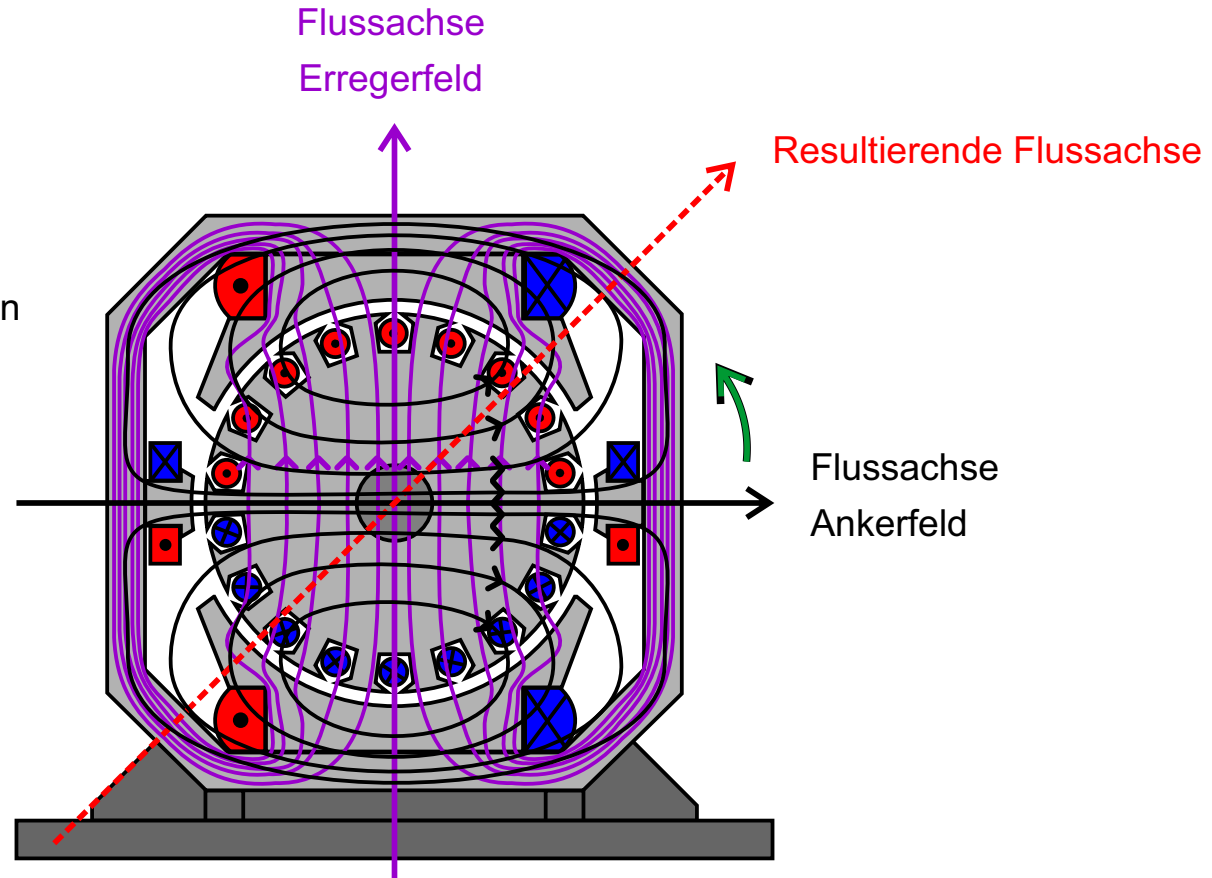
... Anker- und Erregerfeld überlagern sich

Zur Drehmomenterzeugung:

- Flussachsen haben das Bestreben, sich parallel zu stellen
- maximales Drehmoment, wenn Flussachsen senkrecht zueinander stehen

Ankerrückwirkung:

- Verzerrung des Hauptfeldes durch das Ankerfeld.
- Sättigungseffekte im Eisen: Feldschwächung
- Konsequenz: Drehmomentkonstante wird mit wachsendem Ankerstrom kleiner



3.1 Aufbau und Drehmomenterzeugung

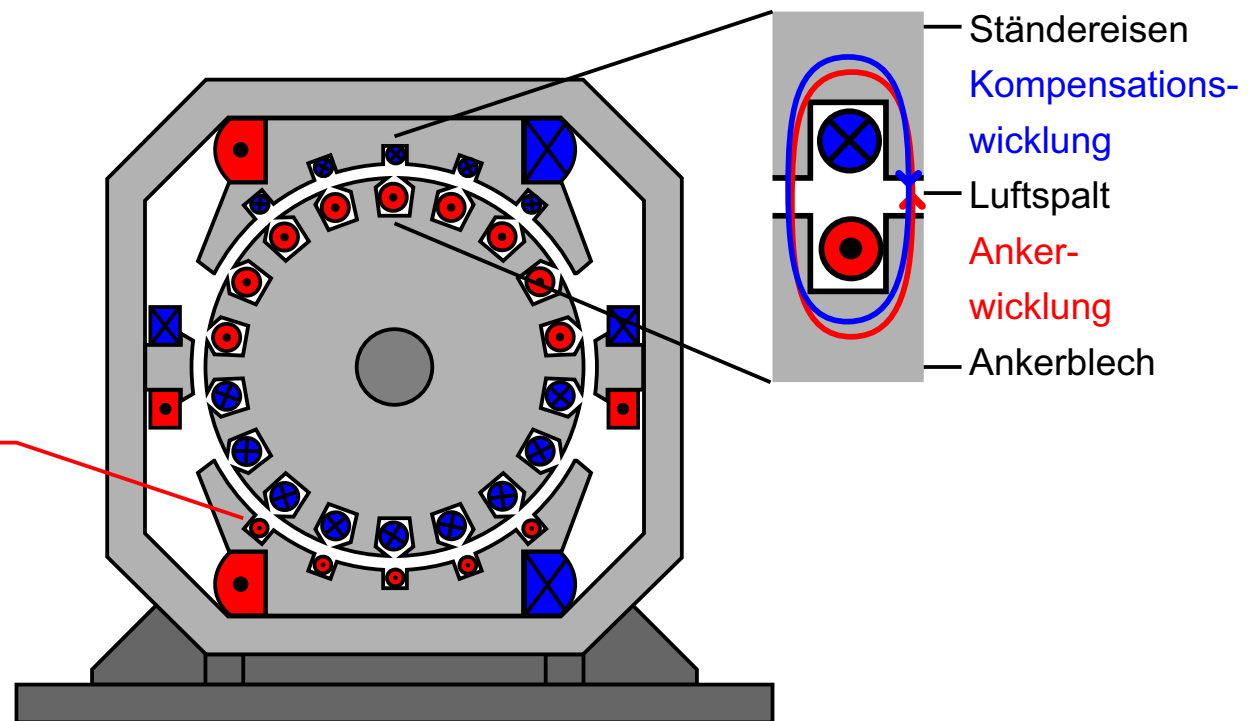
Gegenmaßnahme zur Ankerrückwirkung: Kompensationswicklung

- Ankerwicklung erzeugt Querfeld

- Verzerrung des Erregerfeldes "Ankerrückwirkung"

- Kompensationswicklung in den Polschuhen

Schaltung in Reihe mit Anker- und Wendepolwicklung



3.2 Kräfte an Zahnflanken

Anmerkung zur Drehmomenterzeugung

Analytische Betrachtung

Lorentzkräfte wirken auf die Leiterstäbe der Ankerwicklung → Drehmoment

Rechnung mit Luftspaltflussdichte und Strombelag der Ankerwicklung liefert einen brauchbaren Wert für das Drehmoment.

Wer es genau wissen will:

Erregerstrom → B im Luftspalt: B_L (Effektivwert über den Umfang)

Ankerstrom → Strombelag: $A_s = \frac{\sum \text{Nutströme}}{\text{Umfang}} = \frac{Q \cdot N_o \cdot I_{\text{Leiter}}}{d_L \cdot \pi}$

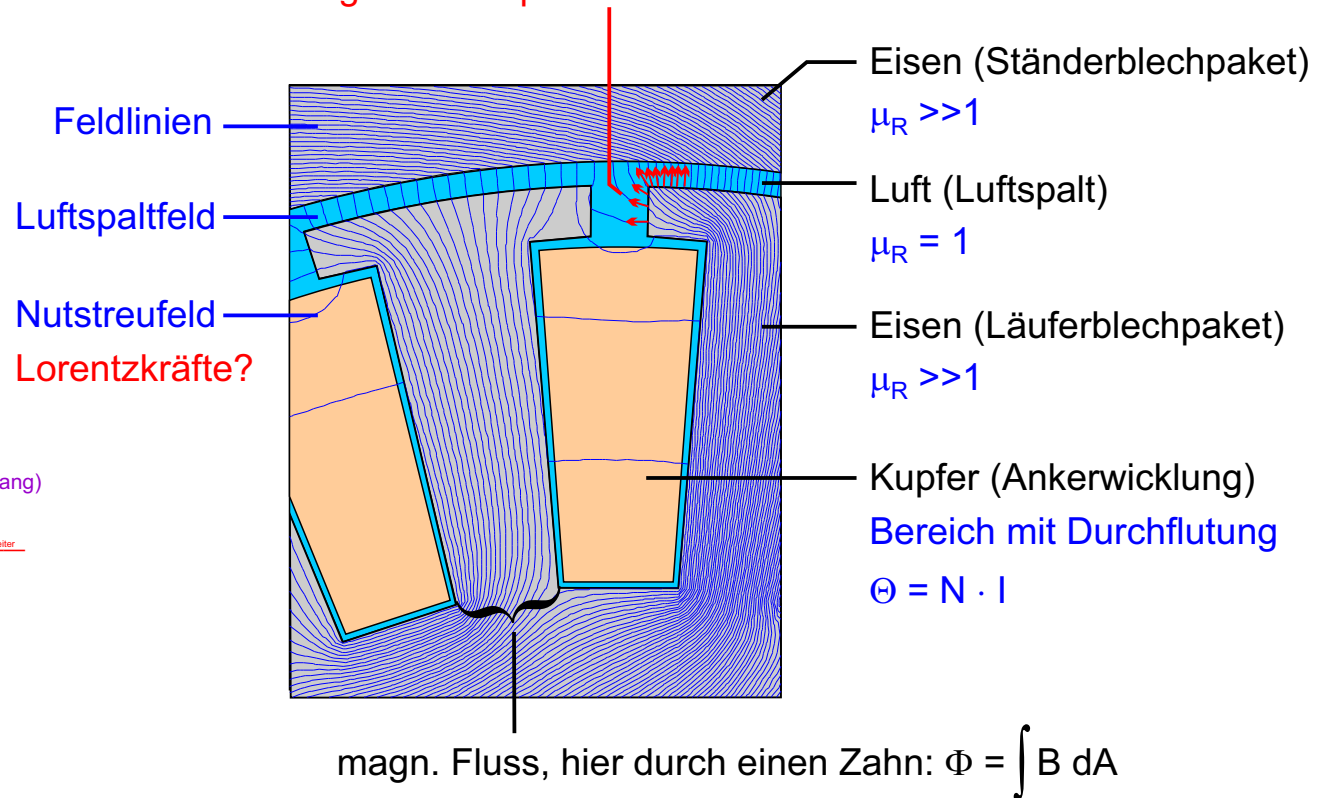
Lorentzkräfte → Flächenschub: $F_A = \frac{\text{Umfangskraft}}{d_L \cdot \pi \cdot I_{\text{Akt}}} = A_s \cdot B_L$

Drehmoment: $M_l = \frac{\pi}{2} \cdot F_A \cdot d_L^2 \cdot I_{\text{Akt}}$

I_{Akt} = Länge des Blechpaketes
 Q = Anzahl der Nuten im Anker
 I_{Leiter} = Leiterstrom (Ankerstrom teilt sich je nach Verschaltung auf)
 d_L = Luftspaltdurchmesser
 N_o = Windungszahl

Physik bzw. FEM-Rechnung

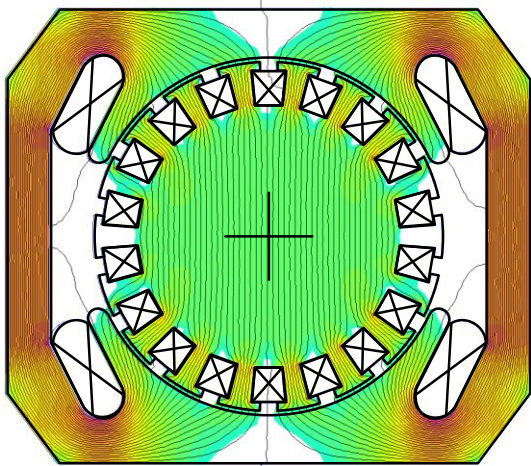
Grenzflächenkräfte an den Zahnflanken
 Tangentialkomponenten → Drehmoment



3.2 Kräfte an Zahnflanken

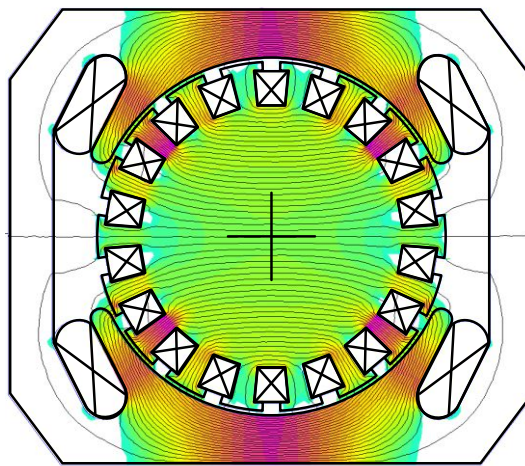
Beispiel: Feldlinienbilder aus FEM-Simulation

hier: typ. Aufbau eines kleinen Universalmotors, ohne Wendepol- und Kompensationswicklung



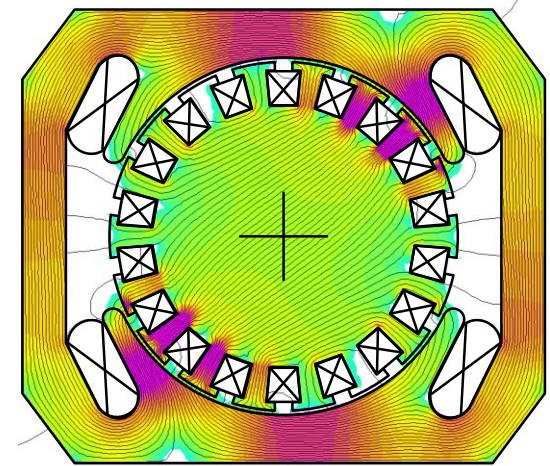
nur Erregung eingeschaltet:

- Feld bildet sich im Eisenkreis aus
- starke Radialkräfte am Rotor
- Ankernuten feldfrei (Kupfer!)



nur Ankerkreis bestromt:

- Feld bildet sich im Eisenkreis aus
- starke Radialkräfte am Rotor
- Ankernuten feldfrei (Kupfer!)



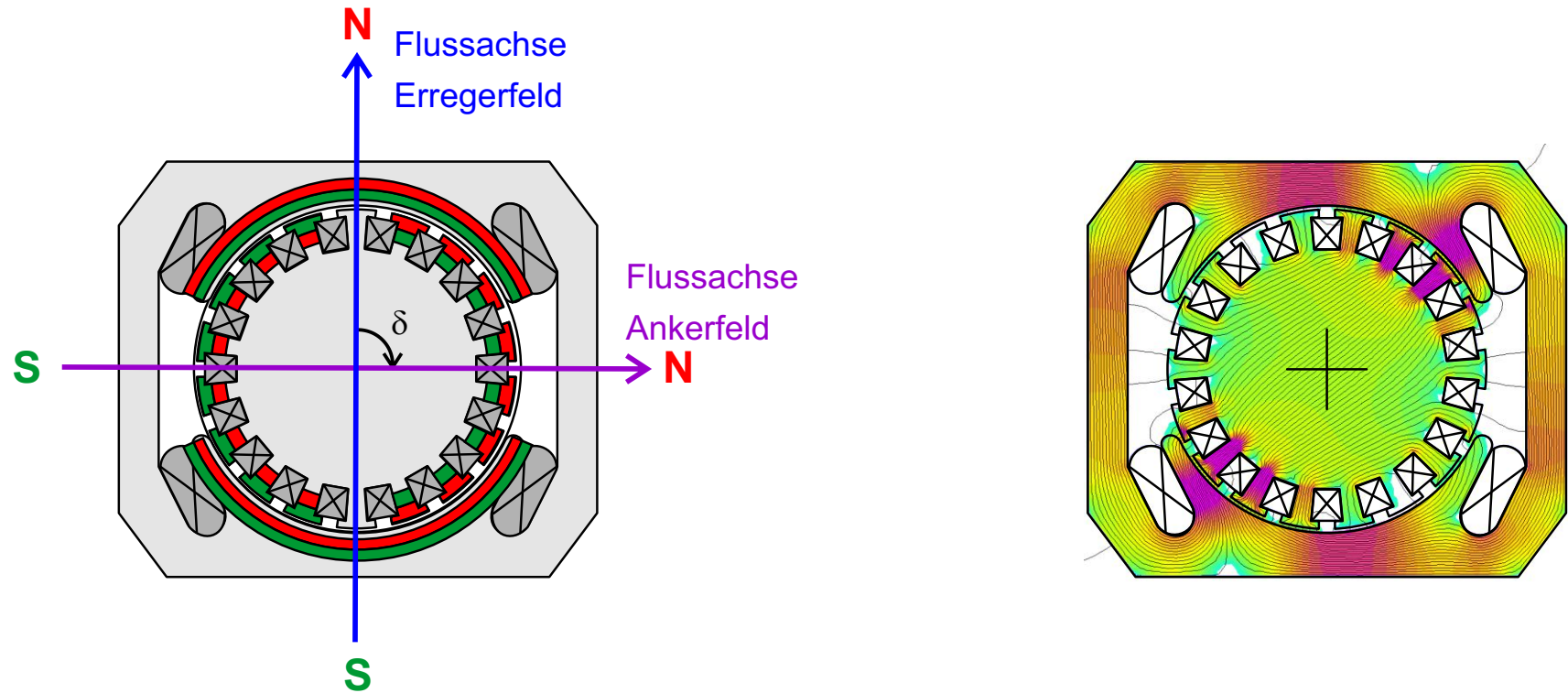
Erreger- und Ankerkreis bestromt:

- Feldverzerrung im Bereich der Ankerzähne:
Tangentialkräfte $\Rightarrow$ Drehmomenterzeugung
- Feldverzerrung im Bereich der Hauptpole:
 $\Rightarrow$ Sättigungseffekte, weniger Feld
 $\Rightarrow$ Drehmomentreduktion "Ankerrückwirkung"

Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info)

3.2 Kräfte an Zahnflanken

Alternative Betrachtung

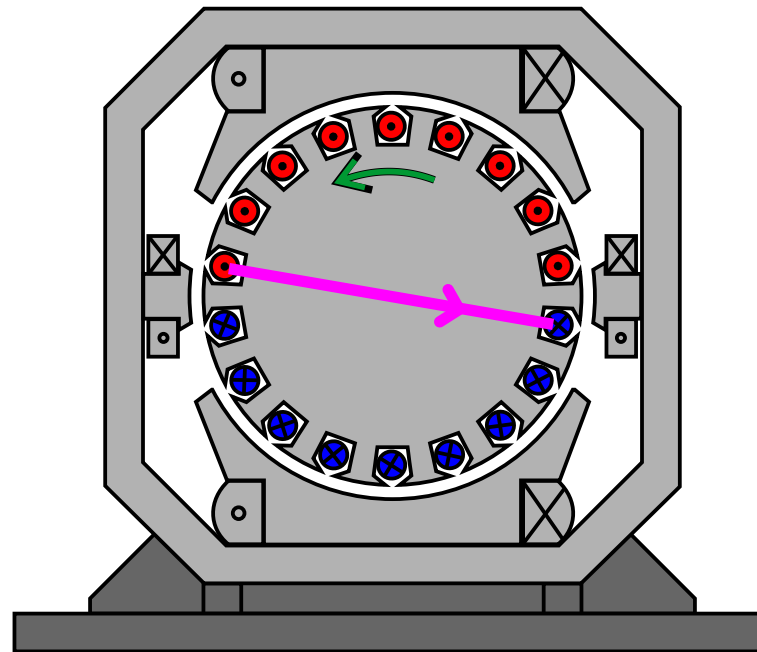


- Nord- und Südpole ziehen sich an, gleichnamige Pole stoßen sich ab
 - magnetisierter Rotor will sich längs des Statorfeldes ausrichten: "Kompassnadel"
 - die Flussachsen haben das bestreben, sich parallel auszurichten
- ⇒ maximales Drehmoment für $\delta = 90^\circ$

Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info)

3.3 Kommutierung

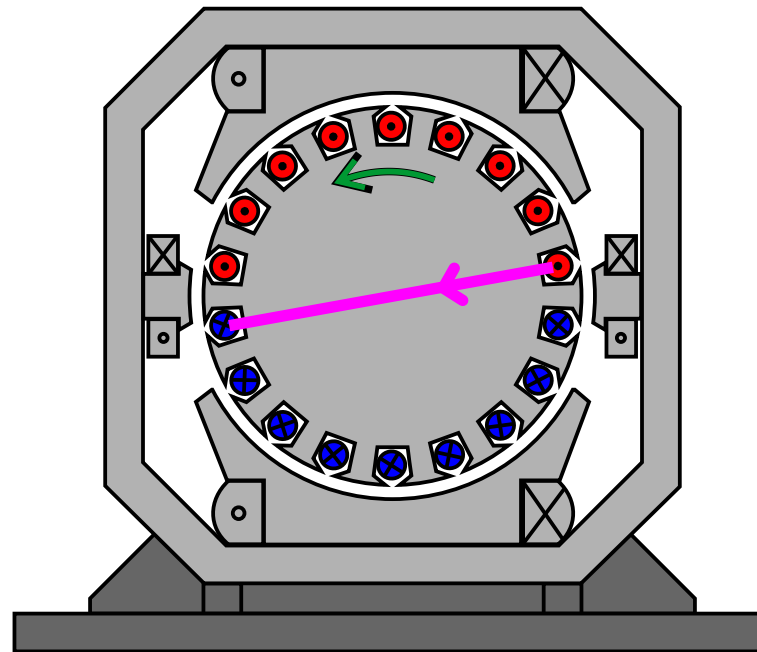
Spulen der Ankerwicklung



- Gegenüberliegende Stäbe bilden eine Spule
- Die Spulen drehen sich mit dem Anker

3.3 Kommutierung

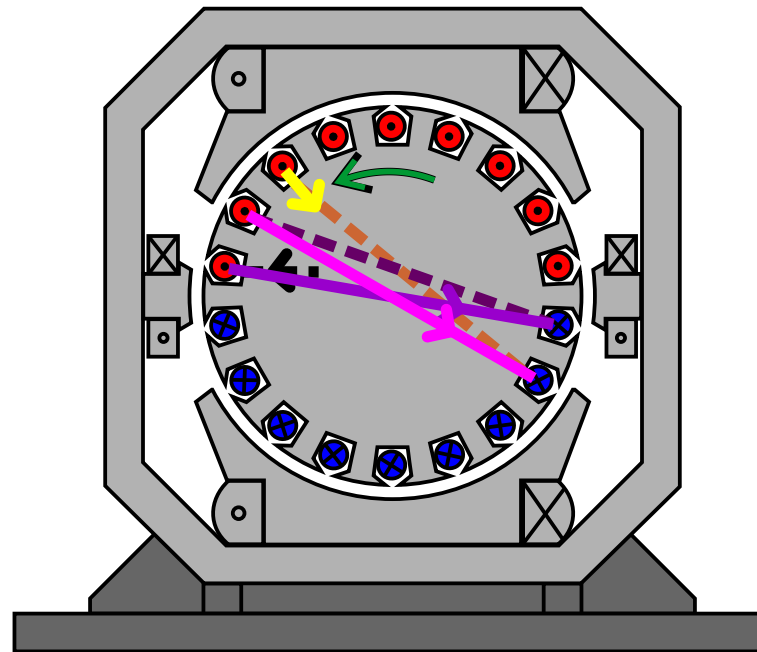
Spulen der Ankerwicklung



- Gegenüberliegende Stäbe bilden eine Spule
- Die Spulen drehen sich mit dem Anker
- Spulen, die unter den Wendepolen hindurchlaufen, müssen umgepolt werden: "Kommutierung"

3.3 Kommutierung

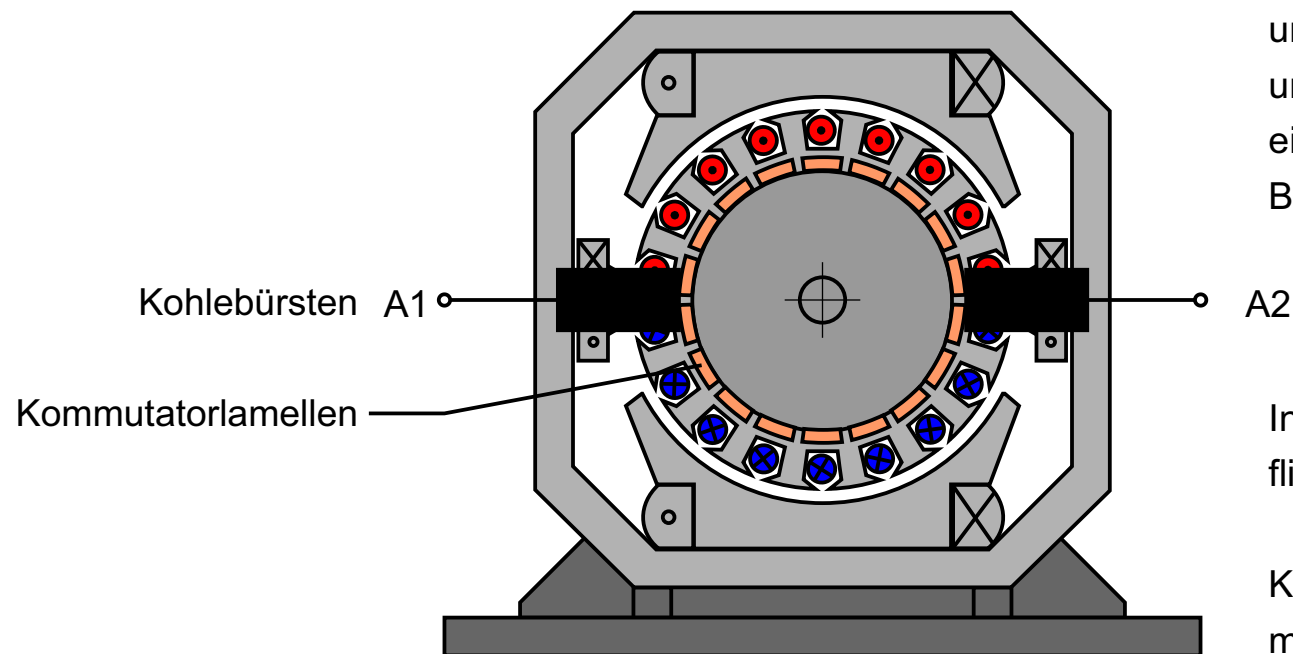
Verschaltung Ankerwicklung



- Gegenüberliegende Stäbe bilden eine Spule
- Die Spulen drehen sich mit dem Anker
- Spulen, die unter den Wendepolen hindurchlaufen, müssen umgepolt werden: "Kommutierung"
- Der Anker wird bewickelt, indem gegenüberliegende Nuten sukzessive mit Spulen aufgefüllt werden

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator



Der Kommutator sorgt dafür, dass das Bestromungsschema bei Drehung des Ankers erhalten bleibt: unter einem Polschuh ergibt sich eine jeweils gleichsinnige Bestromung der Ankernuten.

In den Spulen der Ankerwicklung fließt somit ein Wechselstrom:

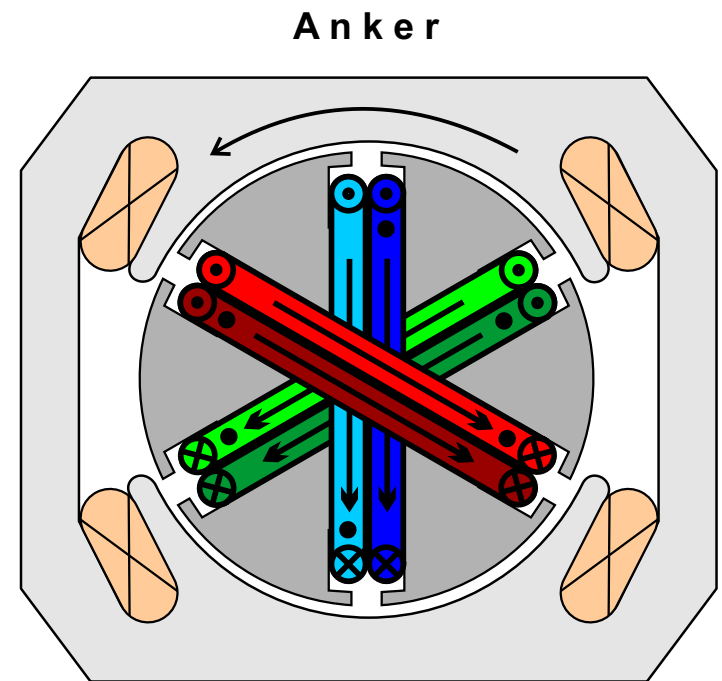
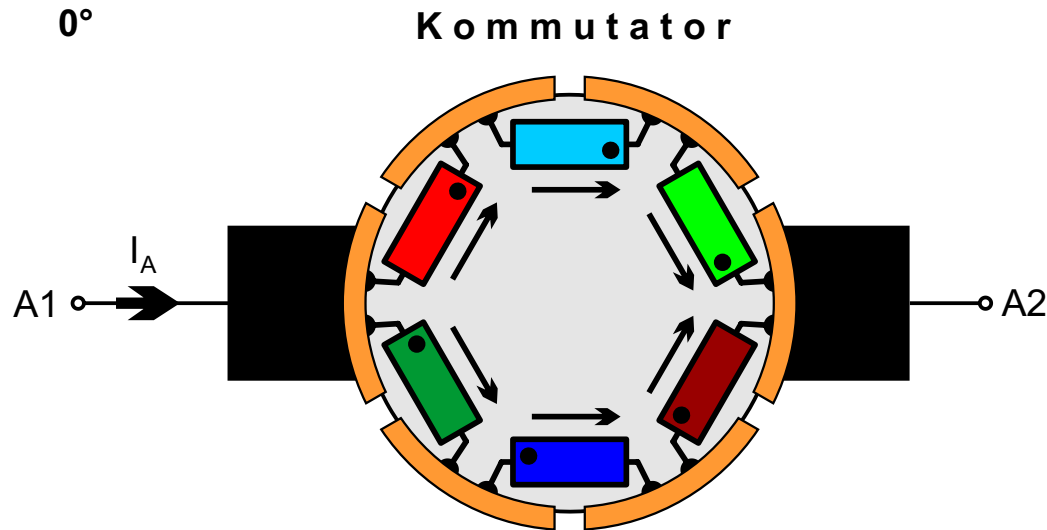
Kommutator =
mechanischer Wechselrichter.

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

0°



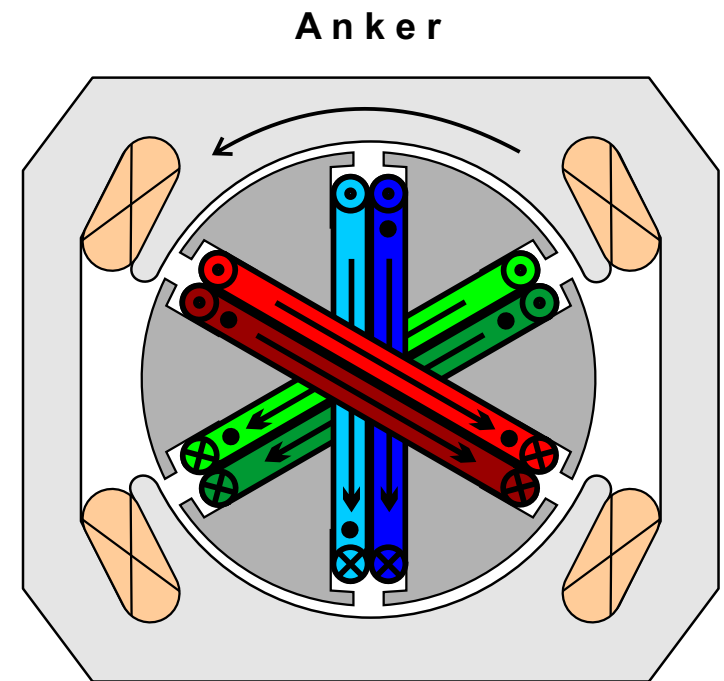
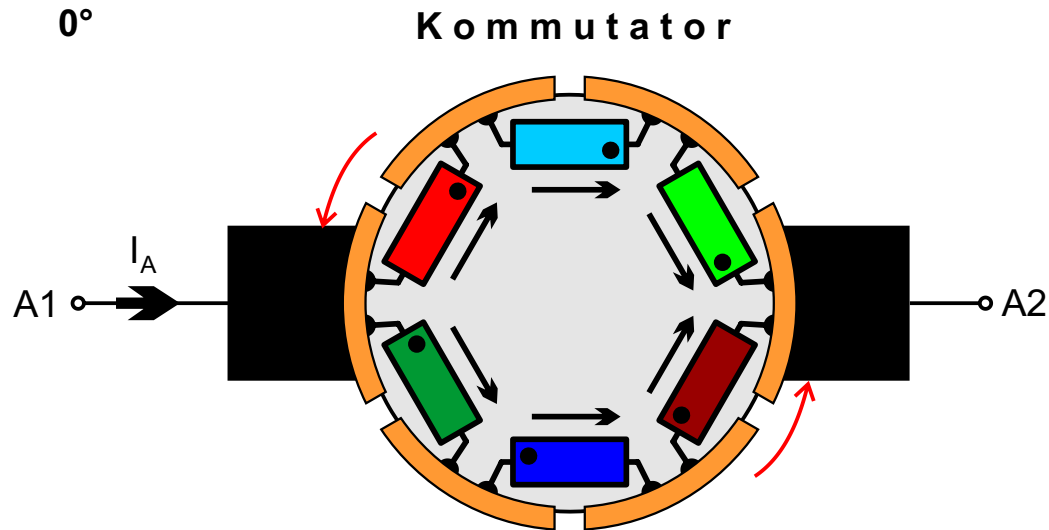
- Die Ankerspulen sind zwischen benachbarte Lamellen geschaltet
- Sie legen als Durchmesser­spulen in den Ankernuten (für $p=1$)
- Alle Spulen sind in Reihe geschaltet
- Der Ankerstrom teilt sich in 2 Stromfäde auf

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

0°



Vor der Kommutierung:

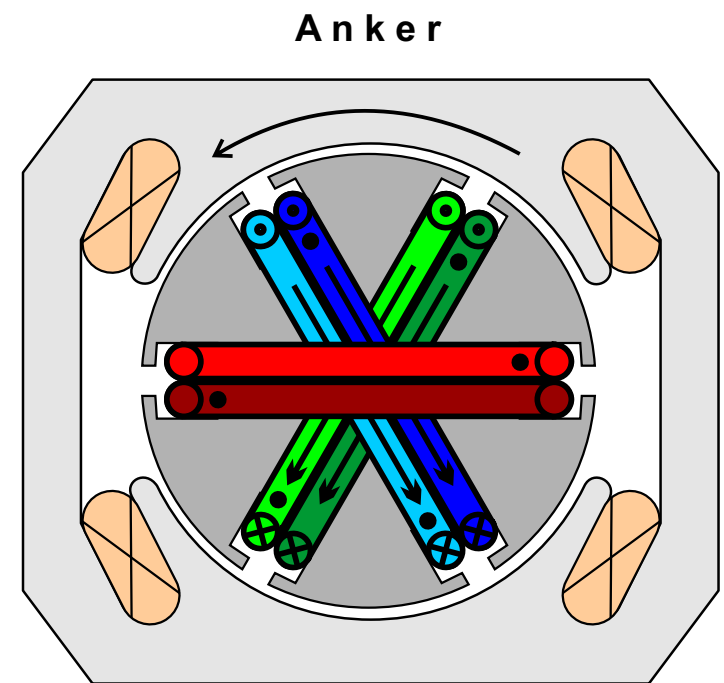
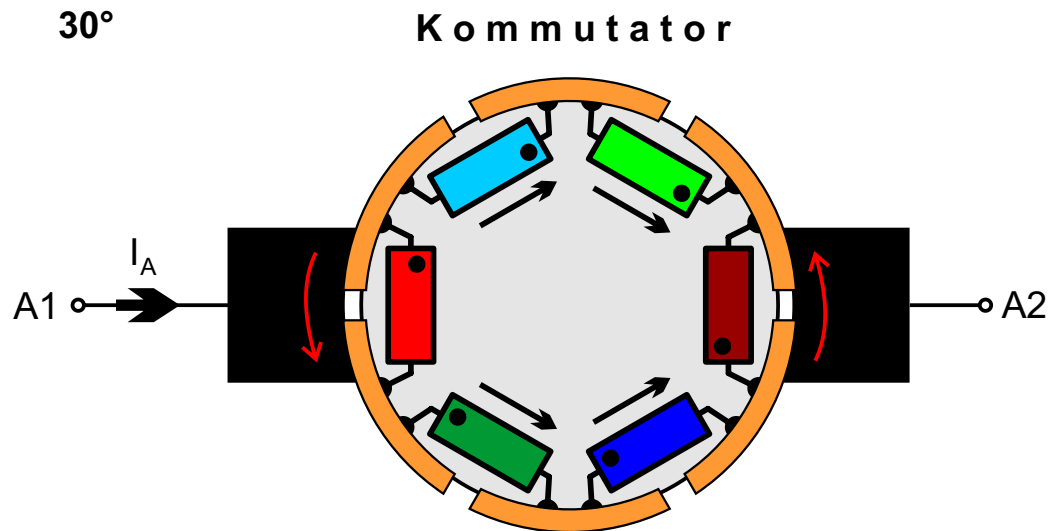
- Die rote Spule liegt im oberen Strompfad
- Sie ist mit ihrem Wicklungssinn bestromt

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

30°



Während der Kommutierung:

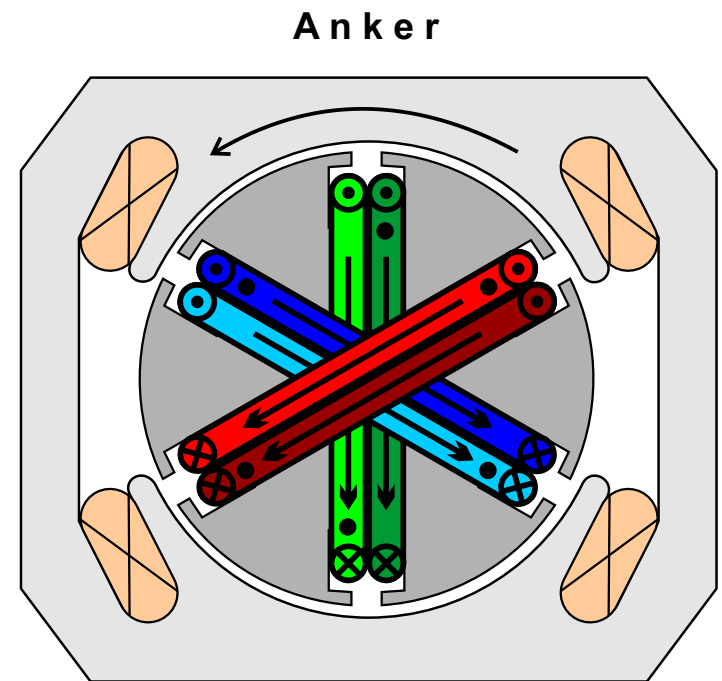
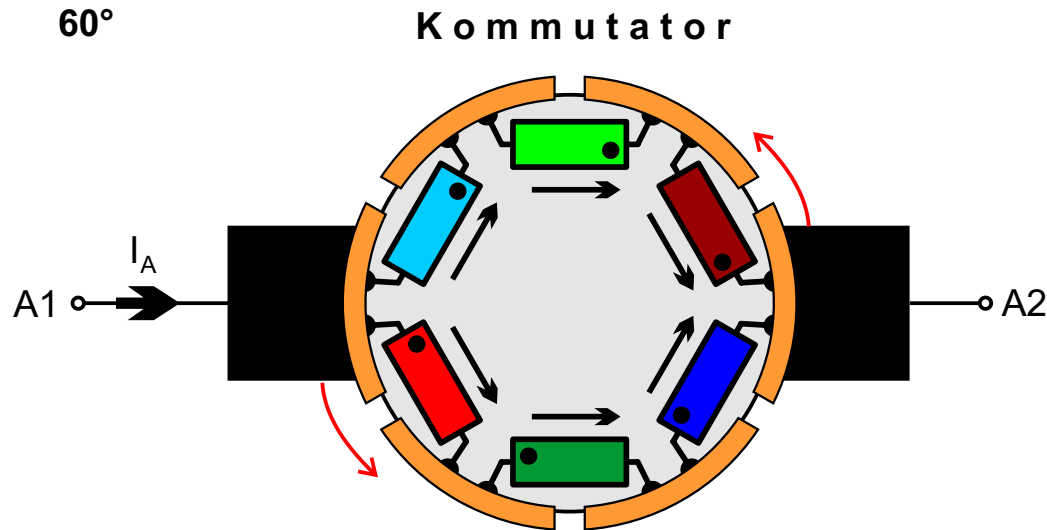
- Die rote Spule liegt in der Bürsten- bzw. Wendepoleebene
- Sie ist kurzgeschlossen, der Strom wird gewendet

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

60°



Nach der Kommutierung:

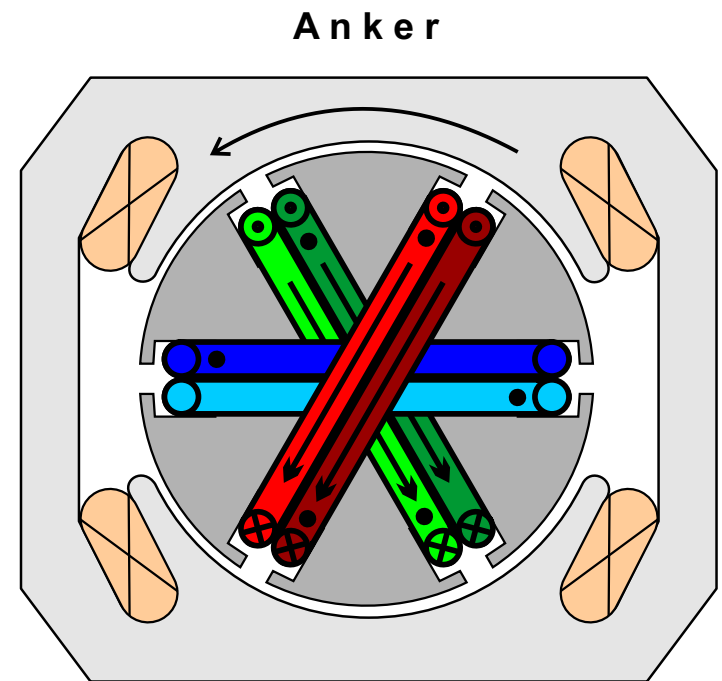
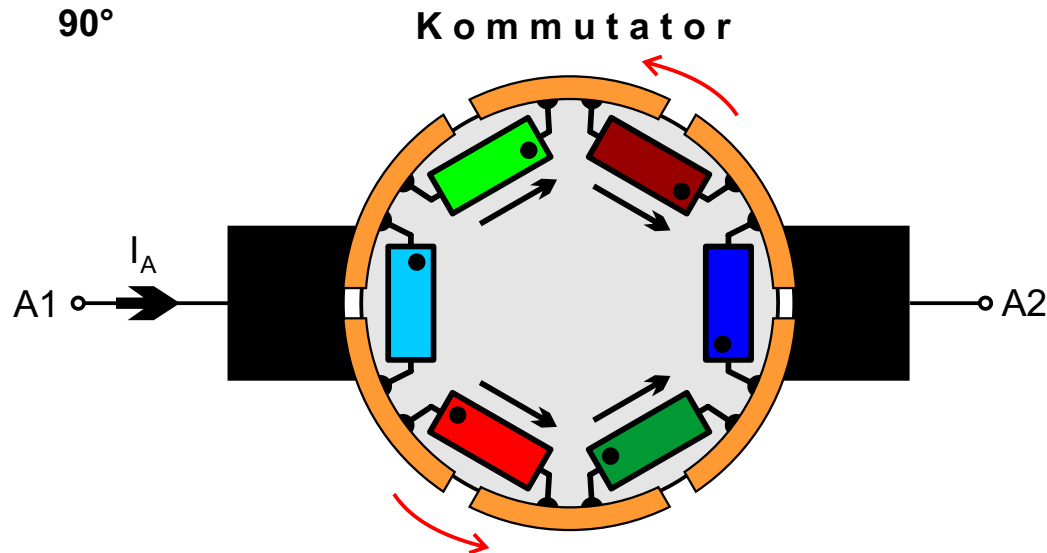
- Die rote Spule liegt im unteren Strompfad
- Sie ist gegen ihren Wicklungssinn bestromt

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

90°



Nachfolgender Kommutierungsvorgang:

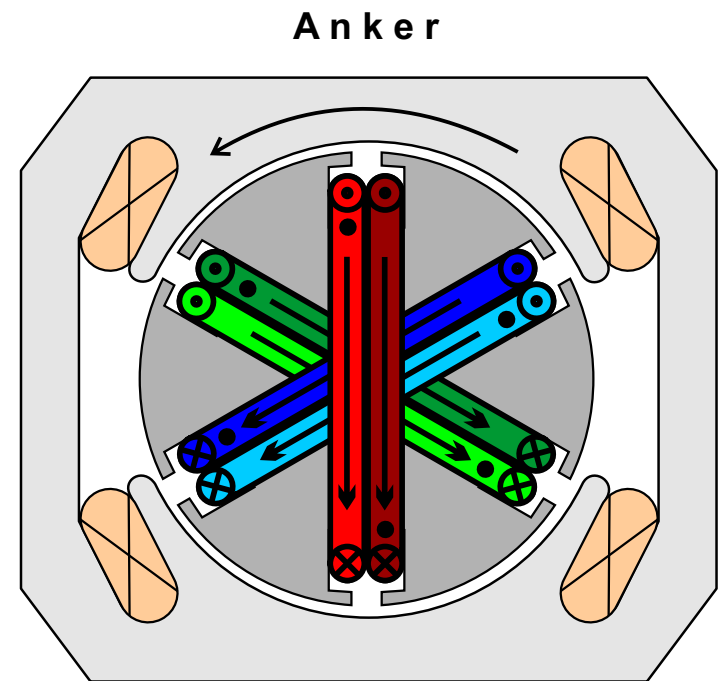
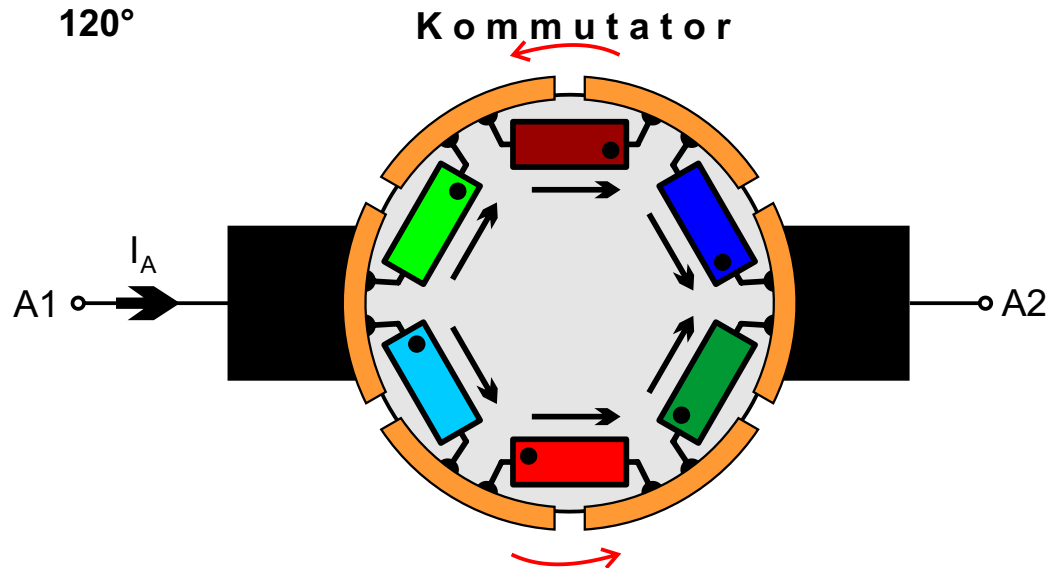
- Die rote Spule liegt weiter im unteren Strompfad
- als nächstes wird der Strom in den beiden blauen Spulen gewendet

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

120°



Nach der Kommutierung:

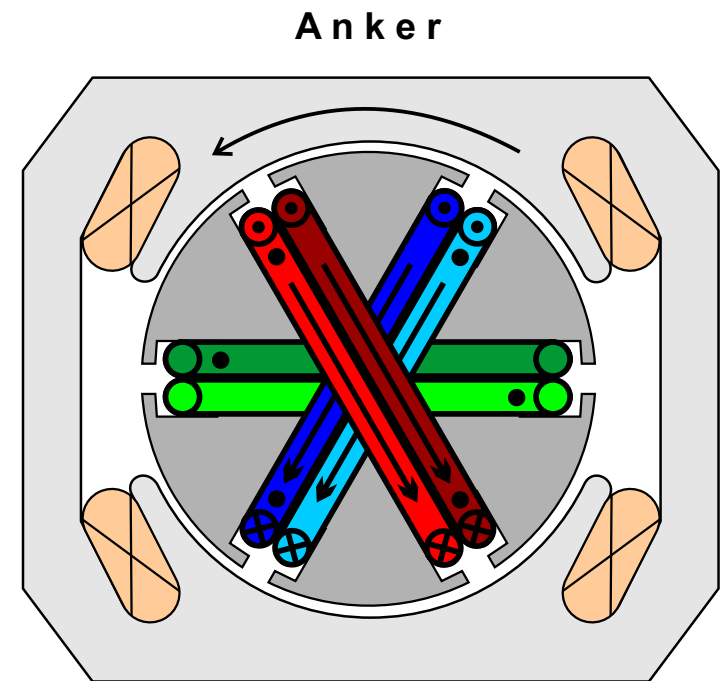
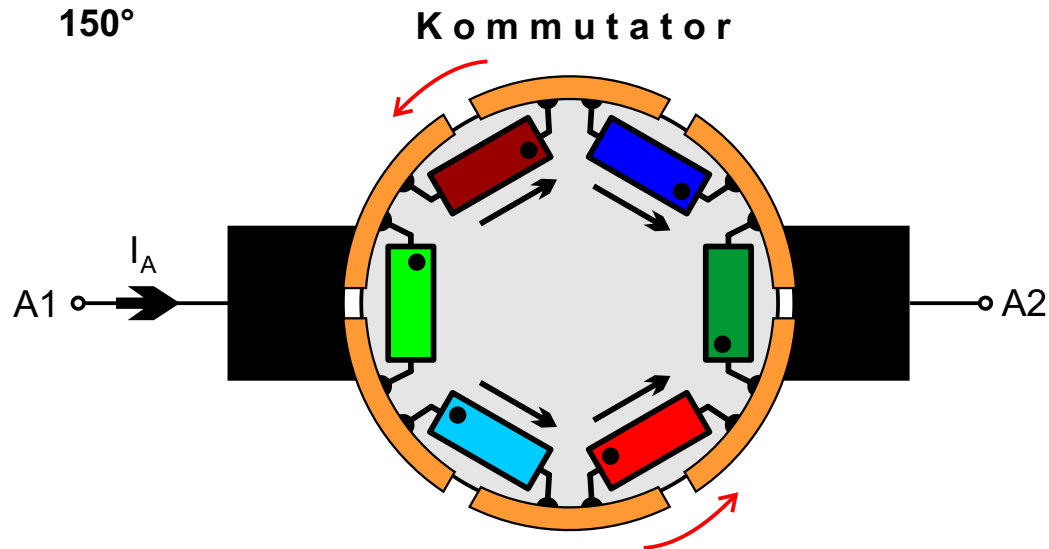
- Die blaue Spule liegt nun am oberen Strompfad
- Sie ist in diesem Falle mit ihrem Wicklungssinn bestromt

3.3 Kommutierung

Stromwendung durch den Kommutator

Ankerstellung:

150°



nun kommen die beiden die grünen Spule an die Reihe...

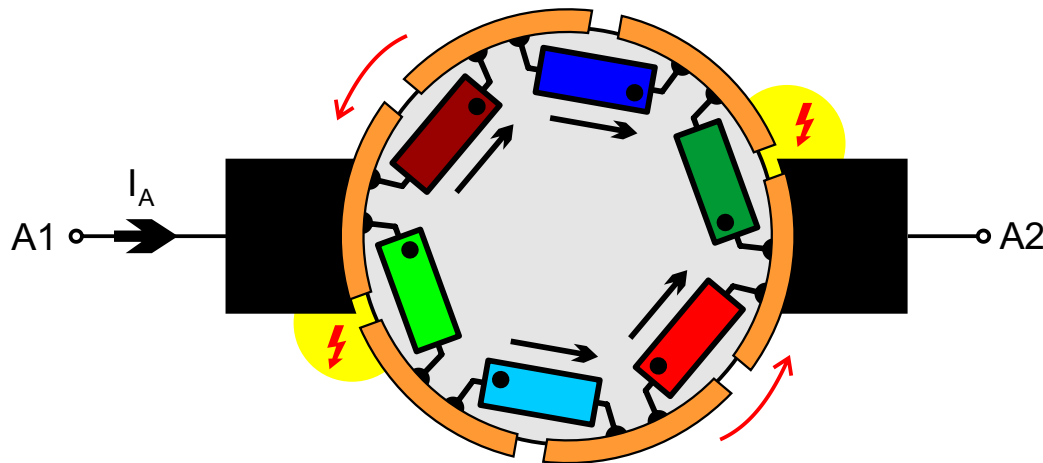
3.3 Kommutierung

Bürstenfeuer

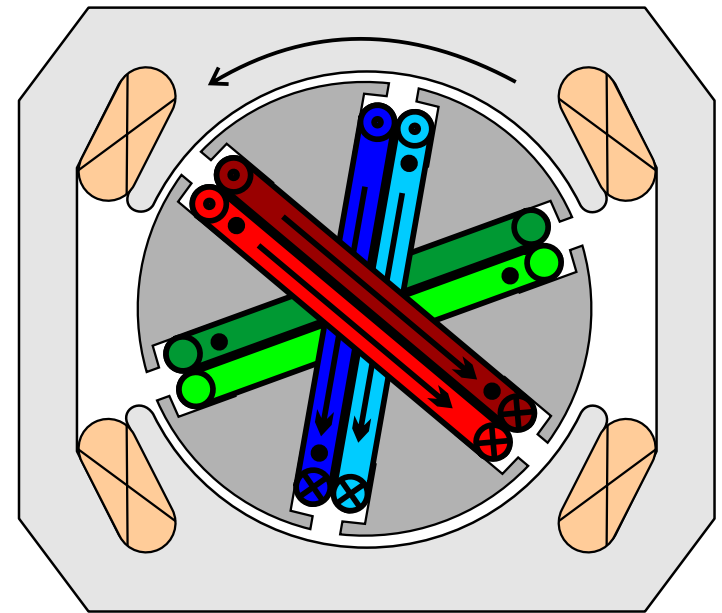
Ankerstellung:

170°

K o m m u t a t o r



A n k e r

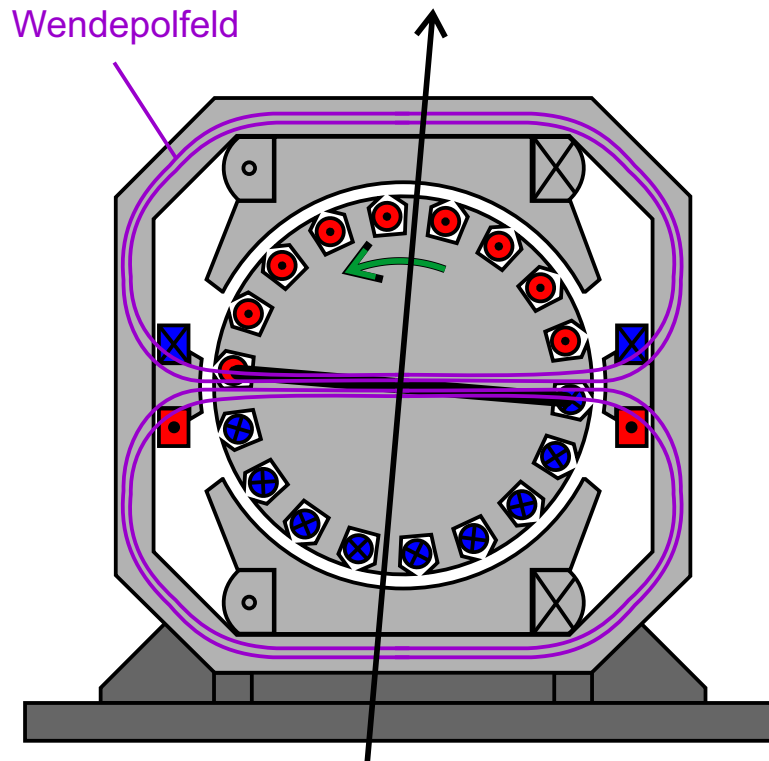


plötzlich befinden sich beide Spulen im jeweils anderen Strompfad mit umgekehrtem Stromvorzeichen:

$U_{\text{ind}} = L \cdot \frac{dI_s}{dt} \Rightarrow \text{Gegeninduktionsspannung} \Rightarrow \text{Lichtbogen} = \text{Bürstenfeuer an der ablaufenden Kante}$

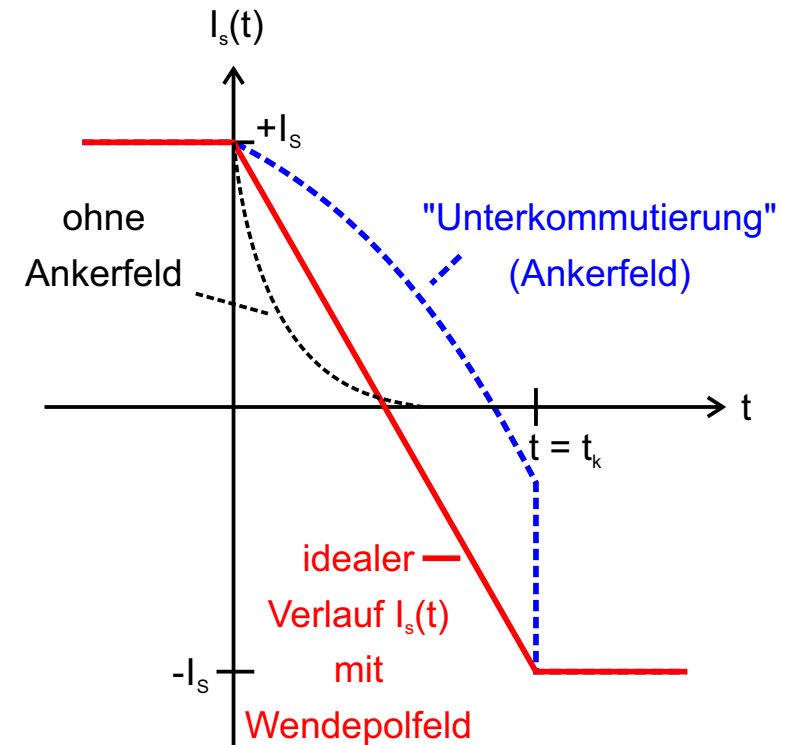
3.3 Kommutierung

Vermeidung von Bürstenfeuer



Spulenachse der
kurzgeschlossenen Ankerspule
unter den Wendepolen

$$\text{Bewegungsinduktion: } U_{\text{ind,WP}} = B_{\text{W}} \, dA_{\text{S}}/dt$$

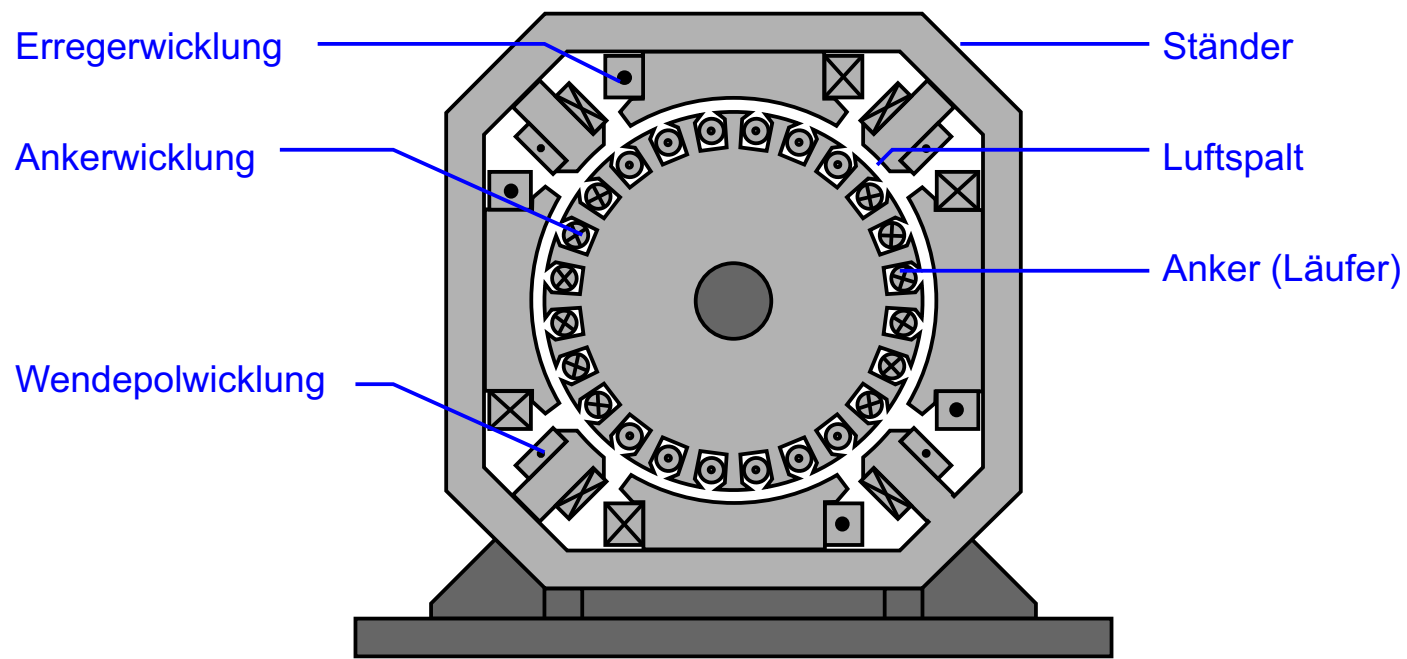


Wendepolwicklung:

$U_{\text{ind,WP}}$ beeinflusst den Stromverlauf und
verhindert eine Unterkommutierung.
Idealer Verlauf kann angenähert werden.

3.4 Aufbau bei Polparzahl 2

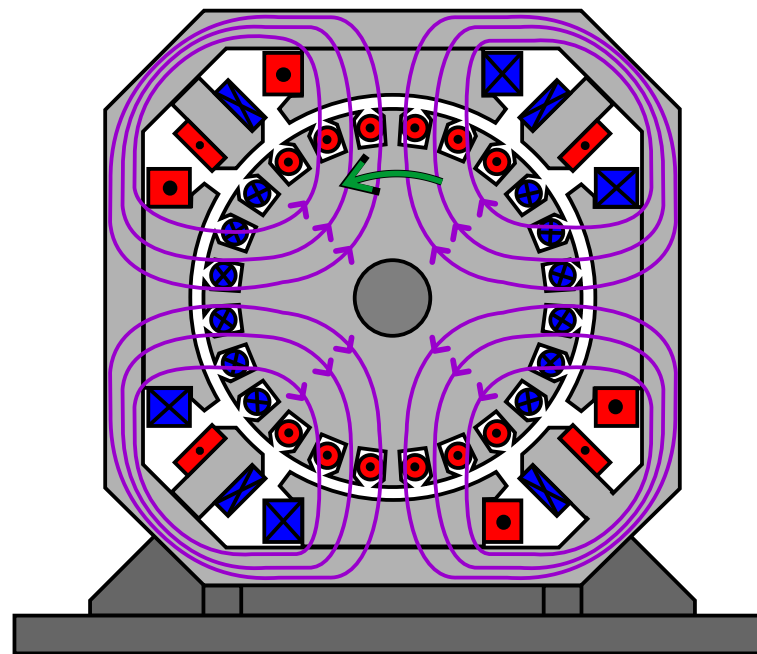
Grundaufbau



3.4 Aufbau bei Polparzahl 2

Maschine erregt: Feldlinien im Eisenkreis

- Die Anordnung für $p = 1$ wiederholt sich nun 2x über dem Umfang
- Günstigere Feldführung
- bevorzugte Bauweise für Standardmaschinen

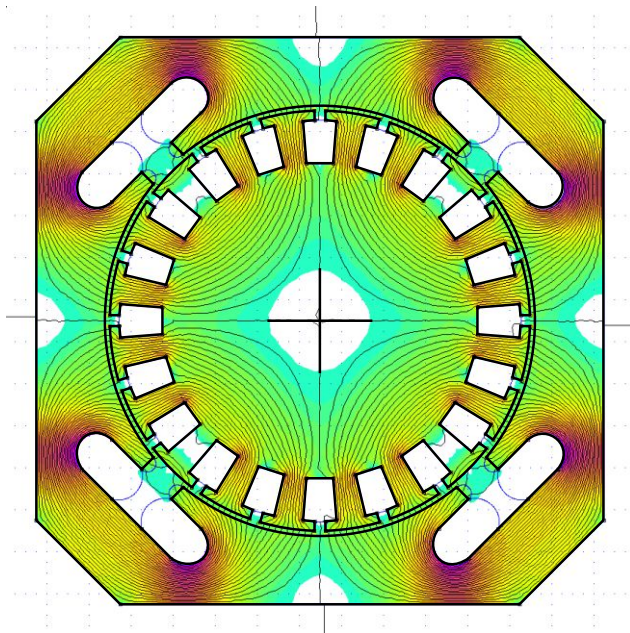


- Erregerwicklung bestromt
- Ankerkreis bestromt (Anker- und Wendepolwicklung)
- Leiter der Ankerwicklung befinden sich im Erregerfeld
- Tangentialkräfte: erzeugen ein Drehmoment

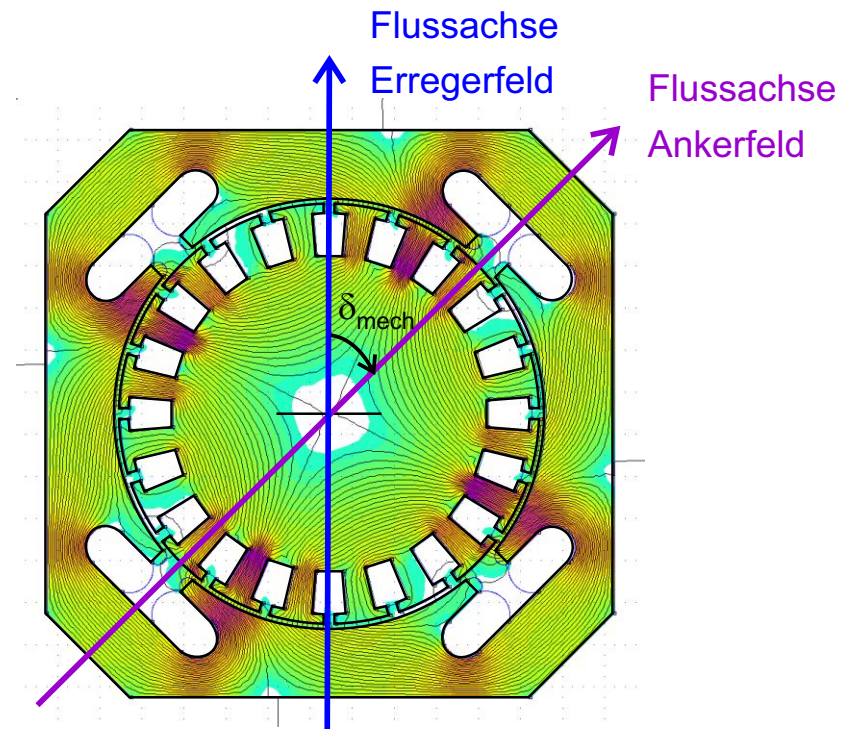
3.4 Aufbau bei Polparzahl 2

FEM-Simulation

nur Erregerfeld eingeschaltet



Überlagerung von Erreger- und Ankerfeld



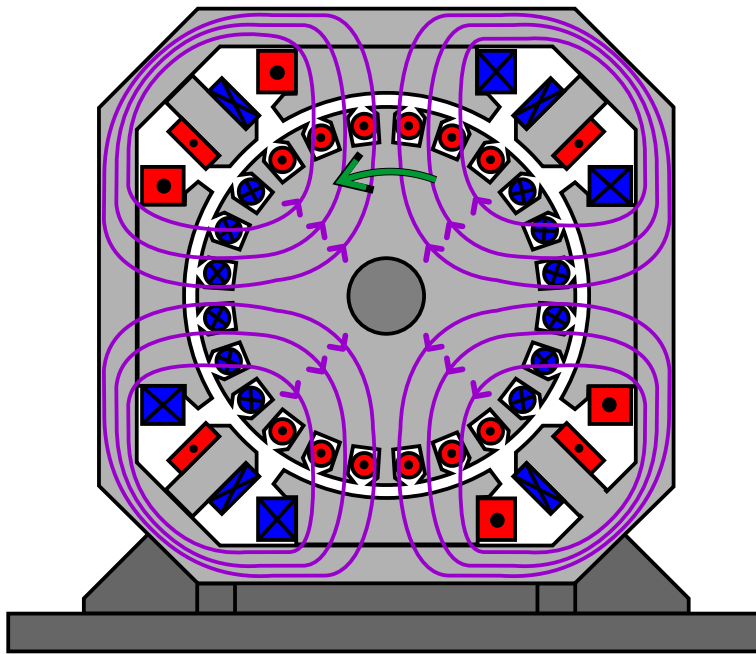
Winkel zwischen den beiden Flussachsen:

$$\delta_{\text{mech}} = \delta_{\text{el}} / p = 45^\circ$$

Verwendete Simulationssoftware: FEMM 4.2 (www.femm.info) – Simulation: A. Kleimaier

3.5 Drehmoment und induzierte Spannung

Grundlegende Zusammenhänge



- Erregung der Maschine: Hauptfluß

$$\Phi = f(I_F) \quad (\text{reale Kennlinie})$$

$$\text{bzw. } \Phi \sim I_F \quad (\text{Luftspaltgerade})$$

- Ankerstrom: Lorentzkräfte im Anker erzeugen ein Drehmoment

$$M_i \sim I_A$$

$$M_i \sim \Phi$$

- Bewegte Ankerspulen im Hauptfeld: Spannungsinduktion im Anker

$$U_{\text{ind}} \sim \omega_{\text{Mech}}$$

$$U_{\text{ind}} \sim \Phi$$

3.5 Drehmoment und induzierte Spannung

Grundgleichungen Energiewandlung

Erregerstrom, Feldstrom:	I_F	erzeugt das Erregerfeld
Hauptfluss im Eisenkreis:	$\Phi = f(I_F)$	ohne Sättigung: $\Phi \sim I_F$
Ankerstrom:	I_A	stellt das Drehmoment ein
Maschinenkonstante:	c	Windungs- und Polpaarzahl, Geometrie
Drehmomentkonstante:	$k_i = c \cdot \Phi$	Einheit: Nm/A bzw. Vs (magn. Fluss)
Inneres Drehmoment:	$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_A = k_i \cdot I_A$	Einheit: Nm bzw. N·m
Wellendrehzahl:	N_W	Einheit: Upm bzw. Umin ⁻¹
Drehfrequenz:	n bzw. f_{mech}	Einheit: 1/s
Winkelgeschwindigkeit:	$\omega = 2\pi n = N_W \cdot \pi/30$	Einheit: rad/s
Induzierte Spannung:	$U_{\text{ind}} = c \cdot \Phi \cdot \omega = k_i \cdot \omega$	alte Bezeichnung: EMK

"EMK" = Elektromotorische Kraft

3.5 Drehmoment und induzierte Spannung

Momentenbilanz

Beschleunigungsmoment: $M_B = J_{\text{Ges}} \cdot d\omega/dt$

Winkelbeschleunigung: $d\omega/dt$ in rad/s^2

Trägheitsmoment: J_{Ges} in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

Schleppmoment: M_S

Eisenverluste, Lagerreibung

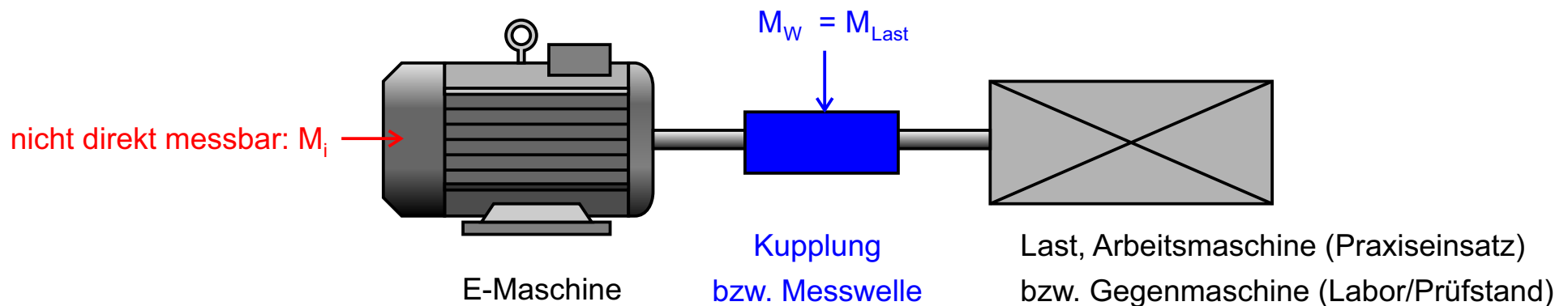
Wellenmoment: M_W

an der Schnittstelle Maschine – Last

Momentenbilanz: $M_i = M_W + M_S + J_{\text{Ges}} \cdot d\omega/dt$ dynamischer Betrieb, allgemeiner Fall

Wellenmoment stationär: $M_W = M_i - M_S$

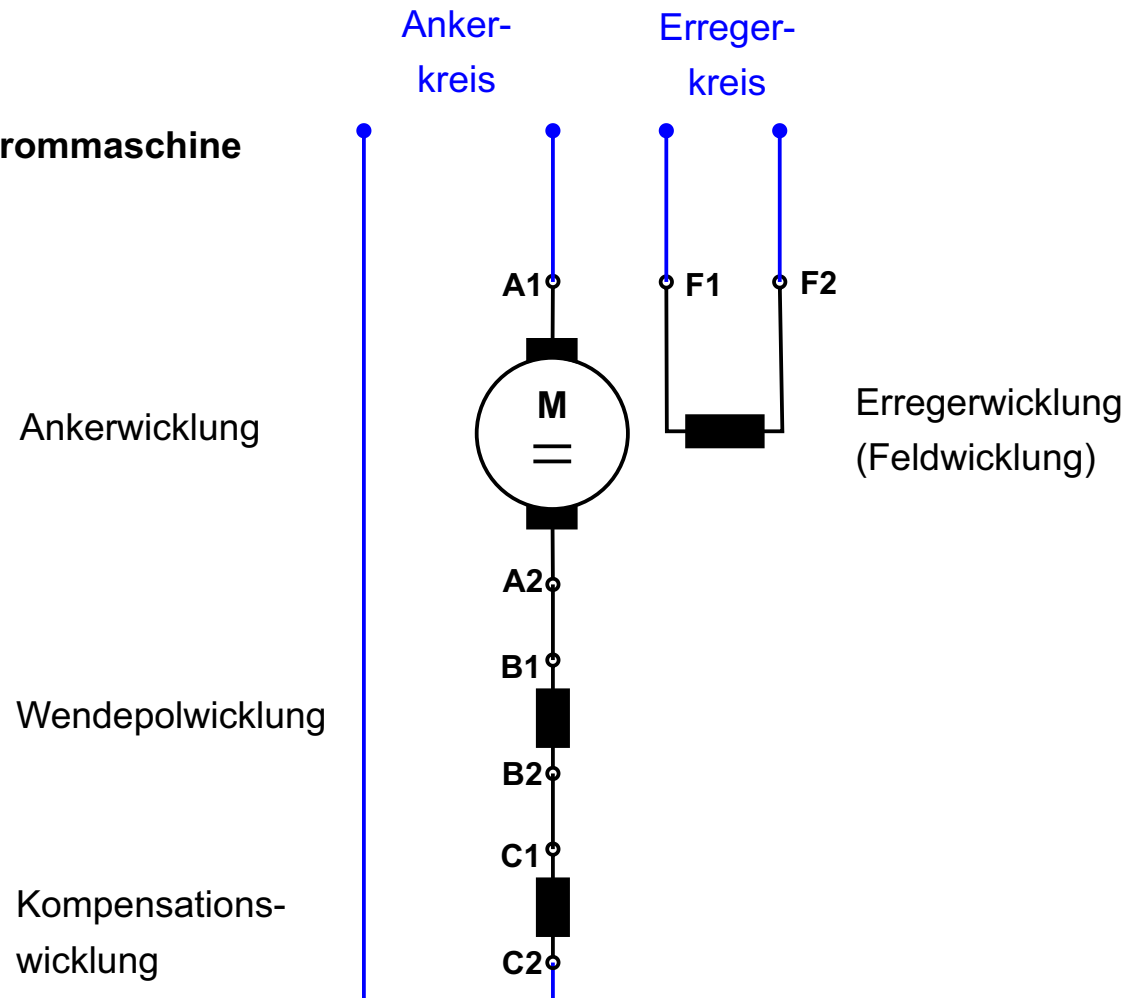
Drehmomentabgabe an der Welle im stationären Fall mit $d\omega/dt = 0$



3.6 Ersatzschaltbild und Energiebilanz

Schaltbild und Klemmenbezeichnung

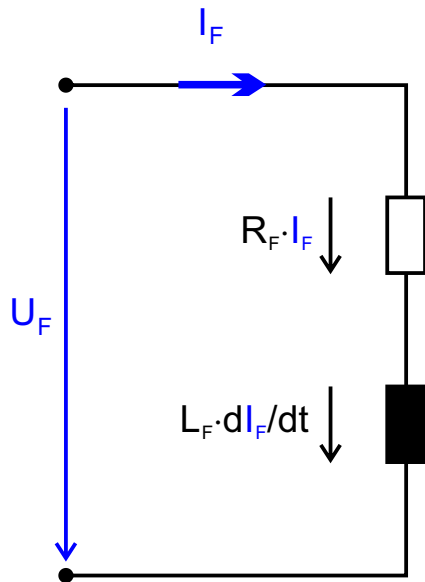
hier: fremderregte Gleichstrommaschine



3.6 Ersatzschaltbild und Energiebilanz

Erregerkreis

$$U_F = R_F \cdot I_F + L_F \cdot dI_F/dt$$

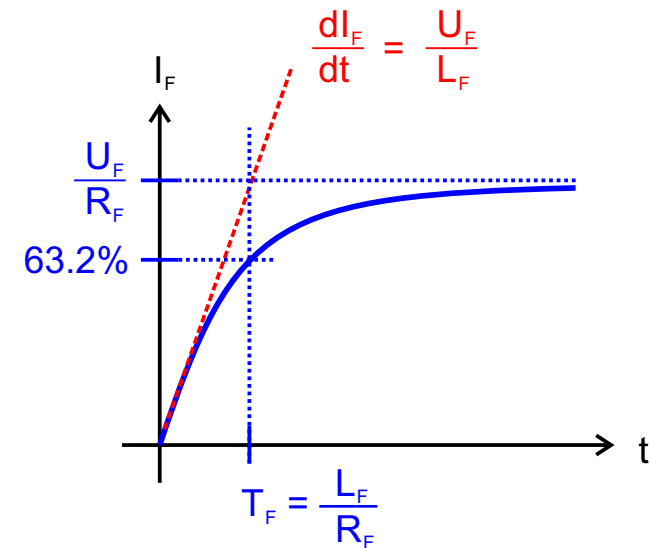


Kupferverluste:

$$P_{V,CU} = I_F^2 \cdot R_F$$

magn. gespeichert:

$$W_M = \frac{1}{2} L_F \cdot I_F^2$$



Der Erregerkreis dient zum Magnetisieren des Eisenkreises.

Er wird beim Aufrüsten der Maschine bestromt und dauerhaft mit Nenn-Erregerstrom betrieben.

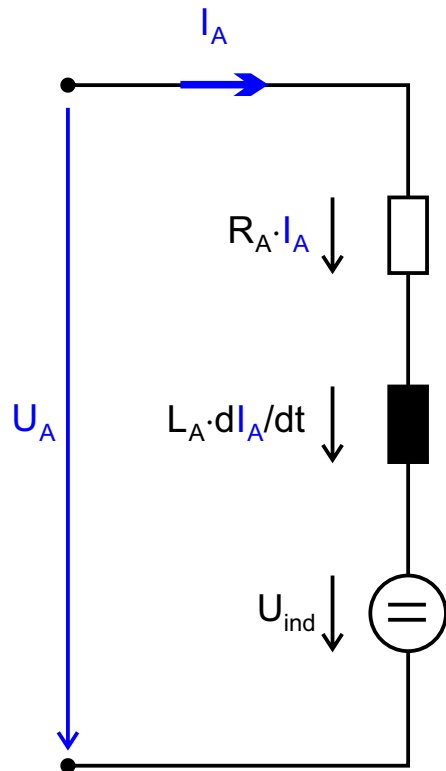
Im Feldschwäcbereich (Kapitel 4) wird der Erregerstrom mit steigender Drehzahl reduziert.

3.6 Ersatzschaltbild und Energiebilanz

Ankerkreis

$$U_A = R_A \cdot I_A + L_A \cdot dI_A/dt + U_{ind}$$

Wendepol- und Kompensationswicklung sind mit eingerechnet



Kupferverluste:

$$P_{V,CU} = I_A^2 \cdot R_A$$

magn. gespeichert:

$$W_M = \frac{1}{2} L_A \cdot I_A^2$$

mech. gespeichert:

$$\frac{1}{2} J_{Ges} \cdot \omega^2$$

$U_{ind} \cdot I_A = M_i \cdot \omega$
mot./gen.

elektromechanische
Energiewandlung

Welle ← Last

Lagerreibung
Eisenverluste