

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 12: Aktuelle Entwicklung – Neue Maschinenvarianten

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

Grundlagen elektrische Antriebe

Bei Elektromaschinen: "neu" = innerhalb
der letzten Jahrzehnte aufgekommen



Inhalt Kapitel 12: Aktuelle Entwicklung – Neue Maschinenvarianten

12.1 Bauformen und Beispiele

12.2 Drehschub

Die folgenden Abschnitte sind optional:

12.3 Bewertung von Maschinenkonzepten

12.4 PMSM: EMK und Kurzschlussstrom

12.5 Einzelzahnwicklung

12.6 Axialflussmaschine der HAW Landshut

12.7 Synchrone Reluktanzmaschine

12.8 Geschaltete Reluktanzmaschine

12.1 Bauformen und Beispiele

Varianten der Synchronmaschine in der Antriebstechnik

grundsätzliches
Betriebsverhalten:
**permanenterregte
Synchronmaschine**

PMSM Permanentterregte Synchronmaschine
verteilte Wicklungen = klassische Drehfeldwicklung

PMSM mit Einzelzahnwicklung
auch: MDM (Modulare Dauermagnetmaschine)
konzentrierte Wicklungen = Zahnspulenwicklung

"BLDC-Motor" (Brushless-DC) } = PMSM mit
"EC-Motor" (Electronically Commutated) } Einzelzahnwicklung

TFM Transversalflussmaschine, diverse Konzepte
Ringwicklung, für Drehstrombetrieb 3 Motor-Scheiben

Axialflussmaschine als PMSM-Variante mit Scheibenläufer

Rotorbauformen

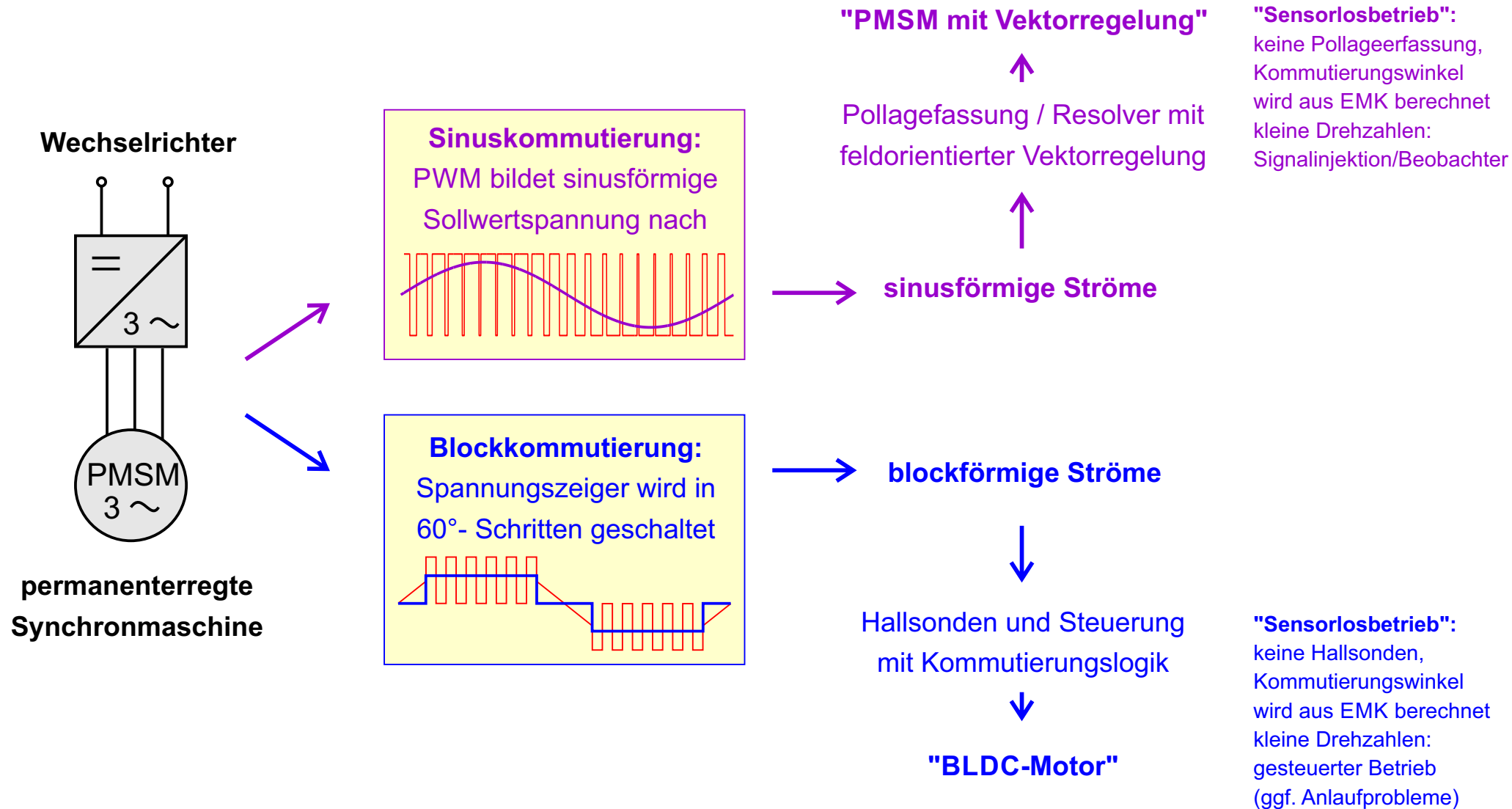
- Innenläufer
- Außenläufer
- Vergrabene Magnete
- Außenmagnete
mit/ohne Rückschluss

Alternativen zur
PM-Erregung

- Fremderregte Synchronmaschine FSM (d.h. elektrische Erregerwicklung)
- Hybriderregung (gemischt elektrisch - permanent)
- Synchrone Reluktanzmaschine SynRM (nur Reaktionsmoment)
- Geschaltete Reluktanzmaschine SRM

12.1 Bauformen und Beispiele

Steuer- und Regelverfahren

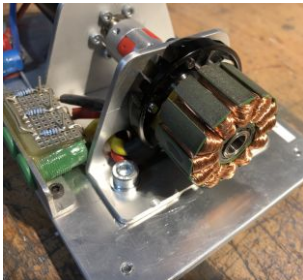


12.1 Bauformen und Beispiele

Beispiel 1: Propellerantrieb für Drohnen und Flugmodelle



Stator mit 12 Zahnspulen
"Einzelzahnwicklung"



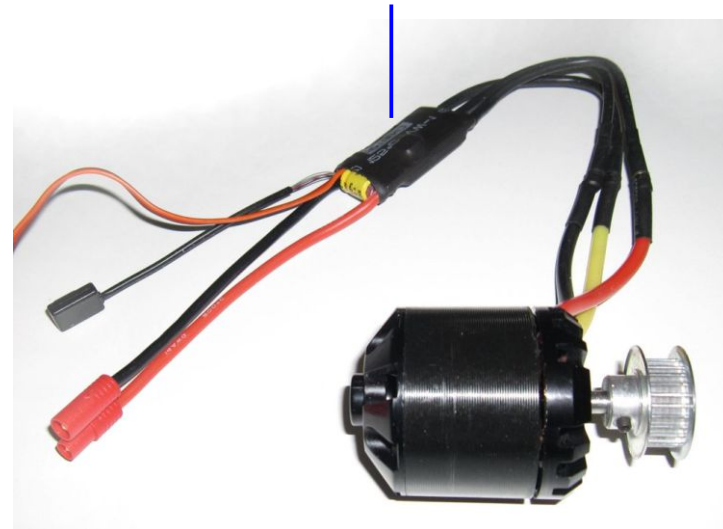
Stator, Blechpaket



Rotor mit 14 Magneten
NdFeB, verkupfert
in die Rotorglocke
eingeklebt

Bauart:	MDM Außenläufer
Steuerverf.:	EC (BLDC)
Bestromung:	Blockkommutierung
Leistung:	100 W dauer / 400 W max.
Moment:	0.2 Nm dauer / 0.8 Nm max.
Drehzahl:	bis 8.000 Upm
Gewicht:	300 g gesamt

Motorcontroller
(Wechselrichter)



Bilder: A. Kleimaier / Hersteller: Graupner

12.1 Bauformen und Beispiele

Beispiel 2a: Nabenmotor für Pedelec, Getriebe-abe

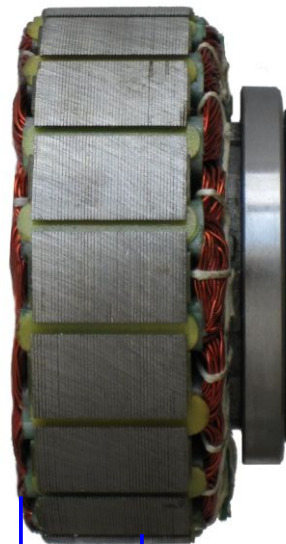
Bauart:	MDM Außenläufer
Steuerverf.:	EC (BLDC)
Bestromung:	Blockkommutierung
Leistung:	250 W dauer
Moment:	2 Nm dauer (Motor)
Gewicht:	3.6 kg (Motor 1.8 kg)

Rotor



Eisenrückschluss
Permanentmagnete

Stator



Statorzähne, geblecht
kompakter Wickelkopf



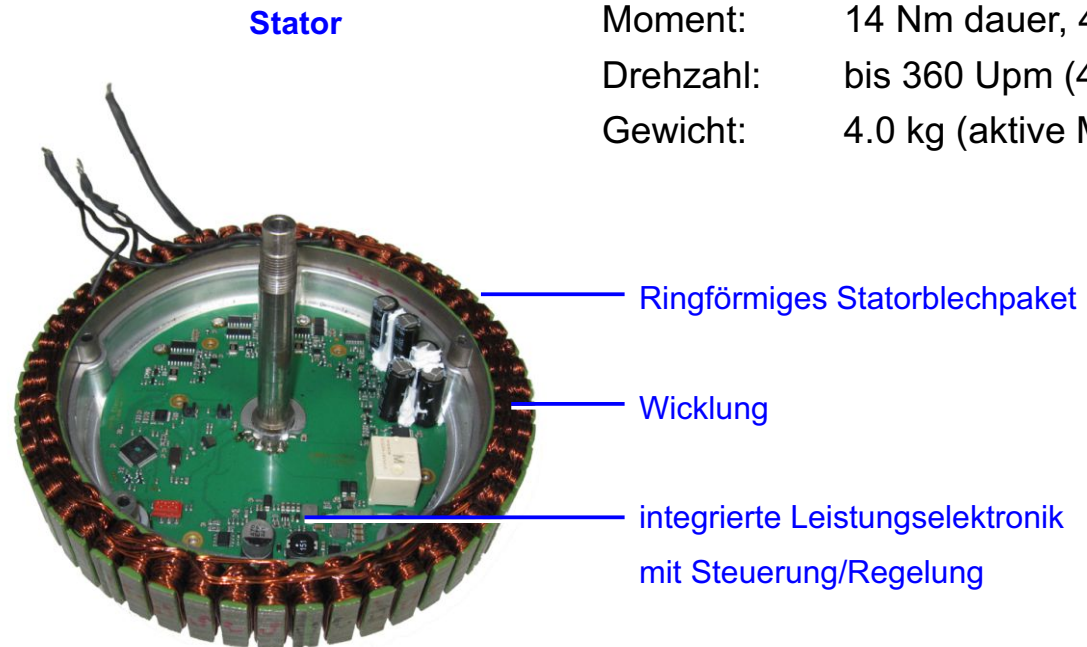
Hallsensoren
(Winkelerfassung)

Bilder: A. Kleimaier / Hersteller: Bafang

12.1 Bauformen und Beispiele

Beispiel 2b: Nabenmotor für Pedelec, Direktantrieb

Bauart:	MDM Außenläufer
Steuerverf.:	EC (BLDC)
Bestromung:	Blockkommutierung
Leistung:	250 W dauer
Moment:	14 Nm dauer, 42 Nm max.
Drehzahl:	bis 360 Upm (45 km/h)
Gewicht:	4.0 kg (aktive Masse 1.5 kg)



Bilder: A. Kleimaier / Hersteller: Hacker

12.1 Bauformen und Beispiele

Beispiel 3: Starter-Generator / Traktionsmotor für Hybridfahrzeuge

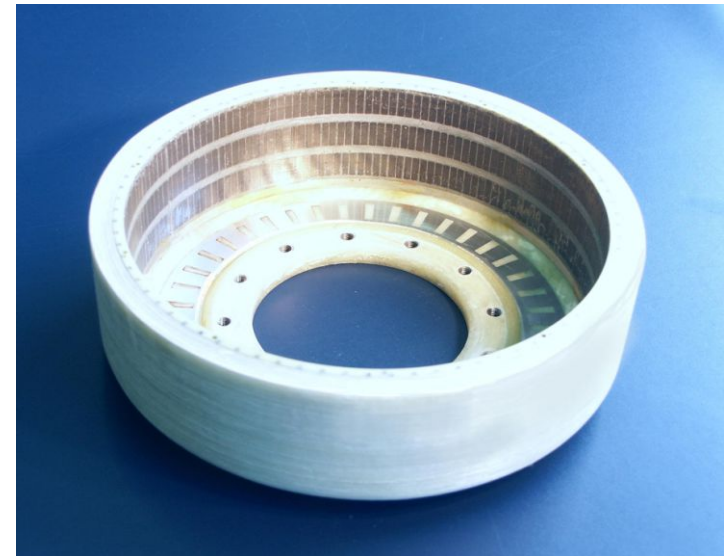
Ausführung als TFM

Stator mit Ringwicklung / Klauenpolen aus SMC



Bauart:	TFM Außenläufer
Steuerverf.:	Vektorregelung
Bestromung:	Sinus
Leistung:	20 kW dauer
Moment:	80 Nm dauer
Drehzahl:	bis 10.000 Upm
Gewicht:	10 kg (aktive Masse 4 kg)

Rotorglocke mit Magneten
80-poliger Aufbau ($p = 40$)



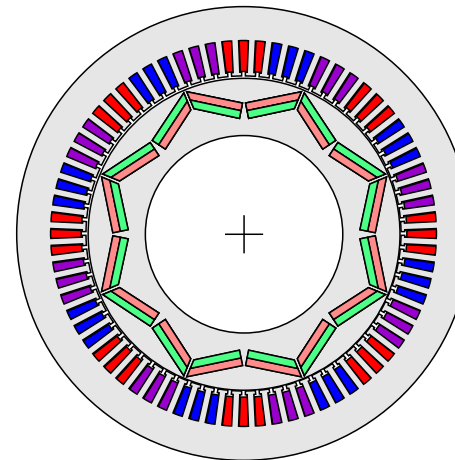
Bilder: A. Kleimaier / Hersteller: Compact Dynamics

12.1 Bauformen und Beispiele

Beispiel 4: Traktionsmotor für Elektrostraßenfahrzeuge



Bauart:	IPMSM Innenläufer
Steuerverf.:	Vektorregelung
Bestromung:	Sinus
Leistung:	80 kW dauer
Moment:	280 Nm max.
Drehzahl:	bis 9.800 Upm
Gewicht:	56 kg (aktive Masse ca. 38 kg)



Aufbau der Maschine:

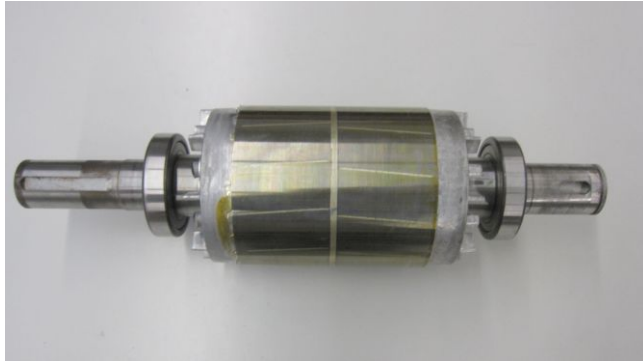
- Stator mit Drehfeldwicklung
- Rotor mit vergabenen Magneten

Weitere Daten:

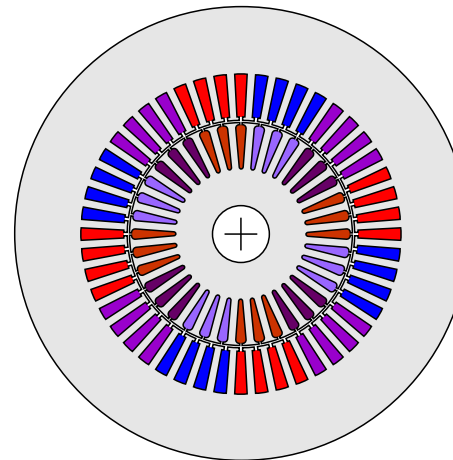
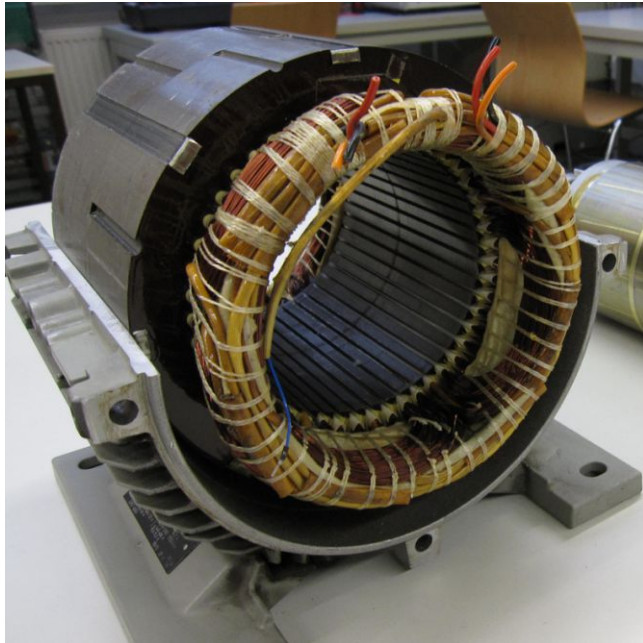
- 8-polige Maschine ($p = 4$)
- Maschine - Rad: $i = 7.96$

12.1 Bauformen und Beispiele

Beispiel 5 - Gegenbeispiel: ASM in Standardbauform



Bauart:	ASM Innenläufer
Steuerverf.:	FOC, U-f-KL, Netzbetrieb
Bestromung:	Sinus
Leistung:	7.5 kW dauer
Moment:	50 Nm dauer
Drehzahl:	bis 1.800 Upm (60 Hz-Betrieb)
Gewicht:	56 kg (aktive Masse 32 kg)



Aufbau der Maschine:

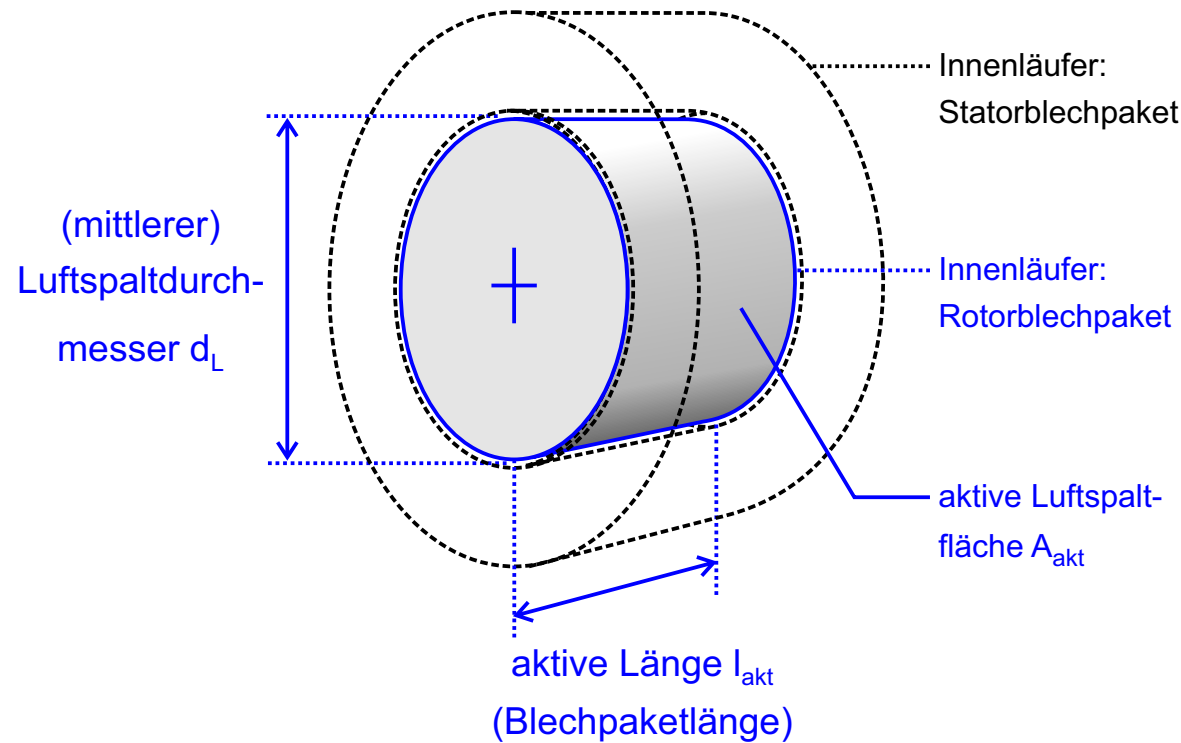
- Stator mit Drehfeldwicklung
- Rotor Kurzschlsskäfig

Weitere Daten:

- 4-polige Maschine ($p = 2$)
- $M_N = 50 \text{ Nm}$, $N_N = 1430 \text{ Upm}$

12.2 Drehschub

Kennzahl für die Ausnutzung: Drehschub τ



Drehmoment =

Hebelarm · Tangentialkraft

$$M = \frac{d_L}{2} \cdot A_{akt} \cdot \tau$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 aktive Luftspaltfläche in m^2 Drehschub in N/m^2

mit $A_{Akt} = d_L \cdot \pi \cdot l_{Akt}$

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot d_L^2 \cdot l_{akt} \cdot \tau$$

bzw.

$$\tau = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{M}{d_L^2 \cdot l_{akt}}$$

ASM:	$\tau = 15..30 \text{ kN/m}^2$	je nach Größe / Überlast
IPMSM:	$\tau = 40..80 \text{ kN/m}^2$	Dauerbetrieb .. Überlast
MDM:	$\tau = 30..40 \text{ kN/m}^2$	aber: d_L groß
TFM:	$\tau > 100 \text{ kN/m}^2$	Dauerbetrieb und Überlast

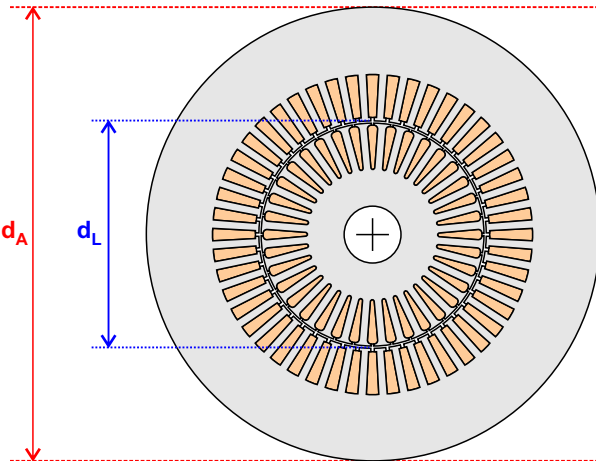
12.2 Drehschub

Auswirkung der Maschinengeometrie auf die Drehmomentausnutzung

ASM, Polpaarzahl 2

verteilte Wicklung

Innenläufer, $l_{\text{akt}} / d_L > 1$

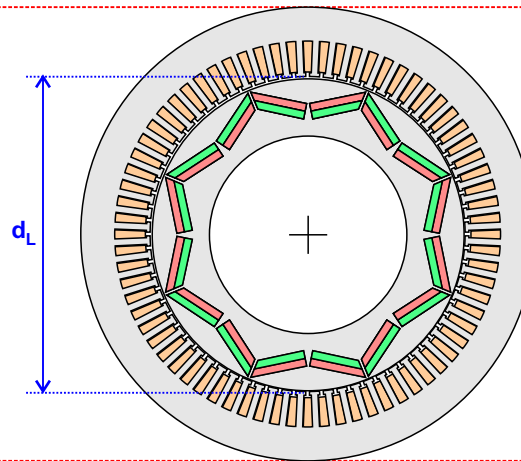


- kleine Polpaarzahl
→ großer Statorrücken, kleines d_L
→ eher schlechte Ausnutzung
- bei Magnetisierung über den Stator (ASM):
→ mäßig guter Drehschub

IPMSM, Polpaarzahl 4

verteilte Wicklung

Innenläufer, $l_{\text{akt}} / d_L > 1$

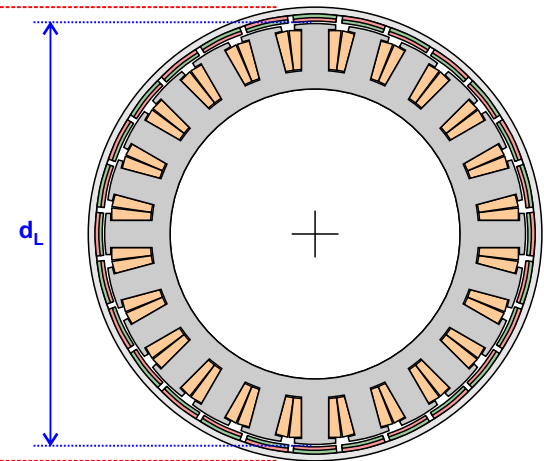


- vergrößerte Polpaarzahl
→ d_L größer, wegen $M \sim d_L^2$
deutlich bessere Ausnutzung
- Magnetisierung über Magnete und zusätzliches Reluktanzmoment:
→ hoher Drehschub realisierbar

MDM, Polpaarzahl 14

Einzelzahnwicklung

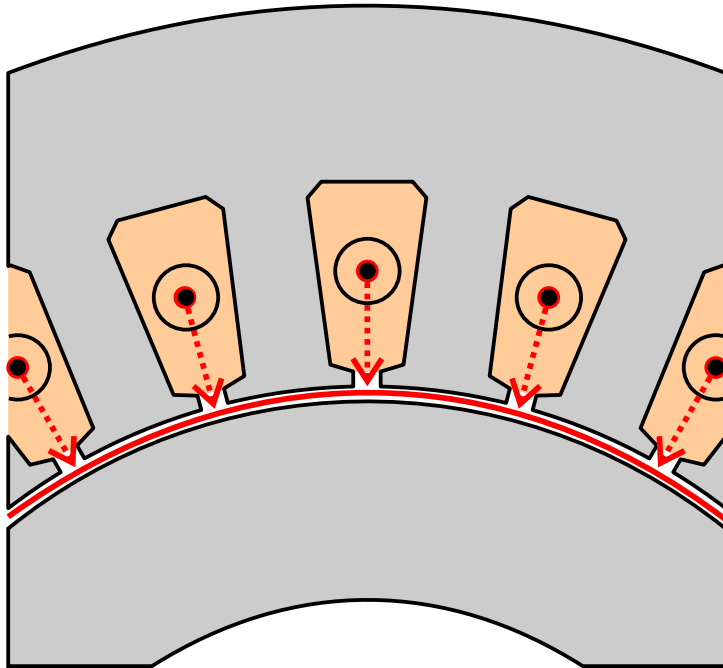
Außenläufer, $l_{\text{akt}} / d_L < 1$



- sehr feine Polteilung
→ Maschine wird ringförmig
- Außenläufer mit geringer Läuferdicke
→ d_L wandert weit nach außen
→ hohe Ausnutzung von τ möglich
- meist ist τ aber kleiner als bei IPMSM

12.2 Drehschub

Analytische Rechnung



Ansatz für analytische Rechnung:

- Ströme in den Statornuten als "**Strombelag**" im Luftspalt
- Anzahl Nuten über den Statorumfang: Q
- Anzahl Windungen pro Nut: N_Q
- Stromeffektivwert bei Drehstromspeisung: I_S
- Luftspaltdurchmesser: d_L
- **Flussdichte im Luftspalt:** $B_L \approx 0.7 \cdot B_{L,max}$

Strombelag: $A_S = \frac{\text{Nutströme}}{\text{Umfang}} = \frac{Q \cdot N_Q \cdot I_S}{d_L \cdot \pi}$

Lorenzkraft: $F_U = Q \cdot N_Q \cdot I_S \cdot I_{Akt} \cdot B_L = \text{Umfangskraft}$

Drehschub: $\tau = \frac{\text{Umfangskraft}}{d_L \cdot \pi \cdot I_{Akt}} = A_S \cdot B_L$

Drehmoment: $M_i = \frac{\pi}{2} \cdot \tau \cdot d_L^2 \cdot I_{Akt}$

12.2 Drehschub

Beispielrechnung Servomotor

Maschinendaten

Außendurchmesser:	$d_A = 104\text{mm}$
Luftspaltdurchmesser:	$d_L = 60\text{mm}$
aktive Länge:	$l_{\text{akt}} = 100\text{mm}$
Polpaarzahl:	$p = 2$
Nutzahl:	$Q = 24$
Strangzahl:	$m = 3$
Windungszahl/Nut:	$N_Q = 35$
Nutquerschnitt:	$A_Q = 48\text{mm}^2$
Effektivw. Strangstrom:	$I_s = 10\text{A}$

Rechnung

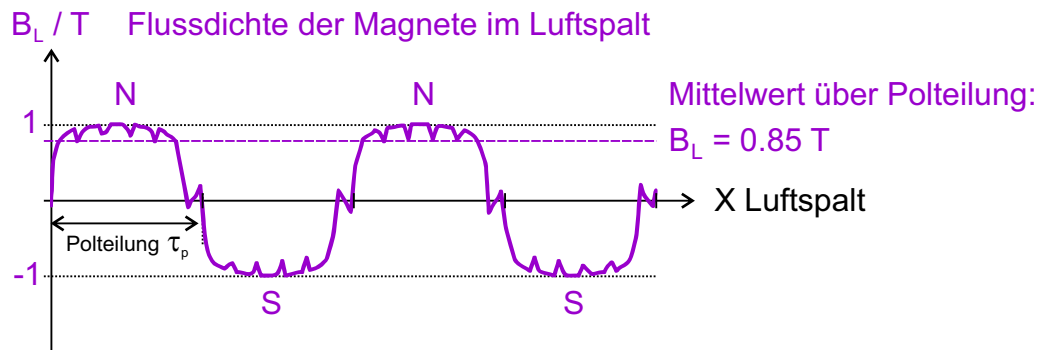
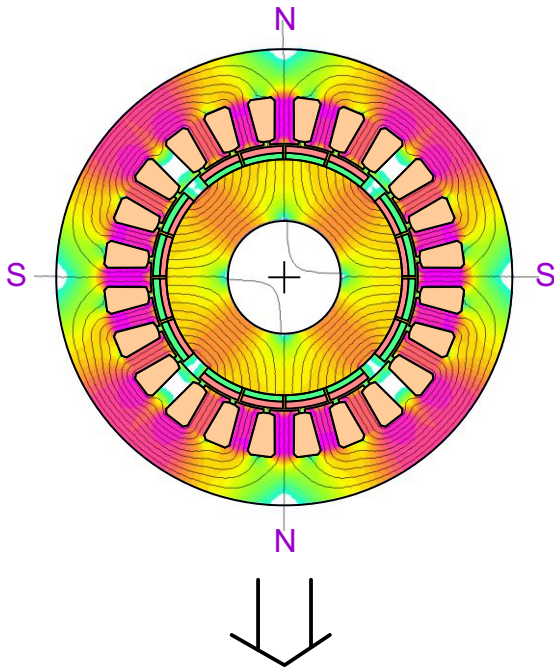
Strombelag: $A_s = \frac{Q \cdot N_Q \cdot I_s}{d_L \cdot \pi} = 44563\text{A/m} = 446\text{A/cm}$

Flussdichte: $B_L = 0.85\text{ T}$ (hier: aus FEM-Sim.)

Drehschub: $\tau = A_s \cdot B_L = 37.9\text{ kN/m}^2$

Drehmoment: $M_i = \frac{\pi}{2} \cdot \tau \cdot d_L^2 \cdot l_{\text{Akt}} = 21.4\text{ Nm}$

FEM-Simulation: $M_i = 20.0\text{Nm}$ (Sättigungseffekte)



Kontrolle Stromdichte

Annahme: Füllfaktor 60%

Stromdichte: $j = \frac{N_Q \cdot I_s}{0.60 \cdot A_Q} = 12.2\text{ A/mm}^2$

$\Rightarrow$ Überlastbetrieb!

Im Dauerbetrieb hier ca. 4 A/mm^2 möglich,

d.h. $I_{\text{SN}} = 3.3\text{ A}$ und $M_N = 6.6\text{ Nm}$

12.3 Bewertung von Maschinenkonzepten

Vergleich der Beispiele aus 12.2

Kennzahlen:	Dreh Schub τ :	Umfangskraft / Luftspaltfläche	wie gut ist die Kraftausbeute?
	Drehmomentausnutzung M/m_{akt} :	Moment / aktive Masse	wie gut wird das Material ausgenutzt?
	Leistungsgewicht P_N / m_{ges} :	Nennleistung / Gesamtmasse	welche Leistung kann erzielt werden?

Anmerkungen: aktive Masse m_{akt} : die zur Schubzeugung eingesetzte Masse von Kupfer, Eisen und ggf. Permanentmagneten ohne Gehäuse
Nennleistung P_N : mit der realisierbaren Nenndrehzahl bzw. Nennspannung steigerbar, nicht direkt von m_{akt} abhängig
Vergleichbarkeit: τ und M/m_{akt} wachsen mit zunehmendem Nennmoment → "große Maschinen sind besser"
→ aber: Überlastbarkeit wird geringer

Vergleich:

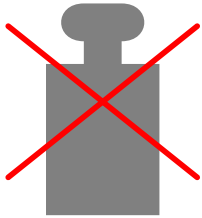
Bsp.	Einsatzgebiet	Konzept	P_N	I_{akt}/d_L	m_{akt}	M_N	M_{Max}	τ_{Max}	$M_{\text{Max}} / m_{\text{akt}}$	P_N / m_{ges}
1	BLDC-Motor Flugmodell	MDM, AL	100 W	0.61	0.2 kg	0.2 Nm	0.8 Nm	18 kN/m ²	4 Nm/kg	0.3 kW/kg
2b	Pedelec-Direktantrieb	MDM, AL	250 W	0.14	1.5 kg	14 Nm	42 Nm	32 kN/m ²	28 Nm/kg	0.06 kW/kg
3	Traktionsmotor Hybrid-FZ	TFM, AL	20 kW	0.31	4.0 kg	80 Nm	80 Nm	28 kN/m ²	20 Nm/kg	2.0 kW/kg
4	Traktionsmotor Elektro-FZ	IPMSM, IL	80 kW	1.15	38 kg	$\approx \frac{1}{2} \cdot M_{\text{Max}}$	280 Nm	70 kN/m²	7.4 Nm/kg	1.4 kW/kg
5	stationäre Standardmaschine	ASM, IL	7.5 kW	1.12	32 kg	50 Nm	$\approx 2 \cdot M_N$	31 kN/m ²	3.1 Nm/kg	0.1 kW/kg

12.3 Bewertung von Maschinenkonzepten

Einsatz in Elektrostraßenfahrzeugen: Abwägen von Vor- und Nachteilen

Anforderung

i.) geringes Gewicht



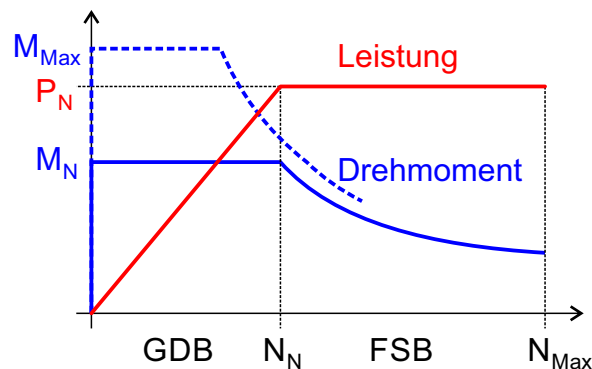
Lösungsweg, Alternativen

- Schnelldrehende Maschine + Getriebe
- Überlastbetrieb zulassen
- Maschinen mit hohem M/m_{Akt} einsetzen:
 - Konzepte mit hohem Flächenschub
 - möglichst feine Polteilung
 - Außenläufer mit $l_{Akt} < d_L$, da $M_i \sim d_L^2$

Nachteile, Baustellen

- ⇒ Festigkeit, Lager, Eisenverluste
- ⇒ Derating bei heißer Maschine
- ⇒ Baustellen:
 - ggf. neue Technologie
 - hohe Polwechselfrequenzen
 - konstruktiv aufwändiger

ii.) Konstantleistungsbereich



- Drehzahl- Drehmomentvorgabe mit schaltbarem Getriebe anpassen
- Feldschwächbare Maschine einsetzen:
 - "weiche" Maschine mit großem L_d
 - kleiner Kurzschlussstrom I_K
 - eher schlechter $\cos \varphi$ im GDB (aber: $\cos \varphi = 1$ im FSB möglich)

- ⇒ hoher Zusatzaufwand
- ⇒ Baustellen:
 - ggf. erhöhte Kupferverluste
 - erhöhter Scheinleistungsbedarf im Grunddrehzahlbereich
 - besondere magn. Auslegung

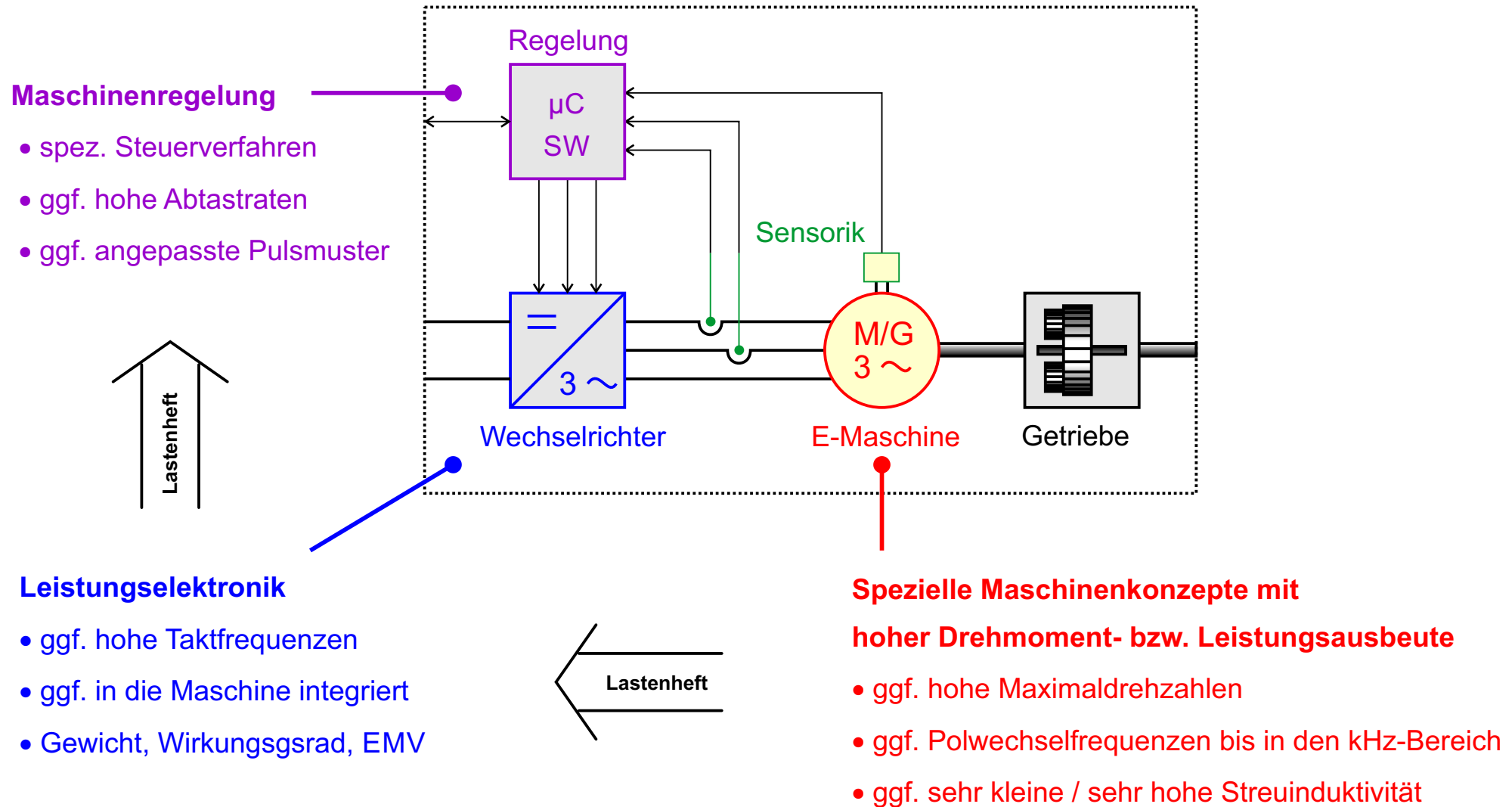
12.3 Bewertung von Maschinenkonzepten

Vergleich verschiedener Einsatzgebiete

Einsatzgebiet	Lastenheft	Motorvariante
Kfz: Starter-Generator	Gewicht, Temperatur, Material, Herstellkosten, großer Konstantleistungsbereich (FSB)	MDM, TFM, ASM
Traktionsantrieb Straßenfahrzeug	Gewicht, Material, Herstellkosten Konstantleistungsbereich (FSB)	IPMSM, fremderegte SM, ASM
Traktionsantrieb Motorsport	Gewicht, max. Leistung bei $v_{\max}$ (häufig kein Konstantleistungsbereich)	MDM, PMSM-Varianten
Drohnen, Multikopter, Elektro- und Hybridflugzeuge	Gewicht, Propellerantrieb mit $M \sim N^2$ kein FSB, $\cos \varphi$ um 0.95	MDM Außenläufer, TFM, Axialflussmotoren
Dieselelektrische Schiffsantriebe, Propellergondel (Pod-Antrieb)	Wirkungsgrad, Propellerantrieb mit $M \sim N^2$ kein FSB	PMSM-Varianten, ASM (konservativ)
Schienenfahrzeuge	Gewicht, Material, Zuverlässigkeit Konstantleistungsbereich (FSB)	ASM, ggf. auch PMSM (konservativ)

12.3 Bewertung von Maschinenkonzepten

Nicht vergessen: Elektrischer Antrieb = mechatronisches System



12.3 Bewertung von Maschinenkonzepten

Was bestimmt die Kenndaten einer Maschine?

Maximales Drehmoment

wird bestimmt durch...

- Geometrie + Eisenkreisdesign
- max. zulässige Wicklungstemp.

→ Materialeinsatz von Cu, Fe, PM

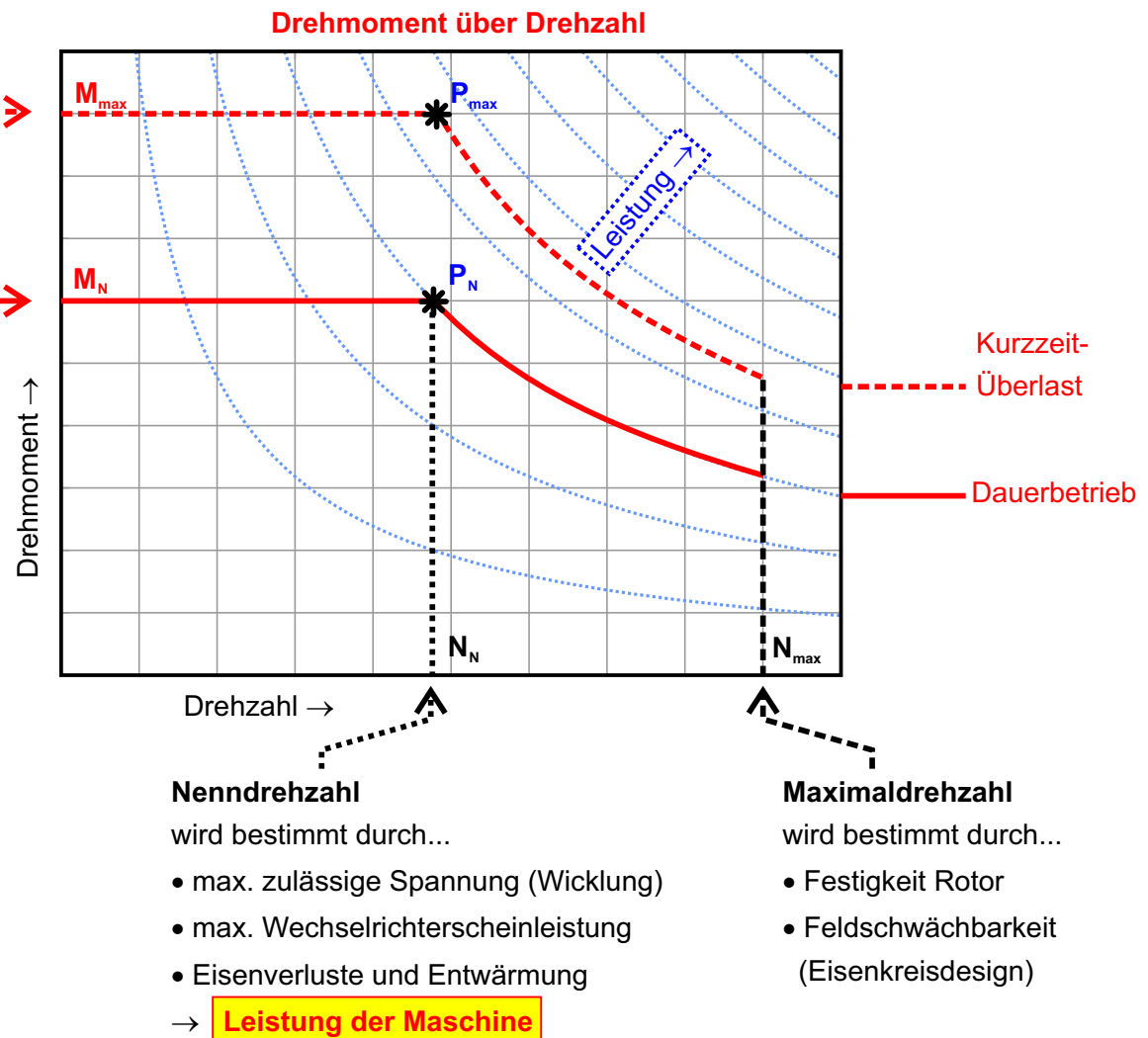
→ **Gewicht der Maschine**

Dauerdrehmoment

wird bestimmt durch...

- Kupferverluste
- Entwärmung der Wicklung

Idealfall: $M_N = M_{\max}$



12.4 PMSM: EMK und Kurzschlussstrom

EMK (induzierte Polradspannung)

Messaufbau

- Maschine wird geschleppt
- Klemmen offen:
EMK (Polradspg.) direkt messbar
- U_P gegen Sternpunkt messen

Drehmoment aus EMK-Messung:

- Betrieb mit Vektorregelung (FOR)
- reine Querstromeinprägung
d.h. I_q entspricht dem Strangstrom
- nur Synchronmoment

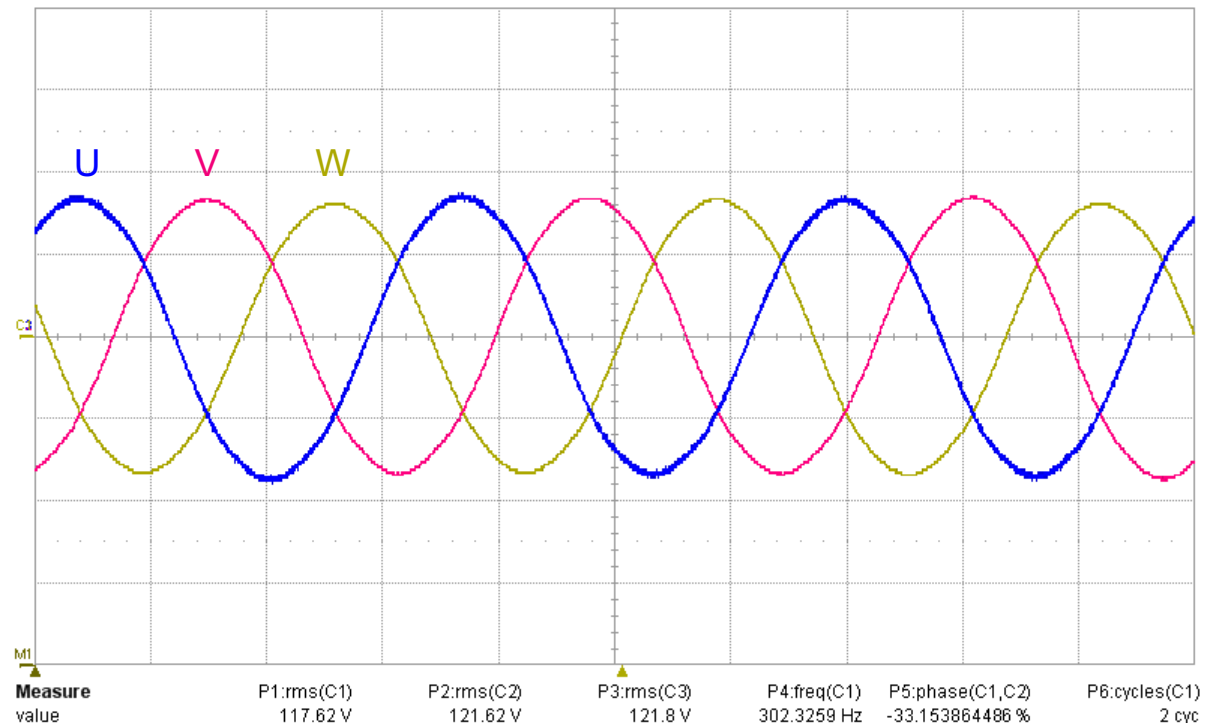
dann gilt nach Kapitel 11 Seite 16:

$$M_i = \frac{3p}{\omega_{el}} U_P \cdot I_q = \frac{3p}{2\pi} \cdot \underbrace{\frac{U_P}{f_{el}}}_{k_{EMK}} \cdot I_q$$

EMK-Konstante k_{EMK}

hier: Effektivwerte

Messung der EMK einer PMSM mit $p = 14$



$$U_P = 120.3 \text{ V}$$

$$f_{el} = 302.3 \text{ Hz}$$

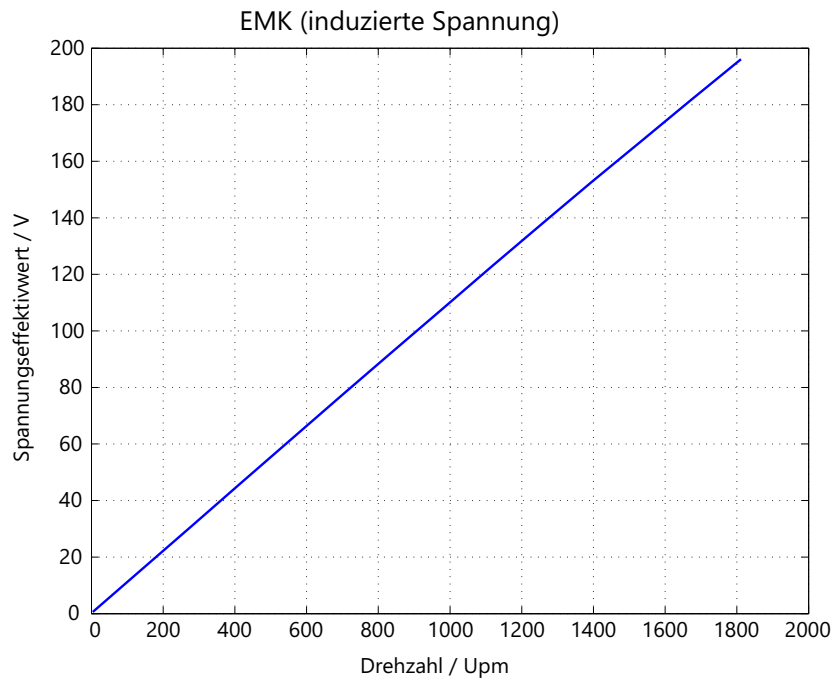
$$k_{EMK} = \frac{U_P}{f_{el}} = 398 \text{ mV/Hz}$$

$$N = \frac{f_{el}}{p} \cdot 60 \text{ Upm} \cdot \text{s} = 1296 \text{ Upm}$$

12.4 PMSM: EMK und Kurzschlussstrom

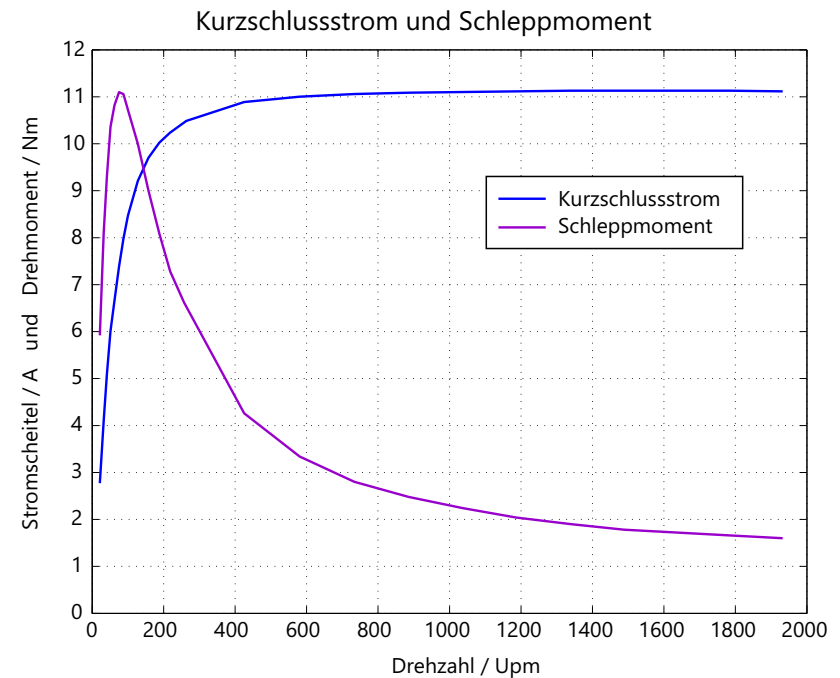
Verhalten einer feldschwächbaren PM-Maschine

Klemmen offen, Maschine geschleppt



- Die induzierte Spannung wächst proportional mit der Drehzahl bzw. mit f_{el}
- hier: $\frac{U_{P,eff}}{f_{el}} = 433 \text{ mV/Hz}$

Kurzgeschlossen, Maschine geschleppt



- Der Kurzschlussstrom bleibt im oberen Drehzahlbereich konstant. Hier: $I_K = I_N$
- Das Schleppmoment hat im unteren Drehzahlbereich ein Maximum und fällt dann in etwa mit $1/N$ ab

12.5 Einzelzahnwicklung

Motivation für die Einzelzahnwicklung



Bilder: A. Kleimaier

Auffälligkeiten – Besonderheiten

- praktisch kein Wickelkopf
 - ringförmiges, hochpoliges Maschinenkonzept
 - Wicklung nur auf einzelne Zähne gewickelt
 - keine Überlappung der Spulen
- ⇒ keine Drehfeldwicklung! Wie funktioniert das dann?

Entwicklungsziel:

Realisierung einer hochausgenutzten Maschine

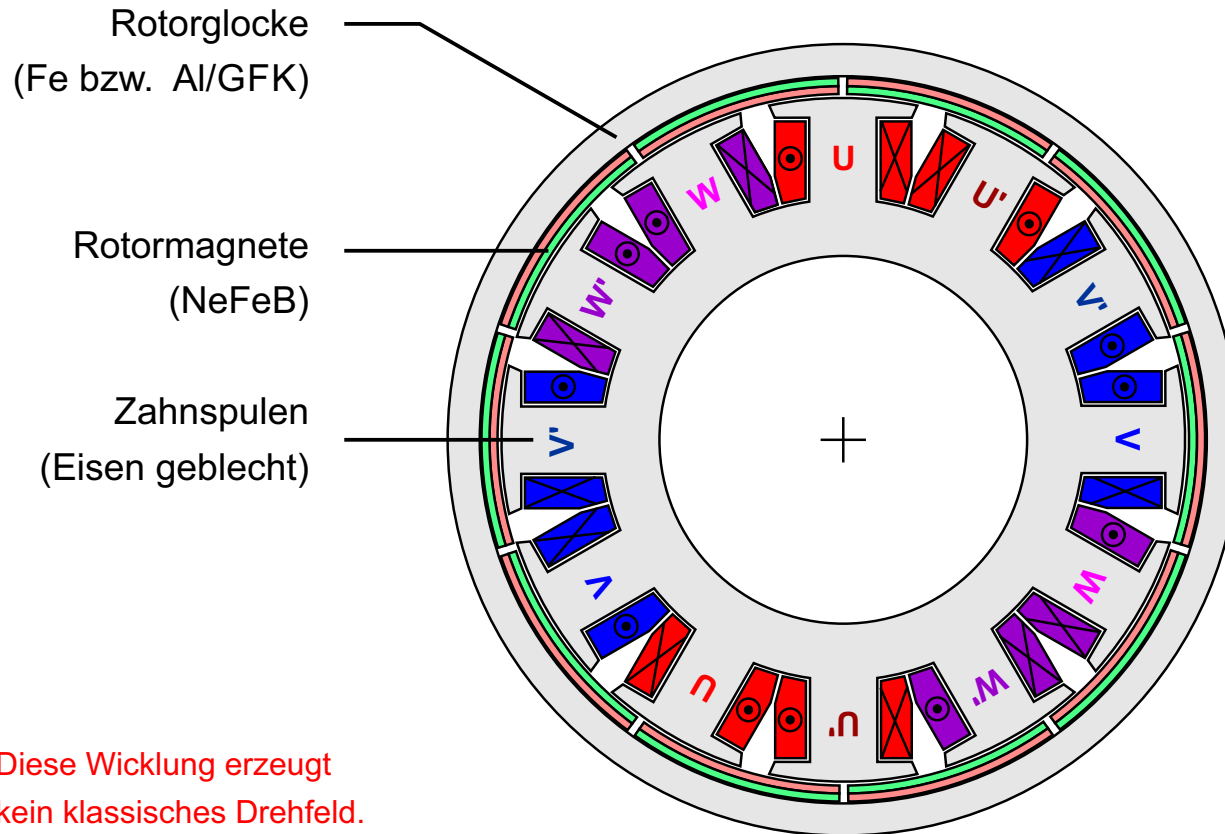
- sehr hohe Drehmomentausbeute
- möglichst geringes Gewicht
- in der Regel aber begrenzte Drehzahl
(man bekommt nichts geschenkt!)

Einsatzgebiete:

- Propellerantriebe, Lüfterantriebe
- Radnabenmotoren
- Starter- Generatorsysteme

12.5 Einzelzahnwicklung

Grundmaschine mit 12 Zähnen und 10 Magneten



Diese Wicklung erzeugt
kein klassisches Drehfeld.
Drehmomentbildung über
die 5. oder 7. Oberwelle
des Statorfeldes

Stator:

- Zahnspulen bzw. Einzelzähne
- Anzahl Zähne: $Z_s = 12$
- $Q = 12, m = 3, p = 5$
 $q = \frac{Q}{2m \cdot p} = 2/5$ "Bruchlochwicklung"

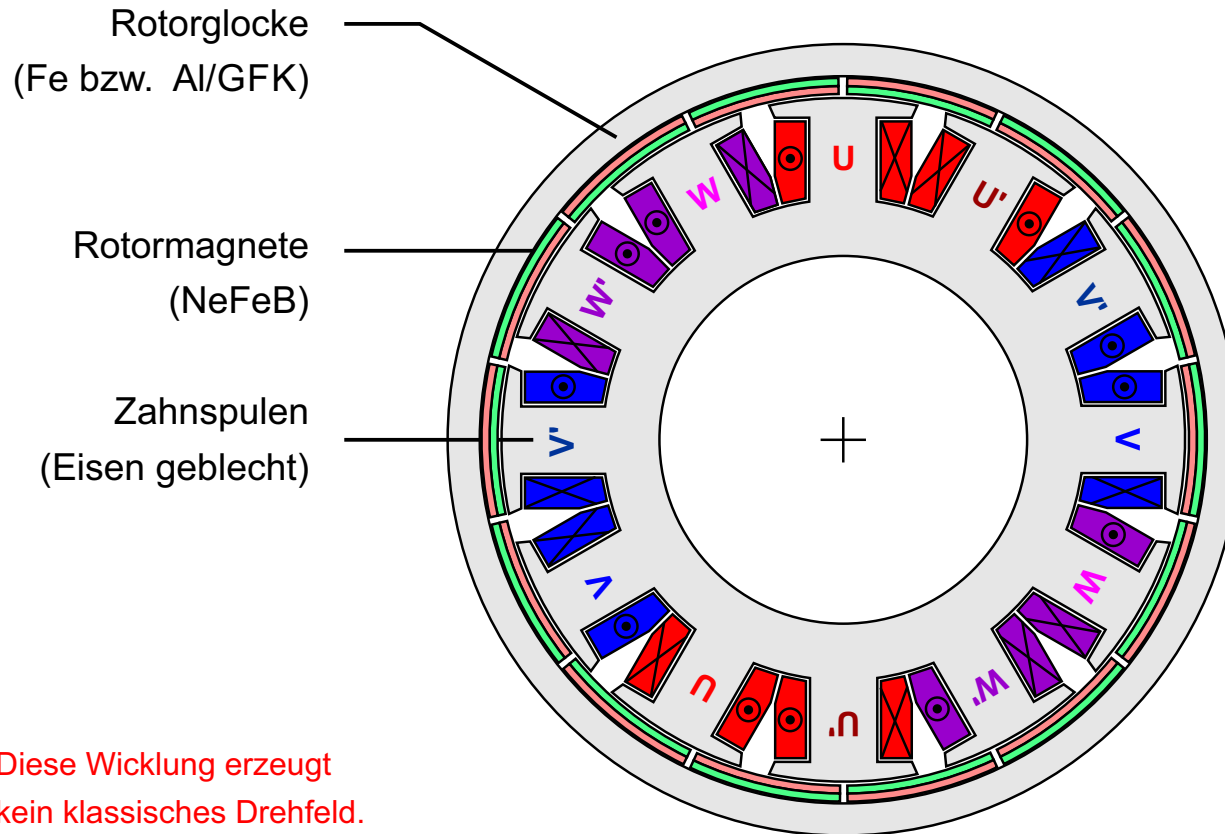
Rotor:

- Außenläufer mit Rotorglocke
- Anzahl Magnete: $2p = 10$

Natürlich können auch mehrere
Grundmaschinen über den Umfang
angeordnet werden, z.B. mit $Q = 24$ und $p = 10$

12.5 Einzelzahnwicklung

Grundmaschine mit 12 Zähnen und 14 Magneten



Diese Wicklung erzeugt
kein klassisches Drehfeld.
Drehmomentbildung über
die 5. oder 7. Oberwelle
des Statorfeldes

Stator:

- Zahnspulen bzw. Einzelzähne
- Anzahl Zähne: $Z_s = 12$
- $Q = 12, m = 3, p = 7$
 $q = \frac{Q}{2m \cdot p} = 2/7$ "Bruchlochwicklung"

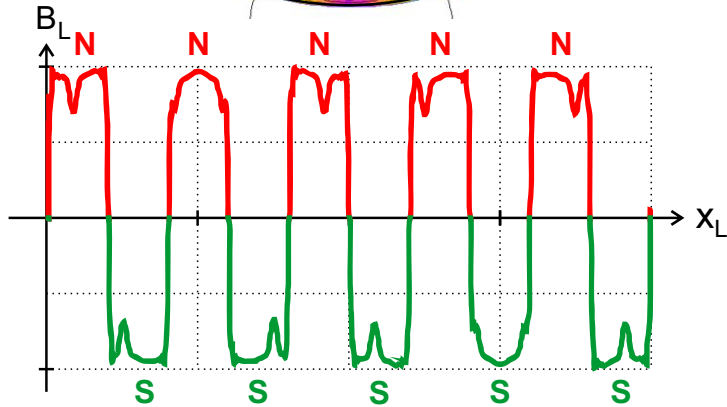
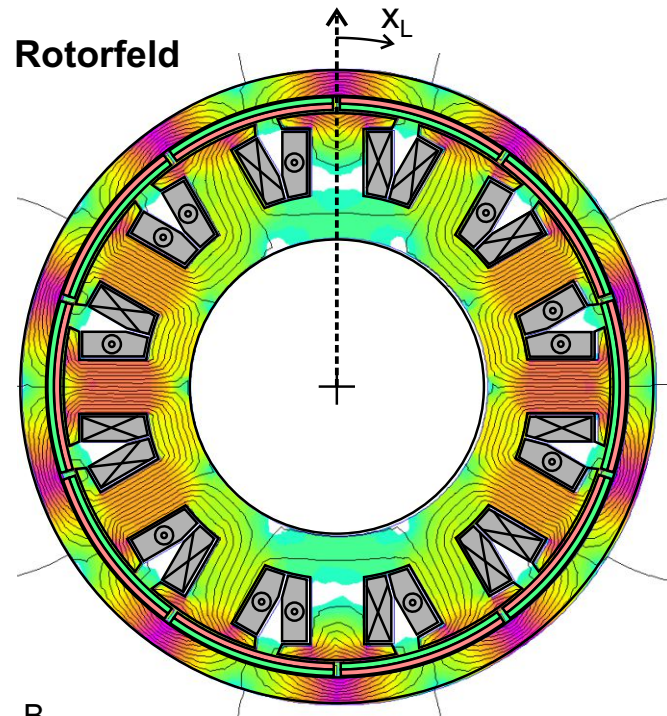
Rotor:

- Außenläufer mit Rotorglocke
- Anzahl Magnete: $2p = 14$

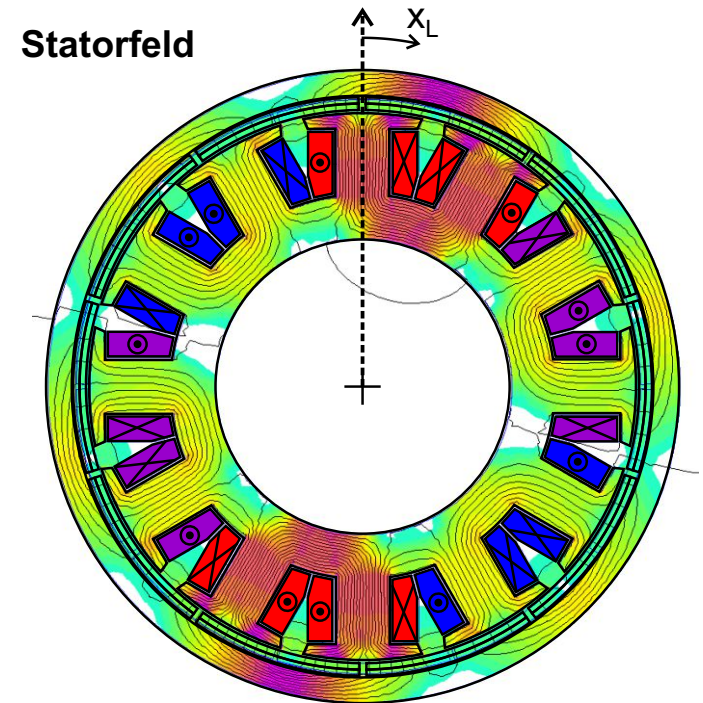
Natürlich können auch mehrere
Grundmaschinen über den Umfang
angeordnet werden, z.B. mit $Q = 24$ und $p = 14$

12.5 Einzelzahnwicklung

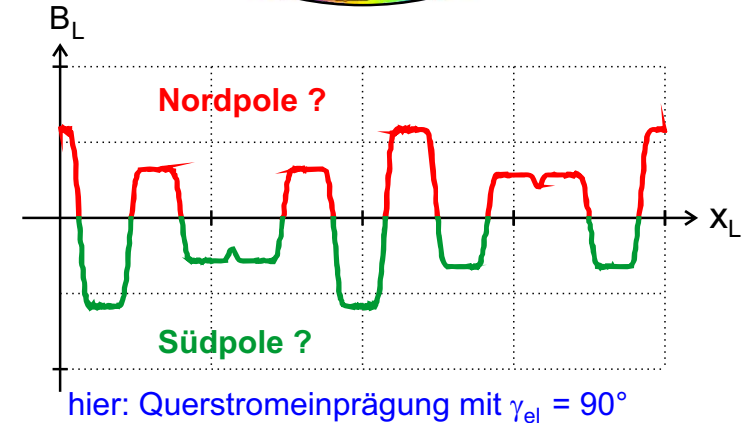
FEM-Simulation Rotor- und Statorfeld



hier:
 $2p = 10$ Magnete
 $p = 5$ Polpaare
5x Nordpol
5x Südpol

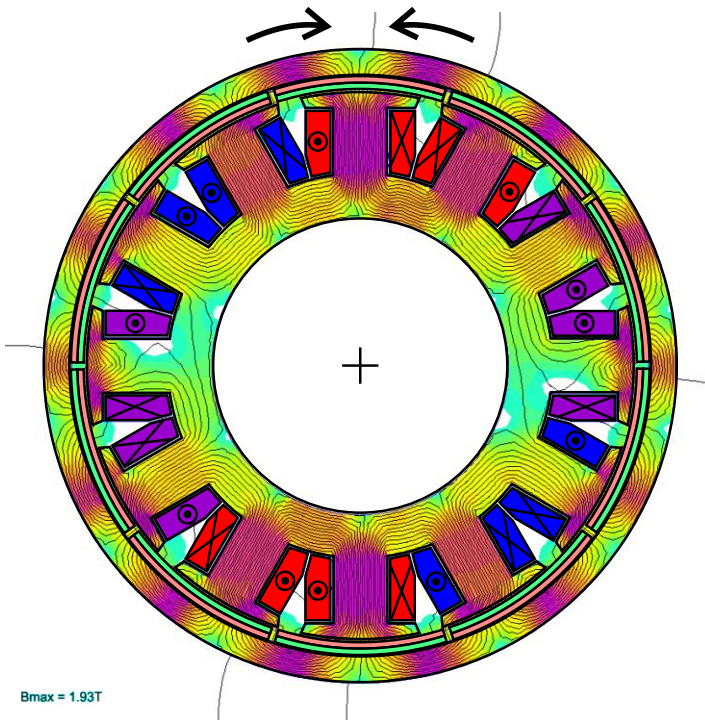


Bauraum
Magnete
= "Luft"

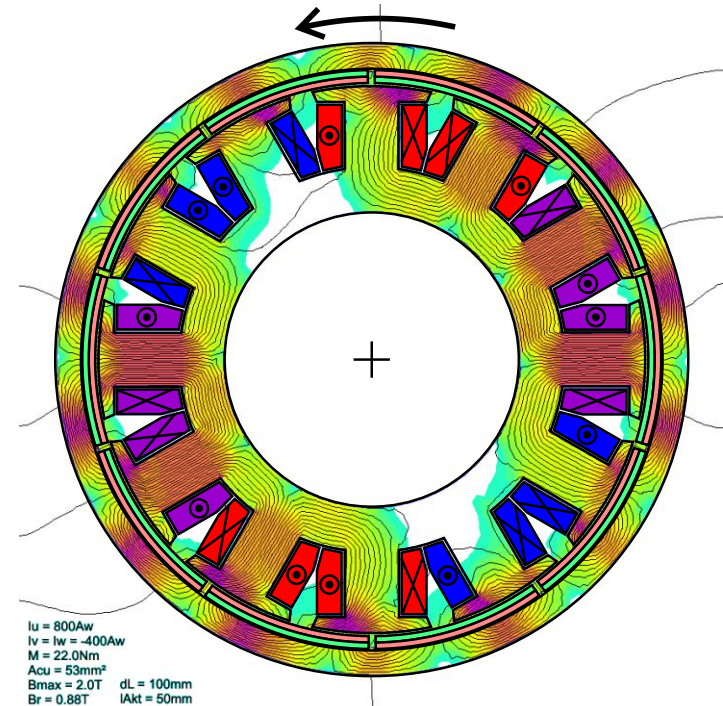


12.5 Einzelzahnwicklung

Überlagerung von Rotor- und Statorfeld



- Rotor- und Statorfeld parallel ausgerichtet
- kein Drehmoment, Ruhelage



- Rotor- und Statorfeld um $\delta = 90^\circ$ el. versetzt
- maximales Drehmoment

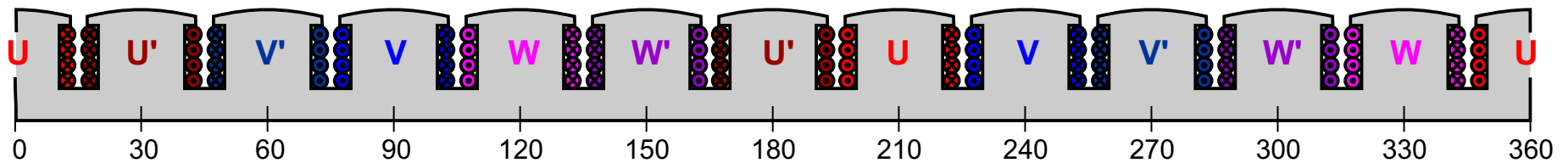
Steuer-/Regelverfahren

- "elektronische Kommutierung": pollage-abhängiges Weiterschalten der Bestromung
- "Querstromeinprägung" $\Rightarrow$ Vektorregelung

12.5 Einzelzahnwicklung

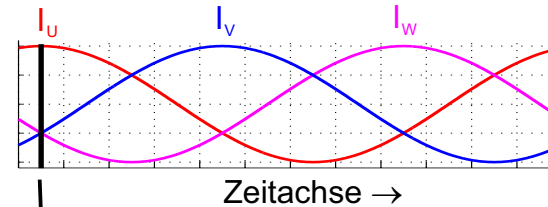
Felderregerkurve

"Wickelschema" mit Statorzähnen

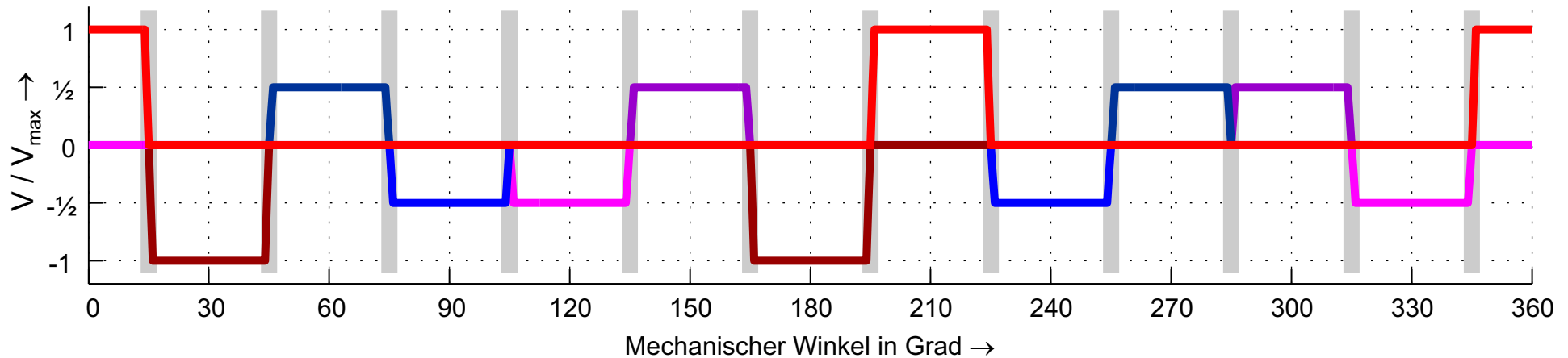


idealisierte Felderregerkurve

für $I_U = I_{\text{Scheitel}}$ und $I_V = I_W = -\frac{1}{2} I_{\text{Scheitel}}$



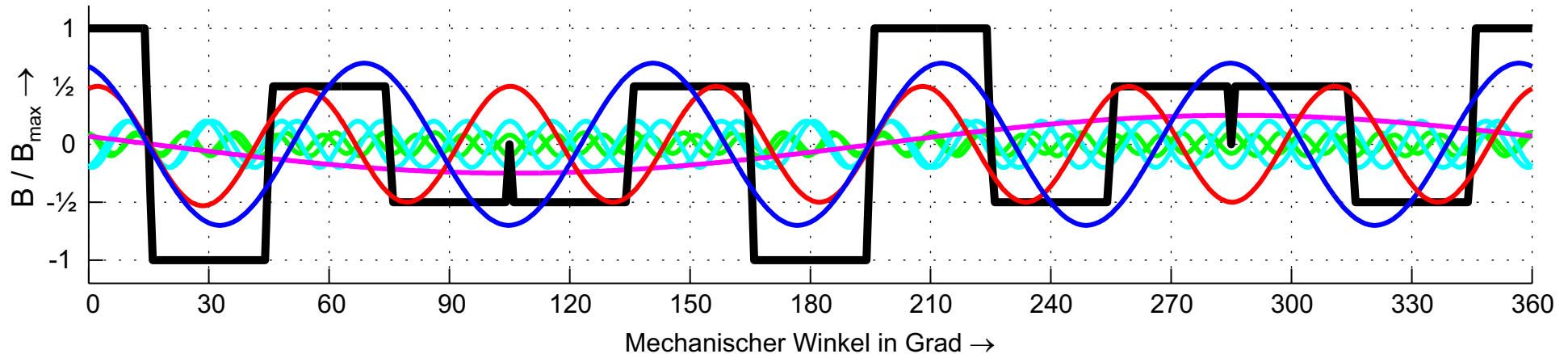
3 - phasiges
Drehstromsystem



12.5 Einzelzahnwicklung

Analyse Felderregenerkurve

Ortsverlauf resultierendes Statorfeld mit den Fourierkomponenten 1 - 5 - 7 - 17 - 19 - 29 - 31
(die 11. und 13. ist nur schwach ausgeprägt und hier nicht berücksichtigt)



$$\begin{aligned} B(x,t) = & - 0.256 \cdot \sin(\omega \cdot t - 1 \cdot x) & + 0.713 \cdot \cos(\omega \cdot t + 5 \cdot x) & + 0.509 \cdot \cos(\omega \cdot t - 7 \cdot x) \\ & - 0.210 \cdot \cos(\omega \cdot t + 17 \cdot x) & - 0.188 \cdot \cos(\omega \cdot t - 19 \cdot x) & + 0.123 \cdot \cos(\omega \cdot t + 29 \cdot x) & + 0.116 \cdot \cos(\omega \cdot t - 31 \cdot x) \\ & - \dots \end{aligned}$$

Analyse mit dem Skript "Einzelzahnwicklung.m" – Beobachtungen:

- das resultierende Statorfeld (schwarze Kurve) ist kein Drehfeld
- die Oberwellen bleiben in ihrer Amplitude konstant, wenn man das Drehstromsystem "laufen lässt"
- sie wandern dabei im Luftspalt und bilden einzelne Drehfelder aus

12.5 Einzelzahnwicklung

Zusammenfassung

Spielregeln:

- Die Synchronmaschine kann nur ein Drehmoment erzeugen, wenn die Polzahlen von Stator- und Rotorfeld übereinstimmen. Andere Statorharmonische erzeugen keinen Schub.
- Rotor mit 2 Magneten: $p = 1$
- Rotor mit 10 Magneten: $p = 5$
- Rotor mit 14 Magneten: $p = 7$
- Rotor mit Kurzschlusskäfig: Bei einer Asynchronmaschine würden alle Statorharmonische zur Drehfeldbildung (mal rechts-, mal linksdrehend) beitragen: Einzelzahnwicklung unbrauchbar!

technisch nutzbar:

5. Oberwelle:
Maschine mit $p = 5$
linksdrehend



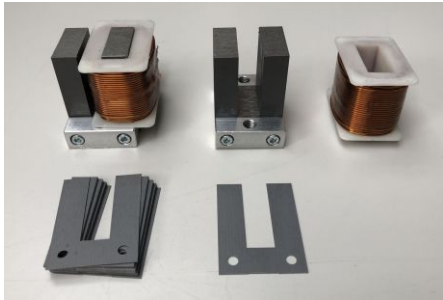
7. Oberwelle:
Maschine mit $p = 7$
rechtsdrehend



$$\begin{aligned} B(x,t) = & - 0.256 \cdot \sin(\omega \cdot t - 1 \cdot x) & + 0.713 \cdot \cos(\omega \cdot t + 5 \cdot x) & + 0.509 \cdot \cos(\omega \cdot t - 7 \cdot x) \\ & - 0.210 \cdot \cos(\omega \cdot t + 17 \cdot x) & - 0.188 \cdot \cos(\omega \cdot t - 19 \cdot x) & + 0.123 \cdot \cos(\omega \cdot t + 29 \cdot x) & + 0.116 \cdot \cos(\omega \cdot t - 31 \cdot x) \\ & - \dots \end{aligned}$$

12.6 Axialflussmaschine der HAW Landshut

Grundkonzept



Joche aus UI30-Kernblechen
mit Steckspulen



Statorhälfte mit aufgeschraubten U-Jochen

Vorteile

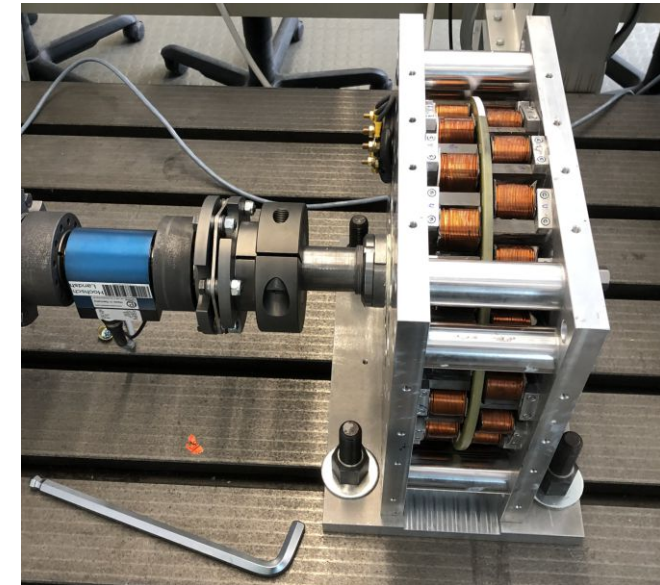
- einfache Herstellbarkeit
- Skalierbarkeit / Baugröße
- hohes Drehmoment
- geringes Trägheitsmoment
- wenig Magnetmaterial
- gut feldschwächbar

Nachteile / Baustellen

- Magnettemperaturen
- Geräuscentwicklung
- erzielbare Nennleistung
- Leistungsfaktor $\cos \varphi \approx 0,70$



Rotor mit Permanentmagneten

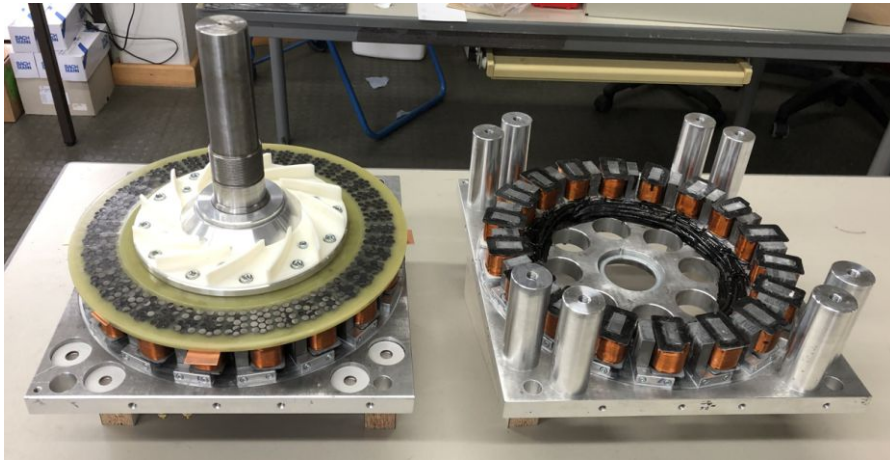


komplette Maschine
bei Montage auf dem Prüfstand

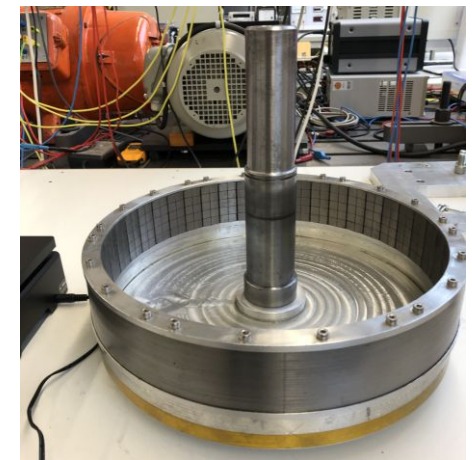
12.6 Axialflussmaschine der HAW Landshut

Vergleich mit Radialflussmaschinen

Axialflussmaschine mit U-Jochen, Prototyp 2.1
Scheibenläufer



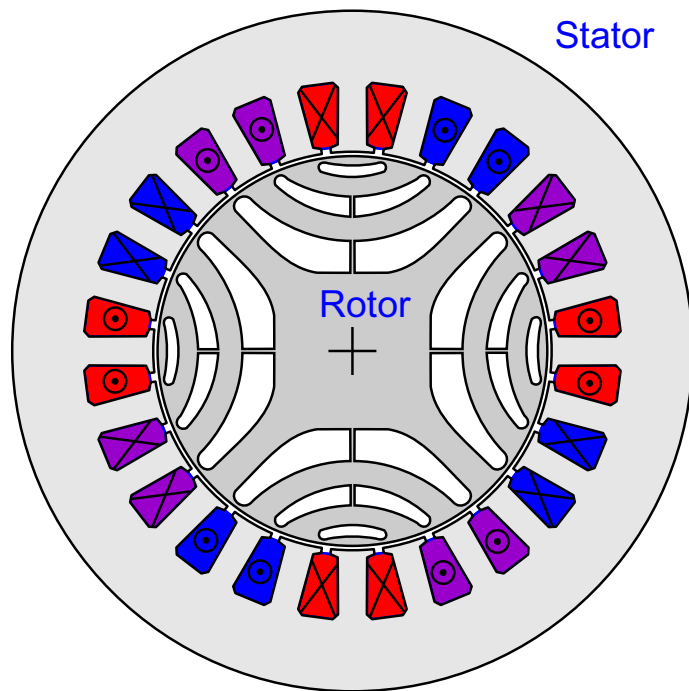
Radialflussmaschine mit U-Jochen, Prototyp
Außenläufer



Einsatzgebiet	P_{Max}	m	$P_{\text{max}} / m_{\text{ges}}$	m_{akt}	m_{Magne}	M_N	M_{max}	τ_{max}	$M_{\text{max}} / m_{\text{akt}}$
Traktionsmotor Nissan Leaf	80 kW	56 kg	1,4 kW/kg	38 kg	ca. 2 kg	k.A.	280 Nm	70 kN/m ²	7,4 Nm/kg
Traktionsmotor BMW i3	125 kW	54 kg	2,3 kW/kg	35 kg	ca.1.5 kg	k.A:	280 Nm	42 kN/m ²	8,0 Nm/kg
Prototyp Axialflussmaschine	ca. 40 kW	30 kg	1,2 kW/kg	10,3 kg	700 g	180 Nm	320 Nm	136 kN/m²	31,1 Nm/kg
Prototyp Radialflussmaschine	ca. 30 kW	34 kg	0,9 kW/kg	13,7 kg	1575 g	180 Nm	395 Nm	66k N/m ²	28,8 Nm/kg

12.7 Synchrone Reluktanzmaschine

Aufbau und Funktionsprinzip



SynRM = Synchrone Reluktanzmaschine

- Stator: verteilte Wicklung
- Rotor: Flussbarrieren (keine Magnete)
- Drehmomentbildung alleine auf Basis des Reaktionsmomentes (vgl. Kapitel 2, S. 16)
- hier: vierpolige Ausführung ($p = 2$)

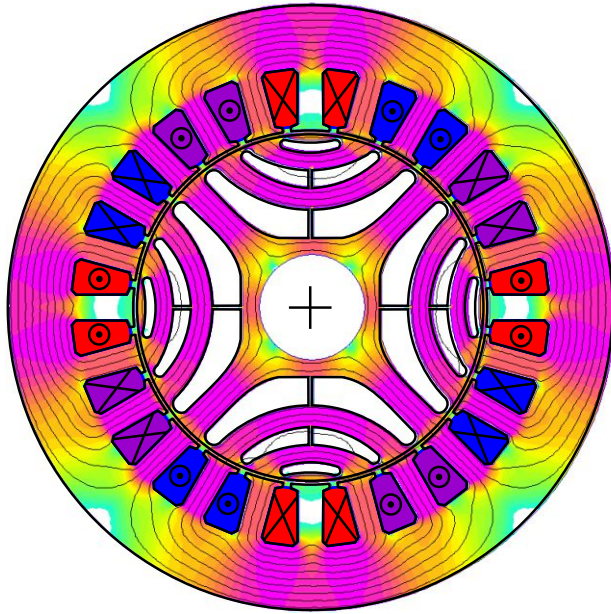
Ansteuerung

- Speisung mit Drehstromwechselrichter
- Stromeinprägung mit feldorientierter Regelung
- Sollwerte für I_d und I_q werden
z.B. mit dem MTPC-Verfahren optimiert
- MTPC = Maximum Torque per **Current**

$$M_i = \underbrace{\frac{3p}{2\pi} \cdot k_{EMK} \cdot I_q}_{\text{Synchronmoment } M_s = 0 \text{ (keine Magnete!)}} + \underbrace{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_q \cdot I_d}_{\text{Nutzung des Reluktanzmomentes } M_R}$$

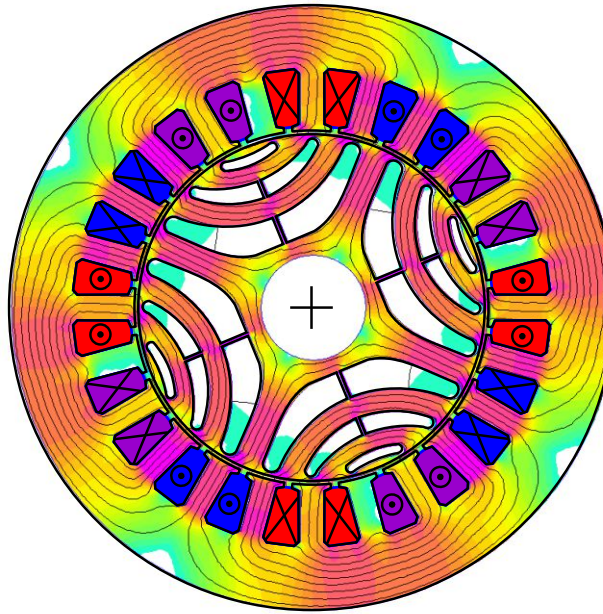
12.7 Synchrone Reluktanzmaschine

Drehmomenterzeugung



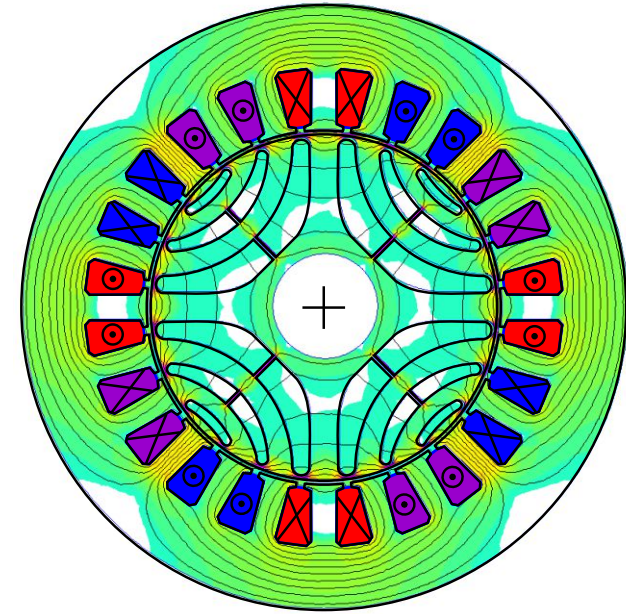
Rotorposition 0° el.

- Flussbarrieren unwirksam
- Induktivität: $L_S = 100\%$
- Drehmoment: $M_R = 0$



Rotorpos. 45° el. = 22.5° mech

- Reluktanzkräfte
- Induktivität: $L_S = \text{ca. } 70\%$
- Drehmoment: $M_R = 100\%$

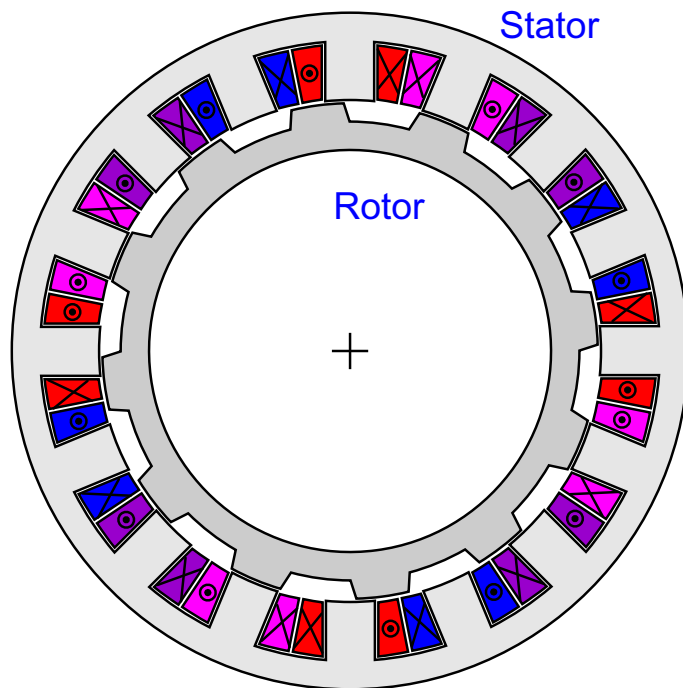


Rotorpos. 90° el. = 45° mech.

- Flussbarrieren max. wirksam
- Induktivität: $L_S = \text{ca. } 30\%$
- Drehmoment: $M_R = 0$

12.8 Geschaltete Reluktanzmaschine

Aufbau und Funktionsprinzip



SRM = Switched Reluctance Motor

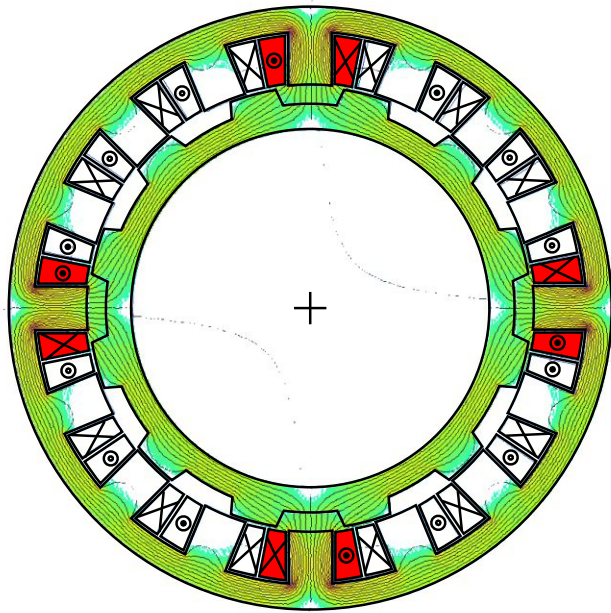
- Stator: konzentrierte Wicklung
- Rotor: ausgeprägte Zähne
- Drehmomentbildung auf Basis von "Anziehungskräften" Statorzahn - Rotorzahn
- Reluktanz ist rotorpositionsabhängig, daraus U_{ind} für elektromechanische Energiewandlung
- Anzahl Stränge: $m = 4$ oder mehr

Ansteuerung

- Separate, blockförmige Bestromung der Stränge
- eigene Wechselrichtertopologie erforderlich, Drehstromwechselrichter nicht einsetzbar
- Kommutierung = Fortschalten der Stränge

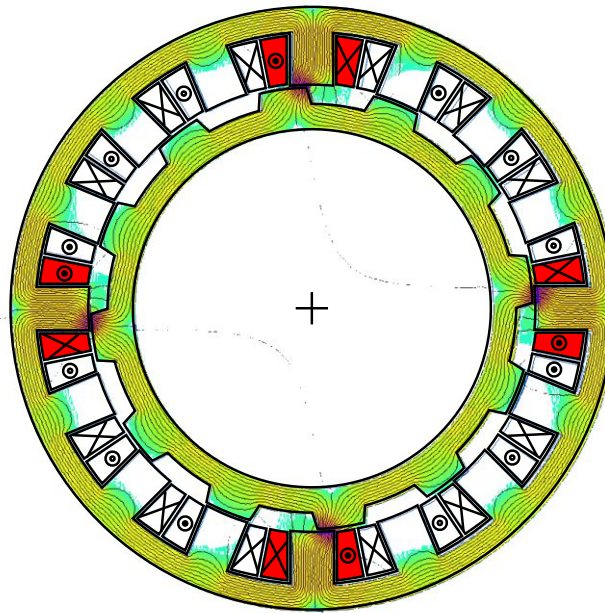
12.8 Geschaltete Reluktanzmaschine

Drehmomenterzeugung: Rotorpositionen Strang U bestromt



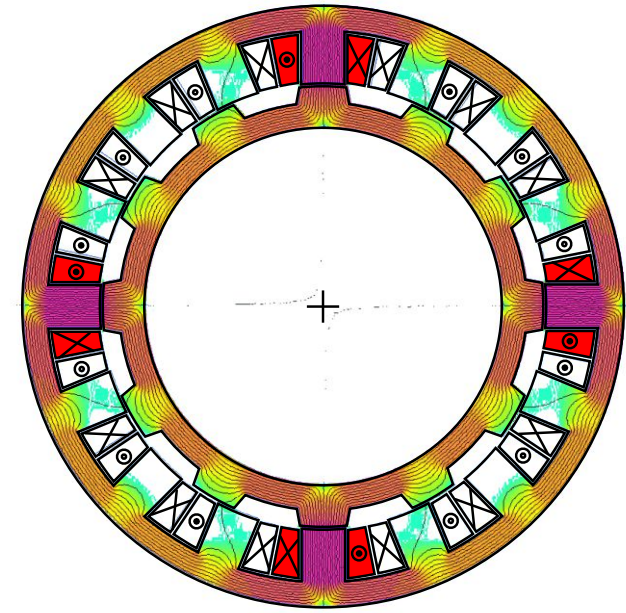
Rotorposition unaligned 0° el.

- Eisenkreis: geringe Ausst.
- Induktivität: $L_{S,U} = \text{ca. } 30\%$
- Drehmoment: $M_U = 0$



Rotorposition 90° el.

- Eisenkreis: lokale Sättigung
- Induktivität: $L_{S,U} = \text{ca. } 70\%$
- Drehmoment: $M_U = 100\%$



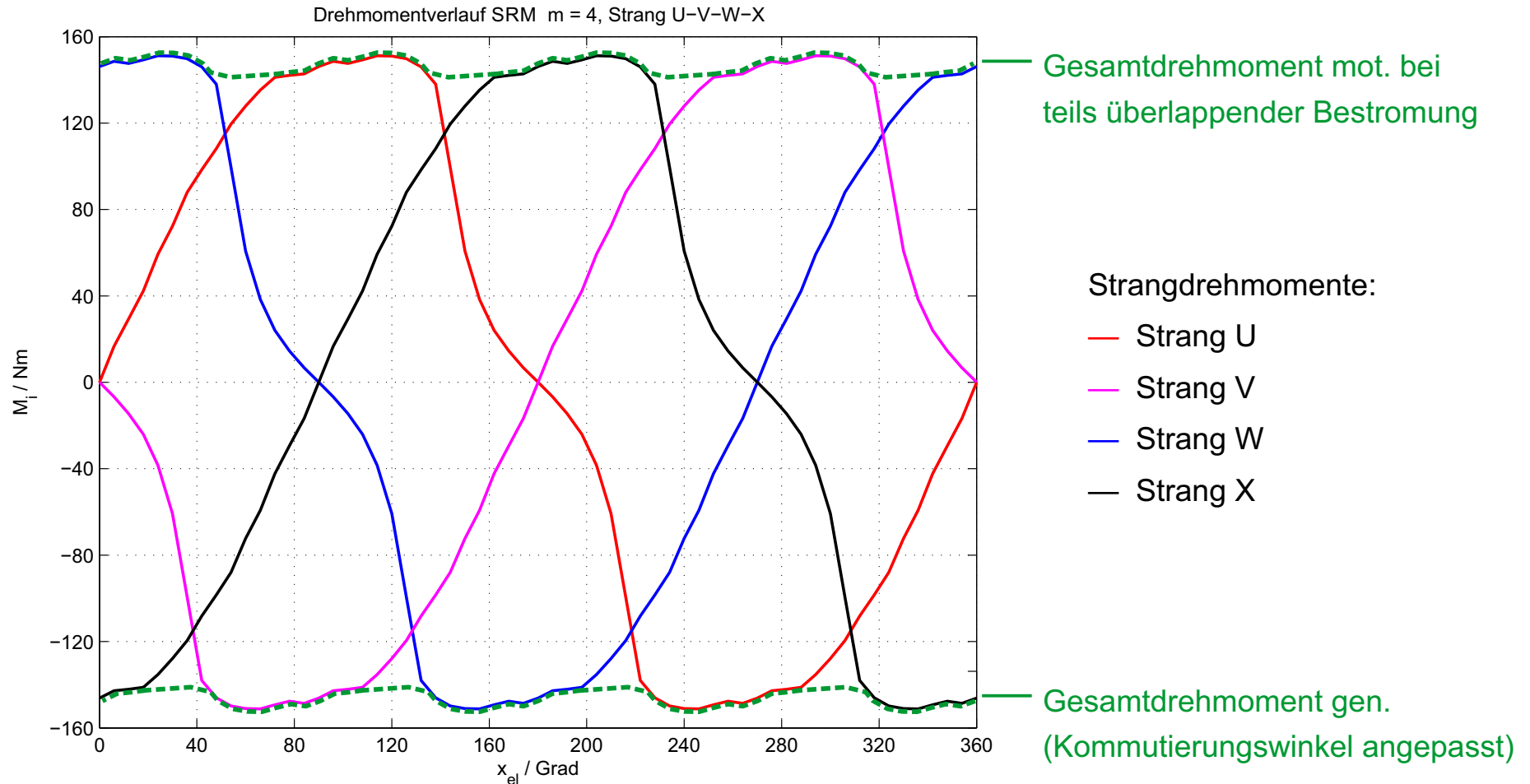
Rotorposition aligned 180° el.

- Eisenkreis: starke Sättigung
- Induktivität: $L_{S,U} = 100\%$
- Drehmoment: $M_U = 0$

Simulationstool: FEMM / Simulation: A. Kleimaier

12.8 Geschaltete Reluktanzmaschine

Drehmomentverlauf



Simulationstools: FEMM, Matlab / Simulation: A. Kleimaier

12.8 Geschaltete Reluktanzmaschine

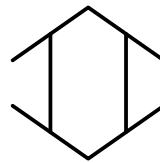
Vor- und Nachteile

Vorteile allgemein:

- Rotor: einfacher und robuster Aufbau
- Stator: Einzelzahnwicklung wie bei MDM

Vorteile gegenüber SM:

- keine Permanentmagnete (Kostenfrage!)
- ohne Bestromung inaktiv, keine EMK, kein Schleppmoment



Nachteile gegenüber SM:

- Erregung vom Stator aus: schlechtere Ausnutzung, deutlich kleinerer Flächenschub
- Standardtopologie Drehstromwechselrichter nicht nutzbar, spezielle Leistungselektronik

Nachteile allgemein

- welliges Drehmoment, vor allem bei kleinen Strangzahlen m
- massive Geräuschentwicklung