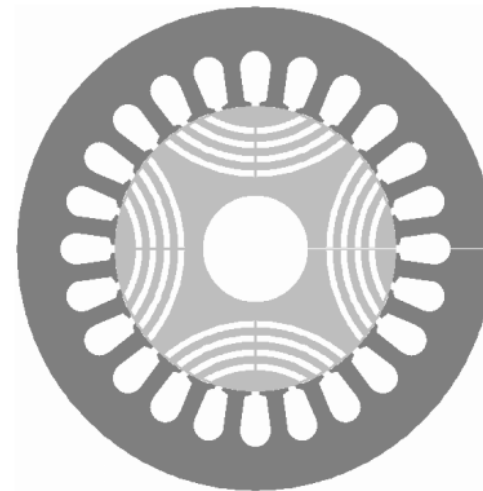
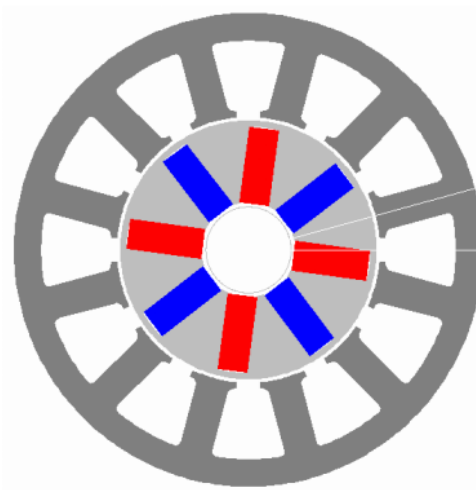
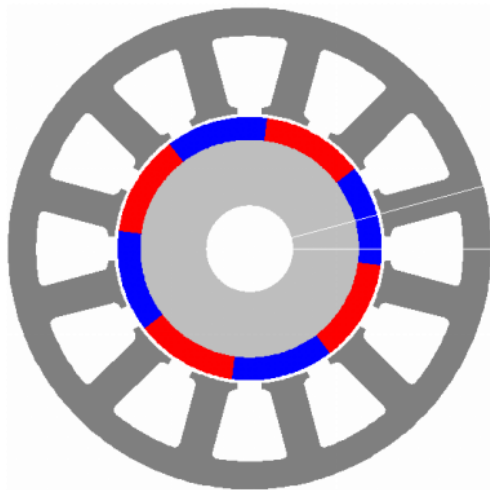


Alternativen zu Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten

Prof. Dr.-Ing. Dorin Iles, Alexander Przybylla, Stefan Paintner, Maximilian Pilz

Ingenieurbüro Dr. Dorin ILES / Hochschule Augsburg, iles@ieee.org

Dr.-Ing. Markus Anders, CD-adapco, markus.anders@cd-adapco.com



Einleitung

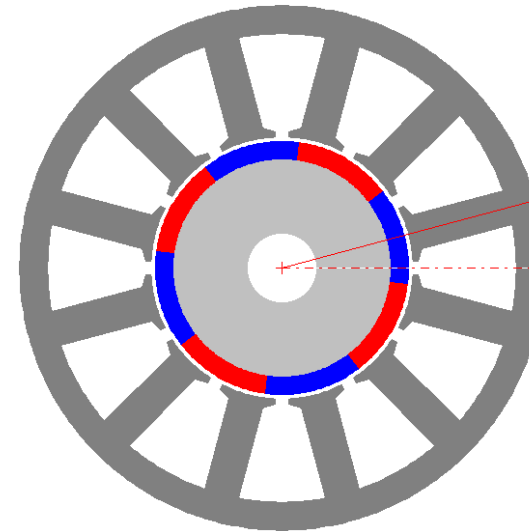
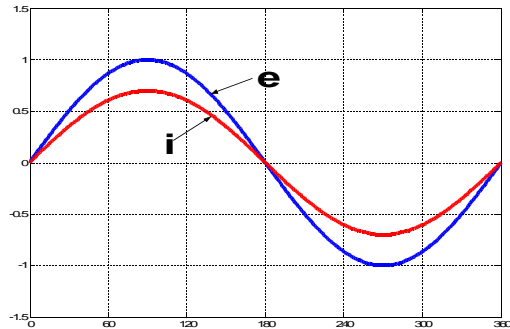
- Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten stellen eine **sehr gute technische Lösung** dar
 - hohe Drehmomentdichte / kleines Bauvolumen
 - hoher Wirkungsgrad / niedrige Verluste
- Der immer höher werdende **Kostendruck** im internationalen Wettbewerb und die **strategische Abhängigkeit** von lokalen Ressourcen für die Komponenten der NdFeB-Magnete zwingt die Hersteller sich nach anderen Magnetmaterialien bzw. anderen Motortechnologien umzusehen
- Das Ziel der Studie ist es herauszufinden, ob es **aus technisch-wirtschaftlicher Sicht attraktive Alternativen** zu der Synchronmaschine mit NdFeB-Permanentmagnete gibt
- Ist es möglich durch den Einsatz von Synchronmotoren mit verfügbareren, günstigeren **Ferritmagneten** oder sogar von **synchronen Reluktanzmotoren** effiziente und kostengünstige(re) elektrische Antriebe zu realisieren?
- **Pragmatischer Ansatz**: anhand einer **Gegenüberstellung für eine konkrete Antriebsaufgabe** soll zwischen den verschiedenen Motortypen ein Vergleich vorgenommen werden. Um die Objektivität zu gewährleisten, werden optimierte Entwürfe für jeden Maschinentyp verglichen.

Inhalt

1. PermanentMagnet-SynchronMotoren (**PMSM**) vs. Reluktanz-SynchronMotoren (**RSM**)
 - ein Technologievergleich mit RSM im Fokus
2. Vergleichsbetrachtung für den konkreten Fallbeispiel

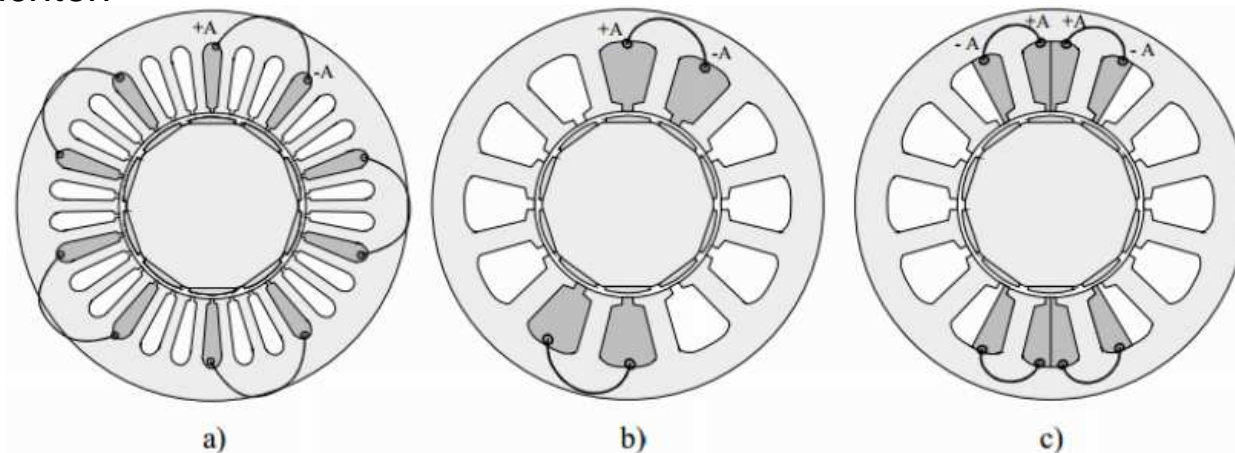
PermanentMagnet-SynchronMotor (PMSM)

PMSM - ein Synchronmotor mit PM-Erregung



Aufbau:

- Stator mit verteilter (a) oder konzentrierter (b und c), 3-strängige Wicklung, Sinus-Bestromung
- Das Funktionsprinzip eines PMSM beruht auf das Bestreben des Rotors, sich dem drehendem Statorfeld auszurichten



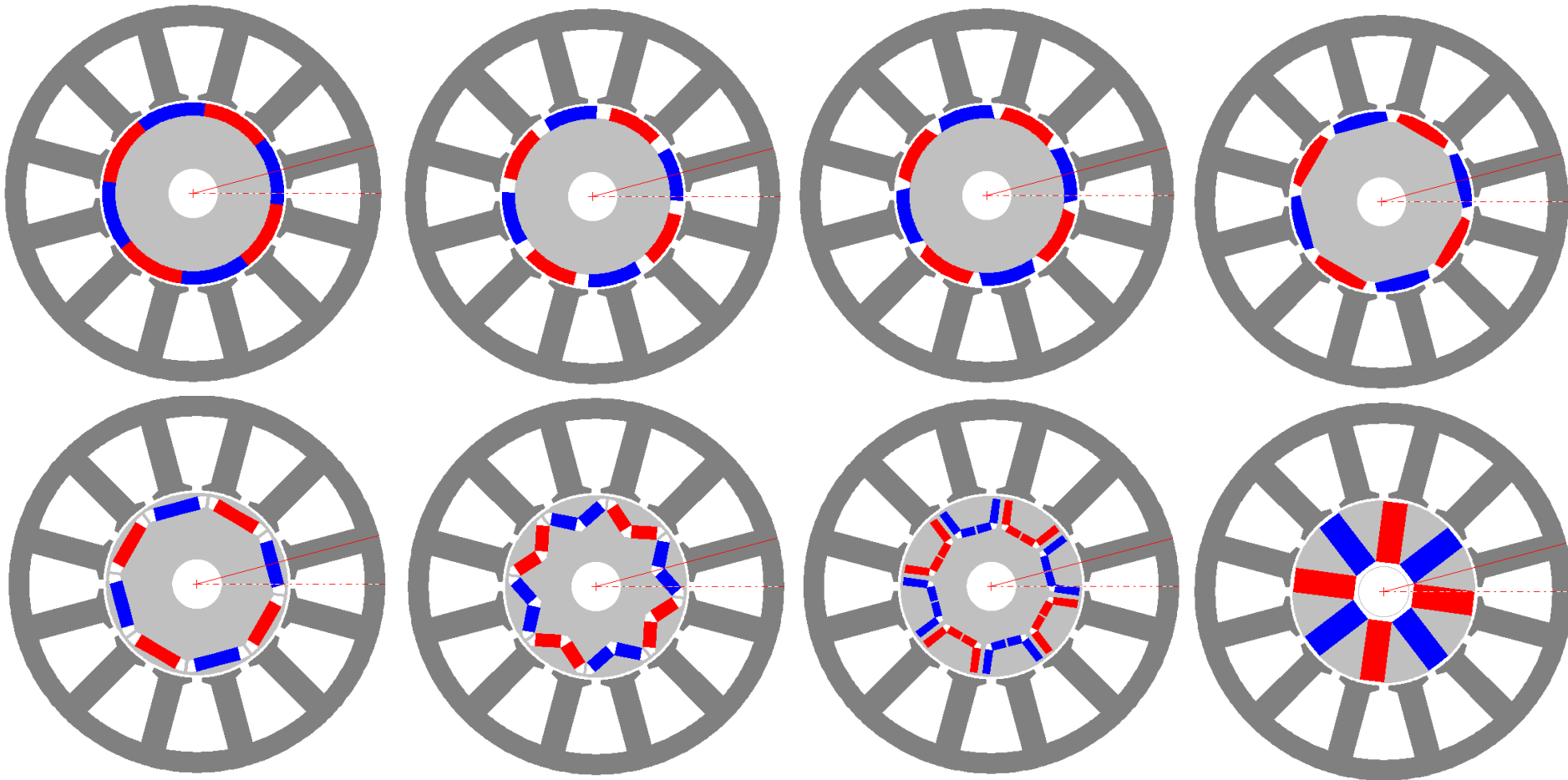
PMSM – Klassifikation bezüglich der PM und mögliche Rotorkonfigurationen

PM-Lage (Oberflächen-PM, eingebettete PM)

PM-Orientierung/Magnetisierung (radial/parallel)

PM-Flußkonzentration

Zusatzdrehmomentkomponente (Reluktanzeffekt/Hybrid)

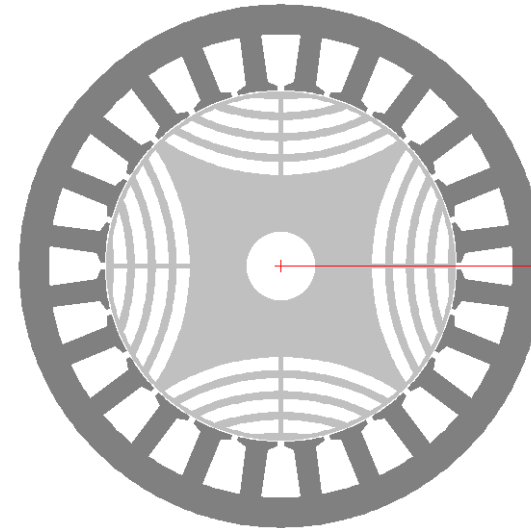


Reluktanzsynchronmotor (RSM)

RSM - ein Synchronmotor ohne Rotor-Erregung aber mit einer ausgeprägten Rotoranisotropie

Bezeichnungen:

- Reluktanzmotor (RM)
- Synchronreluktanzmotor (SRM, SynRM, SynchRel, SynRM)
- Reluktanzsynchronmotor (RSM)



Aufbau:

- Stator mit verteilter 3-strängiger Wicklung, Sinus-Bestromung
- Rotor mit einem in einer Richtung möglichst geringen magnetischen Widerstand (q-Achse)
- In der anderen Richtung (d-Achse) hat der Rotor einen hohen magnetischen Widerstand
- Das Funktionsprinzip einer RSM beruht auf der Anisotropie des Rotors
- Der Rotor hat das Bestreben, die magnetisch leitfähige Richtung am Statorfeld auszurichten

Geschichte des Reluktanzsynchronmotors

- 1874: Beobachtung von Siemens → ein Synchronmotor rotiert weiter obwohl der Erregerstromkreis abgeschaltet wird
- 1895: „der synchrone Motor ohne Erregung “ wird zum „synchrone Reaktionsmotor“(Blondel)
- 1913: erstmalige gründliche Untersuchung durch Jasse die von der Theorie von Blondel abweicht
- 1923: Kostko's Abhandlung „Polyphase Reaction Synchronous Motors“ wird die Grundlage aller zukünftigen Rotorkonfigurationen des RSM (s. Bild)
- In dem Zeitraum 1960-1980 – Forschungsaktivitäten die zu neuen Rotorkonfigurationen ohne Anlaufkäfig führen
- Forschungsarbeit in den letzten 20 Jahren
 - Besonders hervorzuheben ist der Beitrag der FE-Analyse, Leistungselektronik und der Regelungstechnik
- Aktuelle Entwicklungsaktivitäten die zur der Marktreife dieser Technologie beigetragen haben
- Serieneinführung: ABB, Landert, KSB, ...?

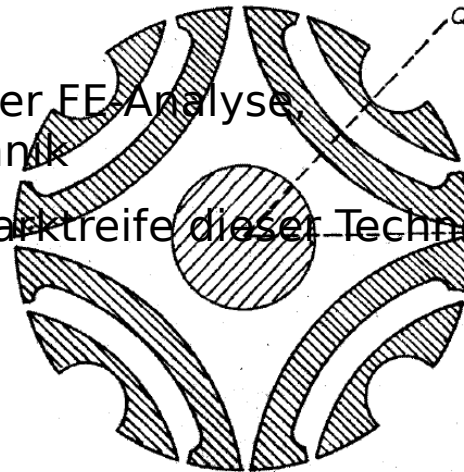


Fig. 2.12 Kostko's reluctance motor rotor with flux guides, 1923. Kostko, 'Polyphase Reaction Synchronous Motors', *J. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 1923, p. 1162. (© IEEE, 1923).

Klassifizierung von Rotoren des RSM

4 Kategorien /

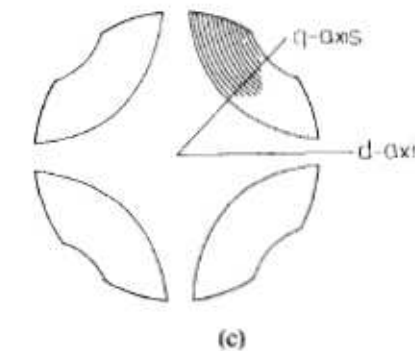
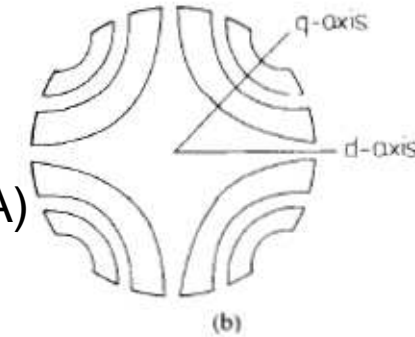
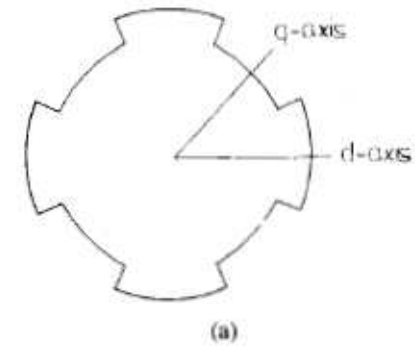
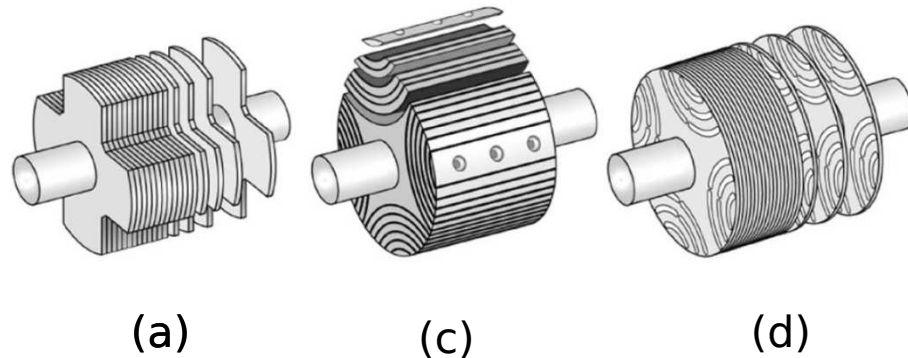
Methoden für die Umsetzung der Anisotropie:

a) einfache Schenkelpole (ohne Flusschranken)

b) segmentierter Rotor (zusammengesetzt aus mehreren Teilen)

c) axial geschichteter Rotor (ALA)

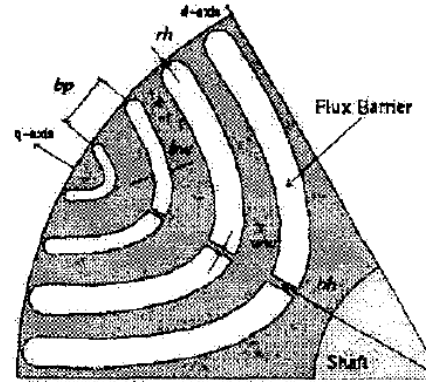
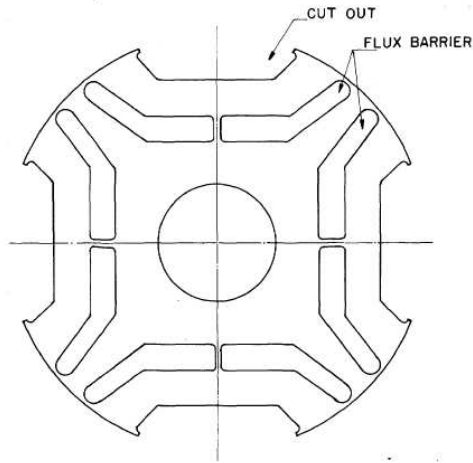
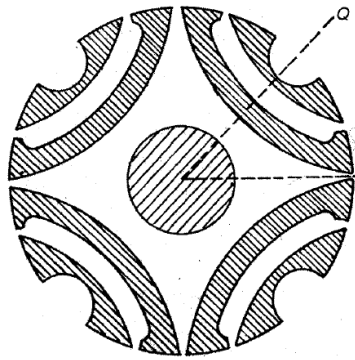
d) transversal (konventionell) geschichteter Rotor (TLA)



TLA – transversal laminiert
ALA – axial laminiert

Fig. 1. Reluctance motor rotors with four poles: (a) Simple salient poles; (b) segmented rotor; (c) axially laminated anisotropic rotor.

Mögliche Rotorkonfigurationen



(b) RSM with flux barriers

Fig. 2.12 Kostko's reluctance motor rotor with flux guides, 1923. Kostko, 'Pol Motors', *J. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 1923, p. 1162. (© IEEE, 1923).

Fig. 1. Rotor cross section of two-barrier per pole reluctance motor.

Germishuizen, et al, Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units, IEEE 2000

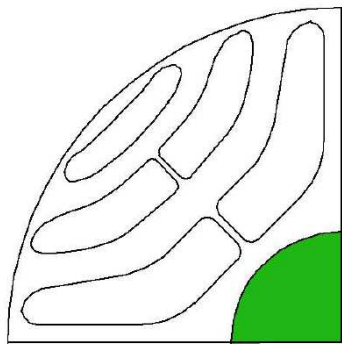


Fig.1: Schematic of rotor lamination of a Transverse Laminated Synchronous Reluctance Motor.

$L_d/L_q=25!$

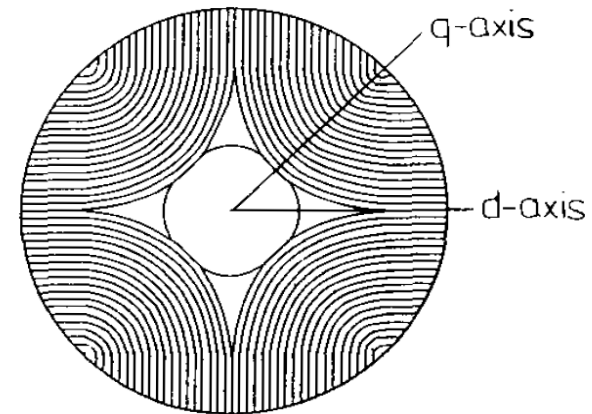


Fig. 2. Rotor with strong anisotropy.

Platt, *Reluctance Motor with Strong Rotor Anisotropy*, IEEE 1992

Boglietti, Cavagnino, Pastorelli, Vagati, Experimental Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors Performance, IEEE 2005

Konstruktive und fertigungstechnologische Aspekte

- Durch den diskreten Aufbau könnte ein schnelles und günstiges Werkzeug verwendet werden

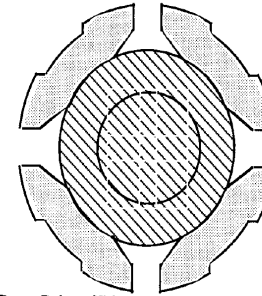
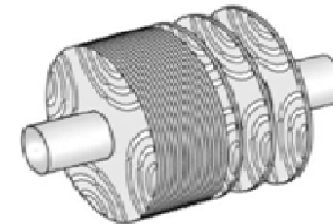


Fig. 3 Showing Rotor Poles of Discrete Pole Synchronous Reluctance Motor.

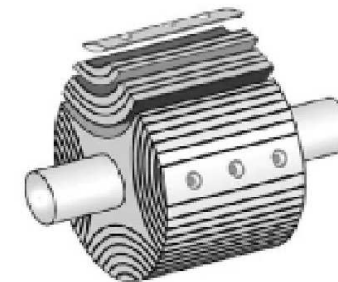
- Solange bestimmte Mindestmaße (Flussschranken, Stege,...) nicht unterschritten werden kann der Rotor konventionell gestanzt werden



- Bei dem axialen Aufbau ist eine Trennung der Biegeteile zueinander notwendig

- Das Trennmedium kann Kunststoff oder ein anderer magnetisch und elektrisch neutraler Stoff sein

- Die Fixierung kann durch Schrauben erfolgen



Allgemein: keine Bewicklung oder Bestückung mit Magneten im Rotor erforderlich

Mathematisches Modell des PMSM und RSM

Effektivwerte

$$\begin{cases} V_d = RI_d - \omega_e L_q I_q \\ V_q = RI_q + \omega_e L_d I_d + E_{PM} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_{PM} = 0 \\ E_{PM} = 0 \end{cases}$$

$$T_{em} = 3p \left[\Psi_{PM} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q \right] = 3p (L_d - L_q) I_d I_q$$

$$I_d = -I \sin \gamma$$

$$I_q = I \cos \gamma$$

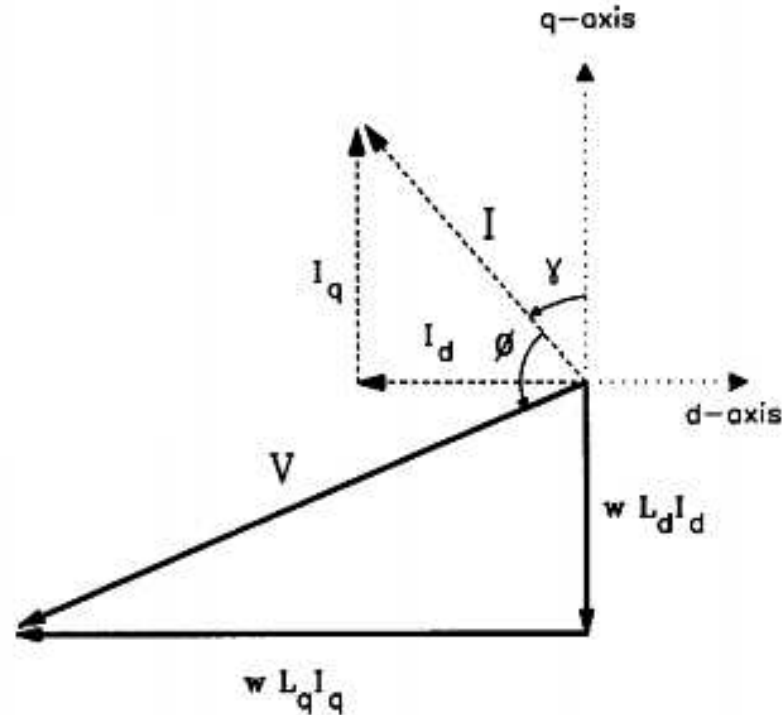
$$V_d = -V \sin \delta$$

$$V_q = V \cos \delta$$

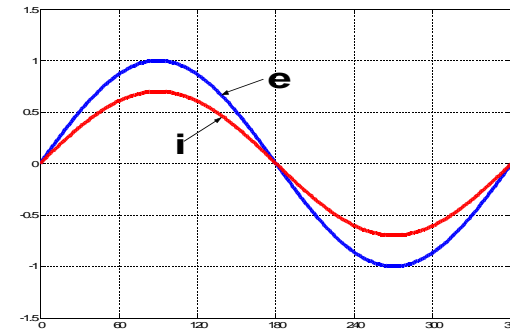
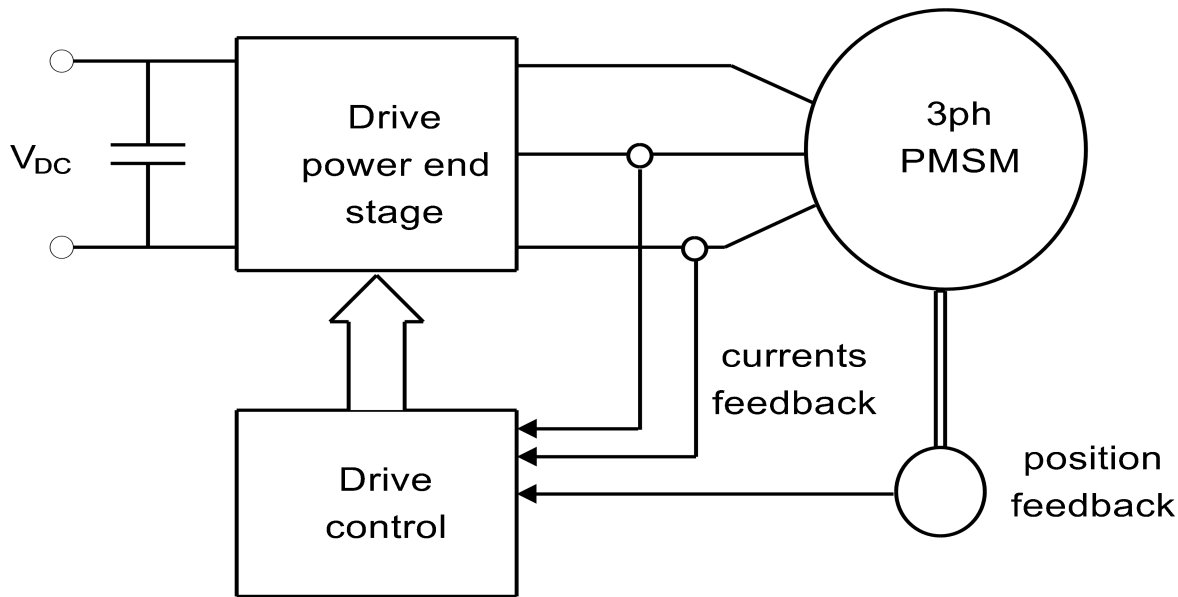
$$\varphi = \delta - \gamma$$

$$\Psi_d = L_d^{inc} i_d$$

$$\Psi_q = L_q^{inc} i_q$$



Ansteuerung/Regelung PMSM und RSM



or observer (sensorless)

- mit Rotorlagesensoren (konventionell)

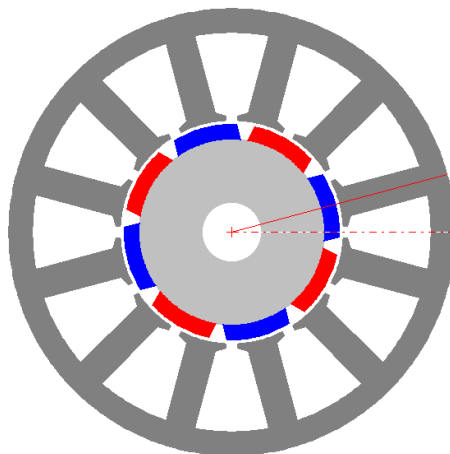
- eventuell ohne Rotorlagesensoren (bei typisch vorteilhafter Rotorlagevariation der Stranginduktivität vor allem bei RSM)

Fallbeispiel für die Vergleichsbetrachtung

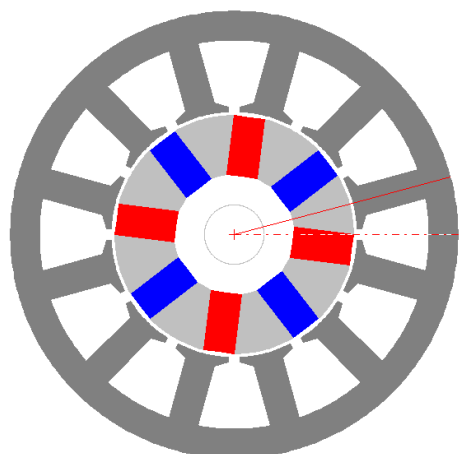
- Betriebspunkt
 - $T = 1$ Nm
 - $n = 3000$ 1/min
- Ziel
 - $\eta = 90$ %
- Einschränkungen
 - $D_{so} = 75$ mm
 - $N_f = 0.3$ (konzentrierte) Zahnwicklung
 - $N_f = 0.4$ (verteilte) Einziehwicklung
- alle weiteren geometrischen Abmessungen sind frei (Designvariablen)
- bei dem Vergleich handelt es sich um optimierte Designs
 - optimale Geometrie für minimale Materialkosten unter Einhaltung der Designeinschränkungen

Designlösungen / Motorkonfigurationen

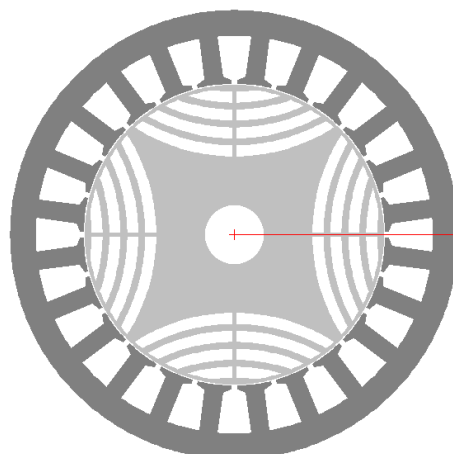
Referenzdesign **PMSM_NdFeB**
($B_{r20}=1.2T$)



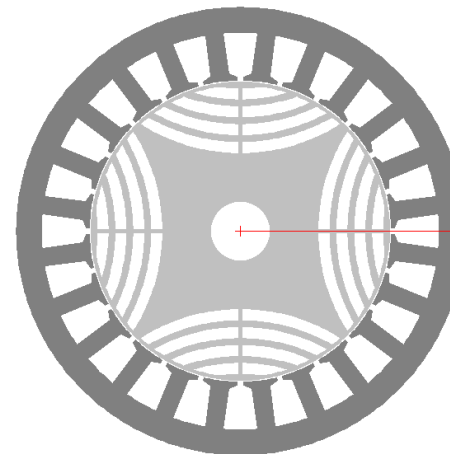
Alternativdesign **PMSM_HF**
($B_{r20}=0.4T$)



Alternativdesign **RSM**



Alternativdesign **PMA-RSM**
($B_{r20}=0.24T$)



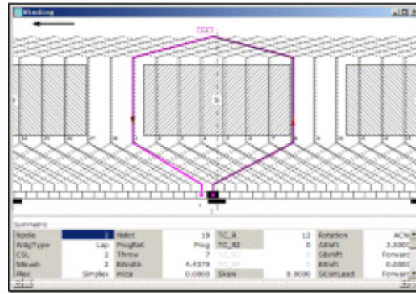
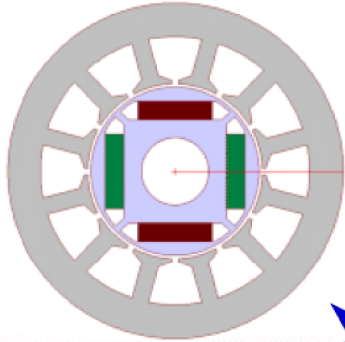
Alle Designs: Dynamoblech M400-50A

SPEED-Approach for the analysis process

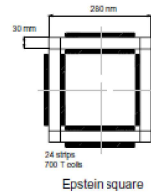
2D-FE - Circuit Coupling

Outline Editor

RadSH	10.0000
RadI	25.0000
Gap	1.0000
LM	5.5000
BetaM	120.0000
Web	2.0000
MagWid	22.0000
Bridge	1.0000
R_rpf	0.0000
Notch	0.0000
qFlat	0.0000
R_qf	0.0000
R_qff	0.0000
Edges	Bridged
Cweb	0.0000
Poles	4
Nmbp	1
Slots	12
LamShape	Circle

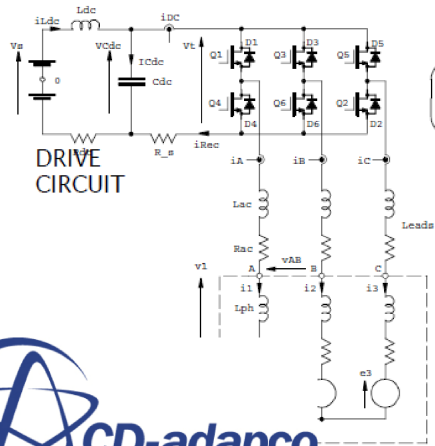
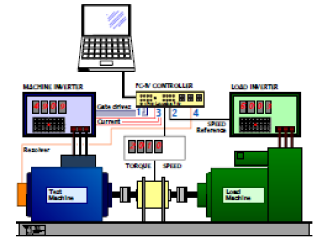
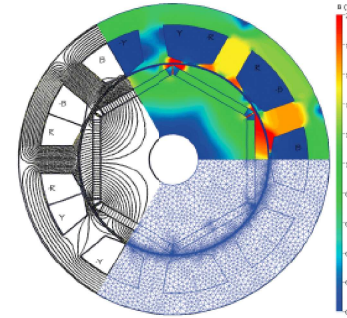


WINDING EDITOR (PC-WFC)

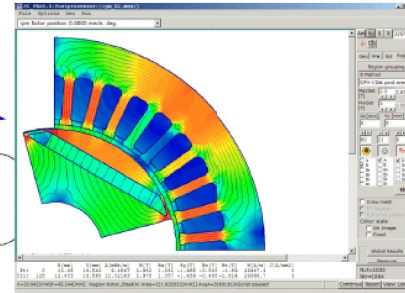
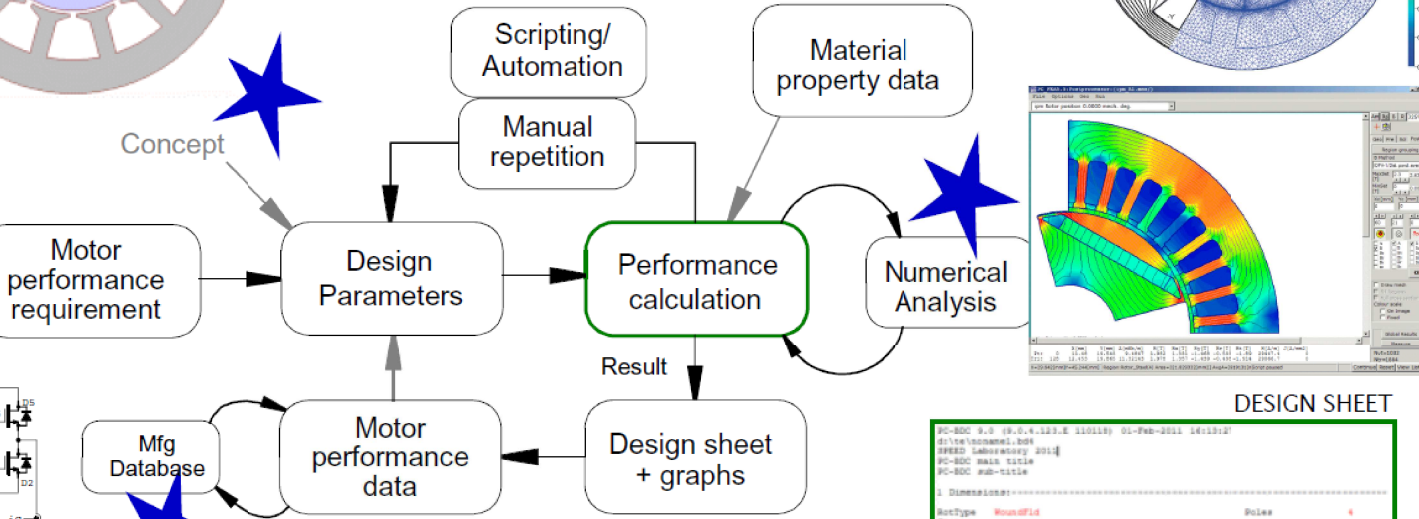


Epstein square

NUMERICAL ANALYSIS



DRIVE CIRCUIT

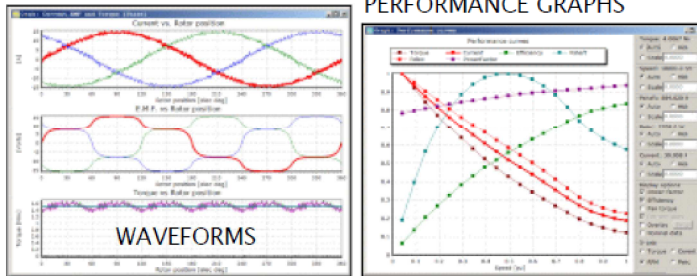


DESIGN SHEET

```

PC-BDC 9.0 (9.0.6.123.E 11011) 01-Feb-2011 16:18:17
d:\test\name1.006
SPEED Laboratory 2011
PC-BDC main title
PC-BDC sub-title

3 Dimensions:-----
RotType WoundFlid Poles 4
StatorCD 100.0000 mm Landscape Circle Slots 12
RFlake 10.0000 mm ASD 16.0000 mm SP 3.0000
RSlot 80.0000 mm RadI 25.0000 mm R Slot Square
WR 8.0000 mm SD 14.0000 mm SD 2.0000 mm
TRD 1.0000 mm Stang 20.0000 *m Stc 0.8700
PoleCD 0.0000 mm
RDC 80.0000 mm RadI 28.0000 mm Gap 0.5000
RSlot 8.0000 mm RadI 14.0000 *m Gap 0.7889
RFlake 10.1556 mm RadSH 10.0000 mm
WoundFlid refer...
WFlType SalientPole
DO 29.0000 mm PoleEdge Parallel Damper False
RFlid 18.0000 mm PoleCD 0.0000 mm CR 1.0000 mm
PoleFace commutator Compacc 140.0000 *m
RSPole 5 mm BarPitch 20.0000 *m BarDia 1.5000 mm
CRD 0.0000 mm RFL 20.0000 mm RFL 24.0000 mm
wFlPo 0.0000 mm wFlPole
wFlRad 10.0000 mm wFlRad
PoleShape Landscape wFlCt
SRAL 0.0000 mm SRAL
SRad 0.0000 mm SRad
LAC 80.0000 mm Lenrot
-----
3 Field Winding Data-----
WFlType SalientPole wFlF
wFlP 60 wFlDIA
wFlWidp 24.0000 wFlDIA
    
```

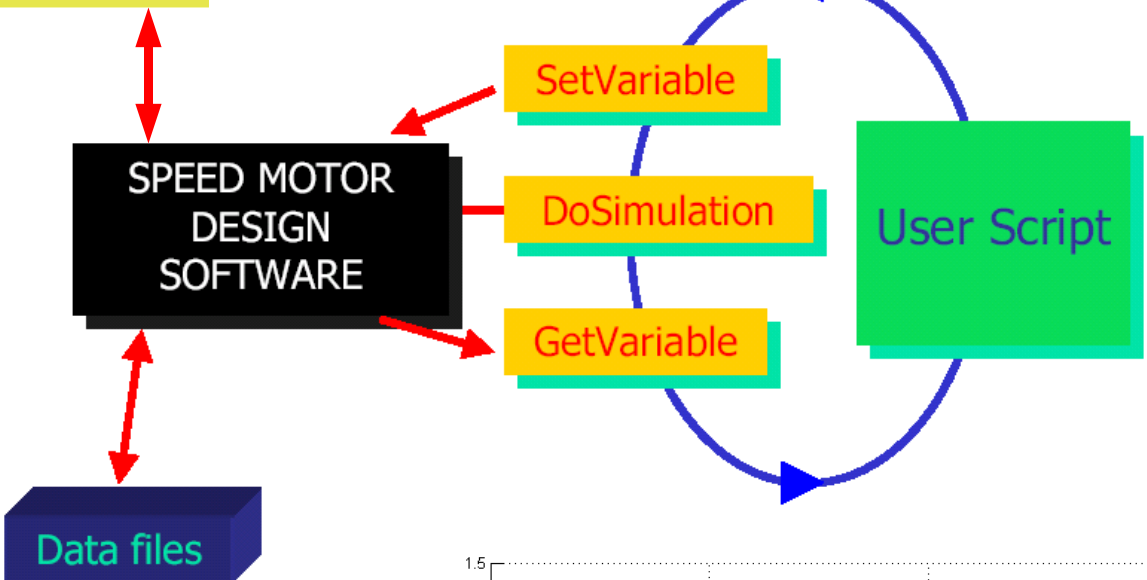


WAVEFORMS

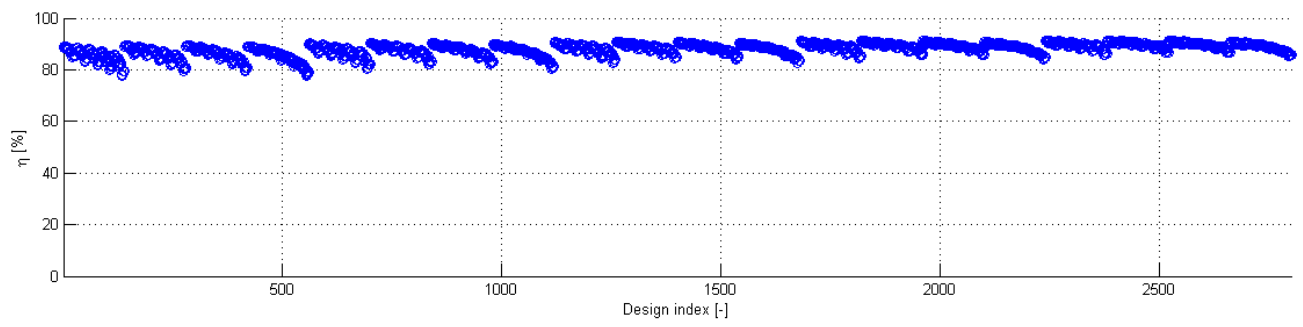
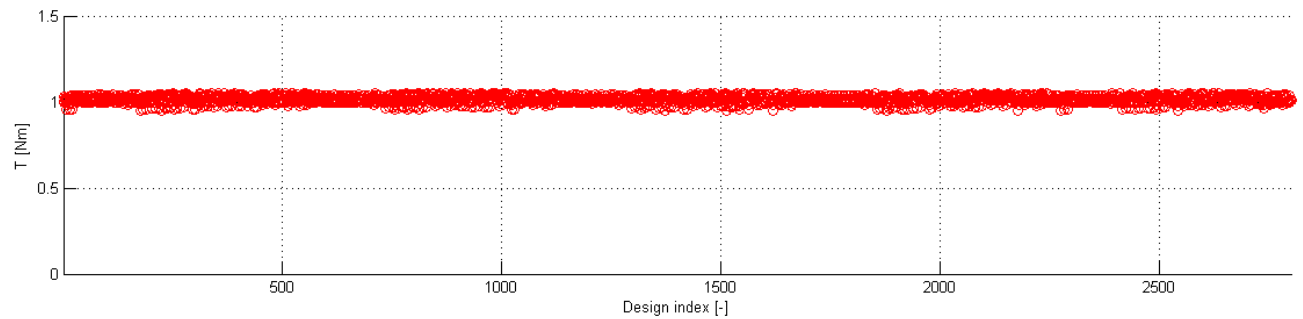


SPEED-Ansatz für die optimale Auslegung

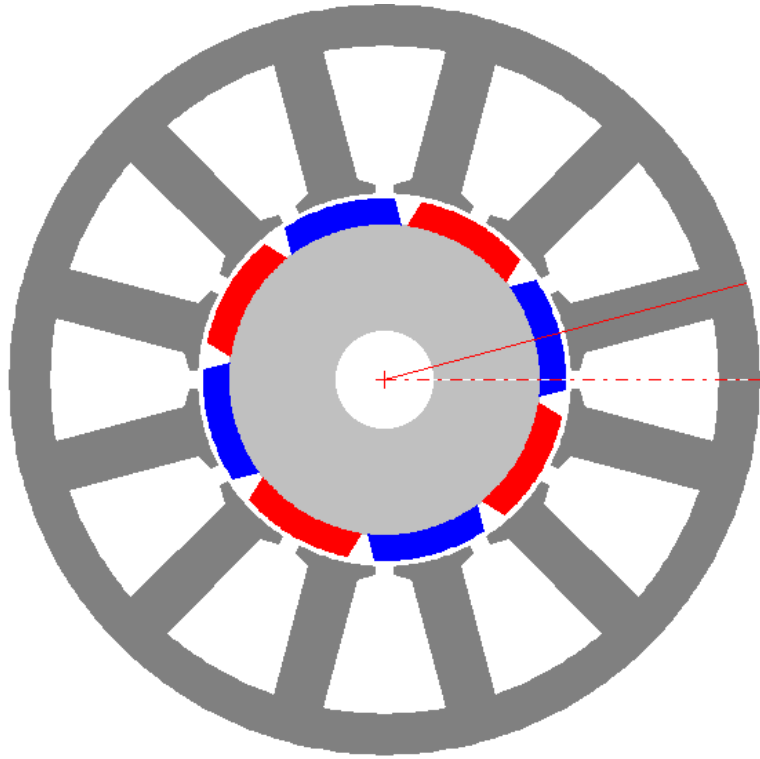
PC-FEA



```
% === SET PC-BDC PARAMETERS ===  
invoke(des, 'SetVariable', piRAD3, Rso_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piLSTK, Lstk(i2));  
invoke(des, 'SetVariable', piRAD1, Rro_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piSD, SD_calc_best);  
invoke(des, 'SetVariable', piTWS, bts(i5));  
%  
invoke(des, 'SetVariable', piNLAYERS, nlayers_calc);  
%  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA10, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA1I, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA20, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA2I, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA30, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA3I, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA40, RCA_calc);  
invoke(des, 'SetVariable', piRADCA4I, RCA_calc);  
% 1  
invoke(des, 'SetVariable', piRA10, RA10_calc);
```



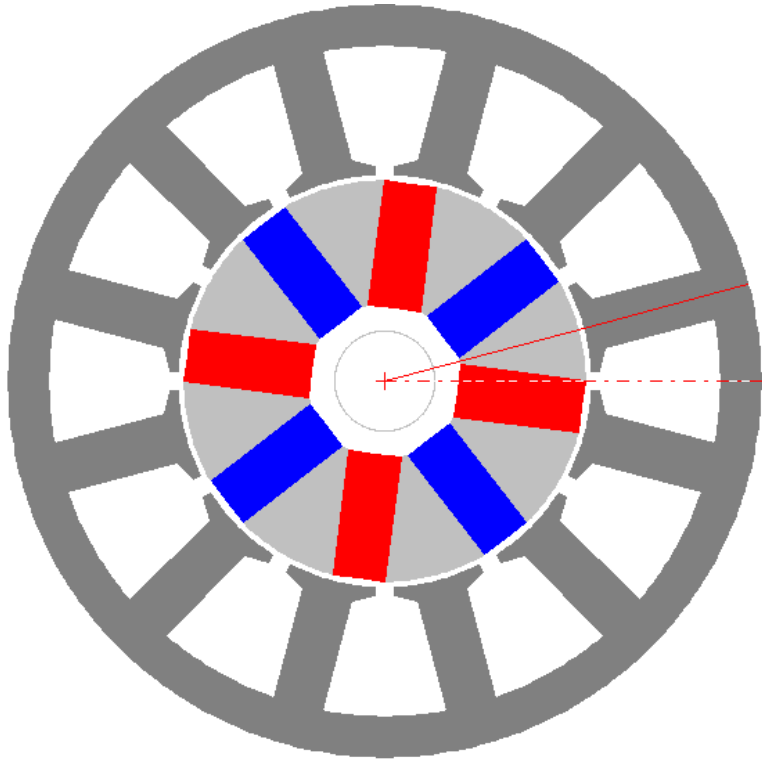
Optimales Design PMSM-NdFeB



Br_20=1.2 T

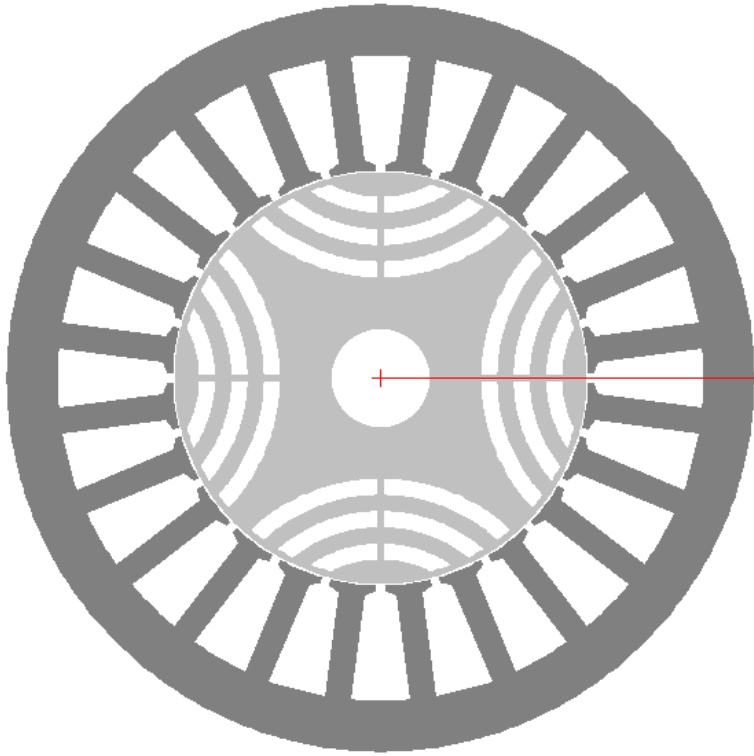
NdFeB gesintert

Optimales Design PMSM-HF



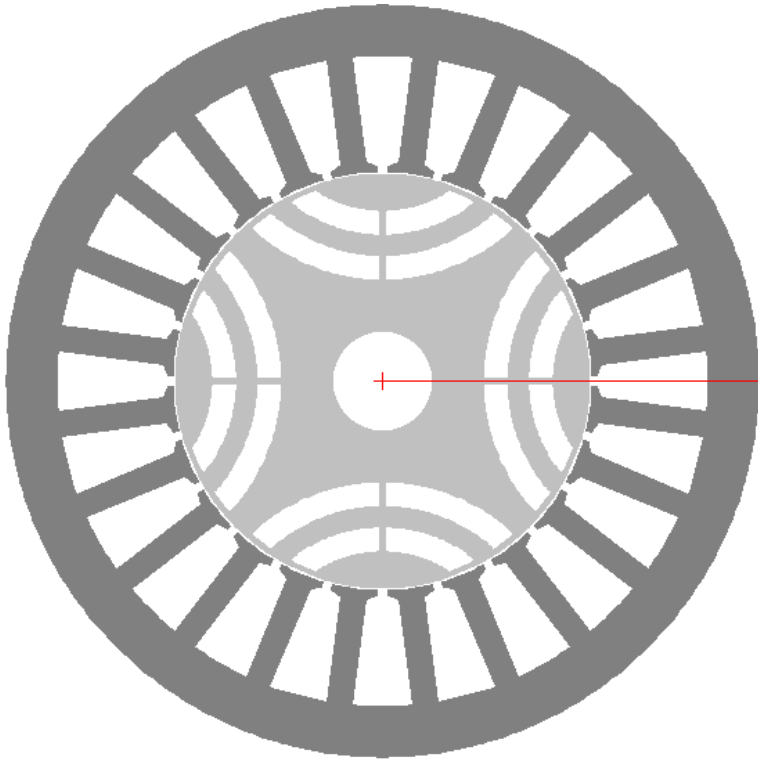
$B_{r_20}=0.4 \text{ T}$
Hartferrit

Optimales Design REL-SM



keine PM

Optimales Design PMA-REL-SM



$B_{r_20}=0.24$ T

Plastoferrit

Ergebnisse im Vergleich

	PMSM-NdFeB	PMSM-HF	REL-SM	PMA-REL-SM
Polzahl (2p) [-]	8	8	4	4
Stator-Nutzahl [-]	12	12	24	24
Dso [mm]	75	75	75	75
Dsi [mm]	37.5	41.25	41.85	41.85
Dw [mm]	10	10	10	10
L_Fe [mm]	35	50	100	60
Luftspalt [mm]	0.65	0.65	0.3	0.3
Statorpaketmaterial	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A
Rotorpaketmaterial	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A
PM-Material	NdFeB (1.2 T)	HF (0.4 T)	-	PF (0.24T)
Wicklungsart	2-Schicht ZW	2-Schicht ZW	1-Schicht ÜW	1-Schicht ÜW
Nutfüllfaktor [-]	0.3	0.3	0.4	0.4
eta_Motor [%]	90	90	89.7 !	90
Masse Aktivteile [kg]	0.905	1.198	2.610	1.766
Material-Preis Aktivteile [EUR]	5.68	4.62	8.43	7.48
Preis_rel [%] (NdFeB=100%)	100	81	148	132
fsav [N/cm ^2]	2.4	1.5	0.8	1.3

Ergebnisse im Vergleich

	PMSM-NdFeB	PMSM-HF	REL -SM	PMA -REL -SM	REL -SM_0.86%	PMA -REL -SM_0.86%
Polzahl (2p) [-]	8	8	4	4	4	4
Stator-Nutzahl [-]	12	12	24	24	24	24
Dso [mm]	75	75	75	75	75	75
Dsi [mm]	37.5	41.25	41.85	41.85	41.85	41.85
Dw [mm]	10	10	10	10	10	10
L_Fe [mm]	35	50	100	60	60	40
Luftspalt [mm]	0.65	0.65	0.3	0.3	0.3	0.3
Statorpaketmaterial	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A
Rotorpaketmaterial	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A	M400-50A
PM-Material	NdFeB (1.2 T)	HF (0.4 T)	-	PF (0.24T)	-	PF (0.24T)
Wicklungsart	2-Schicht ZW	2-Schicht ZW	1-Schicht ÜW	1-Schicht ÜW	1-Schicht ÜW	1-Schicht ÜW
Nutfüllfaktor [-]	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
eta_Motor [%]	90	90	89.7!	90	86	86
Masse Aktivteile [kg]	0.905	1.198	2.610	1.766	1.715	1.264
Material-Preis Aktivteile [EUR]	5.68	4.62	8.43	7.48	6.17	5.71
Preis_rel [%] (NdFeB=100%)	100	81	148	132	109	101
fsav [N/cm^2]	2.4	1.5	0.8	1.3	1.3	1.9

Fazit

- Prinzipiell ist der Einsatz von NdFeB-PM in Synchronmotoren nicht zwingend erforderlich. Die Voraussetzung ist, dass die Anwendung einen Alternativmotor mit größerem Bauvolumen und Trägheitsmoment zulässt.
- Ein hohes Potential hinsichtlich der Kostenreduzierung wurde festgestellt.
- Der HF-PMSM stellt eine ernsthafte Alternativlösung dar.
- Der REL-SM und PMA-REL-SM (mit Ferrite !) können (nur) mit Einschränkung als Alternativlösungen betrachtet werden.
- Eine Analyse des konkreten Antriebsfalls ist zwingend erforderlich.

Literaturquellen

- I. Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Clarendon Press, Oxford 1996*
- T. J. E. Miller, Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive, IEEE*
- A. Vagati, A. Fratta, G. Franceschini, P. Rosso, AC motors for high-performance drives: a design-based comparison*
- R. Vartinian, H. A. Toliyat, Design and Comparison of an Optimized Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor (Pma-SynRM) with an Induction Motor with Identical NEMA Frame Stators, IEEE*
- A. J. O. Cruickshank, Theory and performance of reluctance motors with axially laminated anisotropic rotors, IEEE*
- R. R. Moghaddam, Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design, Master Thesis 2007*
- T. A. Lipo: Synchronous Reluctance Machines - A Variable Alternative for AC Drives, 1991*
- M. Haikola, „Der direkte Weg.....“. ABB Technik 4/2009*