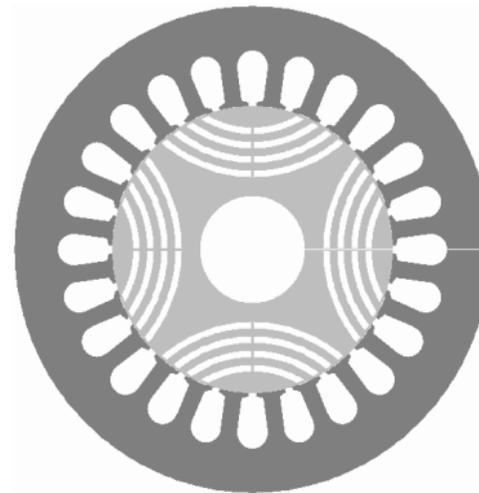
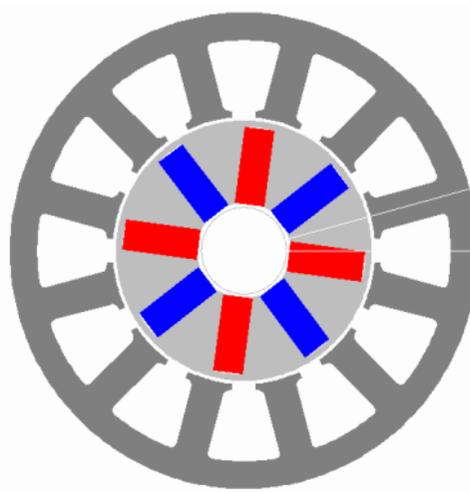
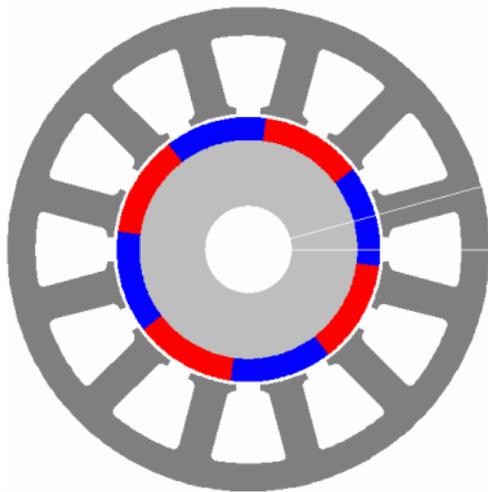


Alternativen zu Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten

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

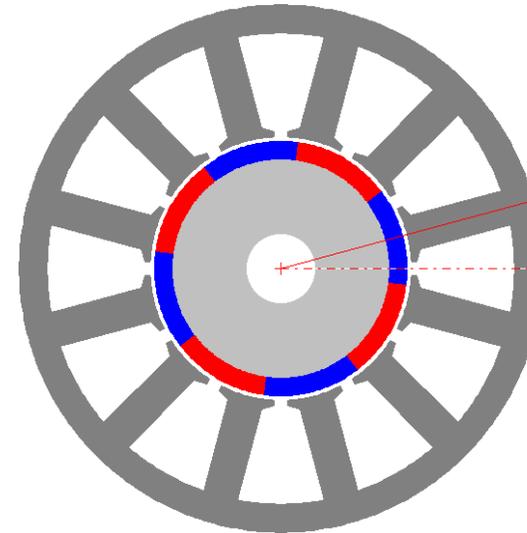
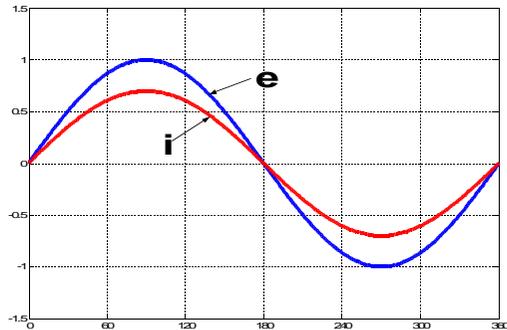
- Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten stellen eine **sehr gute technische Lösung** dar
 - hohe Drehmomentdichte / kleines Bauvolumen
 - hoher Wirkungsgrad / niedrige Verluste
- Der immer höher werdende **Kostendruck** im internationalen Wettbewerb und die **strategische Abhängigkeit** von lokalen Ressourcen 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

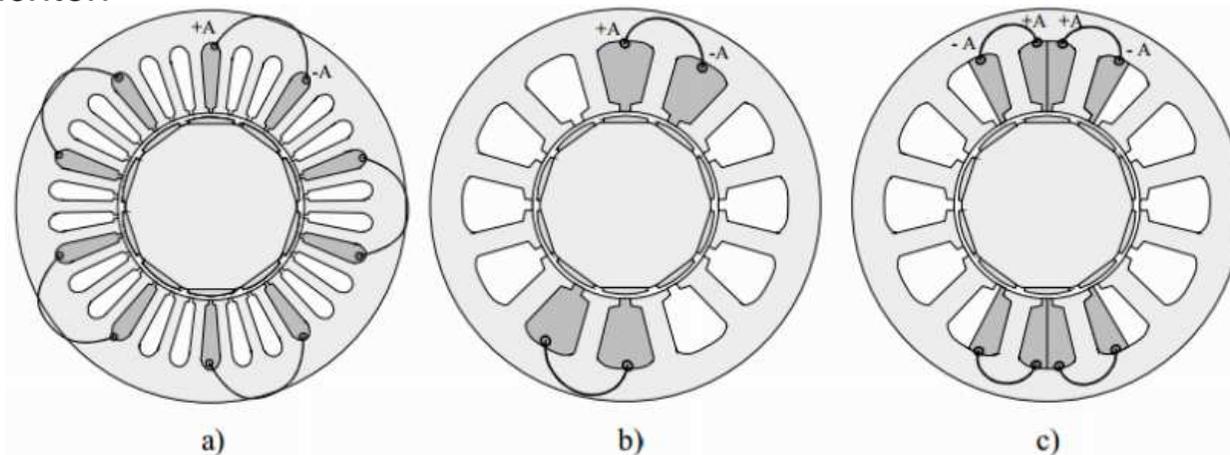
PermanentMagnet-SynchronMotor (PMSM)

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



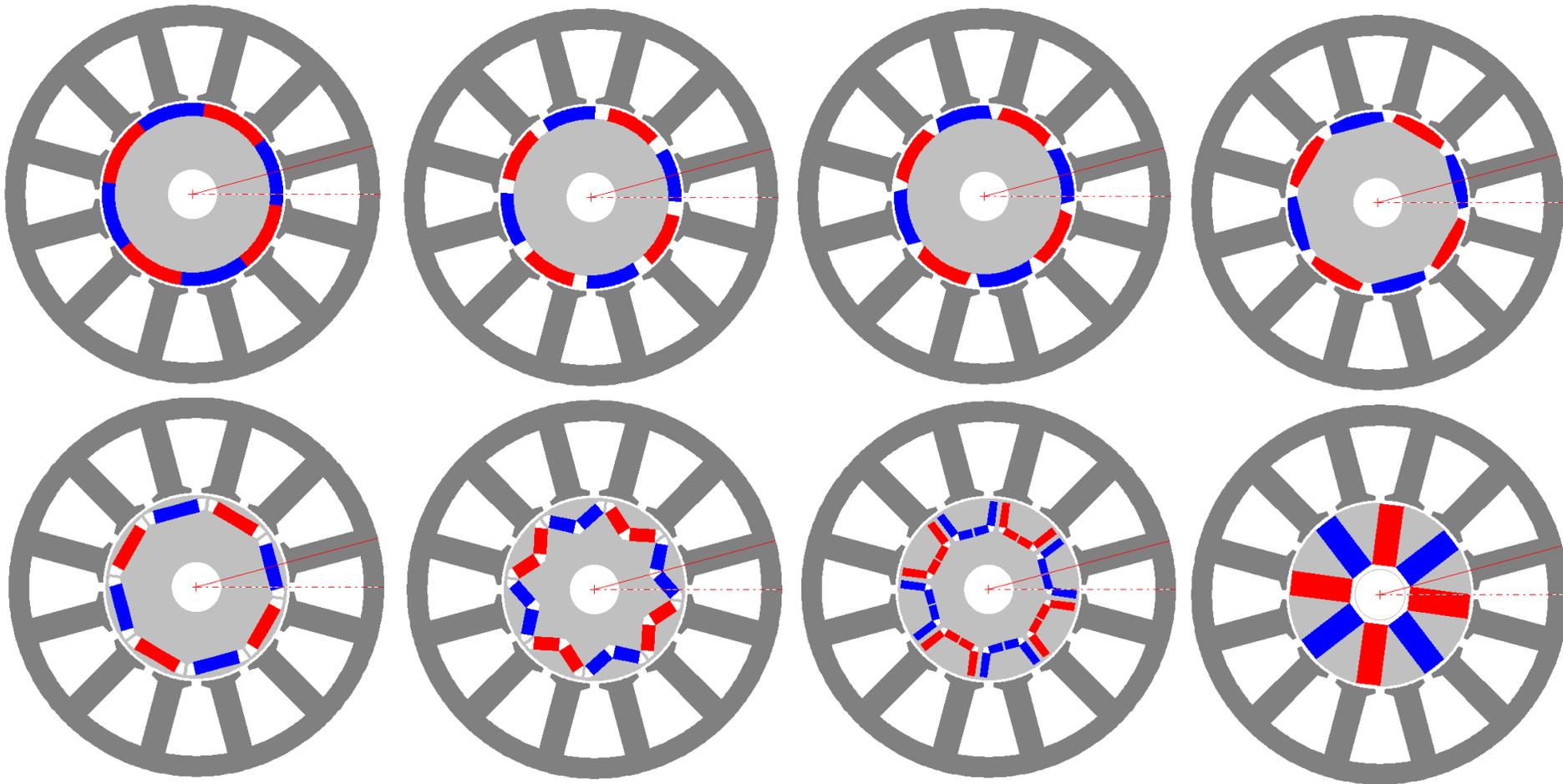
PMSM – Klassifikation bezüglich der PM und mögliche Rotorkonfigurationen

PM-Lage (Oberflächen-PM, eingebettete PM)

PM-Orientierung/Magnetisierung (radial/parallel)

PM-Flußkonzentration

Zusatzdrehmomentkomponente (Reluktanzeffekt/Hybrid)

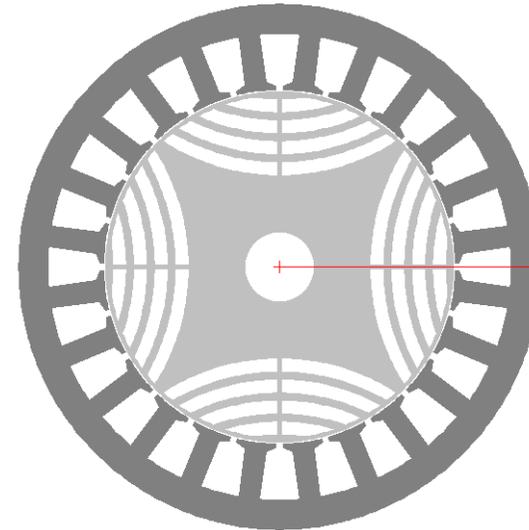


Reluktanzsynchronmotor (RSM)

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 Marktreife dieser Technologie beigetragen haben
- Serieneinführung: ABB, Landert, KSB, ...?

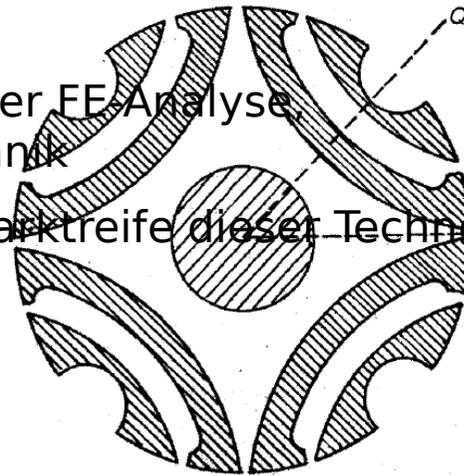


Fig. 2.12 Kostko's reluctance motor rotor with flux guides, 1923. Kostko, 'Polyphase Reaction Synchronous Motors', *J. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 1923, p. 1162. (© IEEE, 1923).

Klassifizierung von Rotoren des RSM

4 Kategorien /

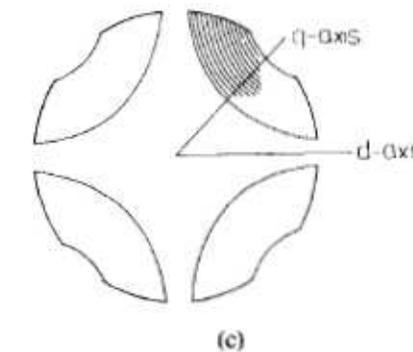
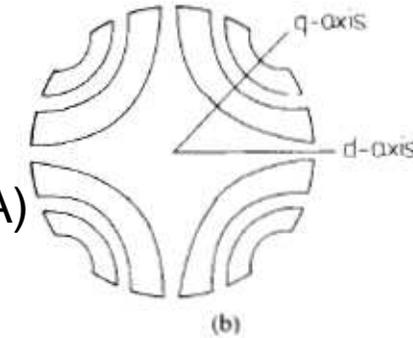
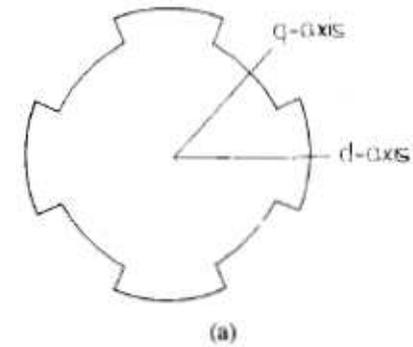
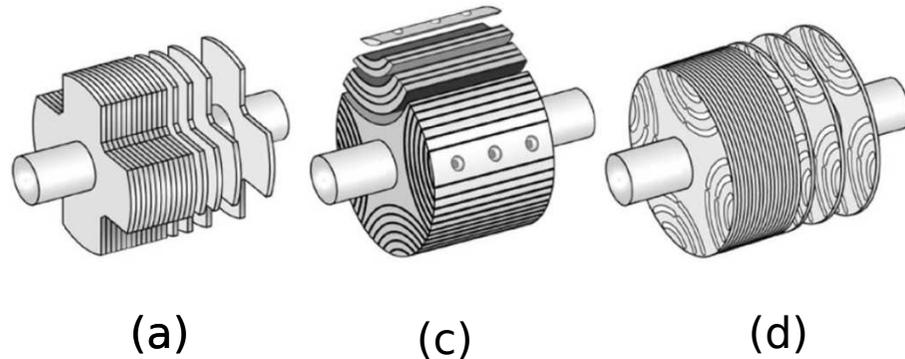
Methoden für die Umsetzung der Anisotropie:

a) einfache Schenkelpole (ohne Flusschranken)

b) segmentierter Rotor (zusammengesetzt aus mehreren Teilen)

c) axial geschichteter Rotor (ALA)

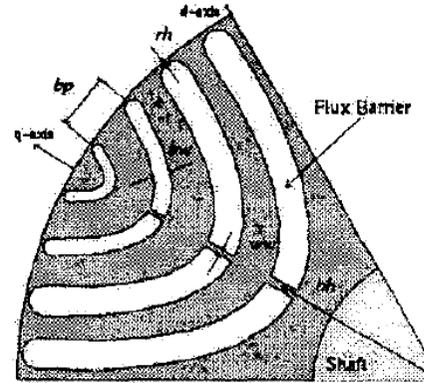
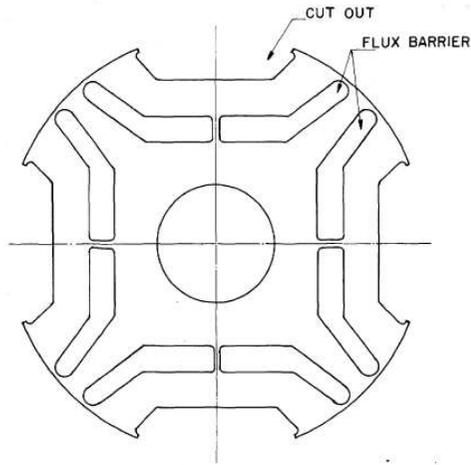
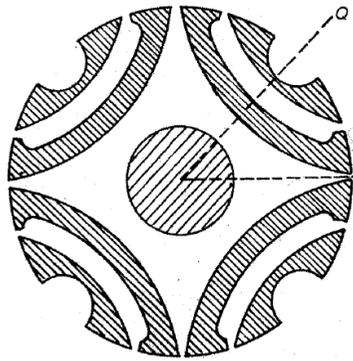
d) transversal (konventionell) geschichteter Rotor (TLA)



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

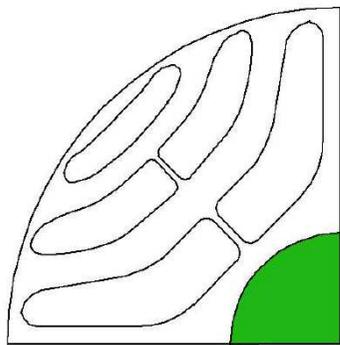


Fig.1: Schematic of rotor lamination of a Transverse Laminated Synchronous Reluctance Motor.

$L_d/L_q=25!$

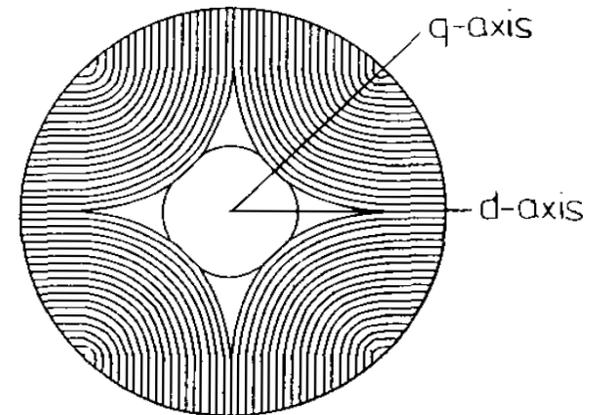


Fig. 2. Rotor with strong anisotropy.

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

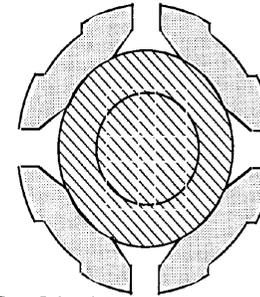
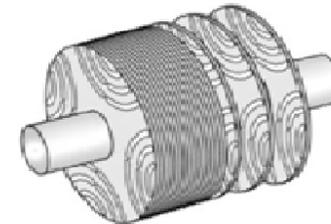


Fig. 3 Showing Rotor Poles of Discrete Pole Synchronous Reluctance Motor.

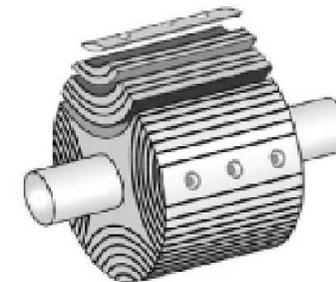
- Solange bestimmte Mindestmaße (Flussschranken, Stege,...) nicht unterschritten werden kann der Rotor konventionell gestanzt werden



- 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

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

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

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

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

$$I_q = I \cos \gamma$$

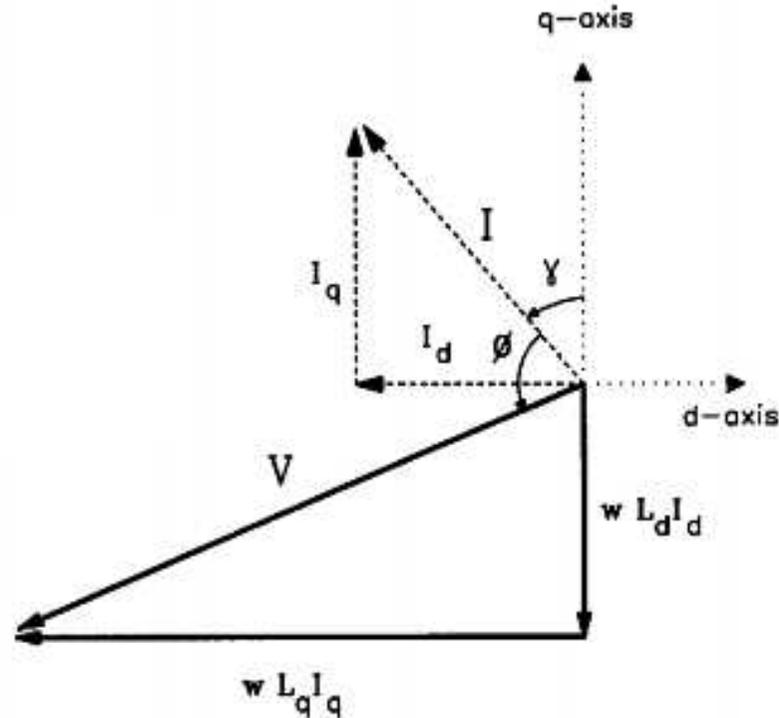
$$V_d = -V \sin \delta$$

$$V_q = V \cos \delta$$

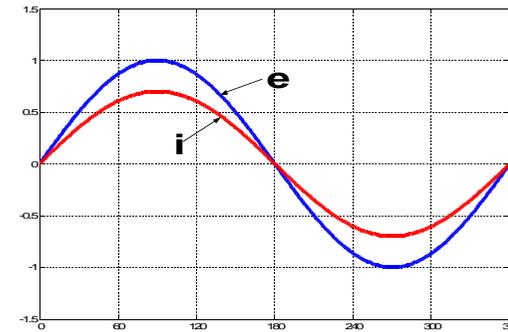
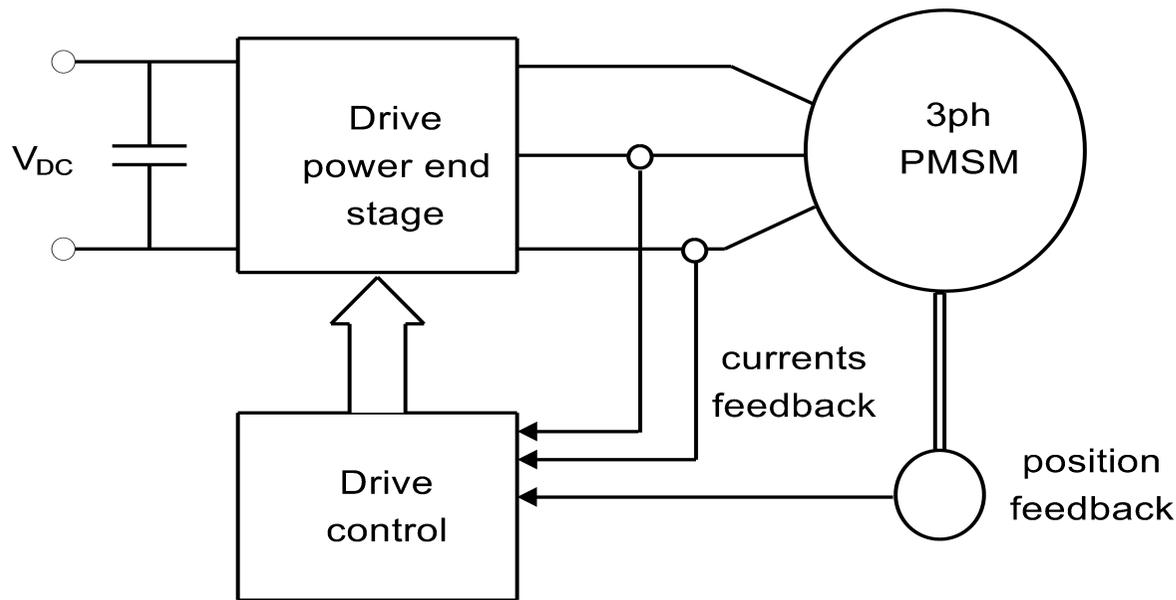
$$\varphi = \delta - \gamma$$

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

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



Ansteuerung/Regelung PMSM und RSM



or observer (sensorless)

- mit Rotorlagesensoren (konventionell)

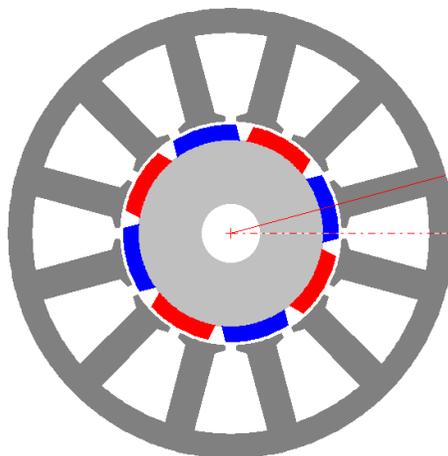
- eventuell ohne Rotorlagesensoren (bei typisch vorteilhafter Rotorlagevariation der Stranginduktivität vor allem bei RSM)

Fallbeispiel für die Vergleichsbetrachtung

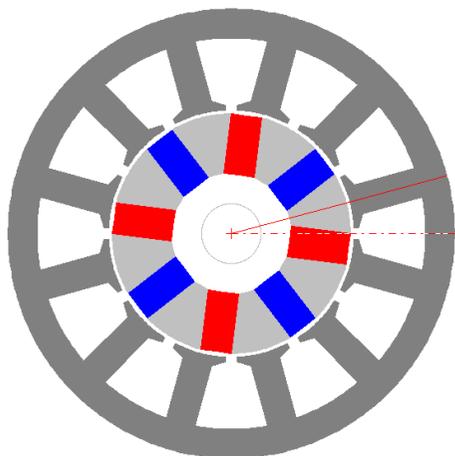
- Betriebspunkt
 - $T = 1$ Nm
 - $n = 3000$ 1/min
- Ziel
 - $\eta = 90$ %
- Einschränkungen
 - $D_{so} = 75$ mm
 - $N_f = 0.3$ (konzentrierte) Zahnwicklung
 - $N_f = 0.4$ (verteilte) Einziehwicklung
- alle weiteren geometrischen Abmessungen sind frei (Designvariablen)
- bei dem Vergleich handelt es sich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

Designlösungen / Motorkonfigurationen

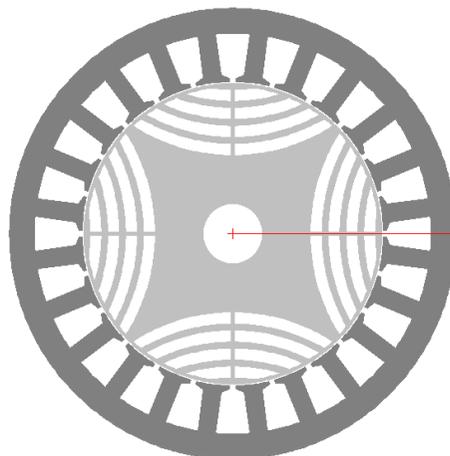
Referenzdesign **PMSM_NdFeB**
($B_{r20}=1.2T$)



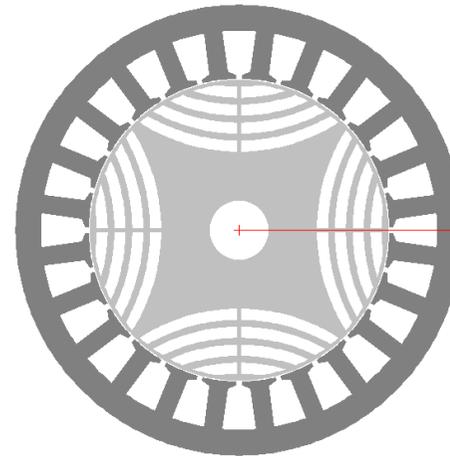
Alternativdesign **PMSM_HF**
($B_{r20}=0.4T$)



Alternativdesign **RSM**



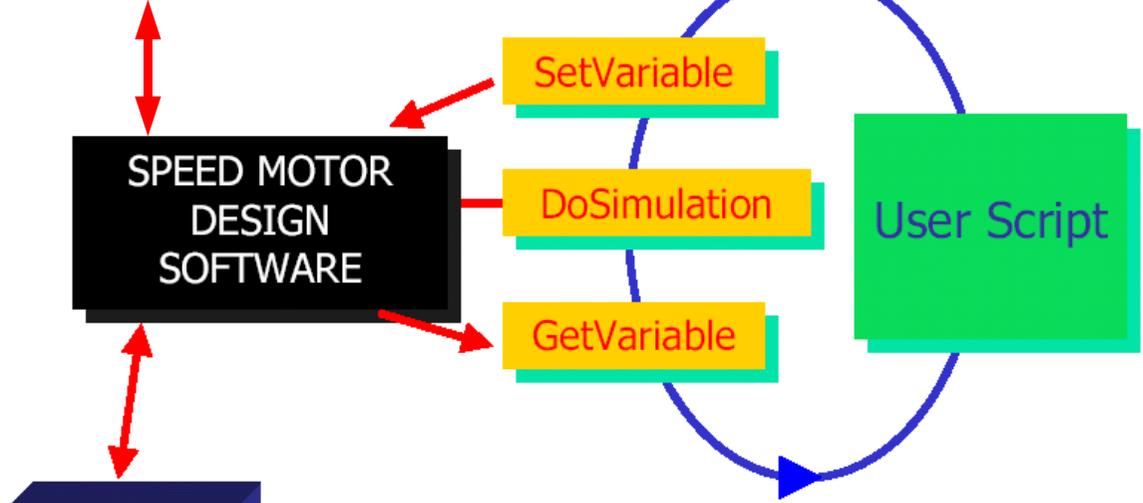
Alternativdesign **PMA-RSM**
($B_{r20}=0.24T$)



Alle Designs: Dynamoblech M400-50A

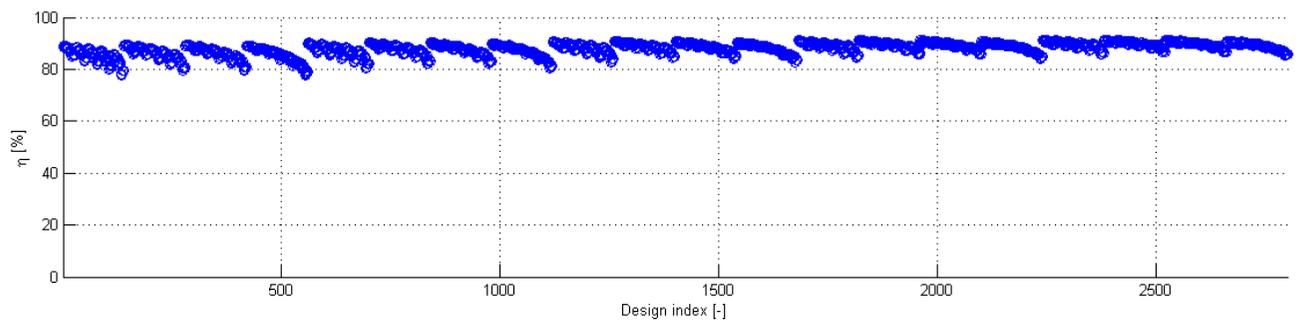
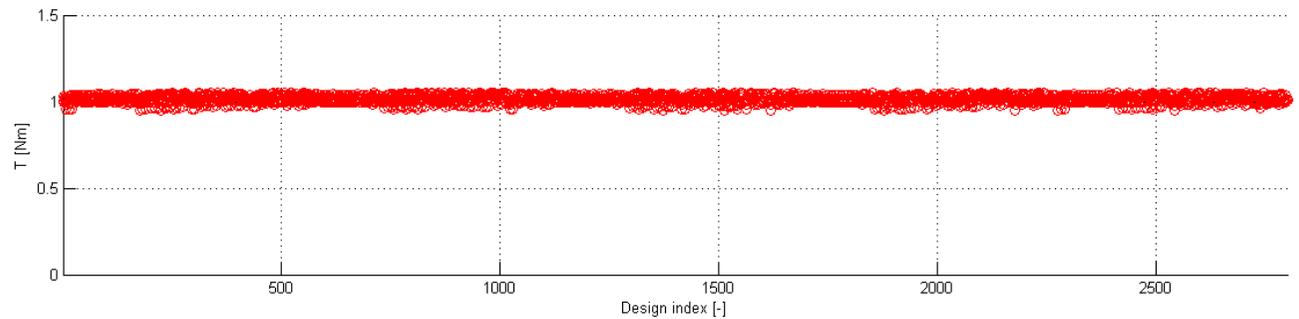
SPEED-Ansatz für die optimale Auslegung

PC-FEA

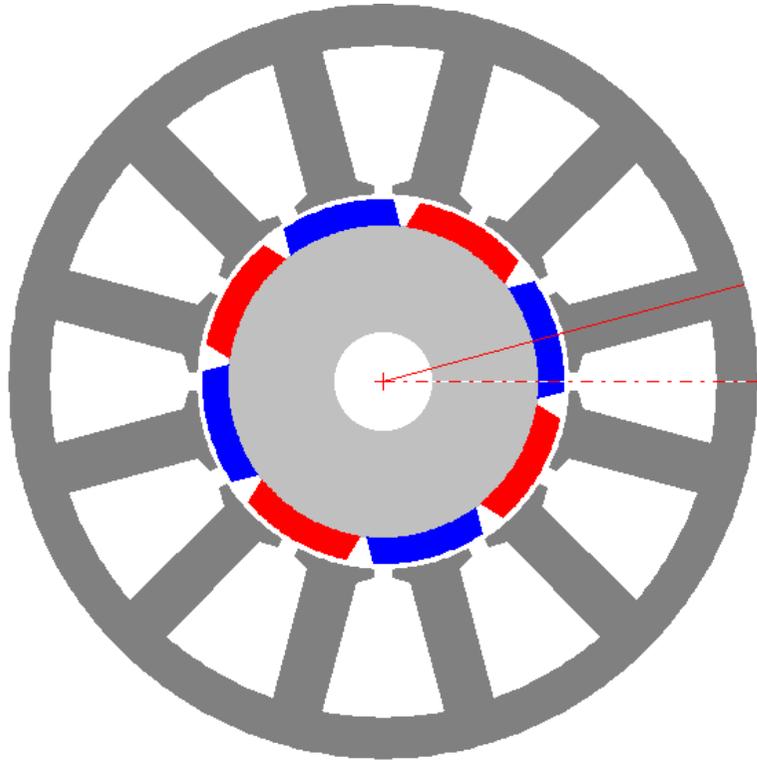


```

% === 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);
    
```



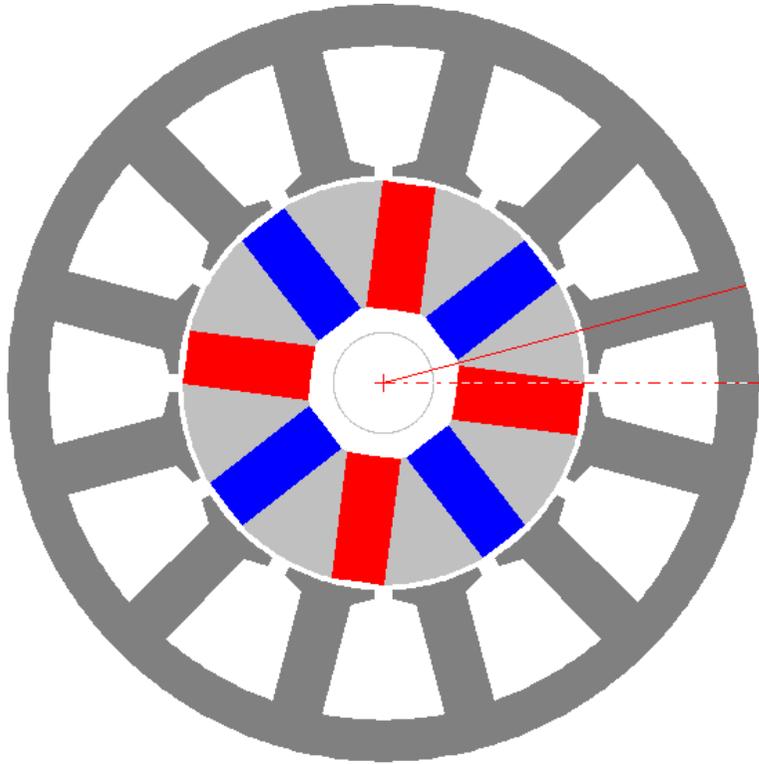
Optimales Design PMSM-NdFeB



Br_20=1.2 T

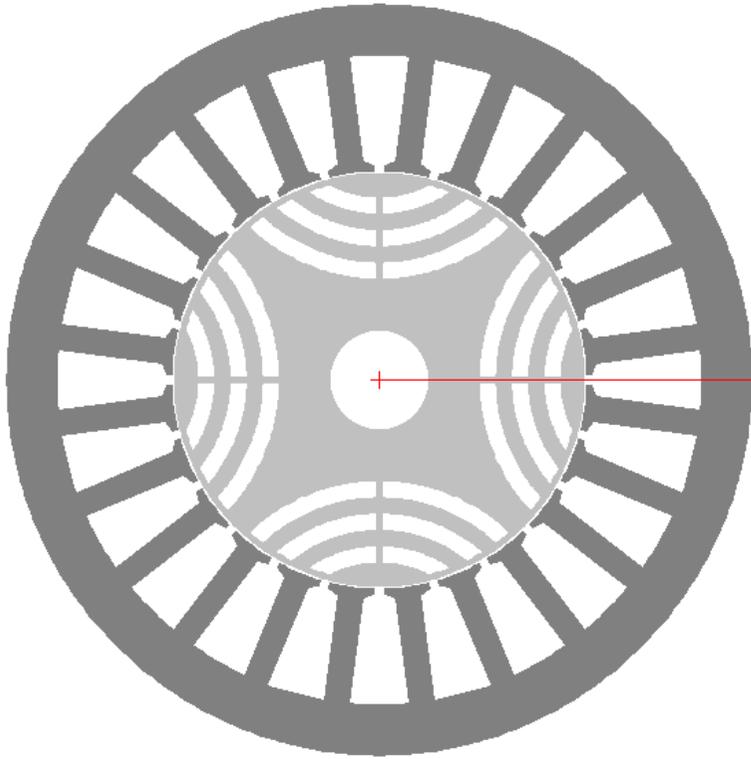
NdFeB gesintert

Optimales Design PMSM-HF



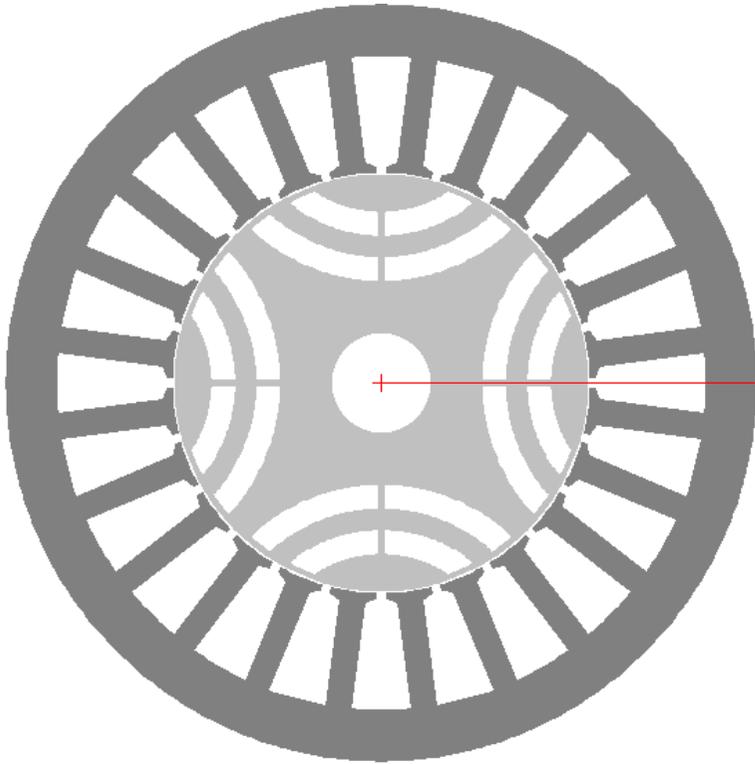
$B_{r_20}=0.4\text{ T}$
Hartferrit

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*