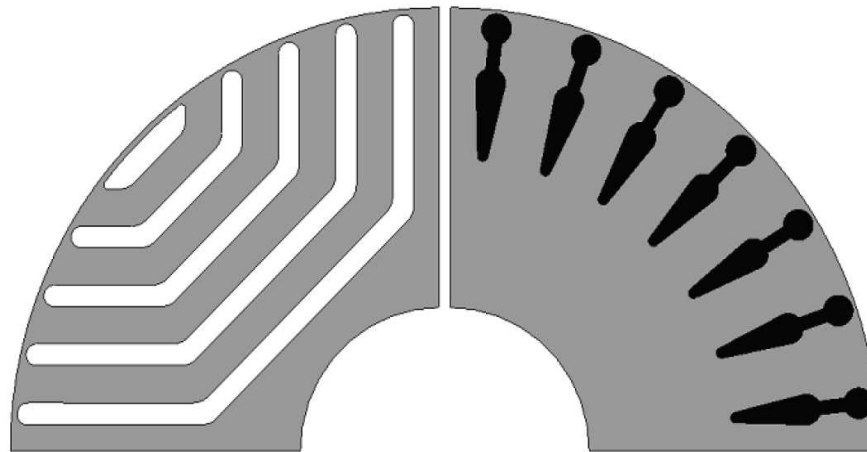


Vergleichsbetrachtung Asynchronmaschine – Reluktanzsynchronmaschine mit FEMAG

Prof. Dr.-Ing. Dorin Iles
Alexander Przybylla, Stefan Paintner
Ingenieurbüro Iles / Hochschule Augsburg

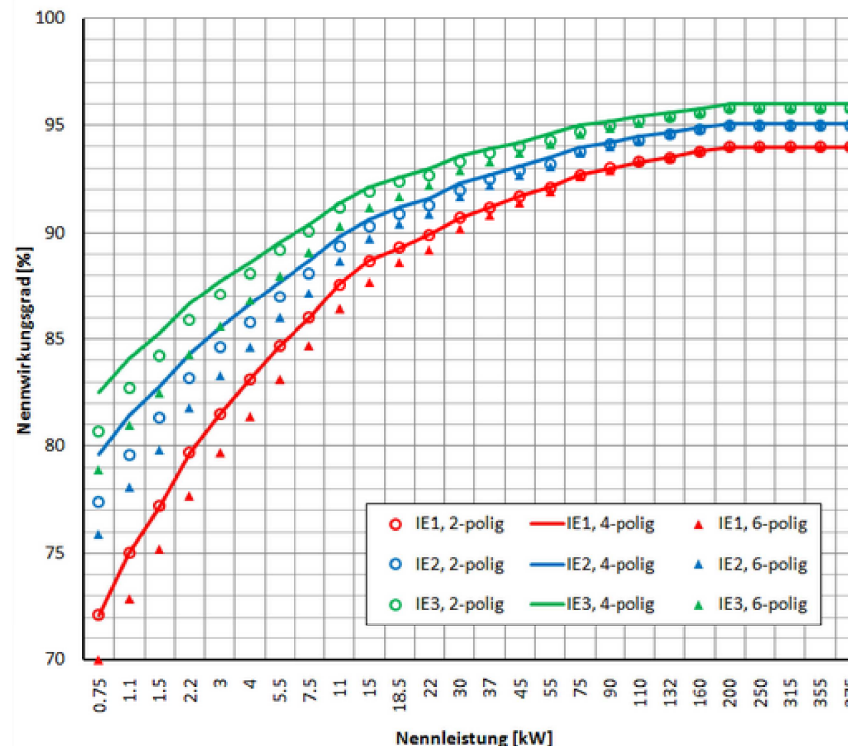
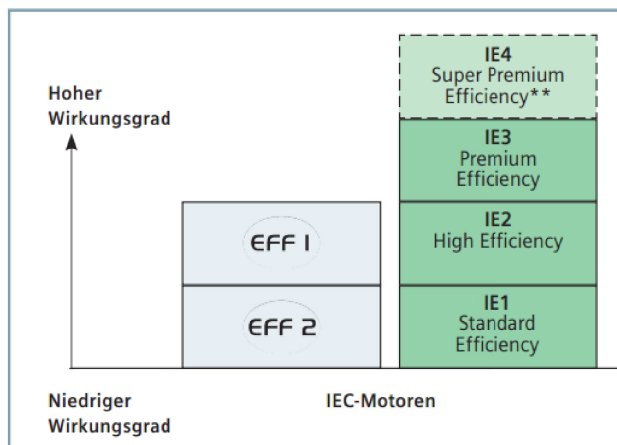


FEMAG-Anwender-Treffen 2012

Email: iles@ieee.org

Herausforderung

- etwa 60-65% des in der Industrie benötigten Stroms wird von Elektromotoren verbraucht
 - Bedeutung des Wirkungsgrades und Notwendigkeit dessen Steigerung
- deutliche Einsparungen durch drehzahlgeregelte Antriebssysteme möglich (Anteil von 30-40% der Neuinstallationen)
- PMSM stellt eine sehr gute technische Alternative zu den ASM, hat aber bedeutende Einschränkungen bezüglich der Kosten und strategischen Abhängigkeit



Ziel

- Ist es möglich mit der Technologie der synchronen Reluktanzmotoren effiziente(re) und kostengünstige(re) elektrische Antriebe zu realisieren?
- Übersicht der Technologie des Reluktanzsynchronmotors
- Vergleichende Gegenüberstellung beider Motortypen (ASM/RSM) hauptsächlich hinsichtlich der Betriebsparameter (Energieeffizienz, Leistungsfaktor, Strombedarf, Drehmomentpulsationen,...)

Inhalt

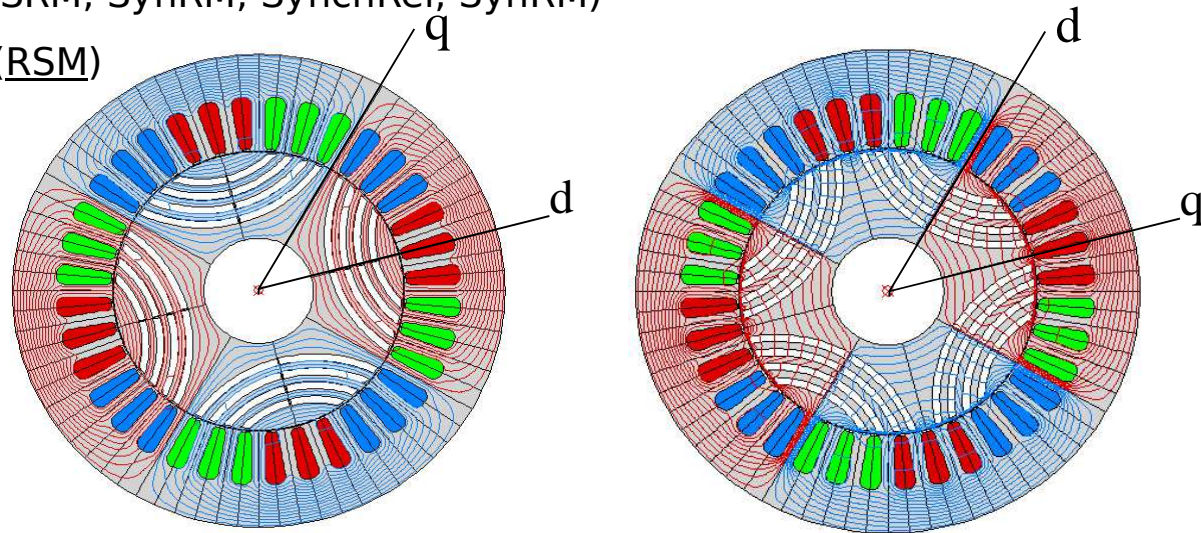
1. RSM - Definition, Aufbau, Funktionsprinzip
2. Geschichte der RSM
3. Mathematisches Modell RSM
4. Rotorkonfigurationen für RSM
5. Konstruktive und fertigungstechnologische Aspekte
6. Ansteuerung/Regelung des RSM
7. Fallbeispiele für die Vergleichsbetrachtung
8. Spezielle Aspekte der RSM
9. Fazit
10. Literaturquellen

Reluktanzsynchronmotor (RSM)

RSM - ein Synchronmotor ohne Erregung aber mit einer ausgeprägten Rotoranisotropie

Bezeichnungen:

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



Aufbau:

- Stator mit verteilter Wicklung
- 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 → einphasiger Motor 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

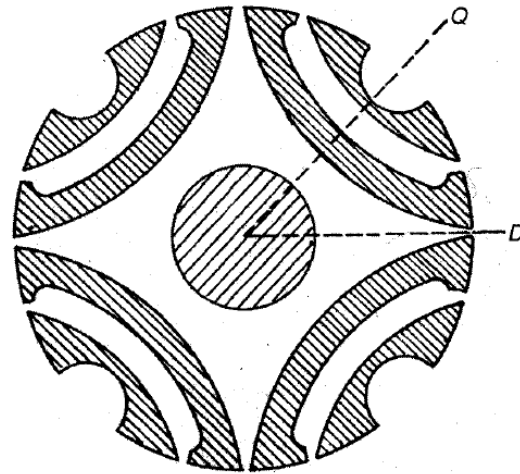


Fig. 2.12 Kostko's reluctance motor rotor with flux guides, 1923. Kostko, 'Polyphase Reaction Synchronous Motors', *J. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 1923, p. 1162. (© IEEE, 1923).

Geschichte des Reluktanzsynchronmotors

- 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, AMK,...?

Mathematisches Modell des Reluktanzsynchronmotors

Effektivwerte

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

$$\Psi_{PM} = 0$$

$$E_{PM} = 0$$

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

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

$$I_q = I \cos \gamma$$

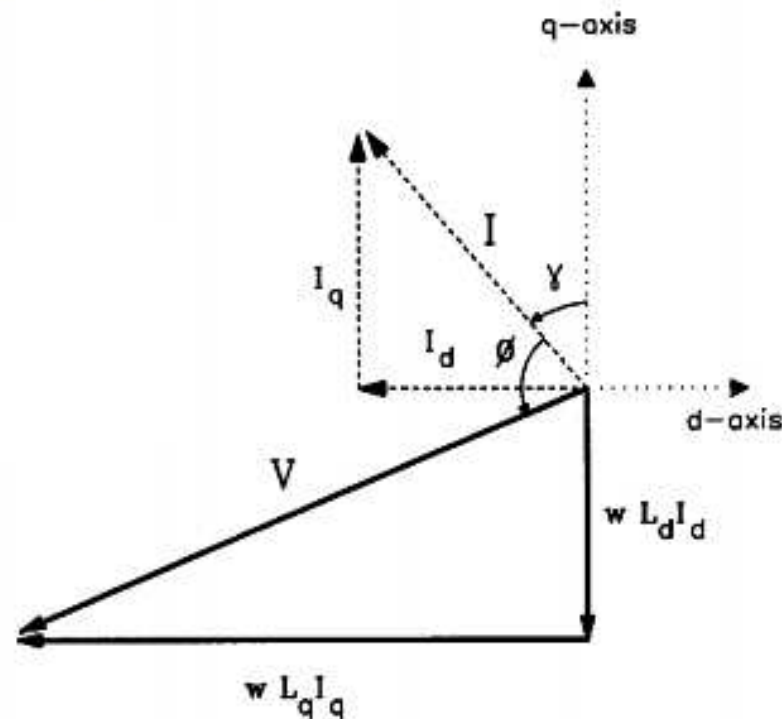
$$V_d = -V \sin \delta$$

$$V_q = V \cos \delta$$

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

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

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

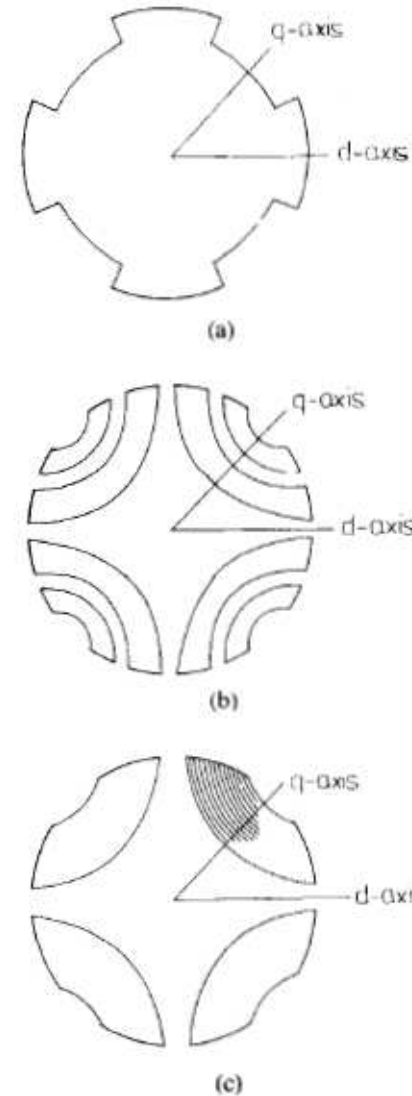
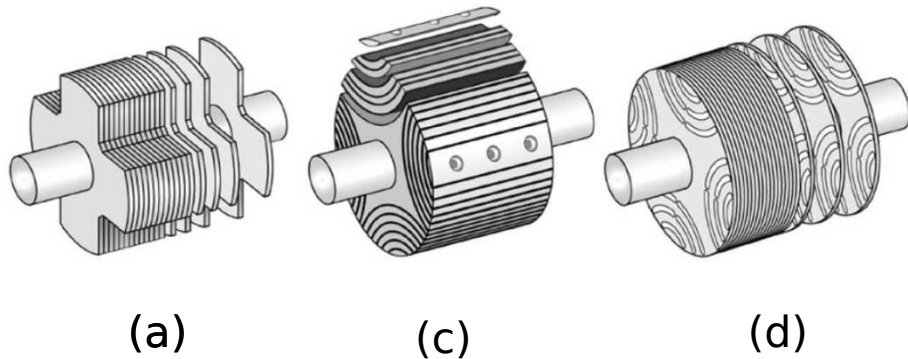


Klassifizierung von Rotoren des RSM

4 Kategorien /

Methoden für die Umsetzung der Anisotropie:

- a) einfache Schenkelpole (ohne Flussschranken), (TLA)
- b) segmentierter Rotor (zusammengesetzt aus mehreren Teilen) (TLA)
- 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

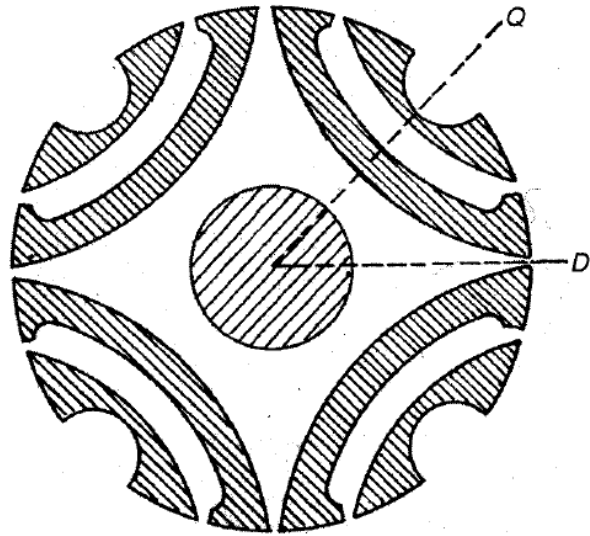
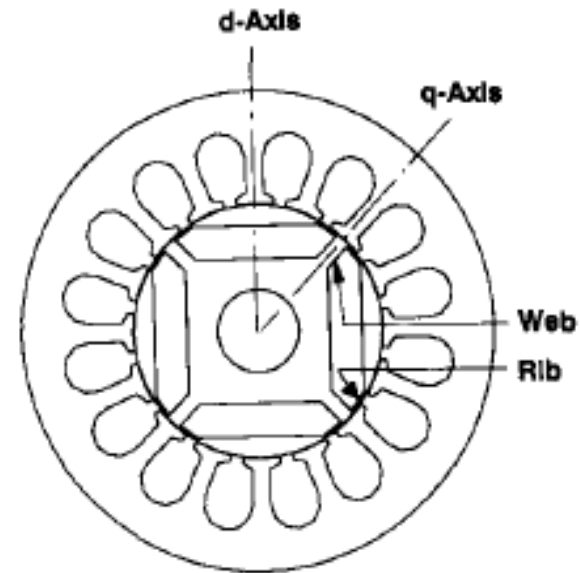


Fig. 2.12 Kostko's reluctance motor rotor with flux guides, 1923. Kostko, 'Polyphase Reaction Synchronous Motors', *J. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 1923, p. 1162. (© IEEE, 1923).



Rotor2

(b)

Fig. 4. Transversely laminated single-barrier SYNCHREL
1; (b) rotor 2.

T. J. E. Miller, Design of a Synchronous
Reluctance Motor Drive, IEEE 1991

Mögliche Rotorkonfigurationen

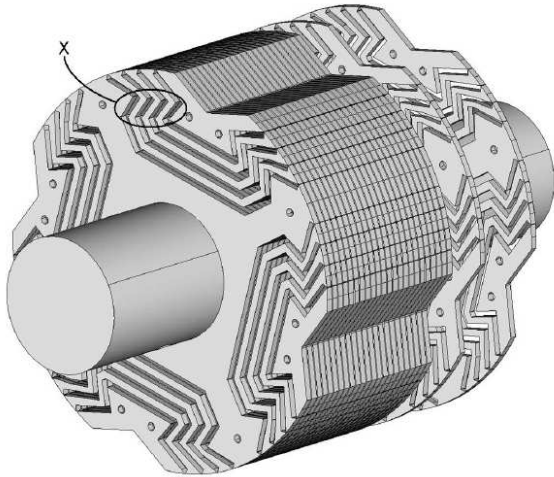


Fig. 3. Schematic of the new design with dovetail shaped poles without supporting bridges. One of eight supporting filler areas is marked with "x."

Kolehmainen, Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor, IEEE 2010

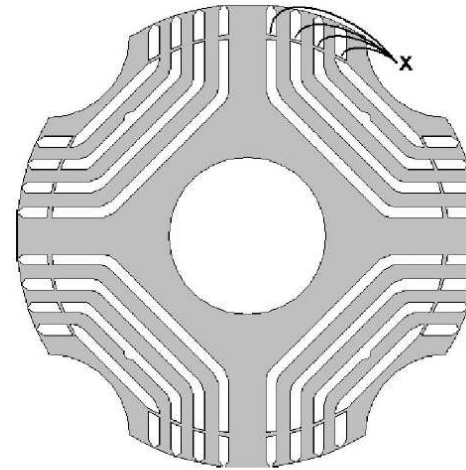


Fig. 2. Rotor design with bridge-fixed poles. Four of the supporting bridges are marked with "x."

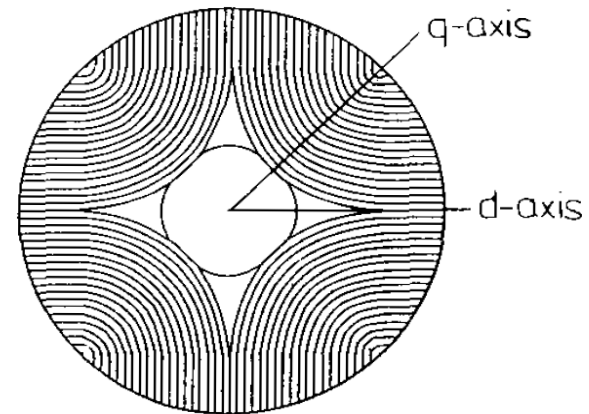


Fig. 2. Rotor with strong anisotropy.

Platt, Reluctance Motor with Strong Rotor Anisotropy, IEEE 1992

$L_d/L_q=25!$

Mögliche Rotorkonfigurationen

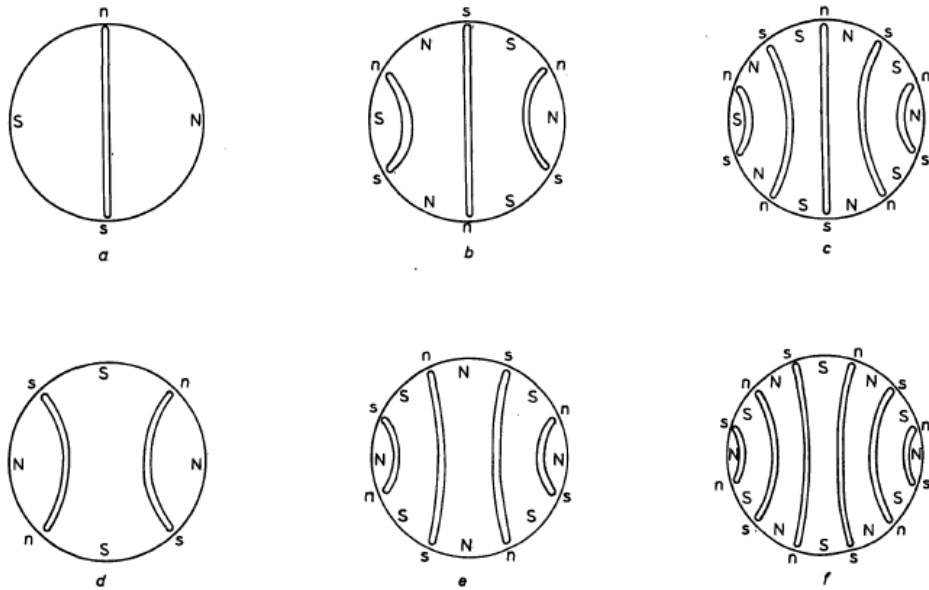


Fig. 2
 First embodiment of essential-barrier principle
 a $p = 1$
 b $p = 3$
 c $p = 5$
 d $p = 2$
 e $p = 4$
 f $p = 6$
 Upper-case letters denote Q axis polarities
 Lower-case letters denote D axis polarities

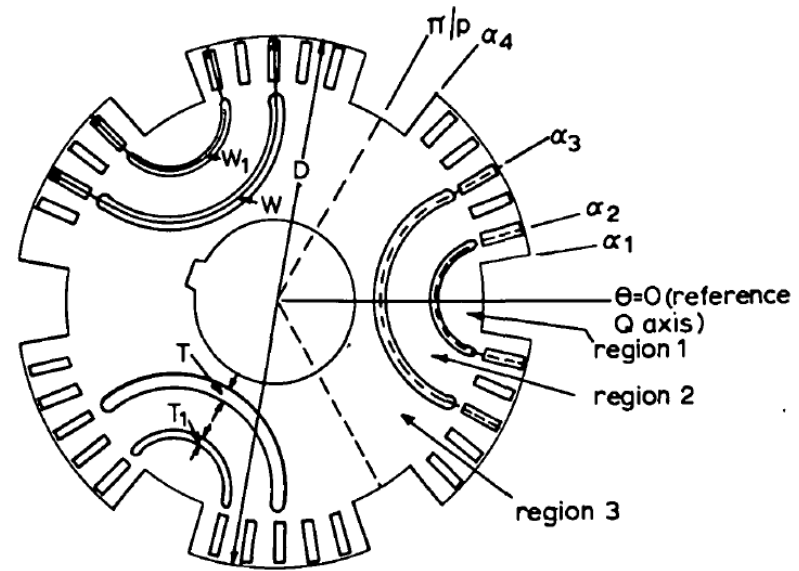


Fig. 6
 Practical rotor lamination of new form for 6-poles

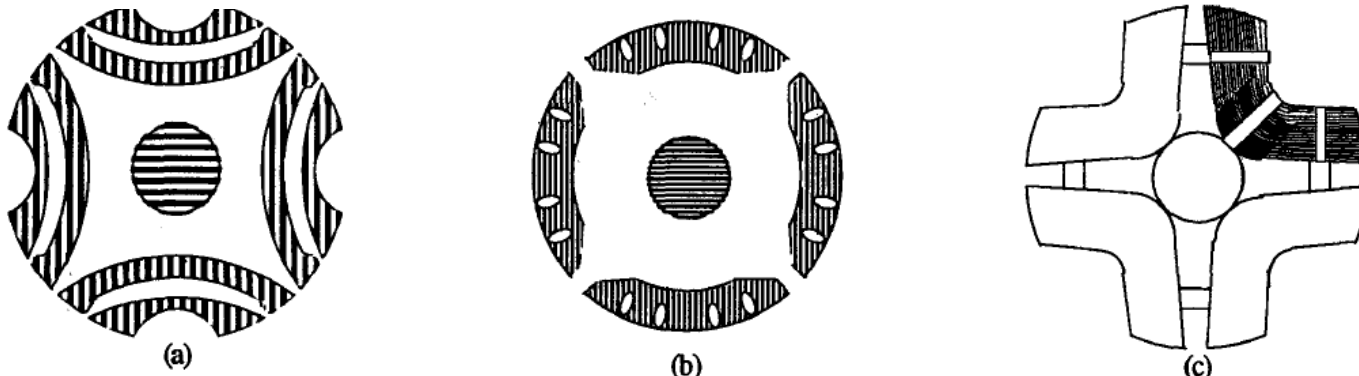


Fig. 1 (a): Kostko's rotor in the 1920s which shows segmental iron pieces and flux barriers. (b): Lawrenson's isolated segmental rotor. (c): General construction of an axially laminated anisotropic rotor.

Matsuo, Lipo, Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine, IEEE 1994

Mögliche Rotorkonfigurationen

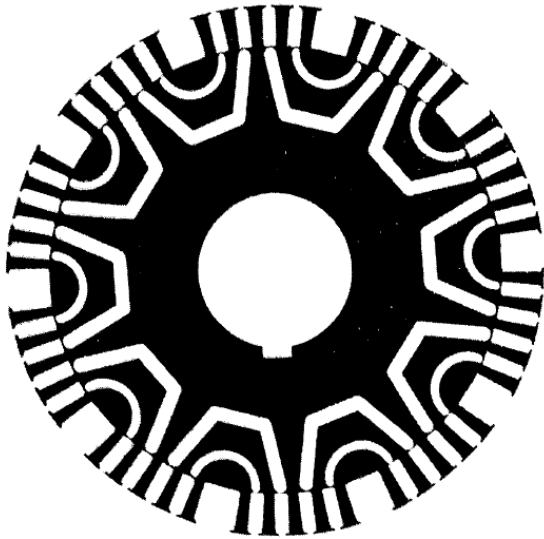


Fig. 10
Flux-barrier rotor of the experimental machine

Broadway, Cageless induction machine, IEE 1971

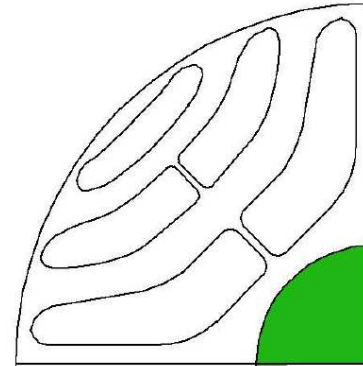


Fig.1: Schematic of rotor lamination of a Transverse Laminated Synchronous Reluctance Motor.

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

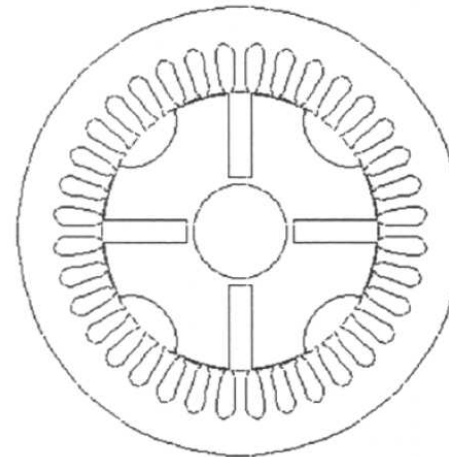


Fig.1. Cross section through VRSM's iron core, 5.5 kW motor

Viorel, Vicol, Strete, A Comparison between Cage Induction Motor and Variable Reluctance Synchronous Motor with Cageless Segmental Rotor, ICEM 2008

Mögliche Rotorkonfigurationen

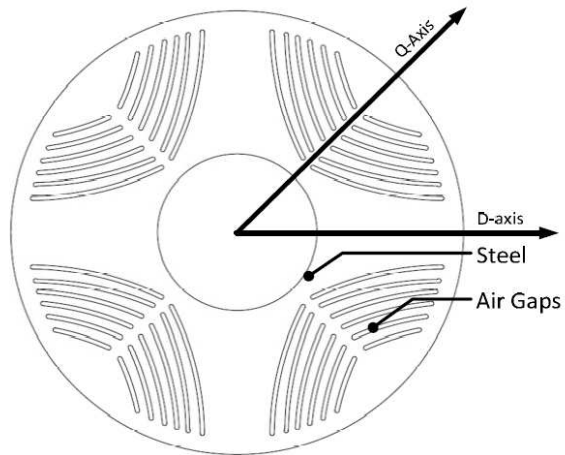
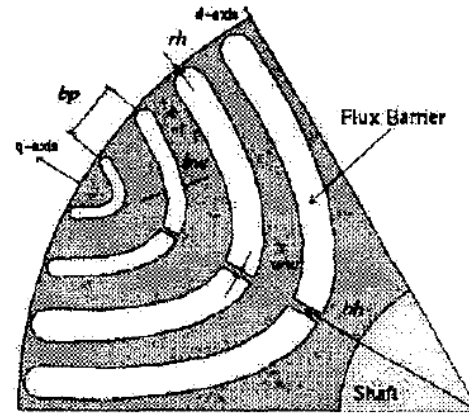


Fig 5. Reluctance Synchronous Machine Designed at the University of the Witwatersrand, adapted from [1]

Ansari, Cronje, Meyer, Evaluation of a Reluctance Synchronous Motor For use in an Electric Mine Shuttle Vehicle, IEEE



(b) RSM with flux barriers

Germishuizen, Van der Merwe, Van der Westhuizen, Kamper, Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units, IEEE 2000

Konstruktive und fertigungstechnologische Aspekte

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

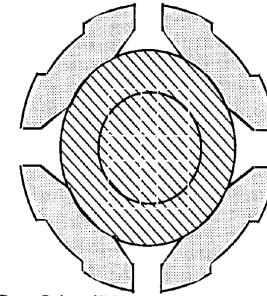
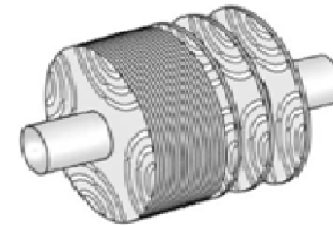
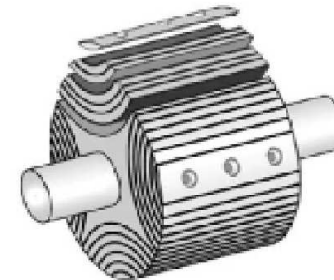


Fig. 3 Showing Rotor Poles of Discrete Pole Synchronous Reluctance Motor.

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

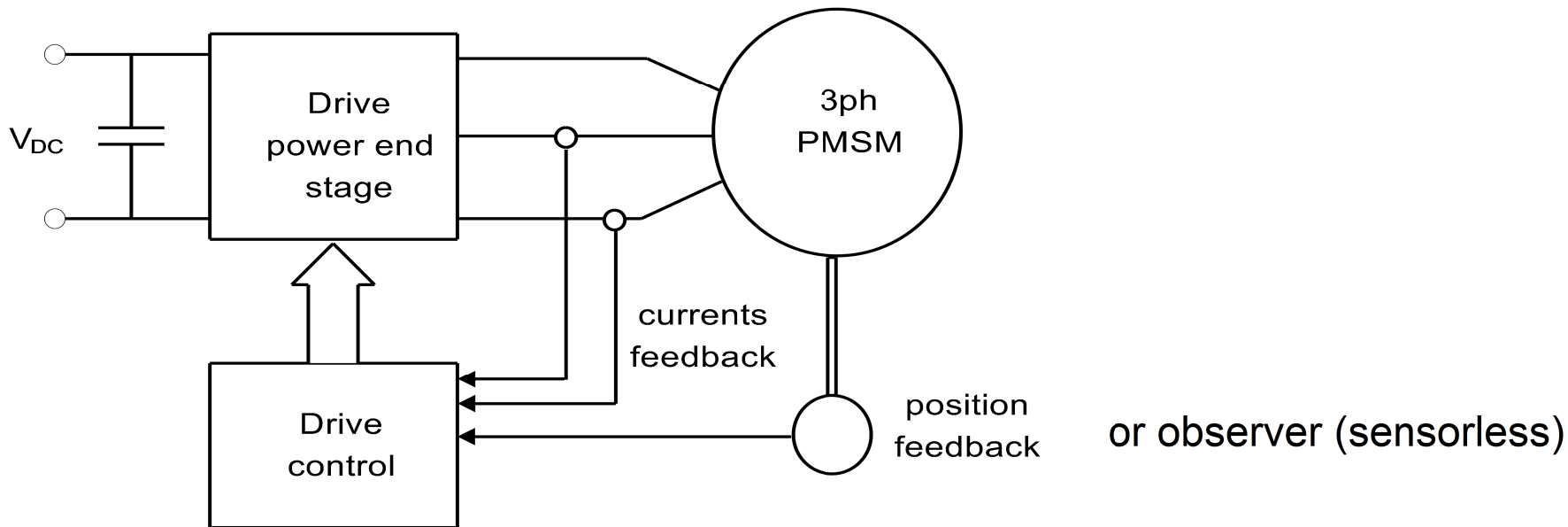


- Bei dem axialen Aufbau ist eine Trennung der Biegeteile zueinander notwendig
- Das Trennmedium kann Kunststoff oder ein anderer magnetisch und elektrisch neutraler Stoff sein
- Die Fixierung kann durch Schrauben erfolgen



Allgemein: keine Bewicklung oder Bestückung mit Magneten im Rotor erforderlich

Ansteuerung/Regelung RSM



-mit Rotorlagesensoren (konventionell)

-ohne Rotorlagesensoren (Strommessung bei typisch vorteilhafter Rotorlagevariation der Stranginduktivität)

Mathematisches Modell des Asynchronmotors

Scheitelwerte

Drehmomentbildung

Statorkoordinaten

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds})$$

Rotorkoordinaten, d-Achse in Richtung des Rotorflusses

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_r i_{qs}) = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (L_m i_{ds}) i_{qs}$$

Drehmomentbildung RSM vs. ASM

$$T_{RSM} = \frac{3}{2} p (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}$$

$$L_{ds} = L_{md} + L_{ls}$$

$$L_{qs} = L_{mq} + L_{ls}$$

$$T_{RSM} = \frac{3}{2} p \left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}}\right) (L_{md} i_{ds}) i_{qs}$$

$$T_{ASM} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (L_m i_{ds}) i_{qs}$$

Vergleichsbetrachtung auf analytischer Basis RSM vs. ASM

Gleicher Strom:

$$T_{RSM} = \frac{3}{2} p \left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}}\right) (L_{md} i_{ds}) i_{qs}$$

$$T_{ASM} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (L_m i_{ds}) i_{qs}$$

$\frac{L_{mq}}{L_{md}} = \frac{1}{6}$
 $\frac{L_{md}}{L_m} = 0.94$
 $\frac{L_m}{L_r} = 0.95$

Für spezifische Werte der Maschinenparameter (s. Literatur)

$$\frac{T_{RSM}}{T_{ASM}} = \frac{L_{md}}{L_m} \frac{\left(1 - \frac{L_{mq}}{L_{md}}\right)}{\left(\frac{L_m}{L_r}\right)}$$

$$\frac{T_{RSM}}{T_{ASM}} = 0.94 \frac{\left(1 - \frac{1}{6}\right)}{0.95} = 0.83$$

$$\frac{T_{RSM}}{T_{ASM}} = \left(1 - \frac{L_q}{L_d}\right) = \left(1 - \frac{1}{\chi}\right)$$

Vergleichsbetrachtung auf analytischer Basis RSM vs. ASM

Gleiches Drehmoment:

$$T_{RSM} = T_{ASM}$$

$$T_{RSM} = \frac{3}{2} p K_{dq} \lambda_d i_{qRSM} \quad T_{ASM} = \frac{3}{2} p K_r \lambda_r i_{qASM}$$

Für spezifische Werte der Maschinenparameter (s. Literatur)

$$K_{dq} = 0.9 \quad K_r = 0.97$$

$$i_{qASM} = 0.93 * i_{qRSM}$$

$$\frac{P_{V_{gesamtASM}}}{P_{V_{gesamtRSM}}} = 1.53 \quad \Rightarrow \quad \frac{P_{V_{gesamtRSM}}}{P_{V_{gesamtASM}}} = 0.65$$

Vergleichsbetrachtung auf analytischer Basis RSM vs. ASM

Gleiche Cu-Verlustleistung

$$P_{CuASM} = \frac{3}{2} [R_{sASM} (i_{qASM}^2 + i_{dASM}^2) + R_r i_{qrASM}^2]$$

$$P_{CuRSM} = \frac{3}{2} [R_{sRSM} (i_{qRSM}^2 + i_{dRSM}^2)]$$

Für spezifische Werte der ASM-Parameter (s. Literatur)

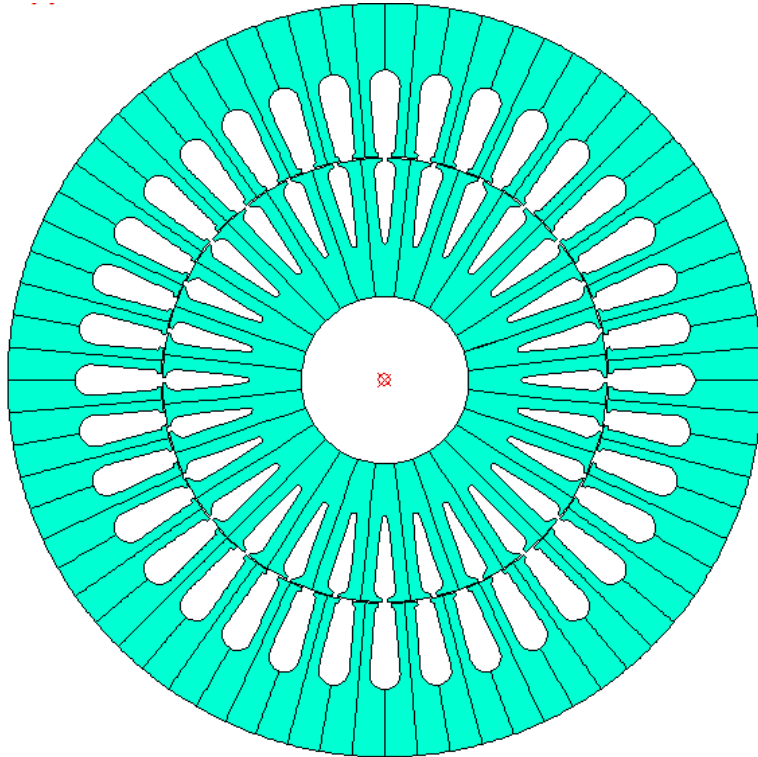
$$R_r = 0.8 R_s \quad \frac{i_d}{i_q} = 0.4$$

$$i_{qASM} = 0.78 * i_{qRSM}$$

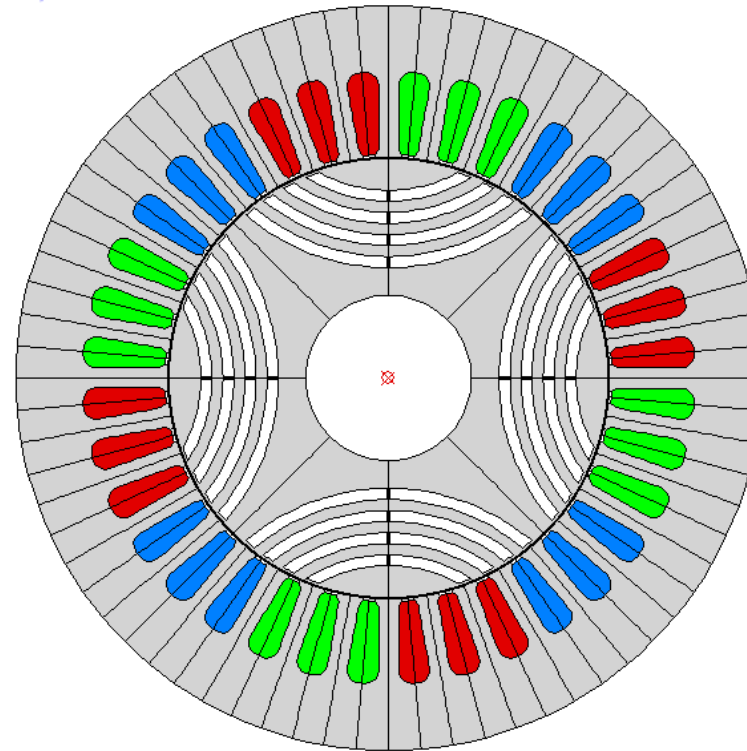
$$\frac{T_{ASM}}{T_{RSM}} = 0.84 \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{RSM}}{T_{ASM}} = 1.19$$

Fallbeispiele für die Vergleichsbetrachtung

ASM-Konfiguration



RSM-Konfiguration



- 3 Baugrößen: **90/100/112**

- die RSM besitzen den **selben Stator** der jeweiligen ASM

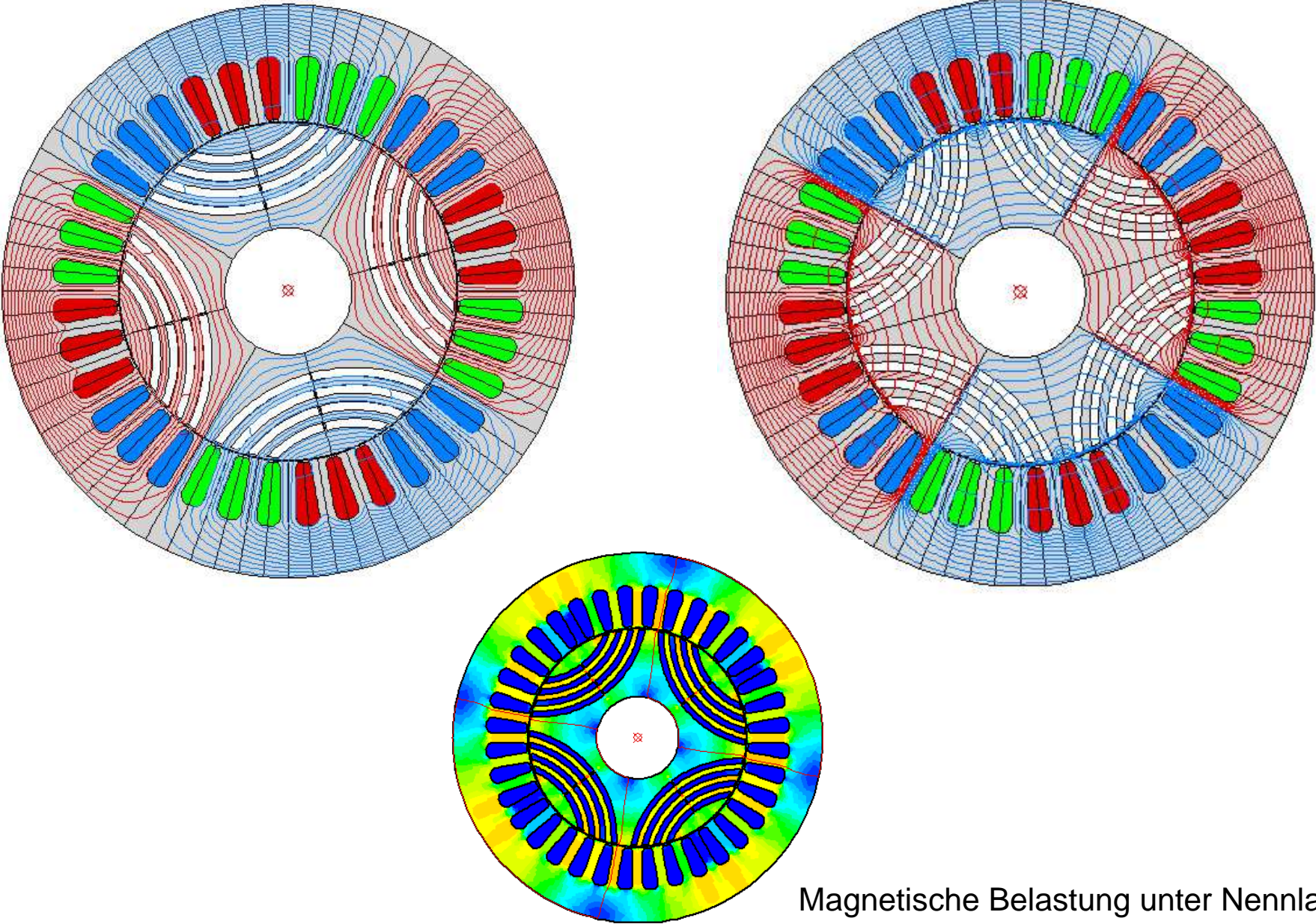
- bei dem Vergleich handelt es sich um nicht-optimierte Designs

Fallbeispiele für die Vergleichsbetrachtung

Konfiguration, Geometrische Abmessungen, Materialien, Wicklung

	90		100		112	
	ASM	RSM	ASM	RSM	ASM	RSM
Polzahl (2p)	4	4	4	4	4	4
Dso [mm]	135	135	150	150	170	170
Dsi [mm]	80	80	90	90	103	103
Dw [mm]	30	30	36	36	38	38
L_Fe [mm]	65	65	90	90	140	140
Ns	36	36	36	36	36	36
Nr	28	-	28	-	28	-
Luftspalt [mm]	0.25	0.25	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
Käfigmaterial	Al	-	Al	-	Al	-
Wicklungsart	1-Schicht	1-Schicht	1-Schicht	1-Schicht	1-Schicht	1-Schicht
Wickelschritt [Nutteilung]	9	9	9	9	9	9
Strangschaltung	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Ergebnisse der FE-Analyse
Flußverlauf in der q- bzw. d-Achse für die Rotorröhre an



Magnetische Belastung unter Nennlast

Betriebsparameter Baugröße 90

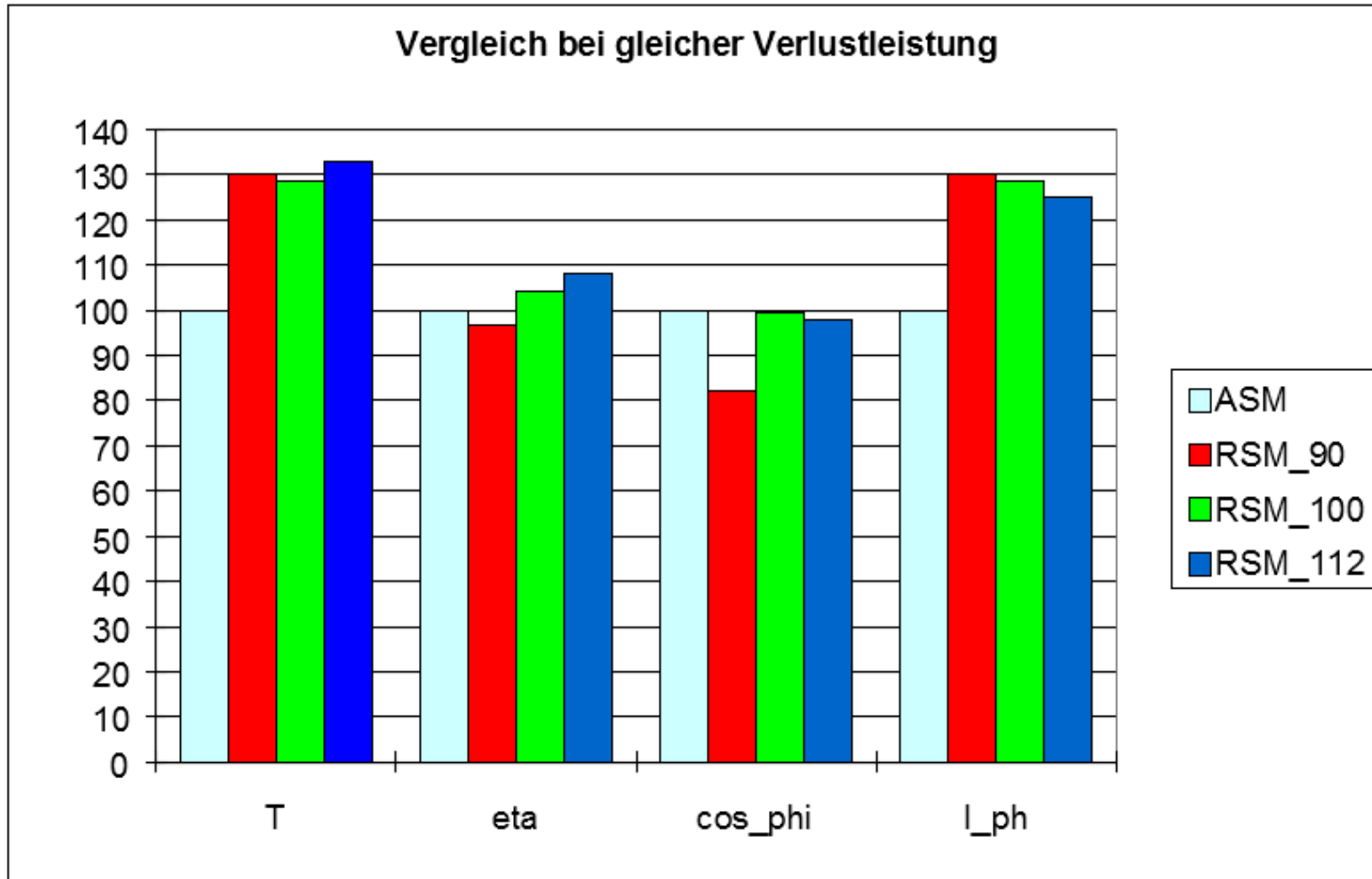
	90			
	A SM	RSM gleicher Statorstrom	RSM gleiches Drehmoment	RSM gleiche Gesamtverluste
T [Nm]	7.5	6.7	7.5	8.7
nN [rpm]	1400	1400	1400	1400
Vph_rms [V]	230	233	241	250
Iph_rms [V] @230V	2.6	2.6	2.9	3.3
P1 [W]	1386	1160	1321	1563
P2 [W]	1100	979	1100	1275
eta_Motor [%]	79.4	84.4	83.3	81.6
cos_phi [-]	0.77	0.64	0.64	0.64
Pv_Cu_Stator [W]	167.1	167.1	207.9	269.2
Pv_Cu_Rotor [W]	78.5	0	0	0
Pv_Fe_S+R [W]	40.0	13.9	13.1	16.1
Pv_gesamt [W]	285.6	181	221	285.3

Rph_w [Ohm]	8.67	8.67	8.67	8.67
Ld [mH]		70.1	67.5	64.5
Lq [mH]		401.7	370.6	334.3

Lq-Ld [mH]	-	332	303	270
Lq/Ld [-]	-	5.7	5.5	5.2

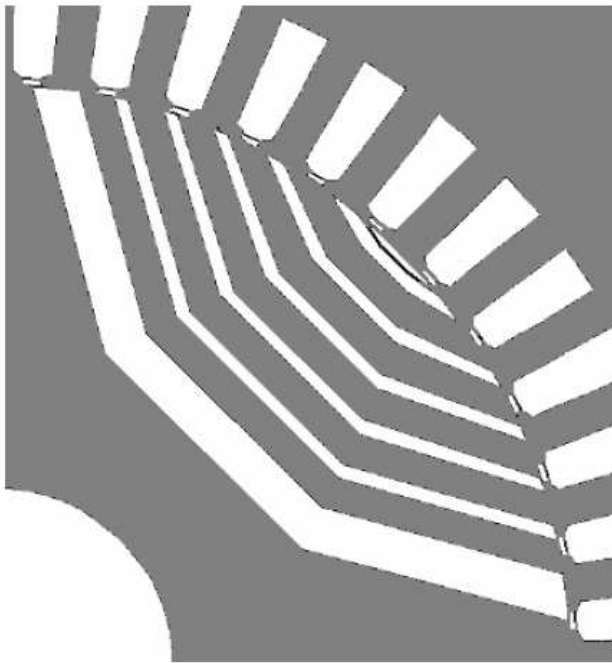
Gegenüberstellung RSM vs. ASM

Bezogene Werte: ASM=100%

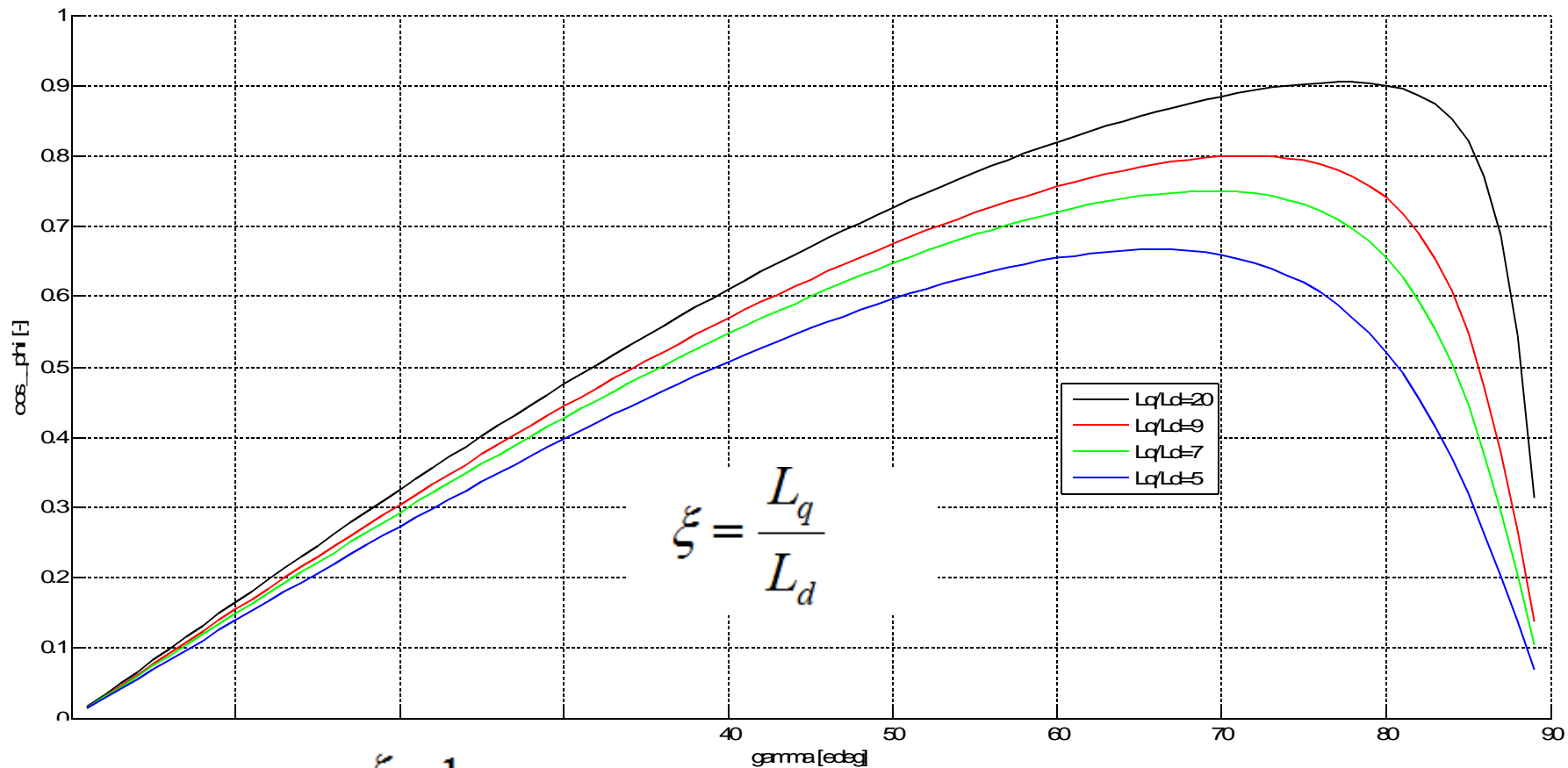


Spezielle Aspekte / Sättigungsverhältnis

- Das Sättigungsverhältnis ist abhängig von der Breite und Position der Flußschranken im Rotor
- Verteilung der magnetisch leitenden und nicht-leitenden Materialien ist besonders wichtig



Spezielle Aspekte / Leistungsfaktor



$$\cos \gamma = \frac{\xi - 1}{\sqrt{\xi^2 \frac{1}{\sin^2 \gamma} + \frac{1}{\cos^2 \gamma}}}$$

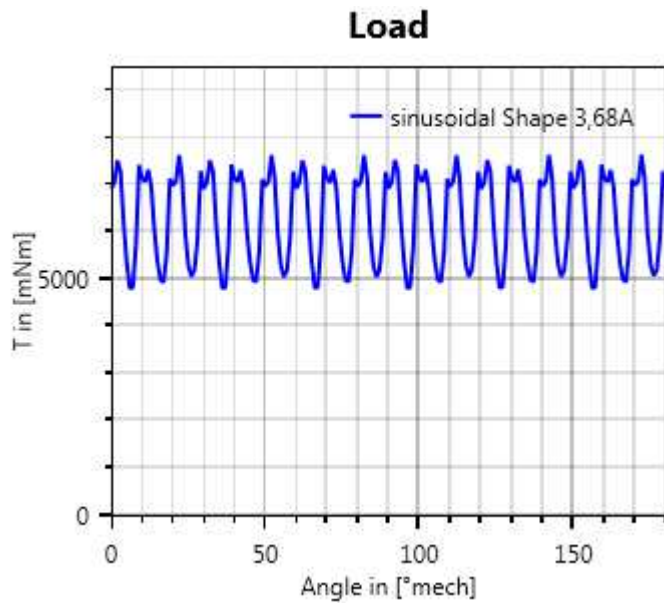
$$\gamma_{\max} = \arctan \sqrt{\xi}$$

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1}$$

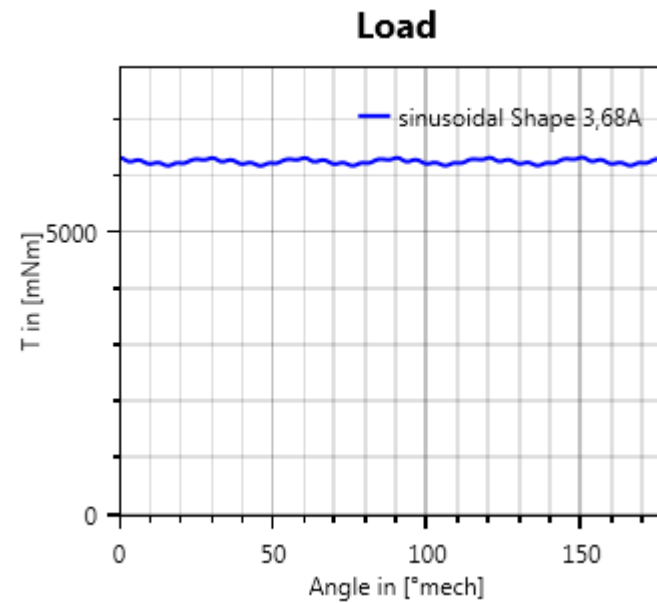
Spezielle Aspekte / Drehmomentpulsationen

Drehmomentverlauf BG 90 nichtoptimiert

Drehmomentverlauf BG 90 optimiert
(z.B. geschrägt)



$$T_{pp}/T_{av} = 45.5 \%$$



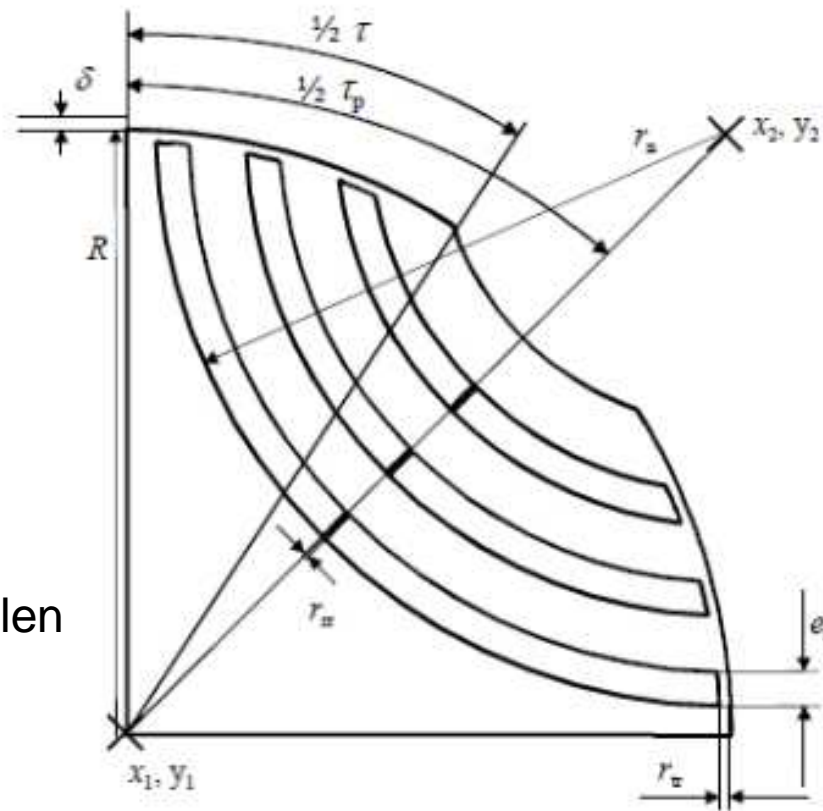
$$T_{pp}/T_{av} = 2.4 \%$$

bei gleichem Drehmoment-Mittelwert

Spezielle Aspekte / Optimale Auslegung

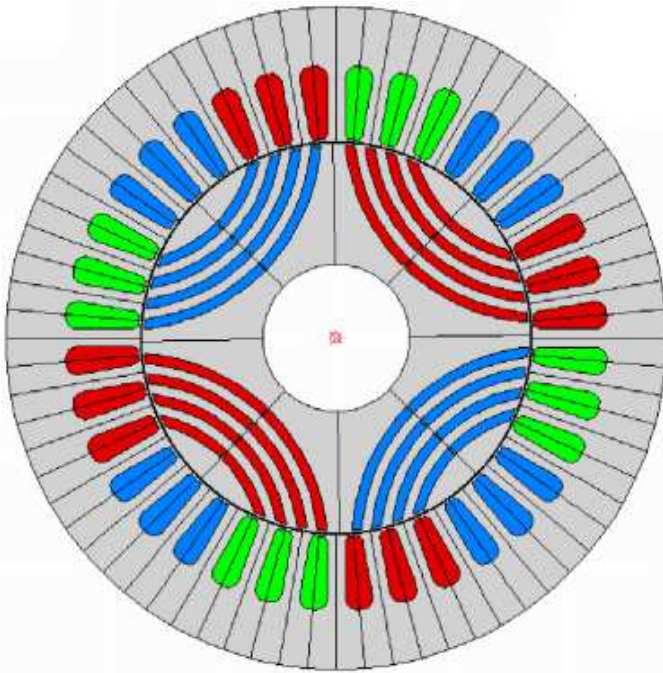
- globale Optimierung
- lokale Optimierung z. B. im Rotor für die
 - Minimierung der Drehmomentpulsationen
 - Maximierung des Sättigungsfaktors

Geometrische Designvariablen



Spezielle Aspekte / PM-RSM

Vergleich ASM / RSM / PM-RSM für BG 90



$B_r = 0.24 \text{ T}$

z. B. Plastroferrit, gespritzt

	90		
	ASM	RSM gleicher Statorstrom	PM_RSM gleicher Statorstrom
T [Nm]	7.5	6.7	8.5
nN [rpm]	1400	1400	1400
V _{ph_rms} [V]	230	233	235
I _{ph_rms} [V] @230V	2.6	2.6	2.6
P1 [W]	1386	1160	1431
P2 [W]	1100	979	1246
eta_Motor [%]	79.4	84.4	87.1
cos_phi [-]	0.77	0.64	0.78
P _{v_Cu_Stator} [W]	167.1	167.1	167.1
P _{v_Cu_Rotor} [W]	78.5	0	0
P _{v_Fe_S+R} [W]	40.0	13.9	18.2
P _{v_gesamt} [W]	285.6	181	185.3

R _{ph_w} [Ohm]	8.67	8.67	8.67
L _d [mH]		70.1	63.6
L _q [mH]		401.7	402.6

L _q -L _d [mH]	-	332	339
L _q /L _d [-]	-	5.7	6.3

Spezielle Aspekte / RSM mit konzentrierter Wicklung

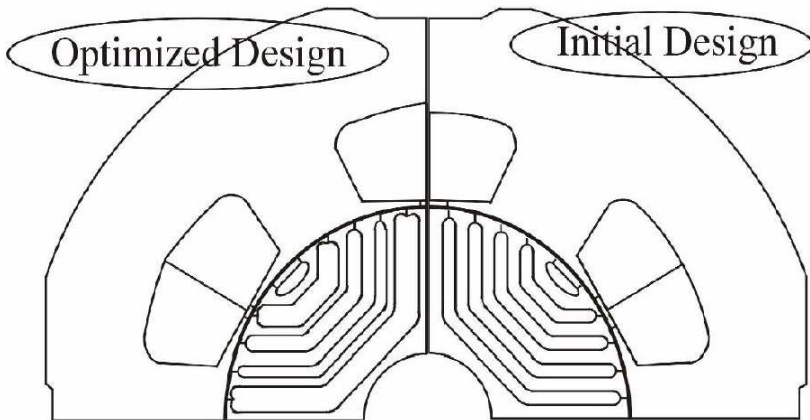


Fig. 7 Configurations of optimized and initial design for 6 slots

6s/4p

Choi, et al., Rotor optimum Design on torque ripple reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using RSM, IEEE 2007

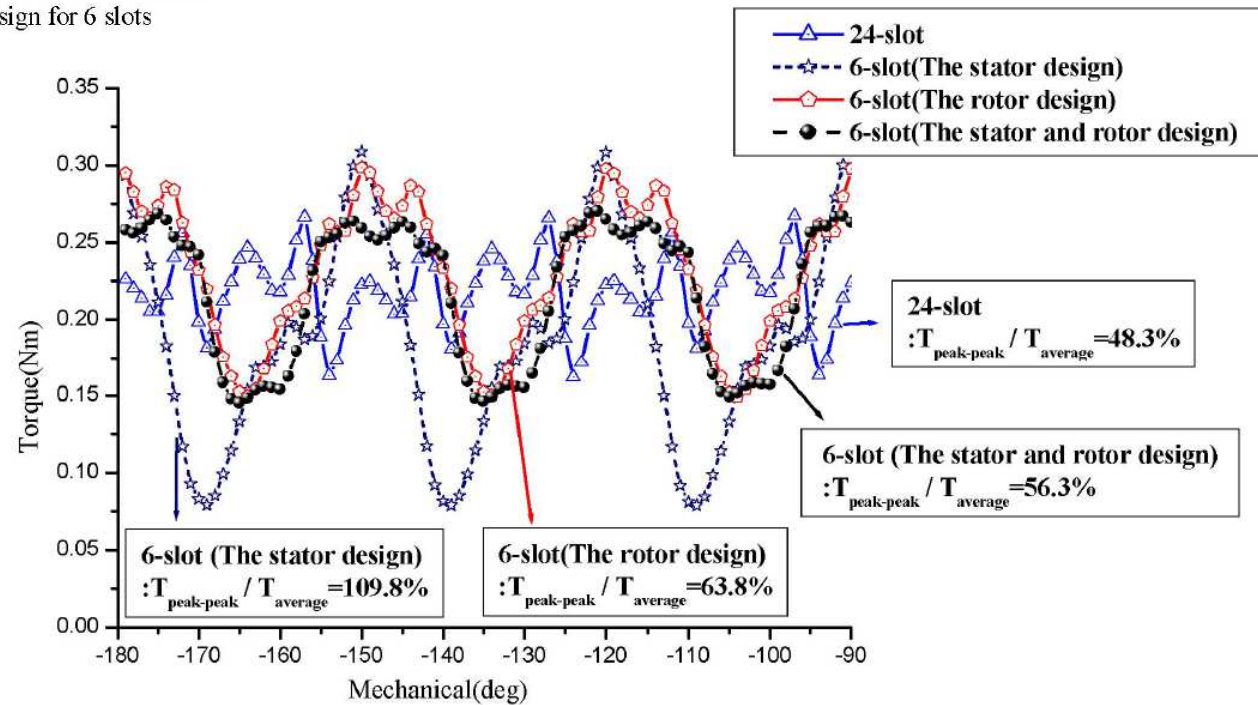
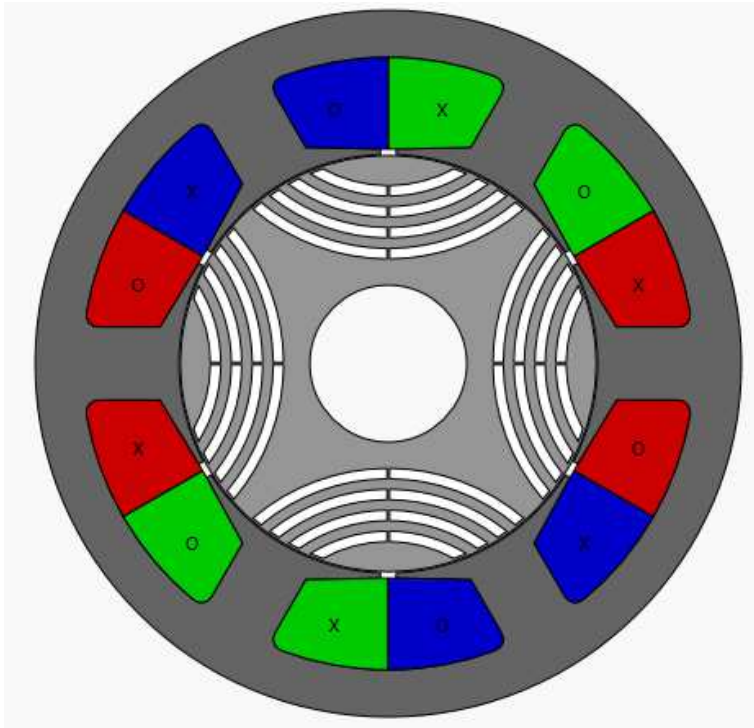


Fig. 8 Results of Torque analysis

Spezielle Aspekte / RSM mit konzentrierter Wicklung

Fortsetzung

RSM mit konzentrierter Wicklung BG 90



$T_{pp}/T_{av}=66.1\%$!

Fazit

- Eine bedeutende Steigerung der Drehmomentdichte und Wirkungsgrades kann im Bereich der kleinen und mittleren Baugrößen/Leistungen sogar unter Beibehaltung des ASM-Stators erreicht werden.
- Mehr Potential hinsichtlich der Verbesserung der Betriebsparameter ist bei optimierten Designs mit geändertem Stator zu erwarten.
- Für drehzahlgeregelte, energieeffiziente Antriebe stellt der RSM eine ernsthafte Alternative des ASM dar.

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*
- A. Boglietti, Experimental Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors Performance, IEEE*
- A. Boglietti, Induction and synchronous reluctance motors comparison, IEEE*
- L. Vicol, L. Strete, A Comparison between Cage Induction Motor and Variable Reluctance Synchronous Motor with Cageless Segmental Rotor, IEEE*
- 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*
- E.A. Ter-Markarjanz, Theoretische und experimentelle Untersuchung des Synchronen Reaktionsmotors, IEEE 1929*
- 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*

Literaturquellen (Fortsetzung)

J. S. Hsu, S. P. Liou, H. H. Woodson, COMPARISON OF THE NATURE OF TORQUE PRODUCTION IN RELUCTANCE AND INDUCTION MOTORS, IEEE 1990

D. Platt, Reluctance Motor with Strong Rotor Anisotropy, IEEE 1992

D.A. Staton, T.J.E. Miller, S.E. Wood: Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor, IEE 1993

T. Matsuo, T.A. Lipo, Rotor Design Optimisation of Synchronous Reluctance Machine, IEEE 1994

A. Consoli, G. Sxarcella, A. Testa, Self Synchronizing Torque Control of Reluctance Motor Drives IEEE 1996

D.Milijavec, P. Jereb, Can be Synchronous Reluctance Motor Compared with Induction Motor?, IEEE 1996

R. W. Fei, Analysis of Starting Performance and Frequency Characteristics of Synchronous Reluctance Motors, IEEE 1996

S.M.R. Sandri, M. Nagrial, MULTI-FLUX GUIDED ROTOR FOR VARIABLE SPEED RELUCTANCE MOTORS, IEEE 1997

H. Kiriya, S. Kawano, Y. Honda, T. Higaki, S. Morimoto, Y. Takea, High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry, IEEE 1998

X.B. Bomela, M.J. Kamper, Effect of Stator Chording and Rotor Skewing on Average Torque and Torque Ripple of Reluctance Synchronous Machine, IEEE 1999

H. Hofmann, S. R. Sanders, High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses, IEEE 2000

Choi, et al., Rotor optimum Design on torque ripple reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using RSM, IEEE 2007