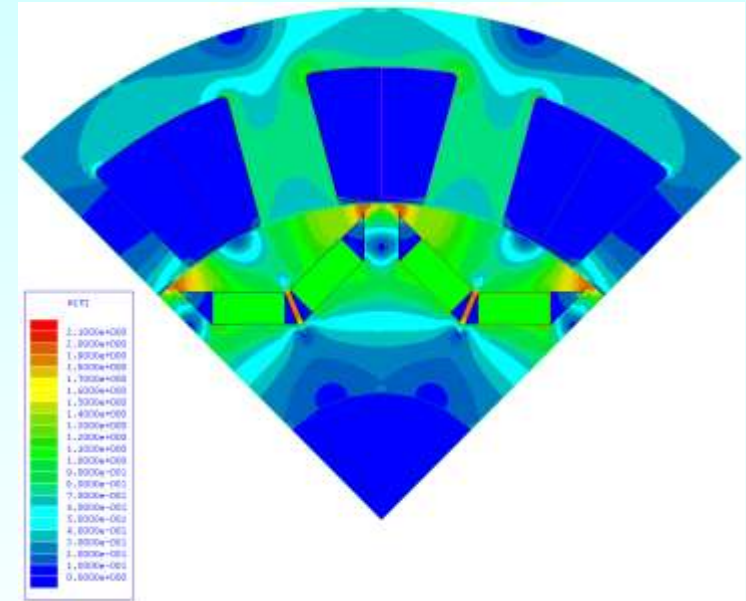
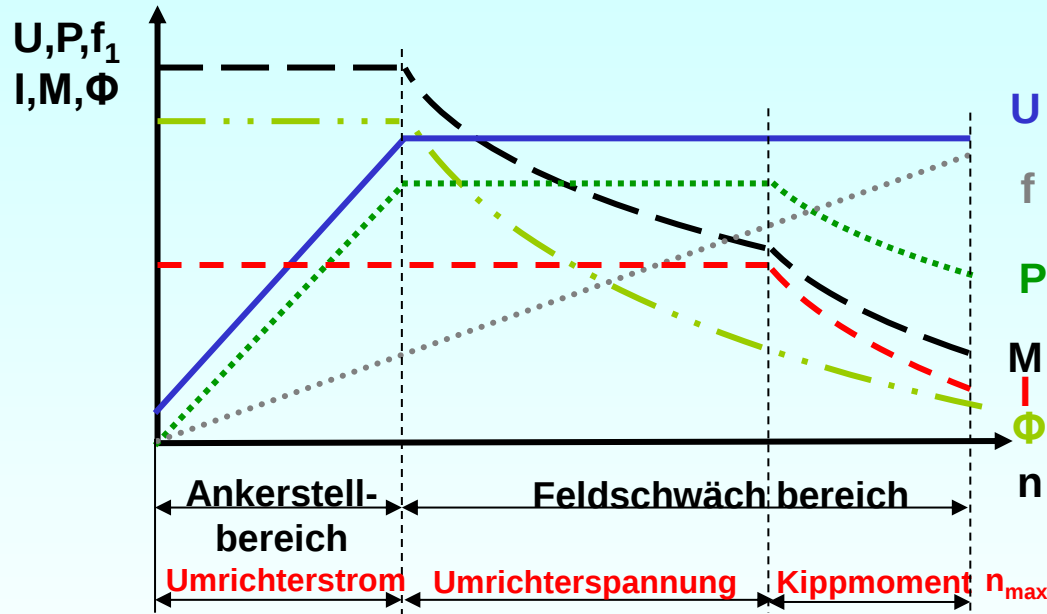


Vergleich unterschiedlicher Antriebstechnologien für elektrische Busantriebe



Univ.-Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. Harald Neudorfer

Institut für elektrische Energiewandlung / TU – Darmstadt

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe / TU - Wien

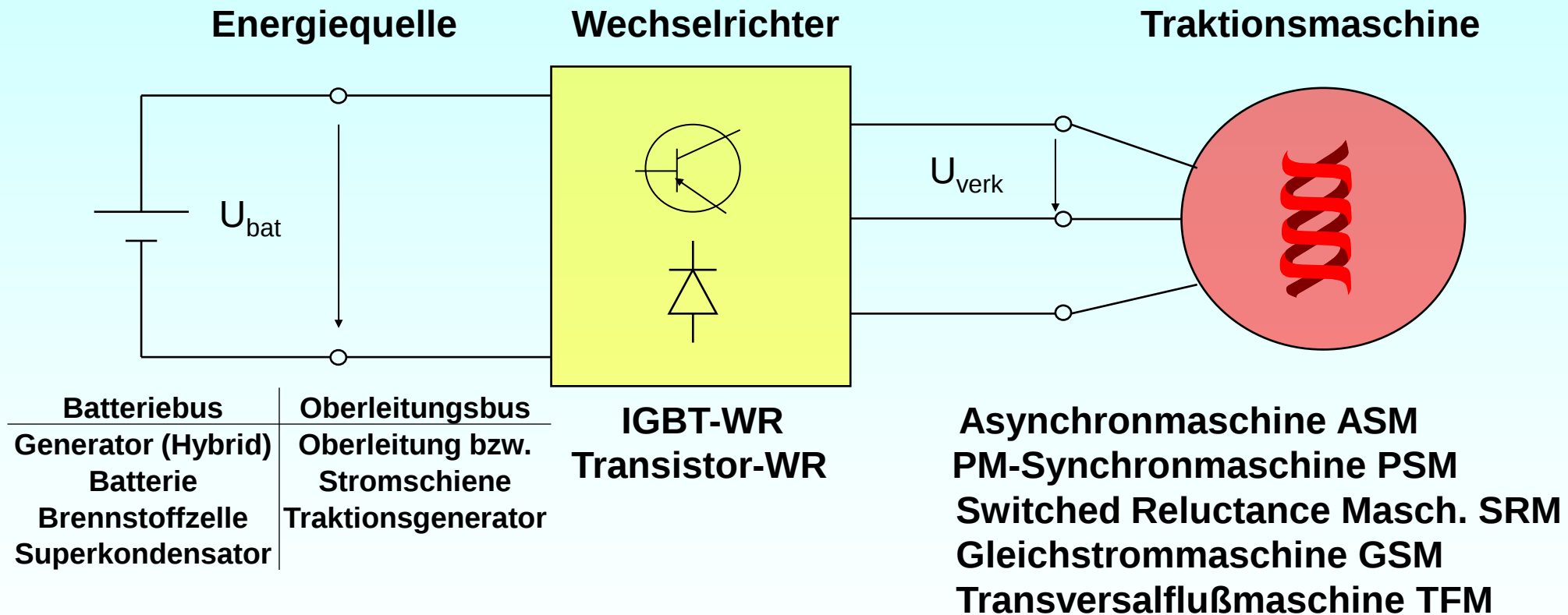
Traktionssysteme Austria GmbH TSA / Wiener Neudorf, Leitung Engineering



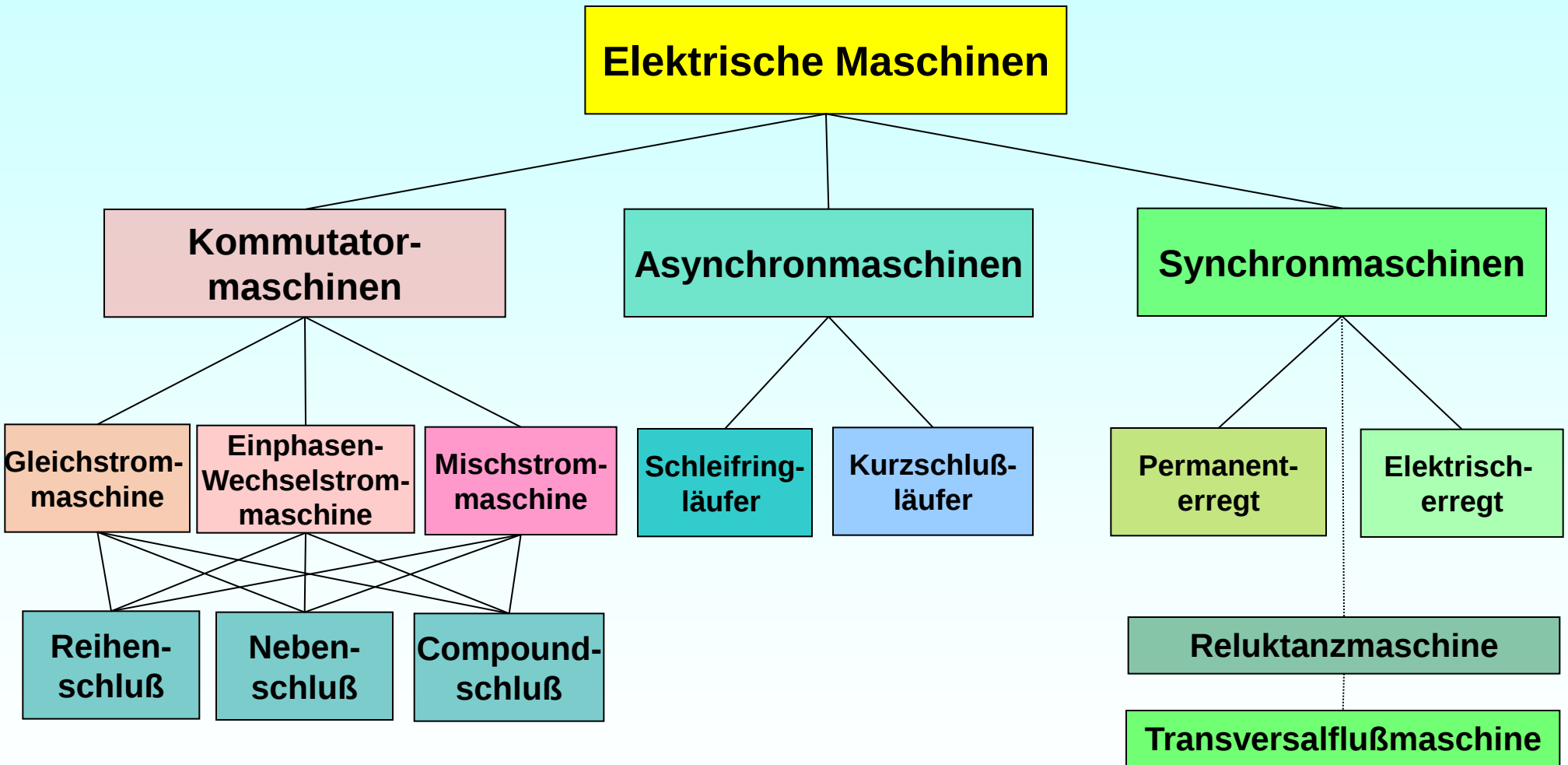
Grundlagen von elektrischen Maschinen

1. **Allgemeine Beanspruchung elektrischer Maschinen**
2. **Allgemeine Auslegungskriterien elektrischer Maschinen**
3. **Drehstromasynchronmaschine (ASM oder IM)**
4. **PM – Drehstromsynchronmaschine (PSM)**
5. **Vergleich ASM / PSM**
6. **Geschaltete Reluktanzmaschine SRM**
7. **Zusammenfassung**

- Grundstruktur des elektr. Antriebsstranges



Grundlagen von elektrische Maschinen



Einteilung der Elektrischen Maschinen



Grundlagen von elektrische Maschinen

Maschine	AS	PSM	SR	GS	TF
Momentendichte	+/-	++	+	-	++
Wirkungsgrad	+/-	++	+/-	-	+
Masse	+	++	+	-	++
Stand der Technik	++	+	+/-	++	--
Wechselrichter	+	+/-	-	++	--
Kosten Maschine	+/-	-*	+	--	-
Kosten System	+/-	+/-	-	+/-	-
Fertigung	+	-	++	-	--
Geräusch	+	++	-	+	--

AS: Asynchron-, PSM: Permanentmagnet-Synchron-, SR: Switched Reluctance-,
GS: Gleichstrom- TF: Transversalfluß-Maschine * Kosten der PM (Selten-Erden Materialien)



1. Allgemeine Beanspruchungen elektrischer Maschinen

Mechanische Beanspruchung

Stoßbelastung
Dichtungen bei rotierenden Teilen
kompakte Bauweise
Fliehkraftbelastungen auf dem rotierenden Teilen

Thermische Beanspruchung

Umgebungstemperatur:	- 30 °C bis +60 °C
Luftfeuchtigkeit:	bis 100 %
Thermische Ausnützung	
Isolationsklasse A- 200	max. mittlere Wicklungstemperaturen

Elektrische Beanspruchung

Sinusspeisung:	Prüfspannung lt. Norm
Wechselrichterspeisung:	$du/dt = \text{bis } 10 \text{ kV}/\mu\text{s}$ bei IGBT- WR

Lebensdauer:	Bus : 12 – 15 Jahre
--------------	---------------------



2. Allgemeine Auslegungskriterien elektrischer Maschinen

Innere Scheinleistung

$$S_N = D_i^2 \cdot l_{Fe} \cdot n \cdot \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \xi_1 \cdot A \cdot B_1$$

Esson'sche Leistungszahl

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \xi_1 \cdot A \cdot B_1$$

Drehmoment

$$M \sim D_i^2 \cdot l_{Fe} \cdot C \sim V_{Rotor} \cdot C$$

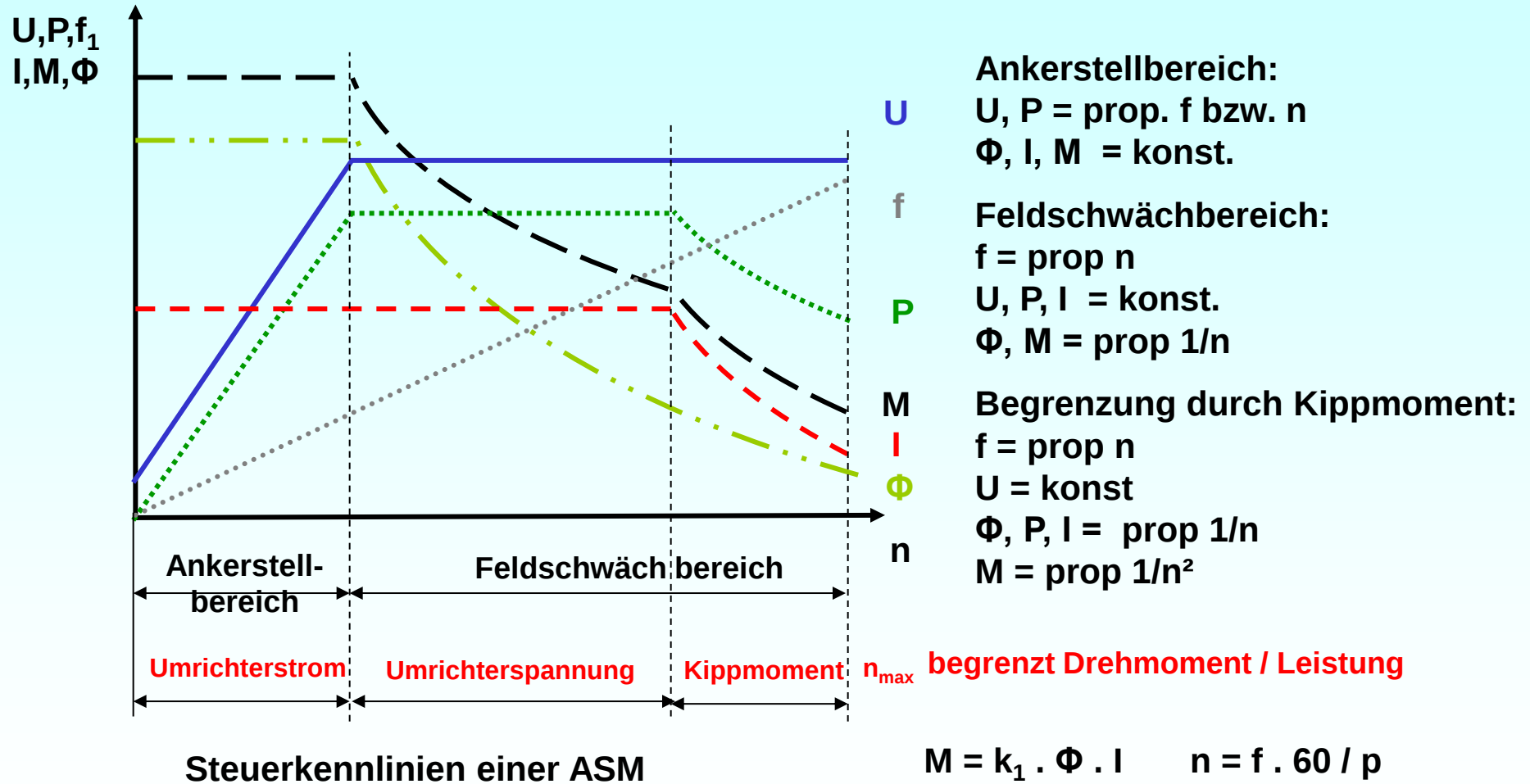
weitere Auslegungsparameter: Wärmeabfuhr, Fliehkräfte, thermische Klasse,
Stöße und Vibrationen, Umweltbedingungen, Einsatzdauer,...

		Industrieantriebe	Traktionsantriebe
Esson'sche Leistungszahl	kVAmin/m ³	2 bis 5*	3 bis 10*
Thermische Klasse	EN 60034/60085	B, F, H	200, (C), (220)
Einsatztemperatur	°C	- 20 bis 40	- 40 bis 60
Spannungsversorgung		Sinus bzw. WR	Wechselrichter WR

* je nach Baugröße, Kühlart, Einsatzbedingungen



3. Drehstromasynchronmaschine (ASM oder IM)



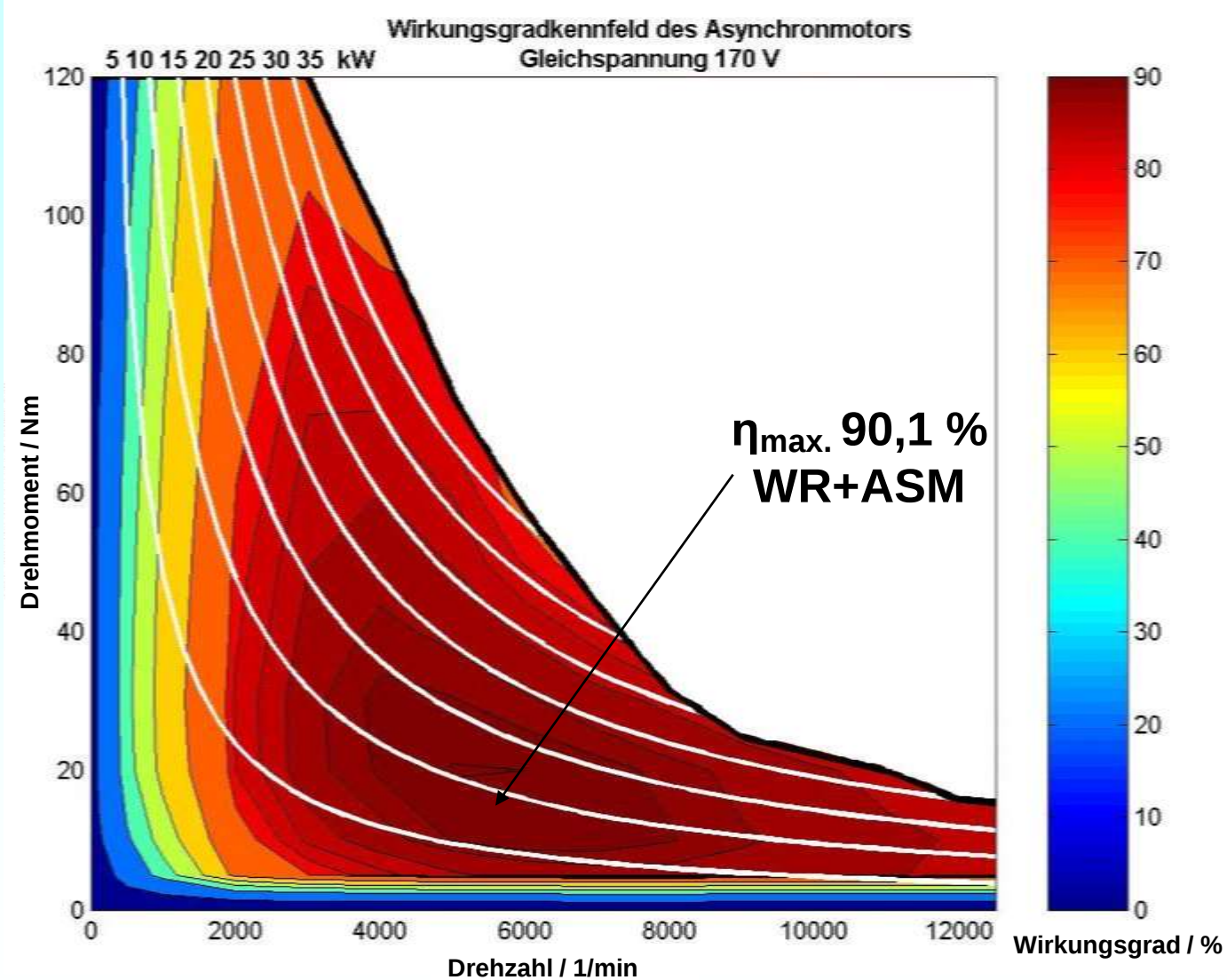
$$M = k_1 \cdot \Phi \cdot I \quad n = f \cdot 60 / p$$

$$s = (n_s - n_r) / n_s$$

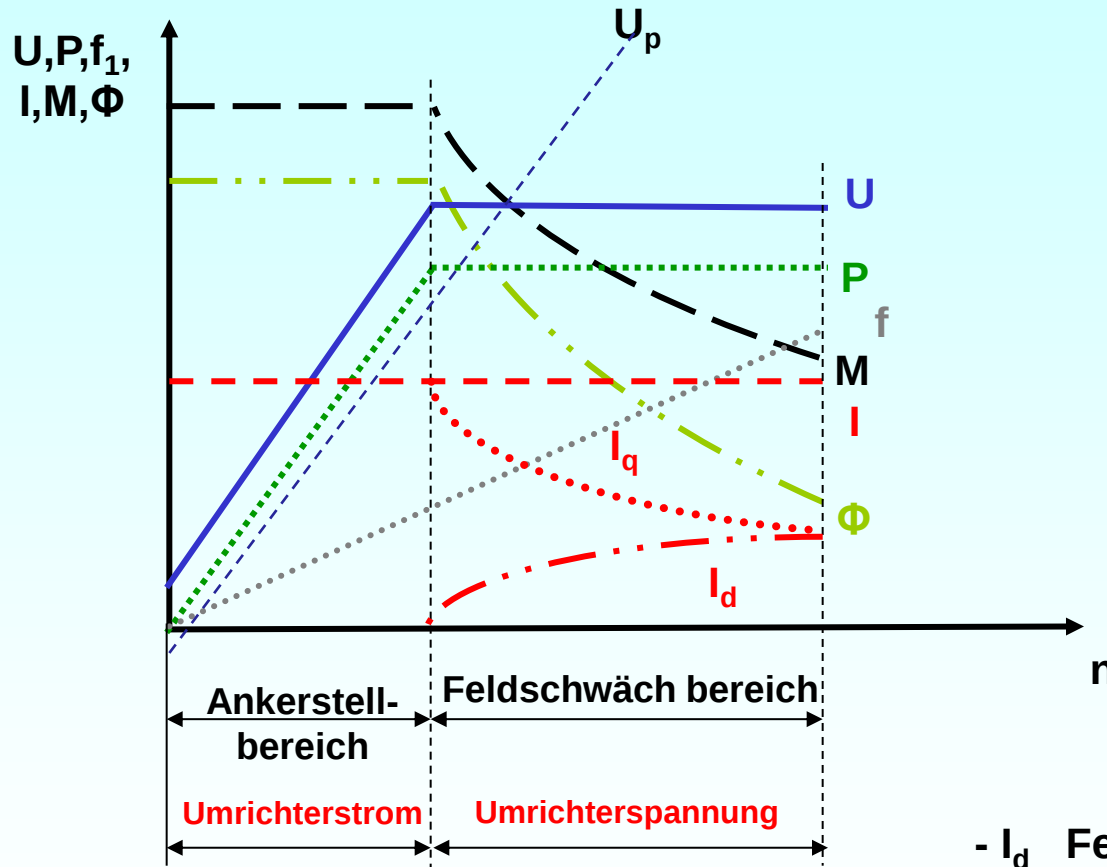


3. Drehstromasynchronmaschine (ASM oder IM)

ASM



4. PM - Drehstromsynchronmaschine (PSM)



$$U_p = k_1 \cdot n \cdot \Phi$$

$$M = k_2 \cdot I_q \cdot \Phi \quad (\text{bei } X_d = X_q)$$

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2$$

$$M \sim I_q \cdot \Psi + (X_d - X_q) \cdot I_d \cdot I_q$$

bei vergrabenen Magneten
 $X_d < X_q$

bei negativen I_d wirkt das
 Reluktanzmoment positiv

- I_d Feldschwächender Strom

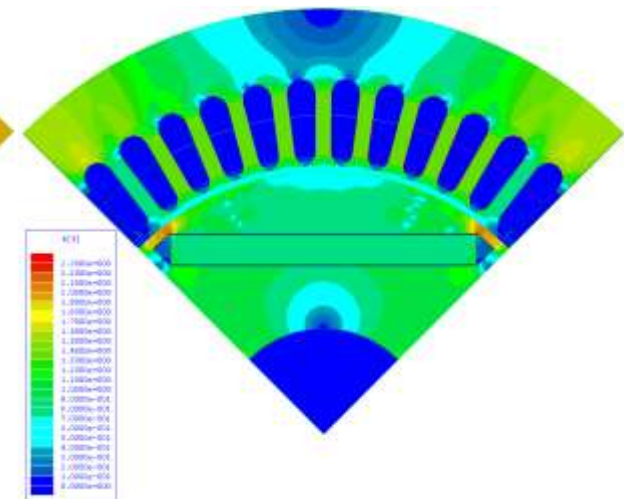
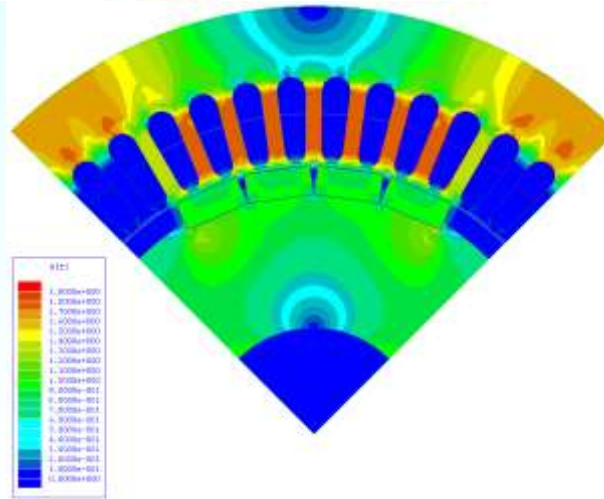
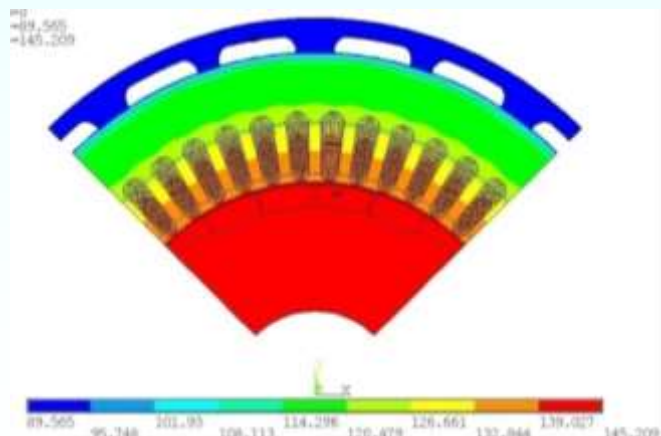
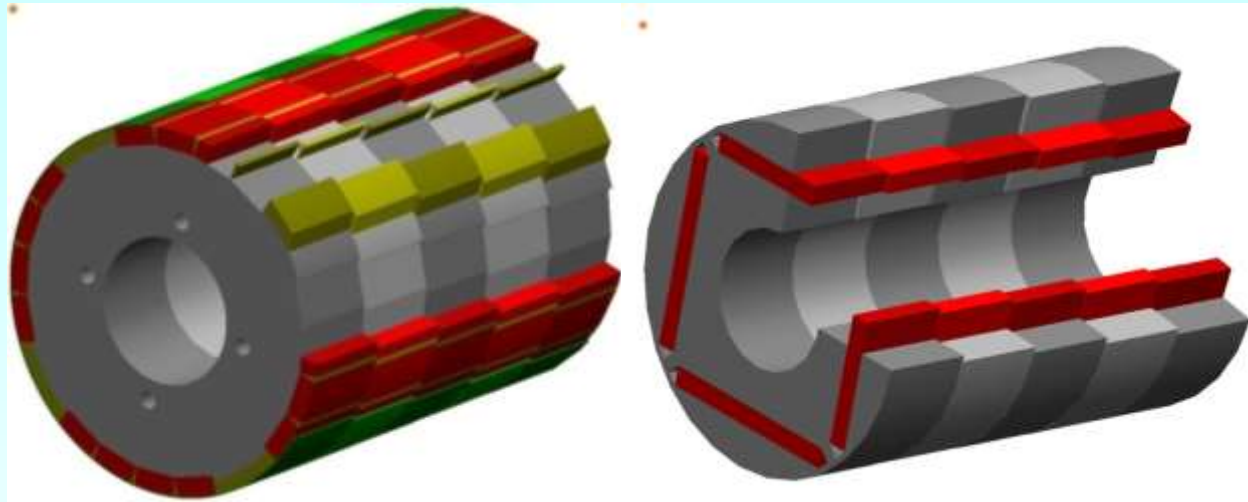
Steuerkennlinie einer PSM (Permanentmagnet –Synchronmaschine)



4. PM - Drehstromsynchronmaschine (PSM)

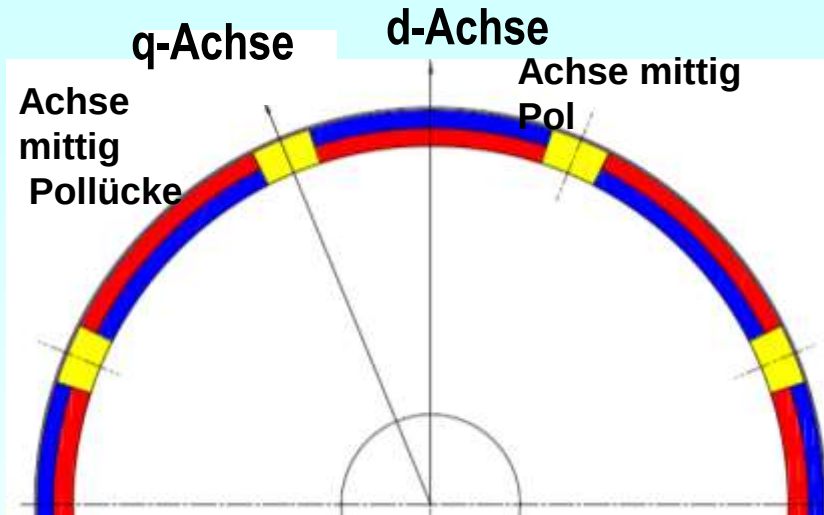
PM-Synchronmaschine PSM

- Drehfeldwicklung oder Einzelzahnwicklung
- Rotor mit Oberflächen- oder vergrabenen PM
- Rotorlagegeber
- + hoher Wirkungsgrad
- + geringe Rotorverluste
- Grenztemperatur der Magnete
- Längsstrom f. Feldschwächung



4. PM - Drehstromsynchronmaschine (PSM)

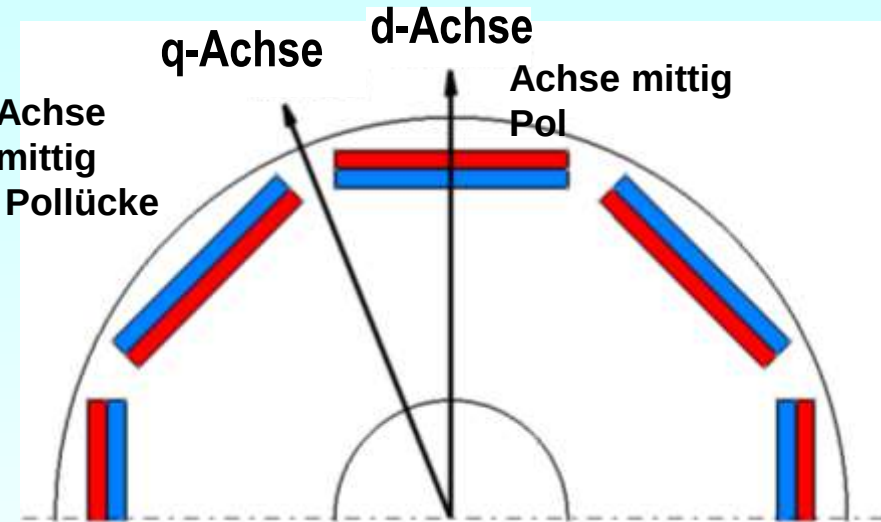
Rotorgeometrie bei PM-Maschinen



Prinzipielle Anordnung von
Oberflächenmagneten $2p = 8$
 $X_d = X_q$

Nachteile:

- Verwendung einer Bandage
- Wirbelstromverluste in PM



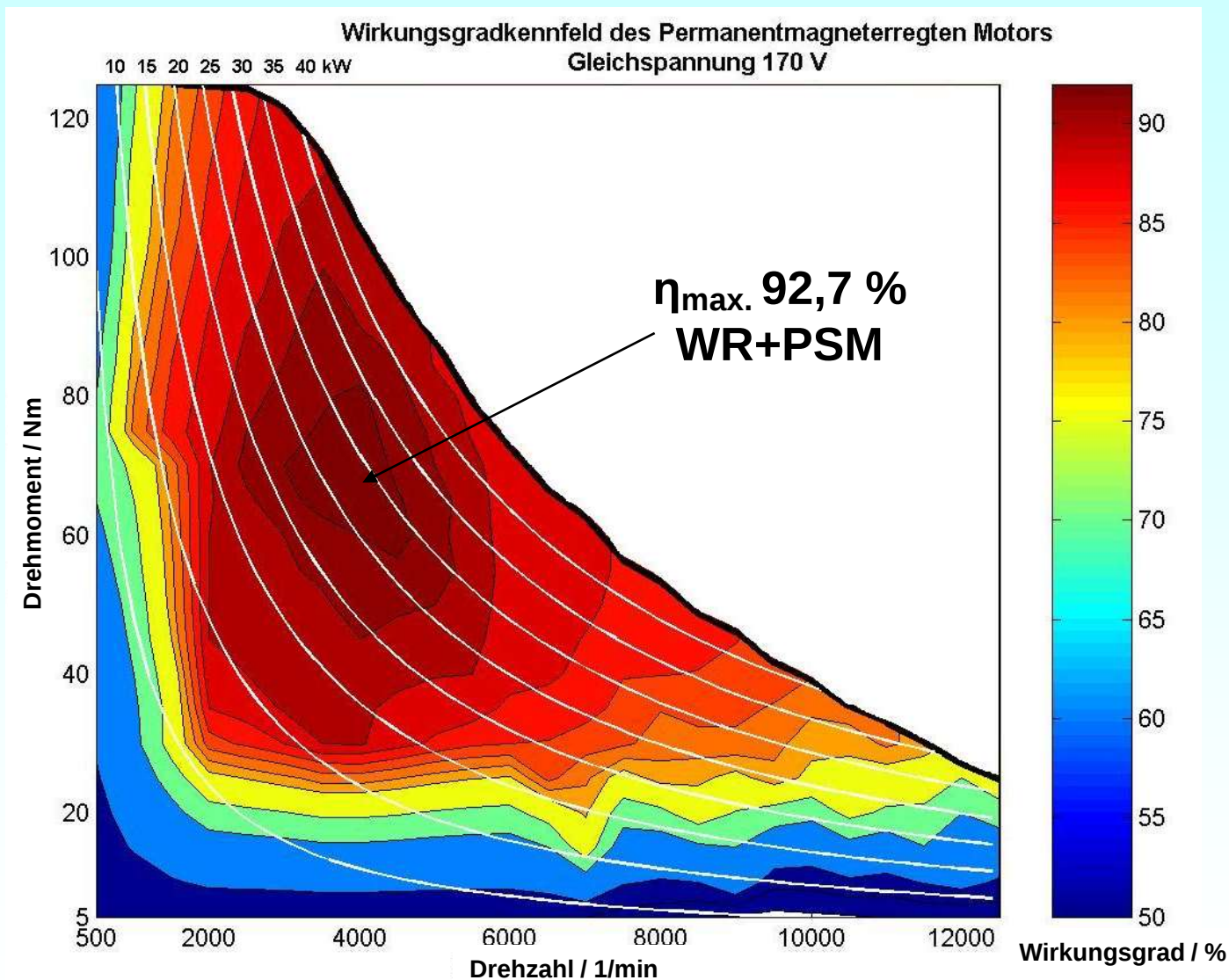
Prinzipielle Anordnung von
vergrabenen Magneten $2p = 8$
 $X_d < X_q$

Vorteile:

- mech. Belastung in Rotorblechpaket
- geringe Verluste in PM

4. PM - Drehstromsynchronmaschine (PSM)

PSM



5. Vergleich ASM / PSM

Typ	TMF 35-28-4	TMPF 35-28-8
Art	ASM	PSM
P	120 kW	200 kW
n	1705 min ⁻¹	1925 min ⁻¹
M	672 Nm	993 Nm
$\dot{V}$	0,25 m ³ /s	0,25 m ³ /s
m	350 kg	342 kg
$\eta_{\max}$	92,6 %	96,5 %



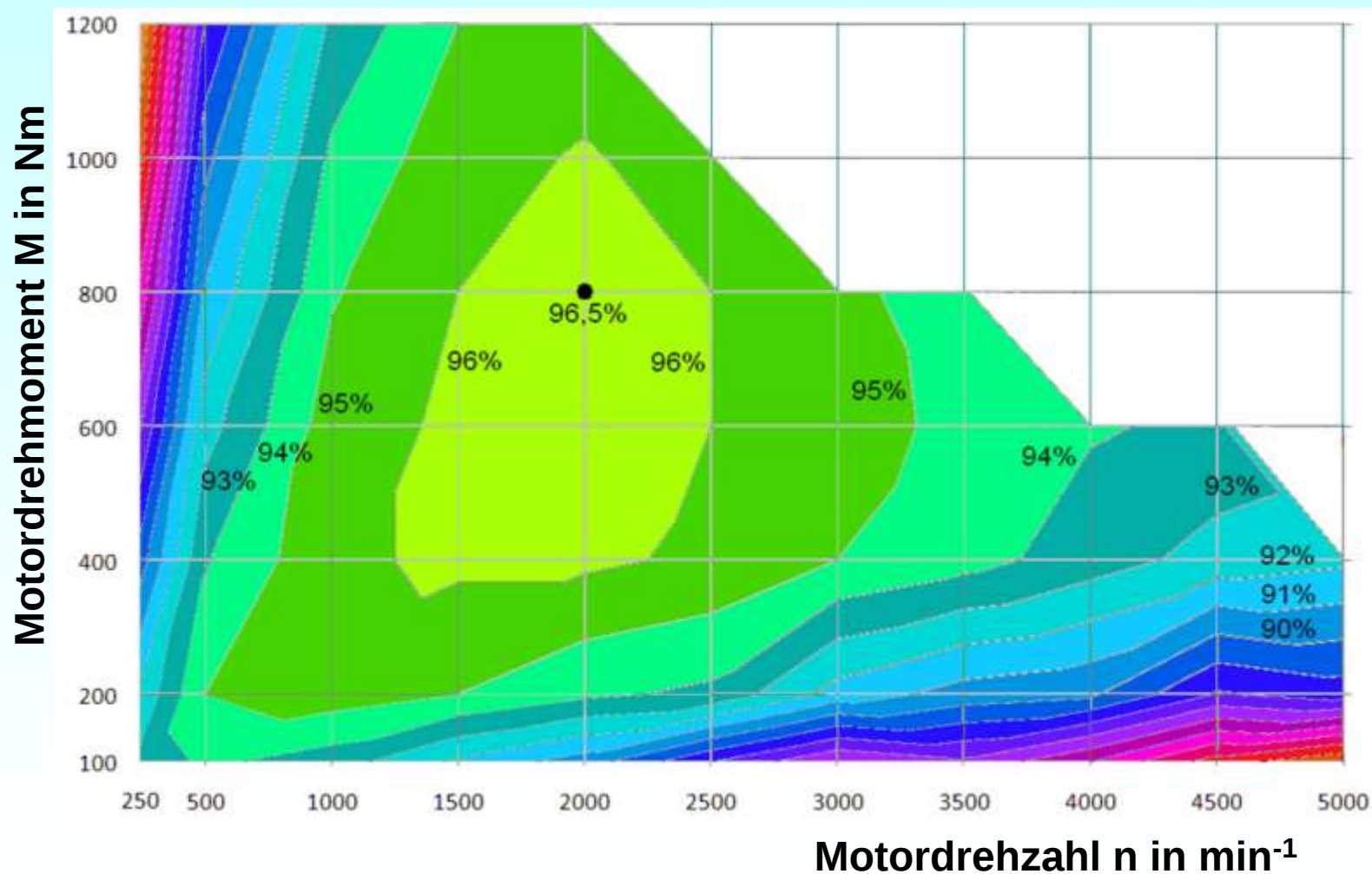
TMPF 35-28-8

Steigerung der abgegebenen mechanischen Leistung: 67 %

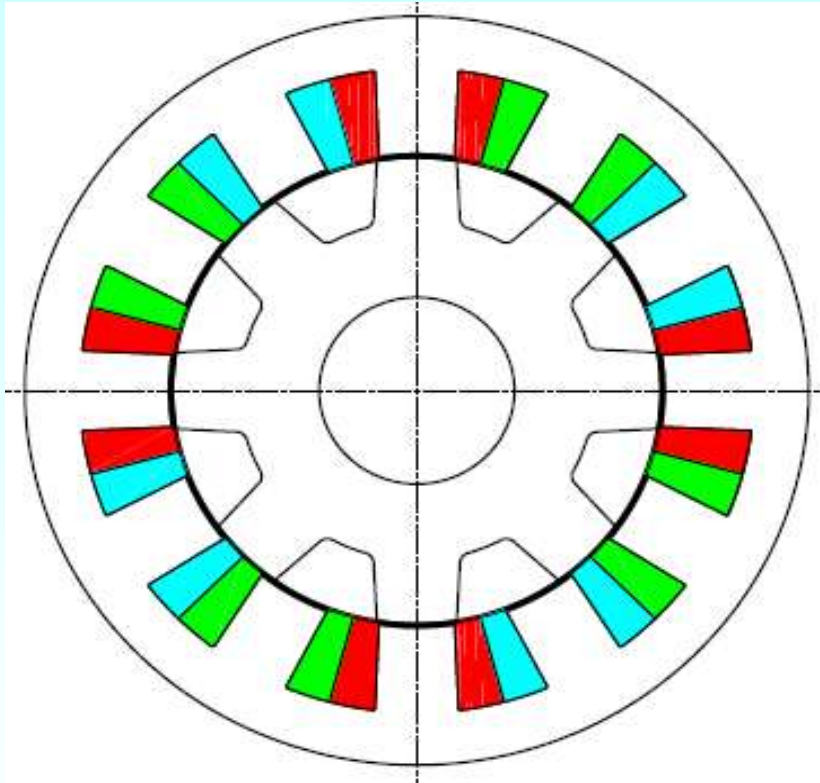
Steigerung des abgegebenen mechanischen Drehmomentes: 48 %

5. Vergleich ASM / PSM

PM-Motor TMPF 35-28-8: Wirkungsgrad Kennlinienfeld

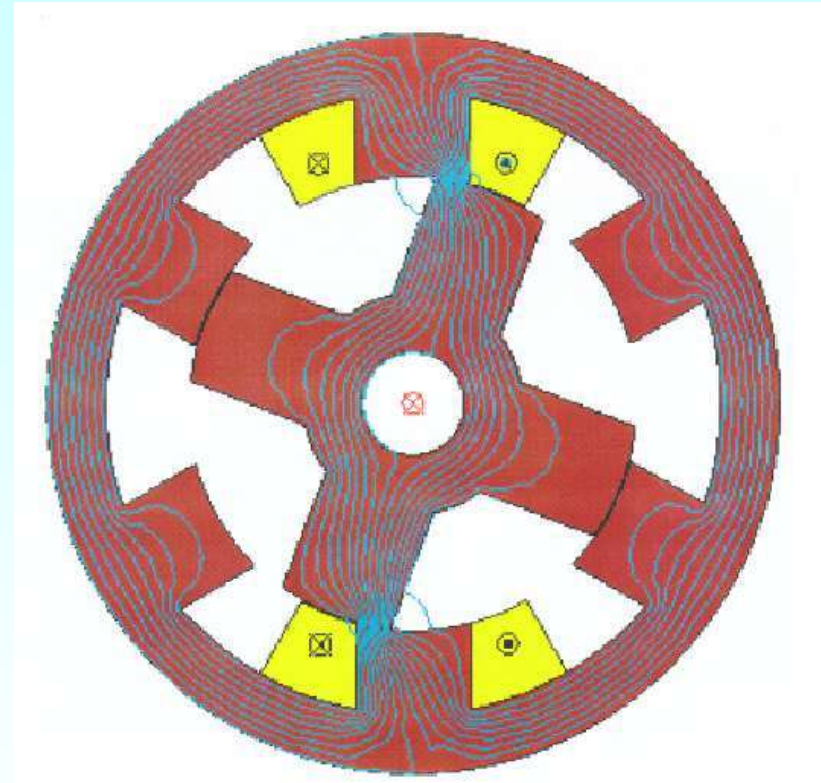


6. Geschaltete Reluktanzmaschine SRM



Blechquerschnitt [3]

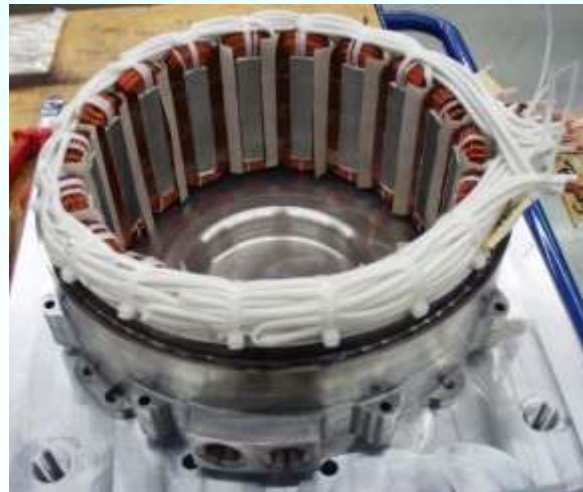
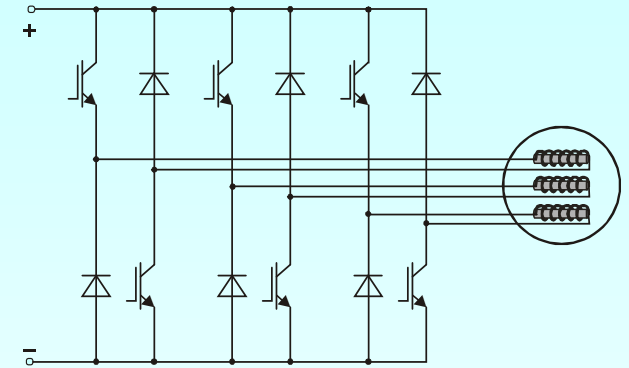
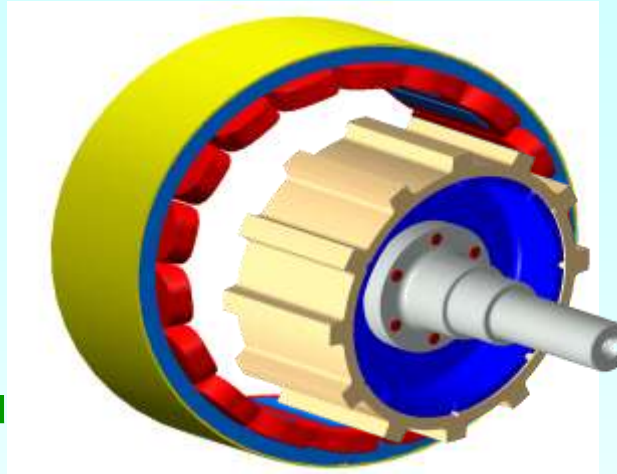
12 Statorzähne, 8 Rotorzähne



Magnetischer Fluss bei einer 6/4 SRM

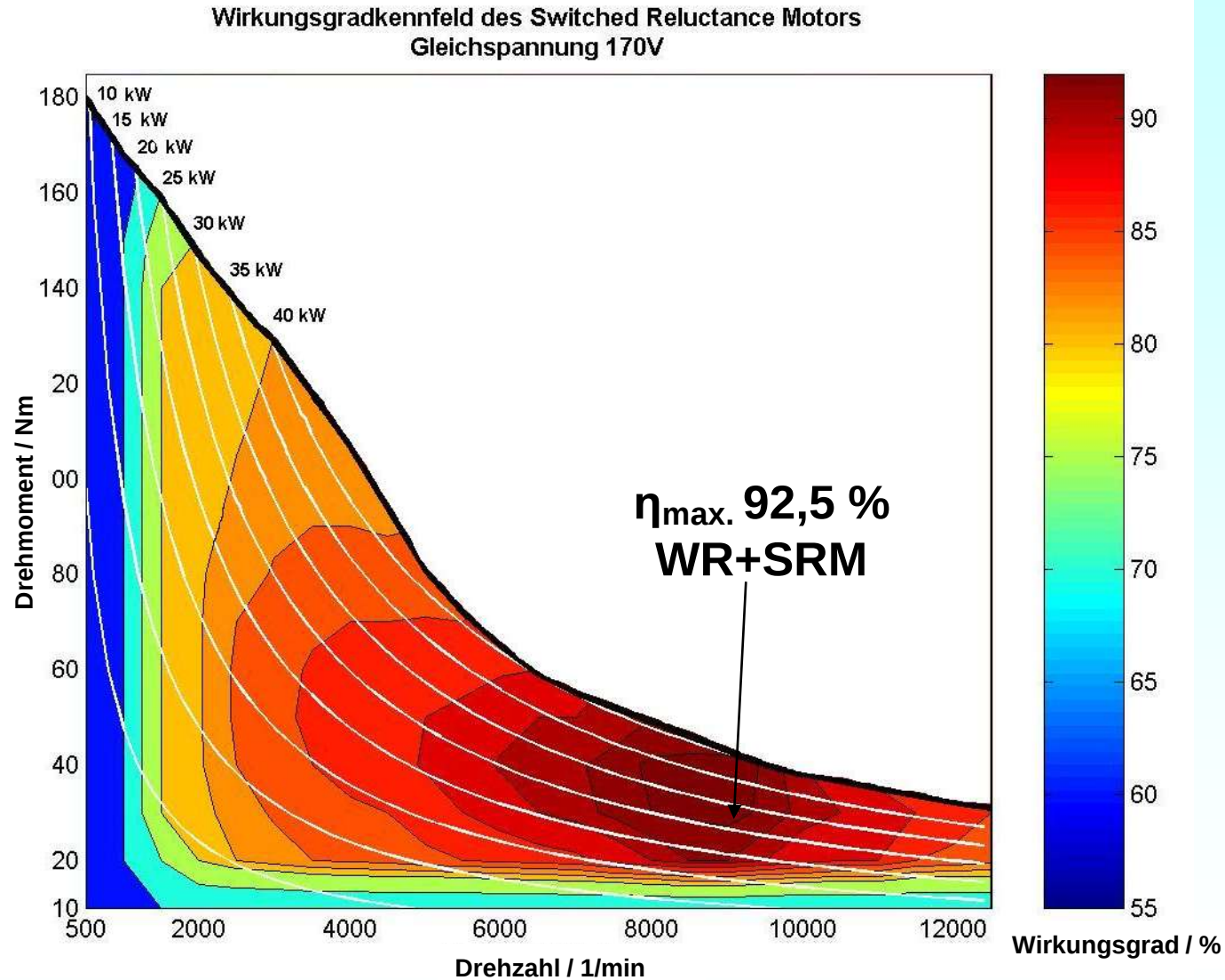
6. Geschaltete Reluktanzmaschine SRM

- Einzelzahnwicklung
- Rotor nur Blechpaket
- Rotorlagegeber
 - + geringe Kosten
 - + einfacher Rotoraufbau
- 6 Anschlußleitungen
- Motorsteuerung
- Eisenverluste bei $f_{\max}$
- Geräuschemission



6. Geschaltete Reluktanzmaschine SRM

SRM



7. Zusammenfassung

- Das Antriebssystem für Straßen- und Schienenfahrzeuge besteht aus Energiequelle, Wechselrichter und Traktionsmaschine.
- Der Wirkungsgrad der permanenterregten Synchronmaschine ist gegenüber der Asynchronmaschine im Nennpunkt um ca. 2 – 3 %Punkte höher. Bei Betriebspunkten mit niedriger Drehzahl und hohem Drehmoment kann der Unterschied bis zu 20 %Punkte betragen.
- Permanenterregte Synchronmaschinen haben aufgrund ihrer Permanentmagnete vor allem im Störfall einige Problemfelder, die jedoch technisch beherrschbar sind.
- Die Weiterentwicklungen bei Traktionsmaschinen allgemein sind in erster Linie von dem Einsatz innovativer Materialien abhängig.
- Der Wirkungsgrad von Energiewandlern von elektromechanischen Energiewandlern liegt derzeit in Abhängigkeit von Maschinentype und Umrichterkonfiguration bei ca. 92 – 96 %. Aus diesem Grund ist eine weitere Steigerung physikalisch gesehen endend.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Traktionssysteme Austria GmbH

Tel: 0043-2236-8118-250

Handy: 0043-699-18118250

e-mail: harald.neudorfer@traktionssysteme.at

hneudorfer@ew.tu-darmstadt.de

Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger
Staatlich befugter und beeideter Ziviltechniker(mit ruhender Befugnis)
Professor an der TU - Darmstadt und Lehrbeauftragter an der TU - Wien

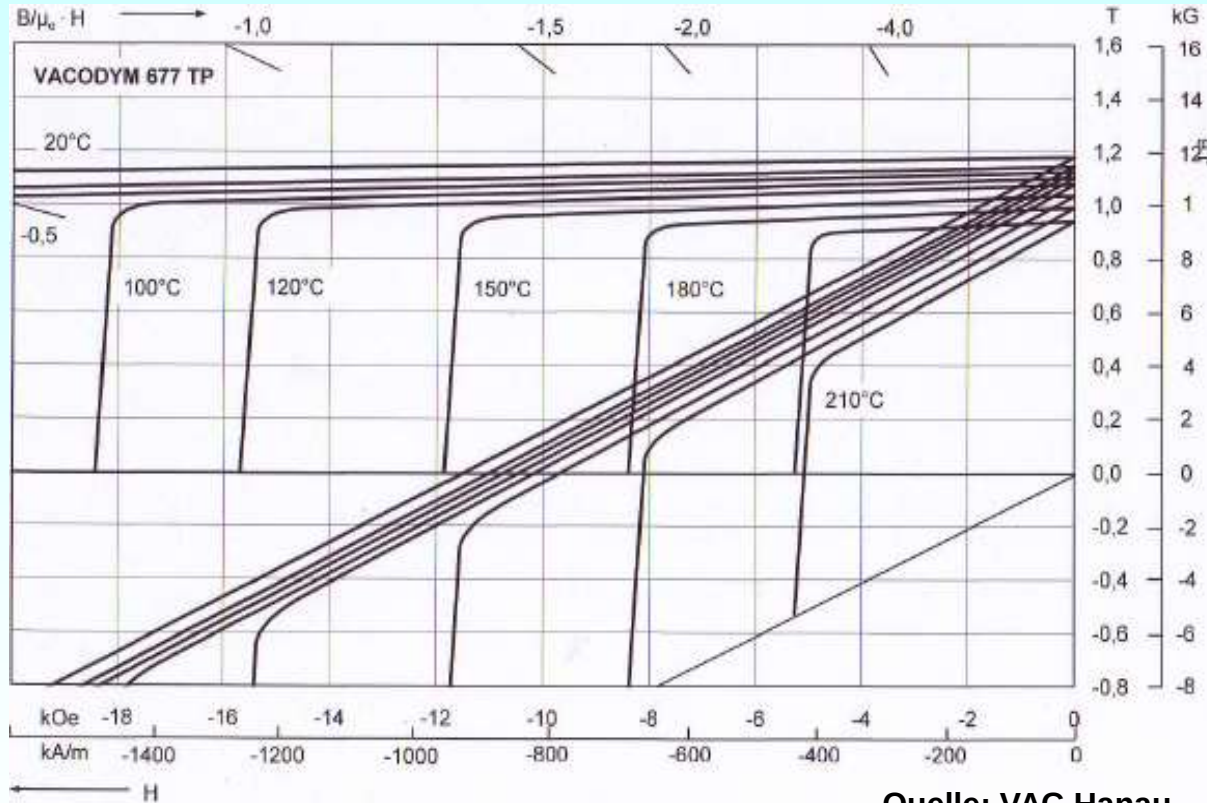


BACK-UP



Grundlagen von elektrische Maschinen

B-H-Kennlinie von Vacodym 677 TP



Quelle: VAC Hanau

B-H-Kennlinie im 2. Quadranten

$$B_R, H_c = f(\vartheta)$$

Arten von Magneten:

- Aluminium Nickel Kobalt

$$B_R = 0,8 - 1,2 \text{ T}$$

$$H_c = 80 - 120 \text{ kA/m}$$

$$w = 100 - 150 \text{ kJ/m}^3$$

- Ferrite

$$B_R = 0,3 - 0,5 \text{ T}$$

$$H_c = 200 - 400 \text{ kA/m}$$

$$w = 30 - 50 \text{ kJ/m}^3$$

- Selten-Erde (NdFeB)

$$B_R = 1,0 - 1,2 \text{ T}$$

$$H_c = 800 - 1400 \text{ kA/m}$$

$$w = 300 - 350 \text{ kJ/m}^3$$

$$\text{NdFeB: } \alpha = 0,0009 \text{ K}^{-1}$$

$$\text{SmCo: } \alpha = 0,0003 \text{ K}^{-1}$$



Verfügbarkeit von Rohstoffen für Permanentmagnet - Maschinen

Seltene Erden: 17 Metalle Vorkommen in der Erdkruste weit häufiger als Edelmetalle, jedoch ist die Aufbereitung sehr aufwändig

14 Metalle Lanthanoide (OZ 58 -71), La, Sc, Y (Nebengruppe IIIb)

(für PM) Cerium Ce, Dysprosium Dy, Erbium Er, Europium Eu, Gadolinium Gd, Holmium Ho, Lanthan La, Lutetium Lu, Neodym Nd, Praseodym Pr, Promethium Pm, Samarium Sm, Scandium Sc, Terbium Tb, Thulium Tm, Ytterbium Yb, Yttrium Y

Wachstum von 1997 – 2007: 20- fache *

Katalysatoren für Raffination: 25 %

Glas,- Keramikindustrie 20 %

Metallurgie 10%

Weltweiter Bedarf 2010: 136.000 t *

Batterien 13 %

Permanentmagnete 25 %

Bildschirmindustrie 6 %

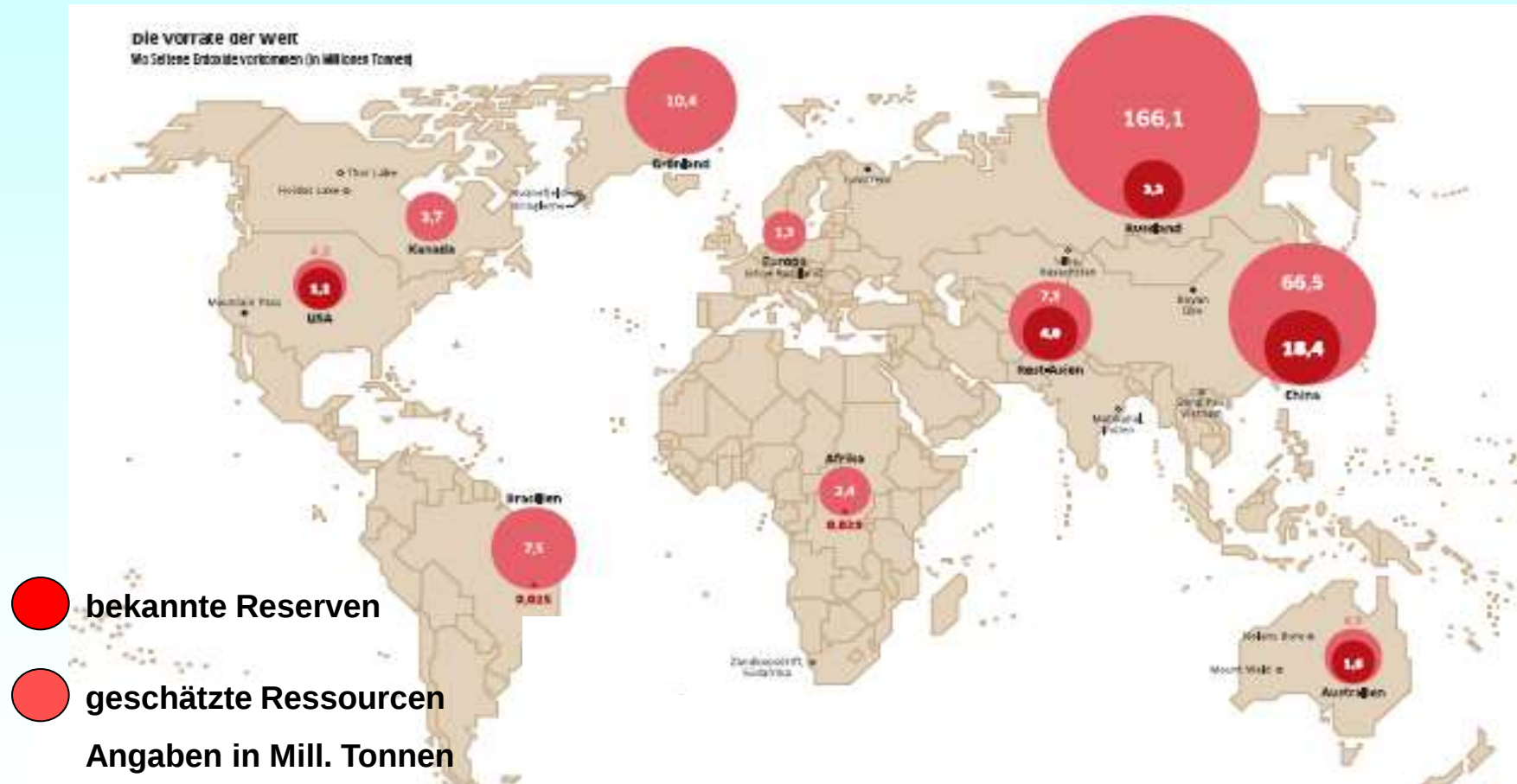
Atomindustrie 1 %

* Quelle: Prof. Dr. Jüstel, Uni Münster 2010



Wirtschaftliche Risiken

Seltene Erdenoxide: Vorräte der Welt

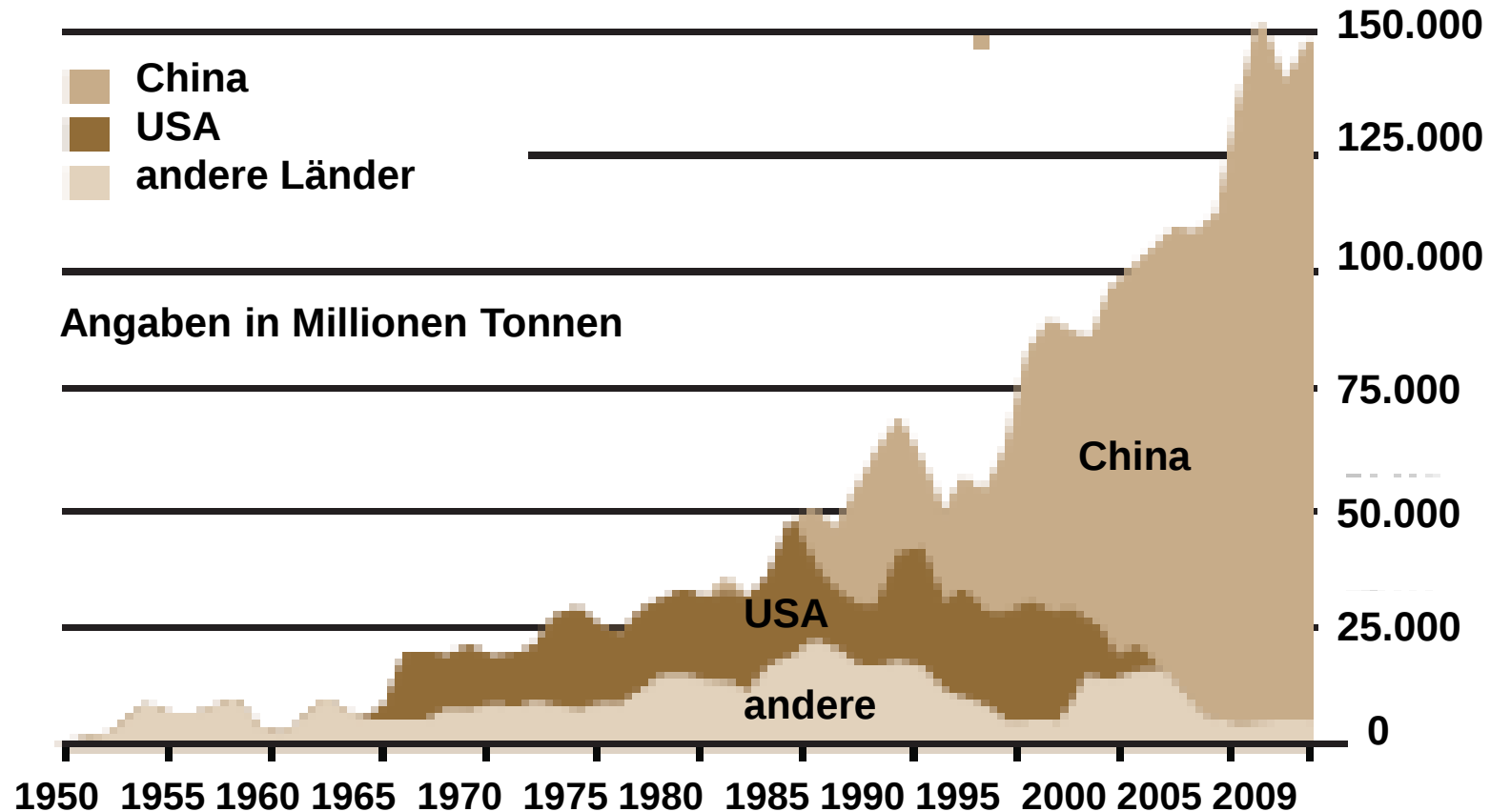


Quelle: GREENPEACE MAGAZIN 2.11; Infografik Carsten Raffel, Bundesanstalt für Geowissenschaften Rohstoffe (BRG) U.S. Geological Survey



Wirtschaftliche Risiken

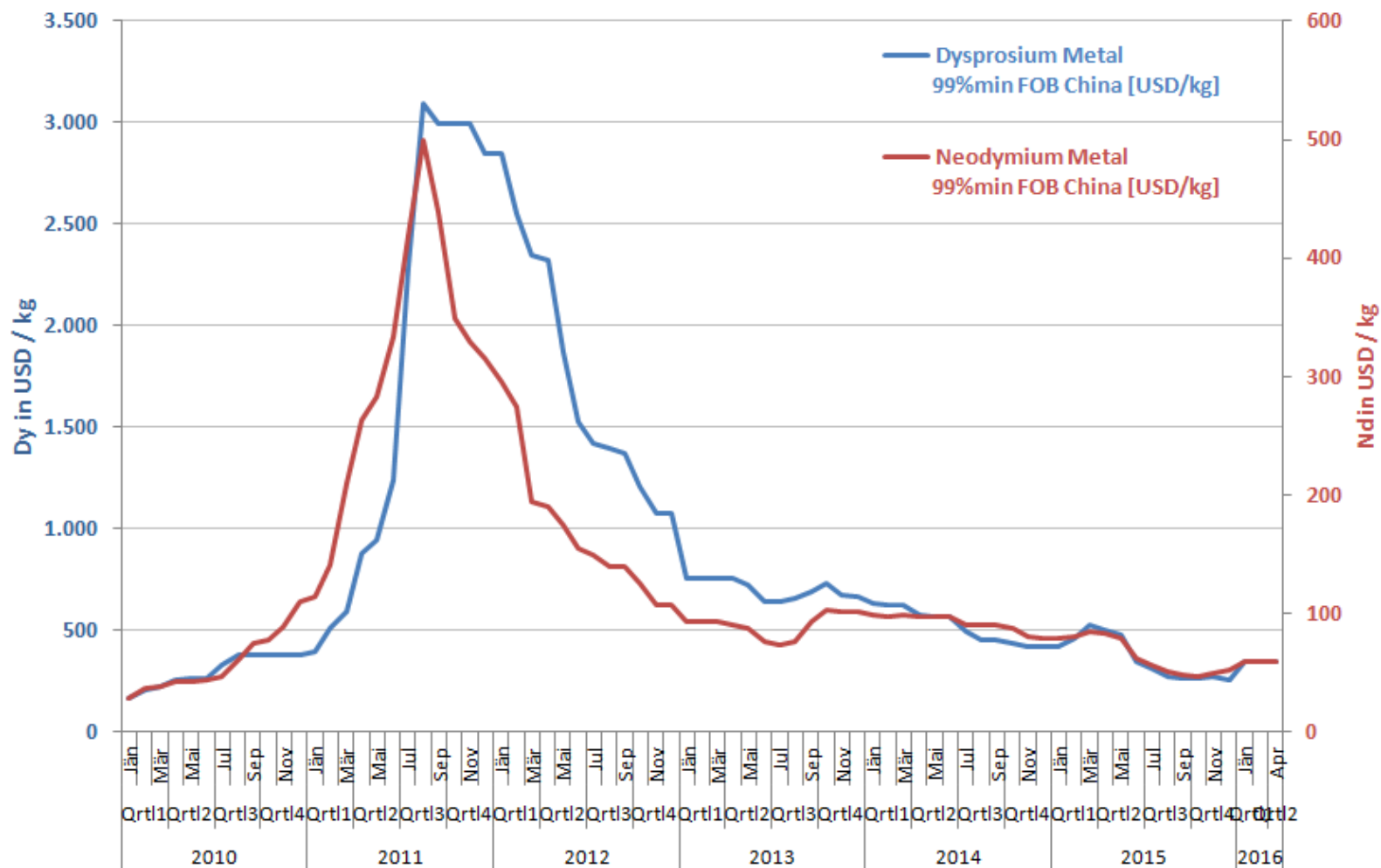
Förderung von seltenen Erdenoxiden



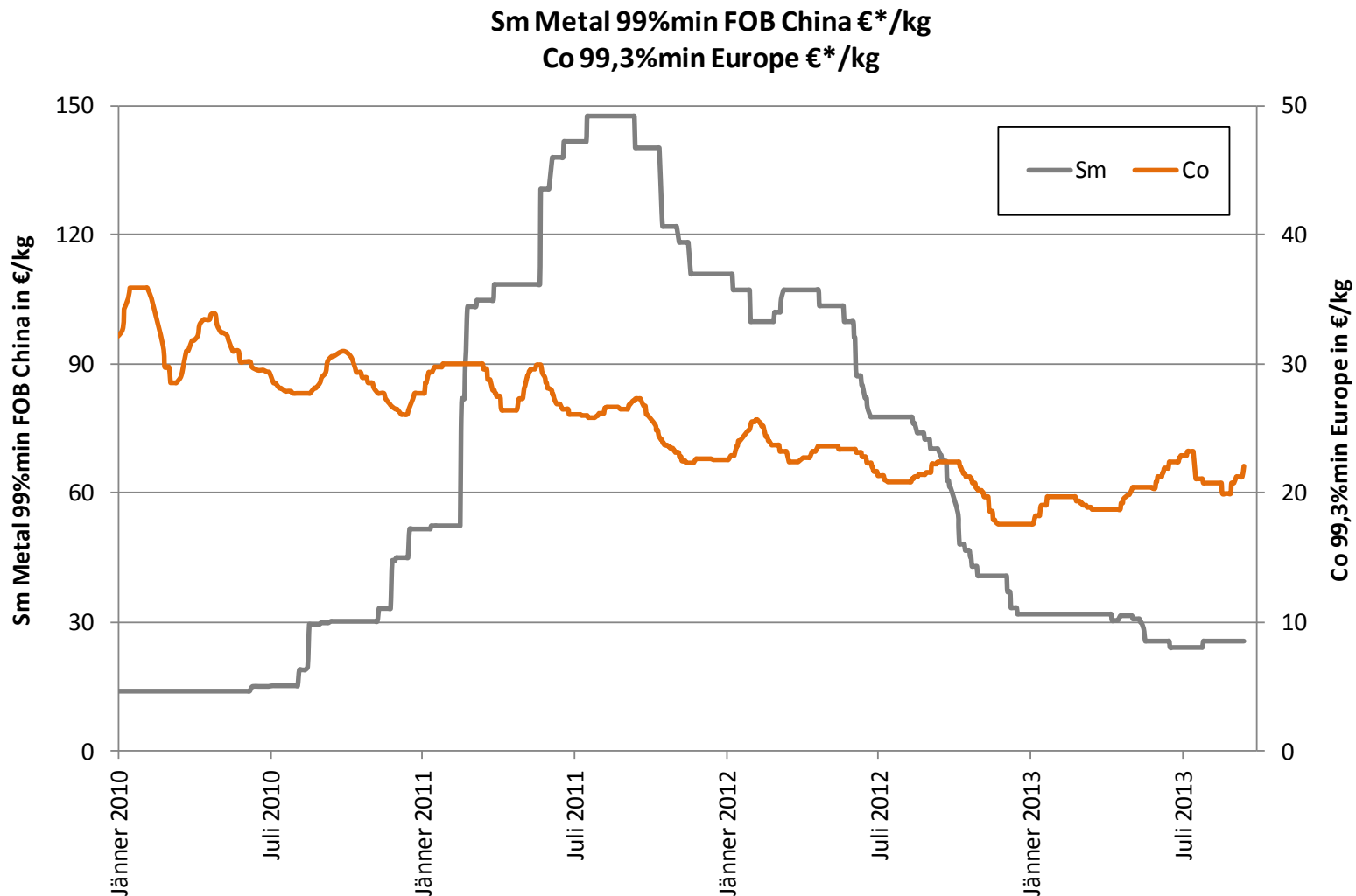
Quelle: GREENPEACE MAGAZIN 2.11; Infografik Carsten Raffel, Bundesanstalt für Geowissenschaften Rohstoffe (BRG) U.S. Geological Survey)



Preisentwicklung Selten Erde Materialien für PM



Preisentwicklung Selten Erde Materialien für PM



Quelle: Asian Metal

* Rohstoffpreise mit fixem Kurs vom 20.09.2013 von USD in € umgerechnet



Problemfelder bei der Anwendung von PSM als Antriebsmotor (1)

1) Ausfall der Wechselrichtersteuerung bei hohen Drehzahlen

wenn $n > n_{\max}$ $U_p > U_{s \max}$ wenn $I_{sd} = 0$

Problem: max. Spannungsfestigkeit der Halbleiterbauelemente im WR wird überschritten

Lösungsansatz: Elektronischer Schalter zwischen WR und PSM

2) Schleppverluste bei Rollphasen des Triebfahrzeuges

Eisenverluste vor allem im Stator durch magnetischen Fluss der PM.

Lösungsansatz: Feldschwächender negativer I_{sd} verringert magnetischen Fluss, erzeugt jedoch Kupferverluste

Problemfelder bei der Anwendung von PSM als Antriebsmotor (2)

3) Kurzschlussstrom bei Schaden in der Statorwicklung

Durch mag. Fluss der PM wird in der angetriebenen Maschine (Generator) ein Dauerkurzschlussstrom fließen. Dadurch entsteht ein Bremsmoment an dieser Traktionsmaschine.

Lösungsansatz: Dauerkurzschlussstrom ca. 2-3 x Nennstrom, bei üblicher Zeitkonstante der Maschine Betrieb einige Minuten mit thermischer Überlast möglich. „Selbstheilungseffekt“ durch Übertemperatur und Entmagnetisierung der PM.

4) Notwendigkeit eines Rotorlagegebers

Die Winkelposition des Rotors ist für die Regelung von I_{sq} und I_{sd} notwendig.

Lösungsansatz: Geberlose Regelung (z.B. INFORM-Verfahren der TU-Wien)

Problemfelder bei der Anwendung von PSM als Antriebsmotor (3)

5) Temperaturabhängigkeit des magnetischen Flusses der PM

Motor: $M = k \cdot \Phi \cdot I_{sq}$ $T \text{ steigt} \rightarrow \Phi \text{ sinkt}$

Motor: Verminderung des Drehmoments

Generator: $U = k \cdot \Phi \cdot n$ $T \text{ steigt} \rightarrow \Phi \text{ sinkt}$

Generator: Verminderung der Polradspannung

6) Für Feldschwächung muss ein nicht direkt drehmomentbildender Strom I_d in die Statorwicklung eingeprägt werden

Das bewirkt eine Erhöhung der Statorkupferverluste ($P_{\text{ver}} = I_s^2 \cdot R$), vor allem im hohen Drehzahlbereich. Bei PSM mit vergrabenen Permanentmagneten kann jedoch das zusätzlich Reluktanzmoment ausgenutzt werden.

7) Kein Gruppenantrieb möglich

Pro PM-Maschine ist ein eigener Wechselrichter notwendig