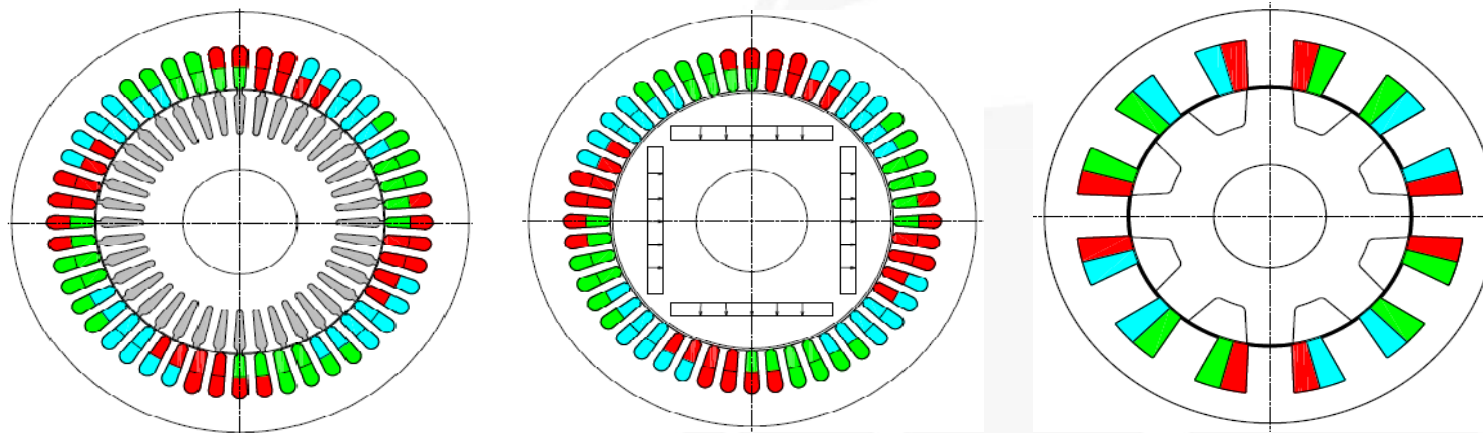


Innovative Elektrische Antriebe – erfolgreich durch Intelligenz und Effizienz
Vortrag 11. April 2008, ÖVE - Wien

Vergleich unterschiedlicher Antriebsmaschinen im Traktionsbereich



Anlässlich des 80. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr. techn. Hans Kleinrath

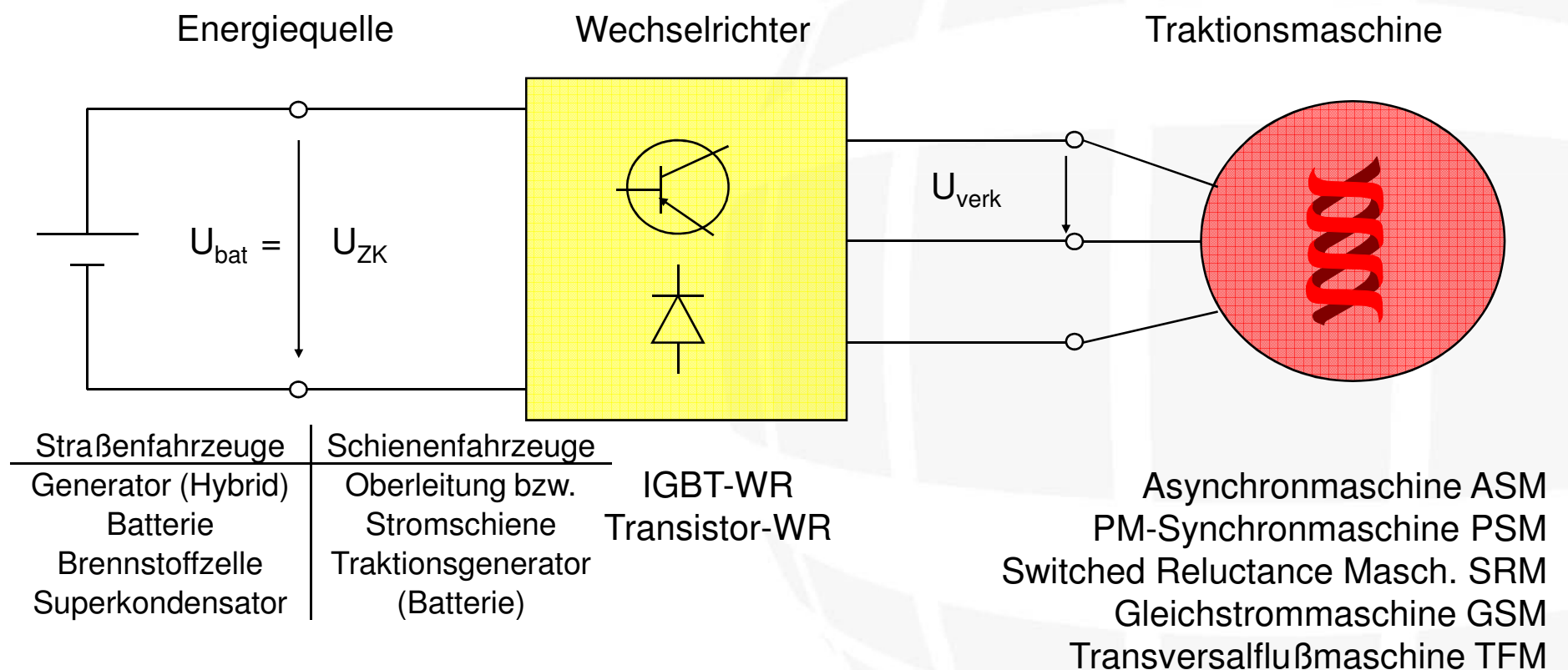
Univ.- Lektor Dr. techn. Dr. phil. Harald Neudorfer
Traktionssysteme Austria GmbH / Wr. Neudorf
Institut für elektrische Energiewandlung / TU Darmstadt

Vortragsübersicht

- Elektrisches Antriebssystem
- Maschinen- und Systemvergleich ASM – PSM – SRM für die Straße
 - Elektromagnetische FE-Berechnungen
 - Thermische FE-Berechnung
 - Mechanische FE-Berechnung
 - Baugrößen- und Kostenvergleich
- Radnabenantrieb: Vergleich ASM-PSM-TFM für die Schiene
- Maschinenvergleich ASM- PSM für ein Metro - Fahrzeug
- Zusammenfassung

Elektrisches Antriebssystem

- Grundstruktur des elektr. Antriebsstranges



Elektrisches Antriebssystem

	Straßenfahrzeuge	Schienenfahrzeuge
Lebensdauer	10 Jahre	30 Jahre
Kühlarten	Flüssigkeitskühlung	Luftkühlung / Flüssigkeitskühlung
Kühlmitteltemperatur	80 – 100 °C bei Hybridfahrzeug 60 – 70 °C bei E-Fahrzeug	40 °C bei Luftkühlung 60 – 70 °C bei Flüssigkeitskühlung
mech. max. Stoßbeschleunigung	bis 3 g (~ 30 m/s ²)	bis 30 g (~ 300 m/s ²)
Leistungsbereich	5 - 100 kW	40 - 1700 kW
Maschinentype	PSM (ASM, TFM, SRM)	ASM (PSM)
technische Auslegungskriterien	- Momenten- und Leistungsdichte - Wirkungsgrad - Betriebssicherheit	- Momenten- und Leistungsdichte - Betriebssicherheit - Temperaturbelastung

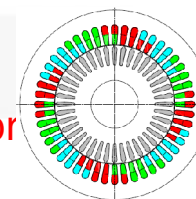
Vergleich von unterschiedlichen Antriebsmaschinen für Straßenfahrzeuge

Maschinenvergleich

Asynchronmaschine mit Aluminiumkurzschlußrotor

Variante A

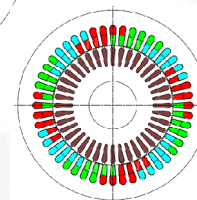
IM Alu- Rotor



Asynchronmaschine mit Kupferkurzschlußrotor

Variante B

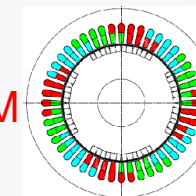
IM Cu- Rotor



Permanenterregte Synchronmaschine mit verteilter Wicklung und Oberflächenmagneten

Variante C

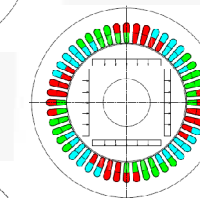
PM VW OFM



Permanenterregte Synchronmaschine mit verteilter Wicklung und vergrabenen Magneten

Variante D

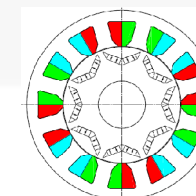
PM VW VM



Permanenterregte Synchronmaschine mit Einzelzahnwicklung und vergrabenen Magneten

Variante E

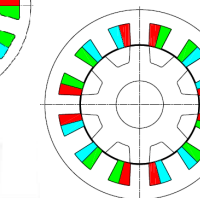
PM EZ VM



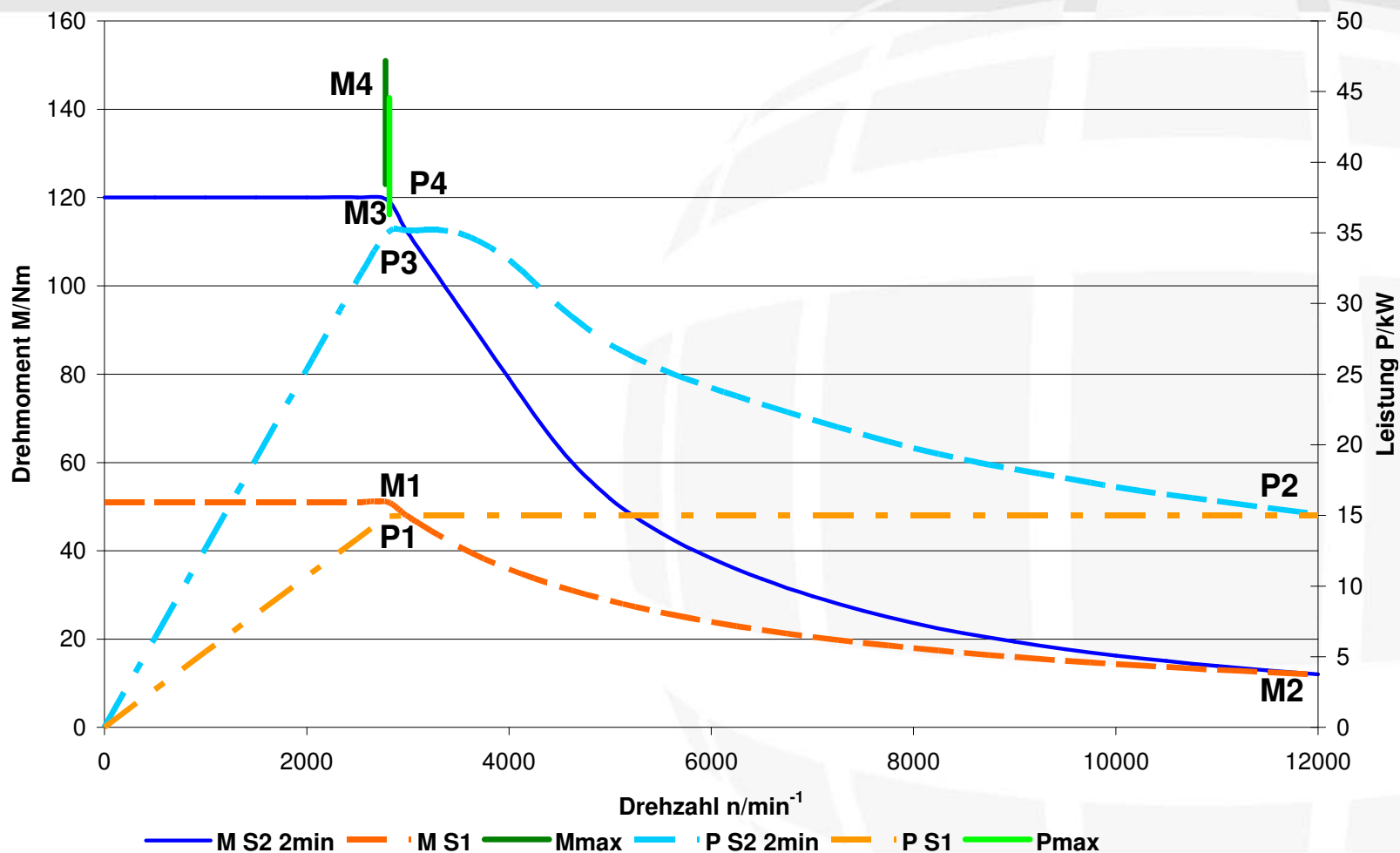
Geschaltene Reluktanzmaschine 12/8

Variante F

SR 12/8

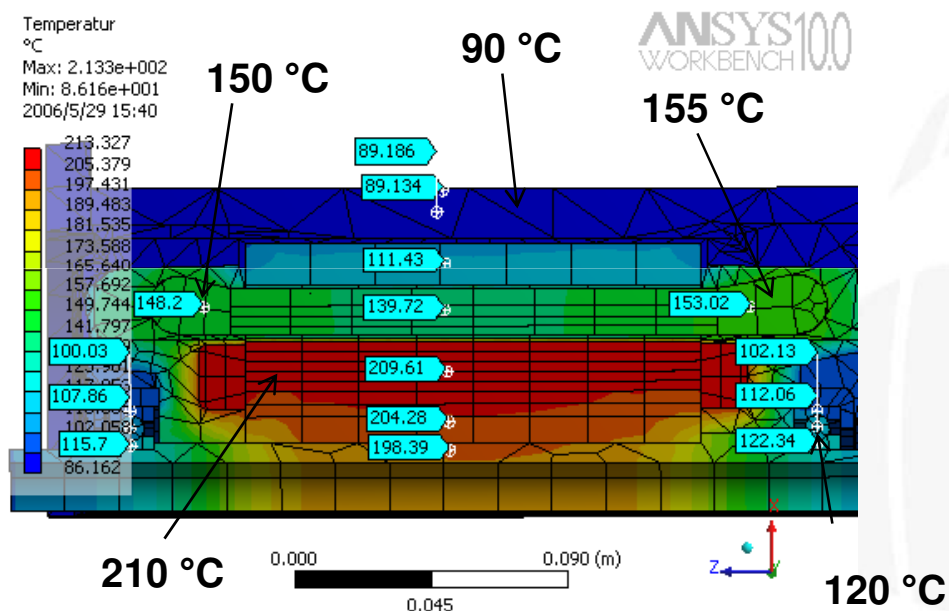


Auslegungsparameter von unterschiedlichen Antriebsmaschinen

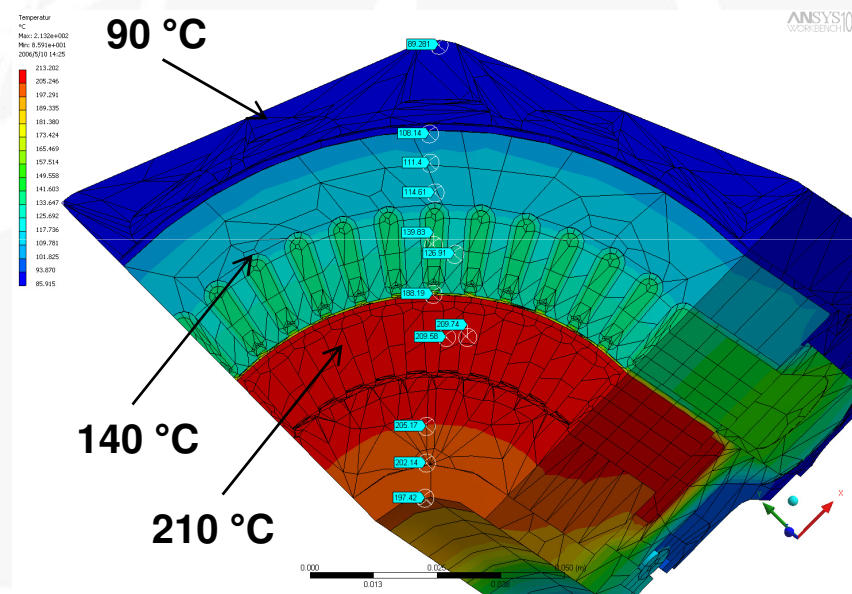


Elektrische Traktionsmaschine - ASM

Variante A: ASM mit Aluminiumkurzschlußrotor IM 1815



Thermische FE-Berechnung Längsschnitt
P=15 kW S1, $n=2800 \text{ min}^{-1}$
Statorwicklung $\delta_{\max} = 155 \text{ °C}$

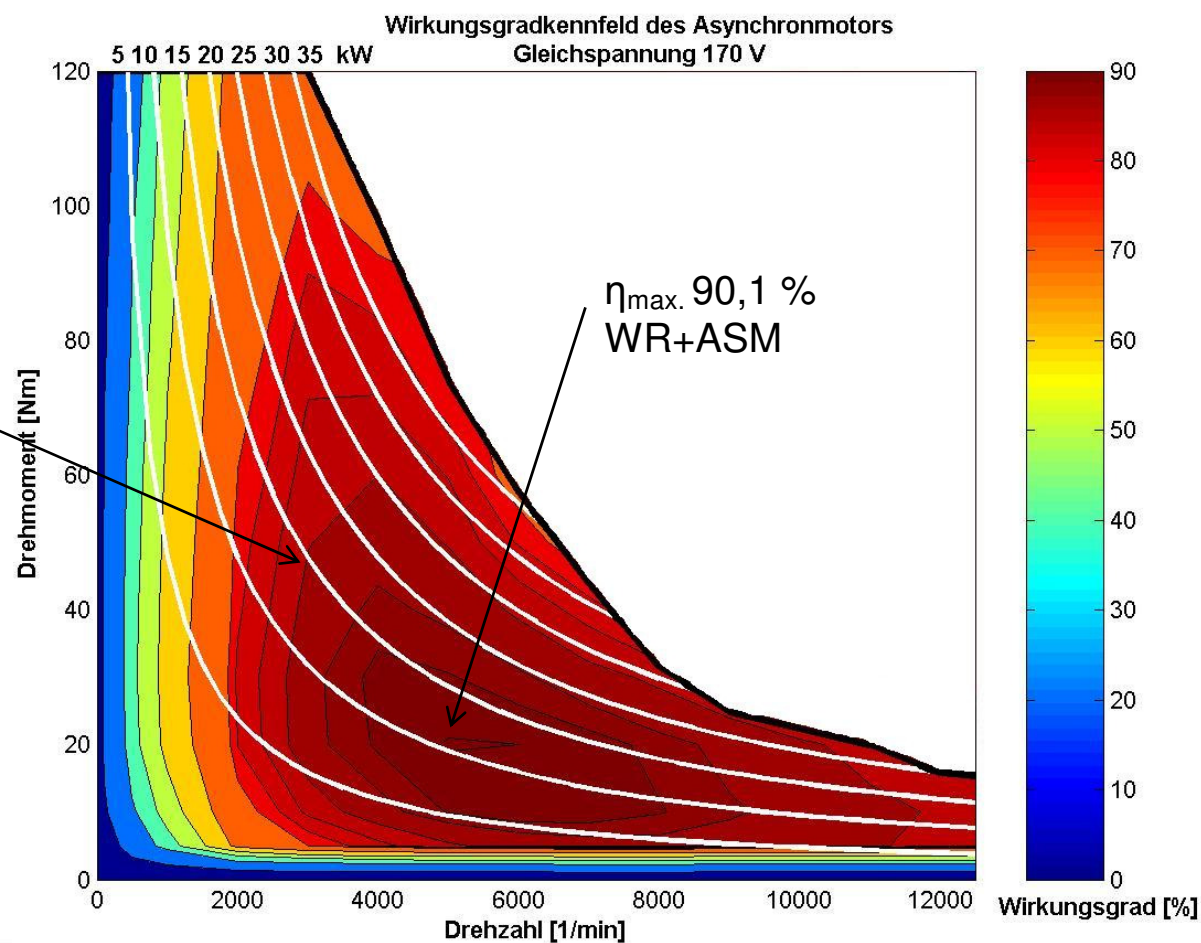


Thermische FE-Berechnung Querschnitt
P=15 kW S1, $n=2800 \text{ min}^{-1}$
Rotorwicklung $\delta_{\max} = 210 \text{ °C}$

Elektrische Traktionsmaschine - ASM

**ASM
IM 1815**

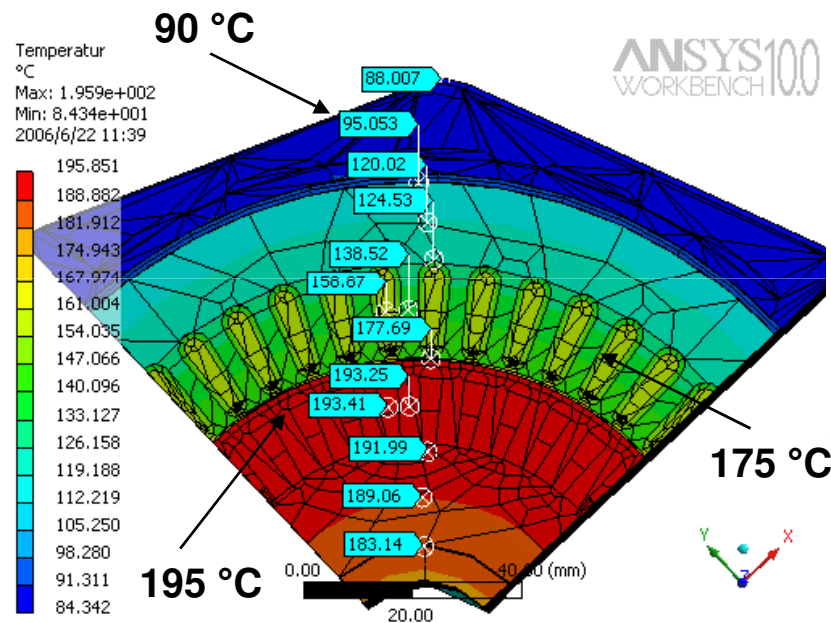
$\eta_{\max.} 88,5\%$
WR+ASM
@2800min⁻¹, 50 Nm



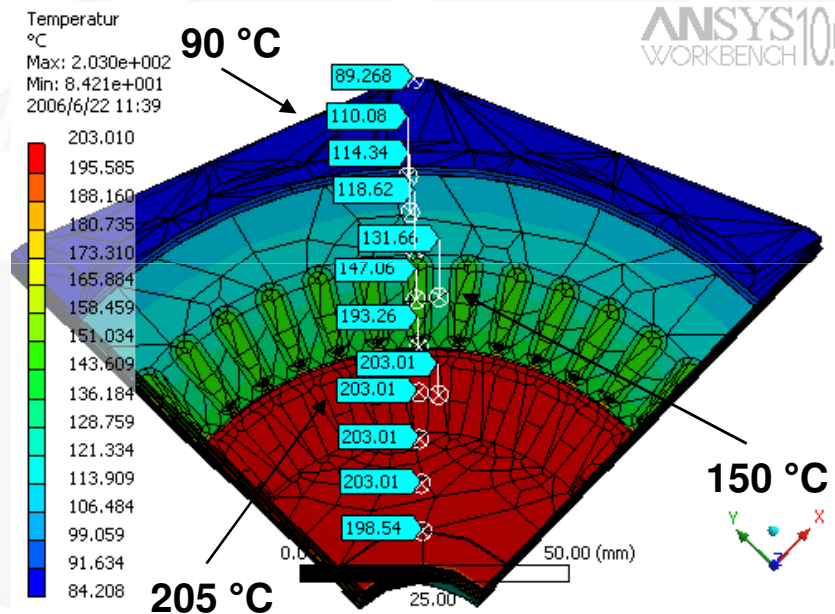
Elektrische Traktionsmaschine - ASM

Variante B: ASM mit Kupferkurzschlußrotor IM 1813

$l_{fe} = 130 \text{ mm}$



Thermische FE-Berechnung
P=15 kW S1, $n=2800 \text{ min}^{-1}$
Rotorwicklung $\delta_{\max} = 195 \text{ °C}$

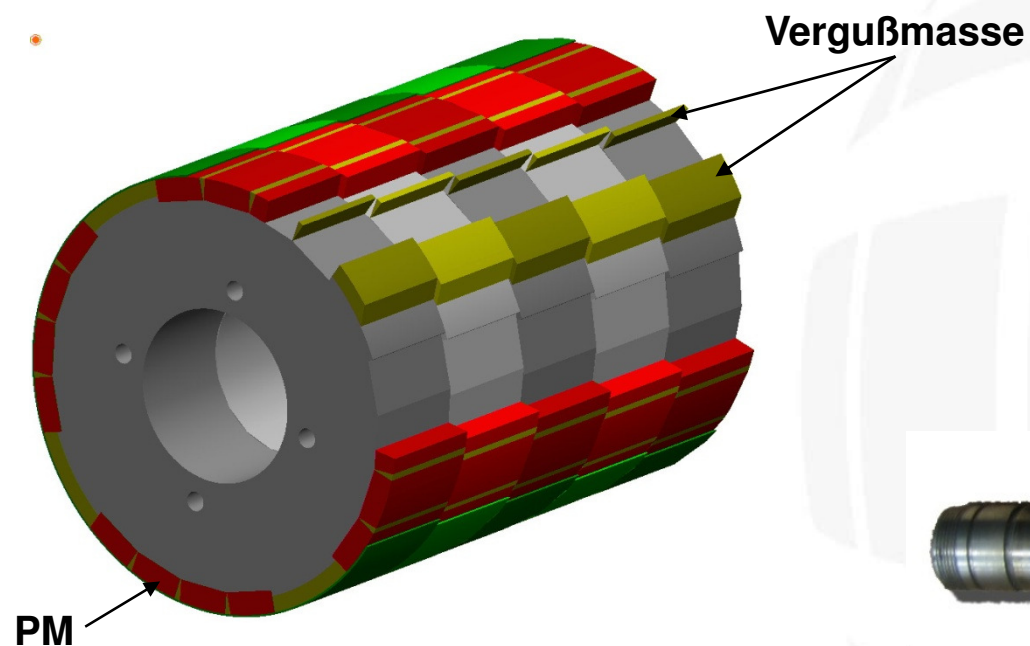


Thermische FE-Berechnung
P=15 kW S1, $n=12000 \text{ min}^{-1}$
Rotorwicklung $\delta_{\max} = 205 \text{ °C}$

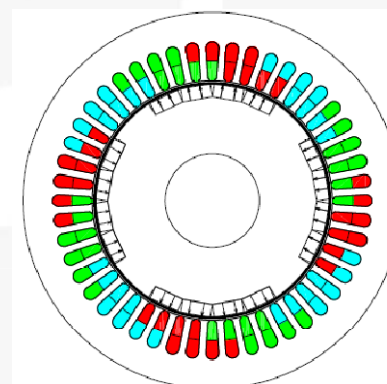
Elektrische Traktionsmaschine - PSM

Variante C: PSM mit verteilter Wicklung und Oberflächenmagneten PM 1812

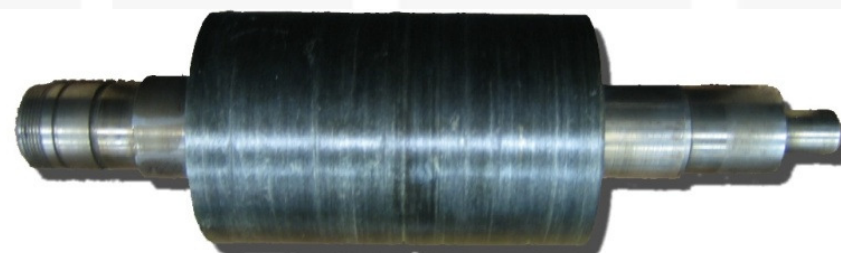
$l_{fe} = 130 \text{ mm}$



Rotorblechpakete in geschrägter Anordnung



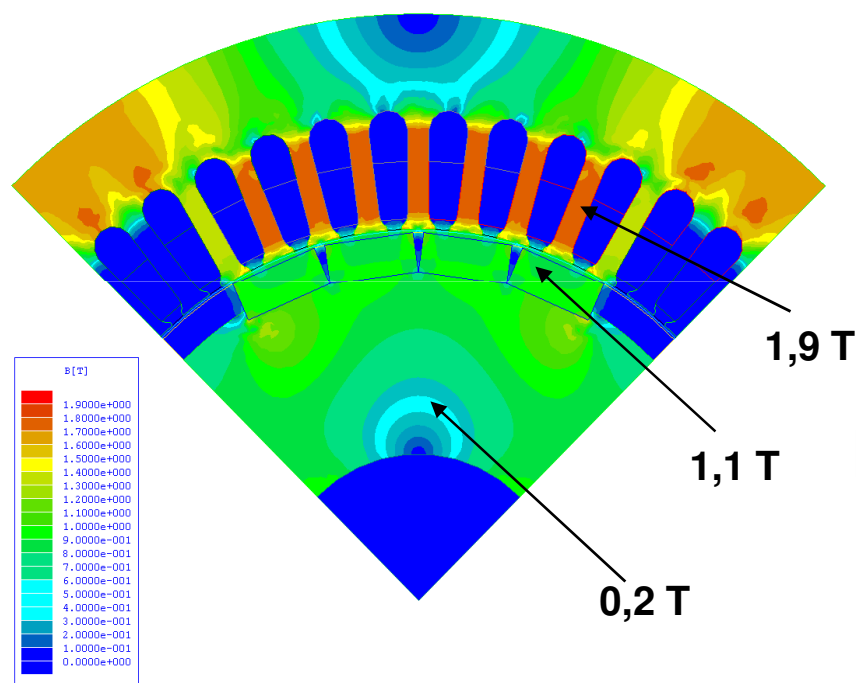
Querschnitt



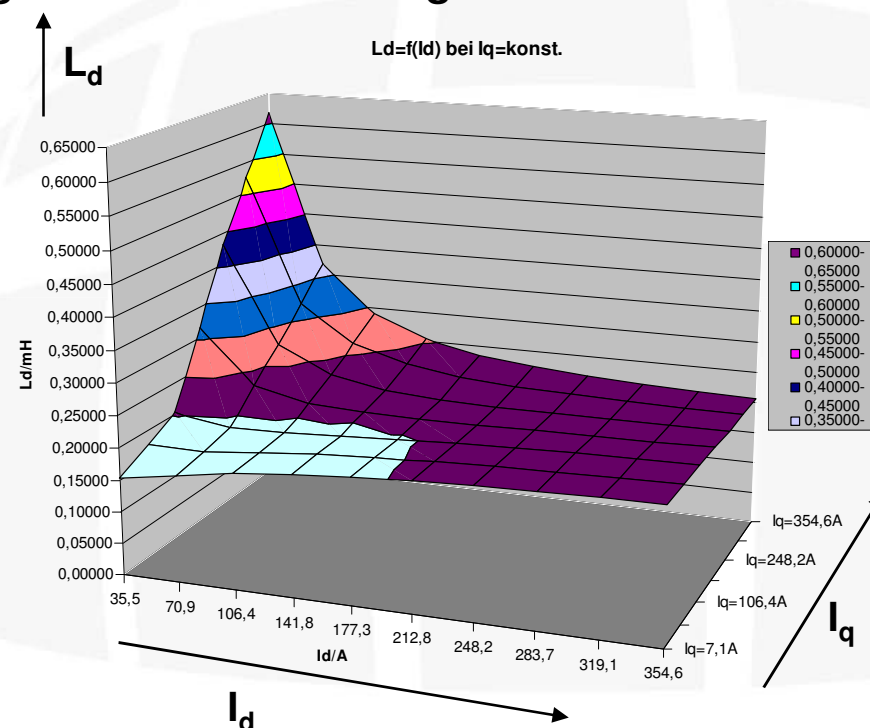
Rotor mit Oberflächen-Permanentmagneten und Kohlefaserbandage

Elektrische Traktionsmaschine - PSM

Variante C: PSM mit verteilter Wicklung und Oberflächenmagneten PM 1812



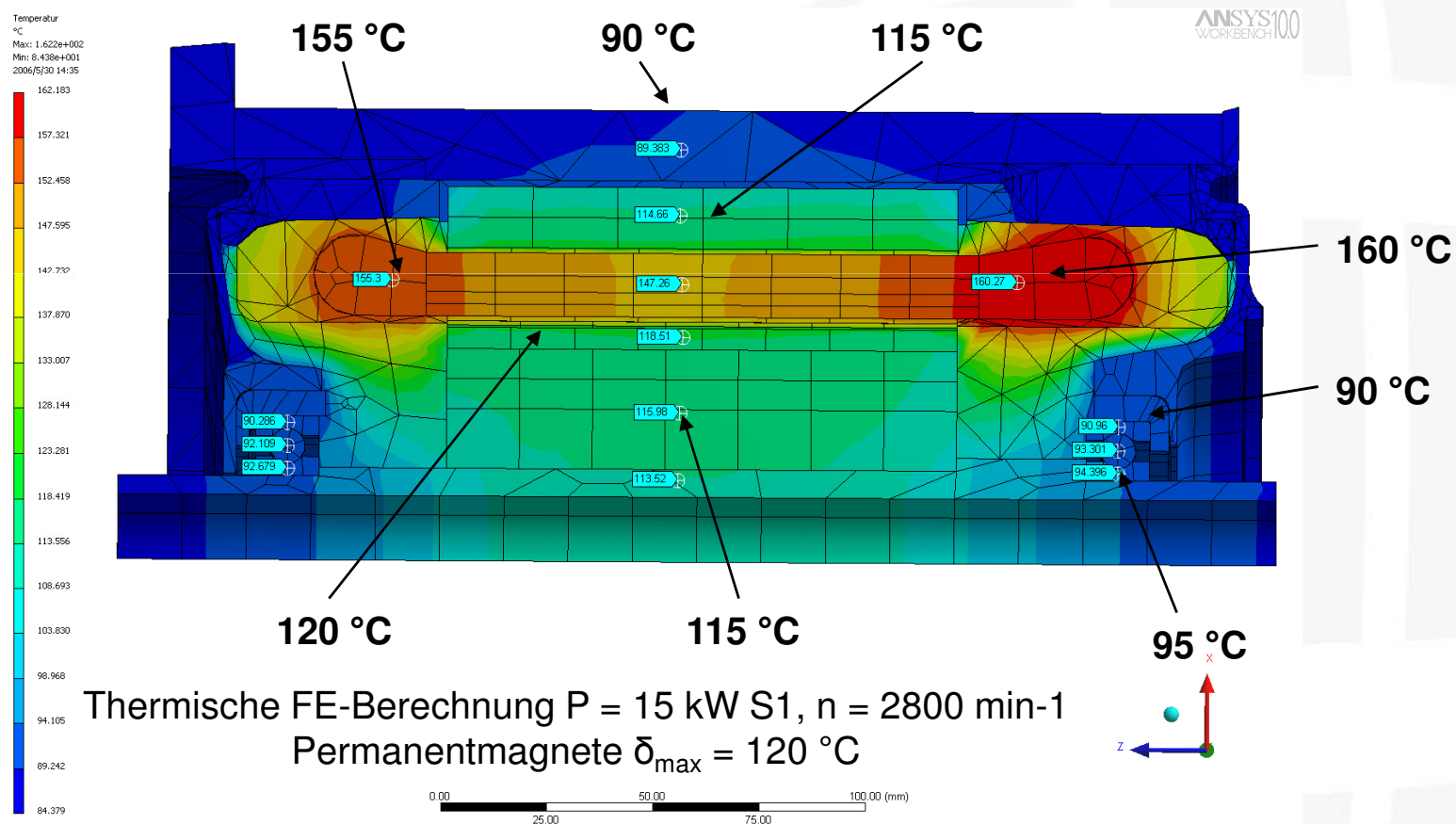
Elektromagnetische FE-Berechnung
Induktion B im Stator- und Rotorblech



Längsinduktivität L_d in Abhängigkeit vom
Längsstrom I_d und Querstrom I_q

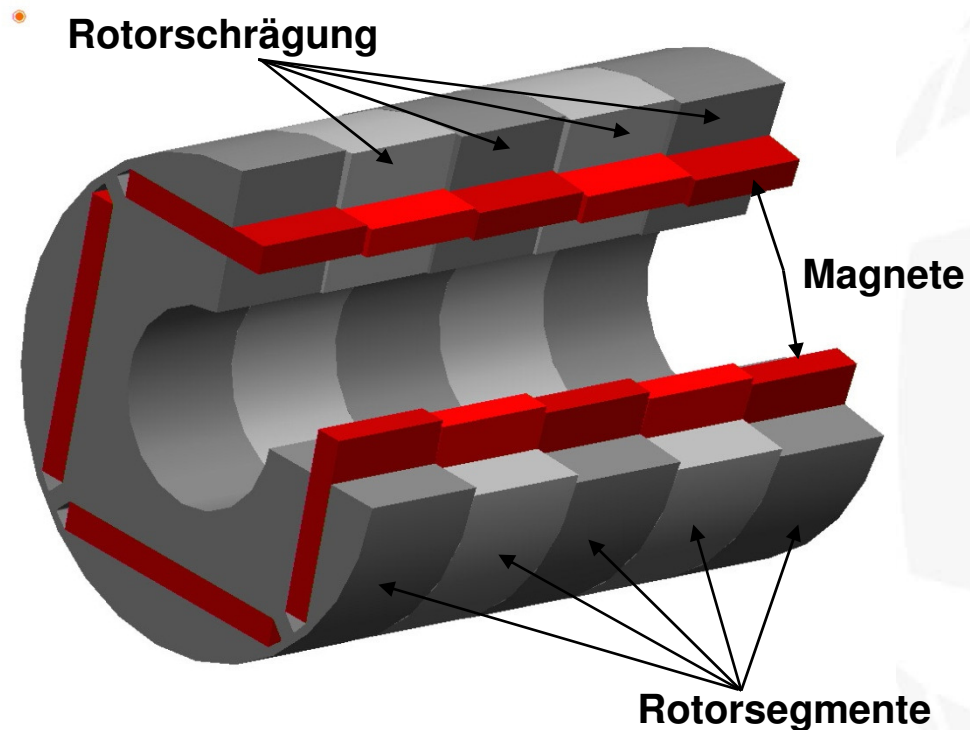
Elektrische Traktionsmaschine - PSM

Variante C: PSM mit verteilter Wicklung und Oberflächenmagneten PM 1812

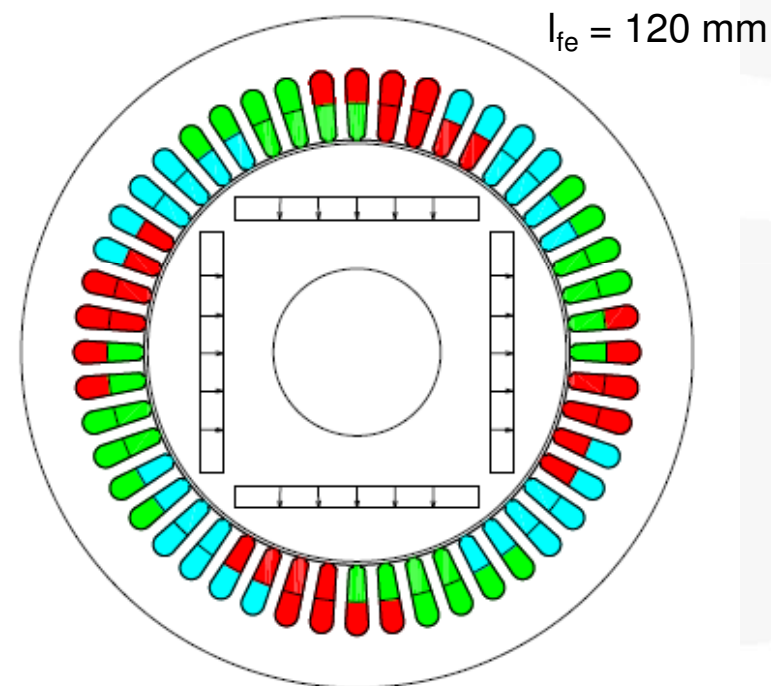


Elektrische Traktionsmaschine - PSM

Variante D: PSM mit verteilter Wicklung und vergrabenen Magneten PM 1812



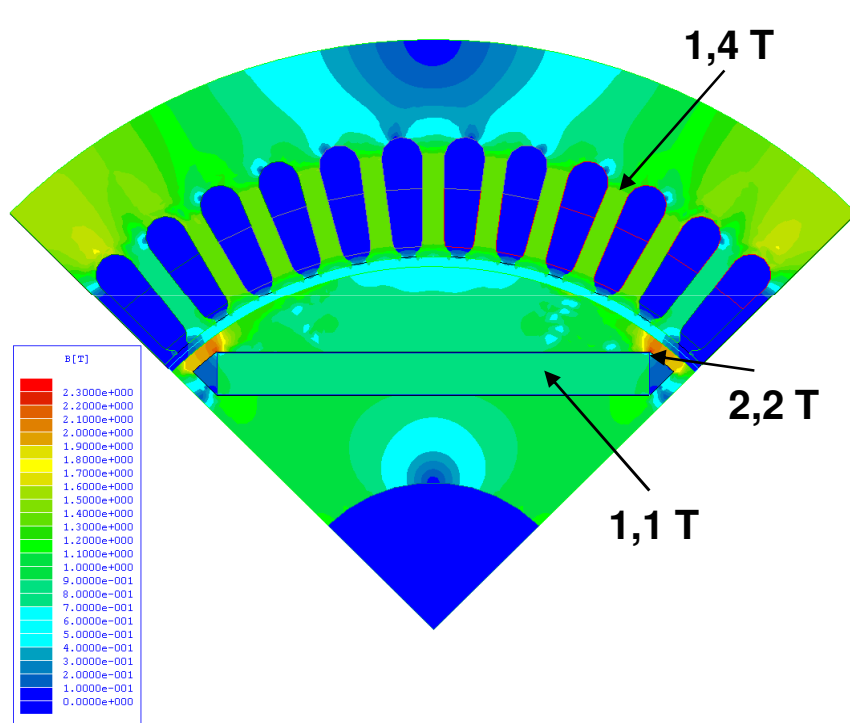
Rotor aus Rotorsegmenten mit vergrabenen Magneten



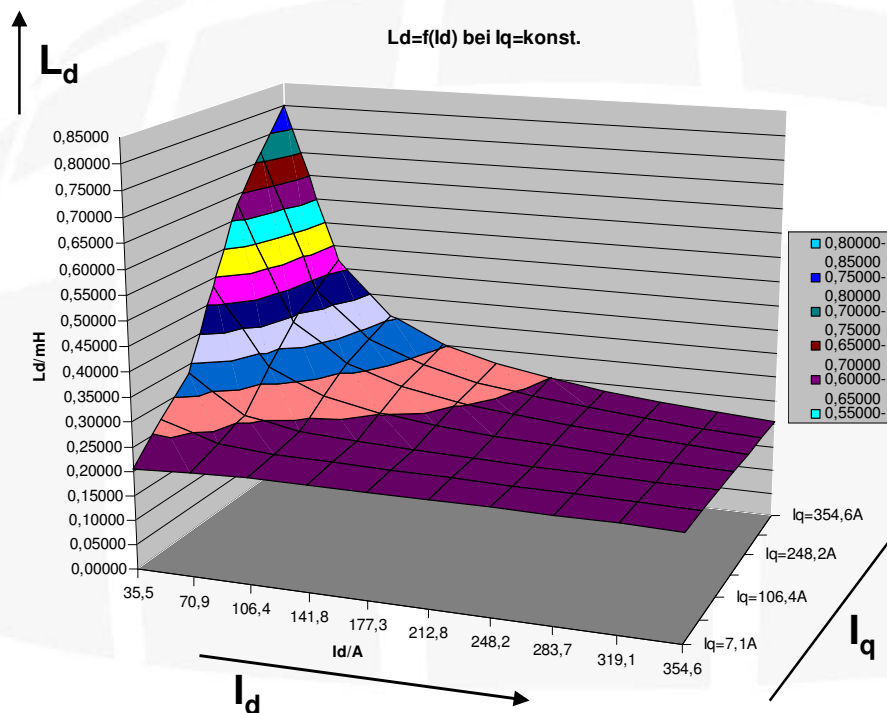
Querschnitt

Elektrische Traktionsmaschine PSM

Variante D: PSM mit verteilter Wicklung und vergrabenen Magneten PM 1812



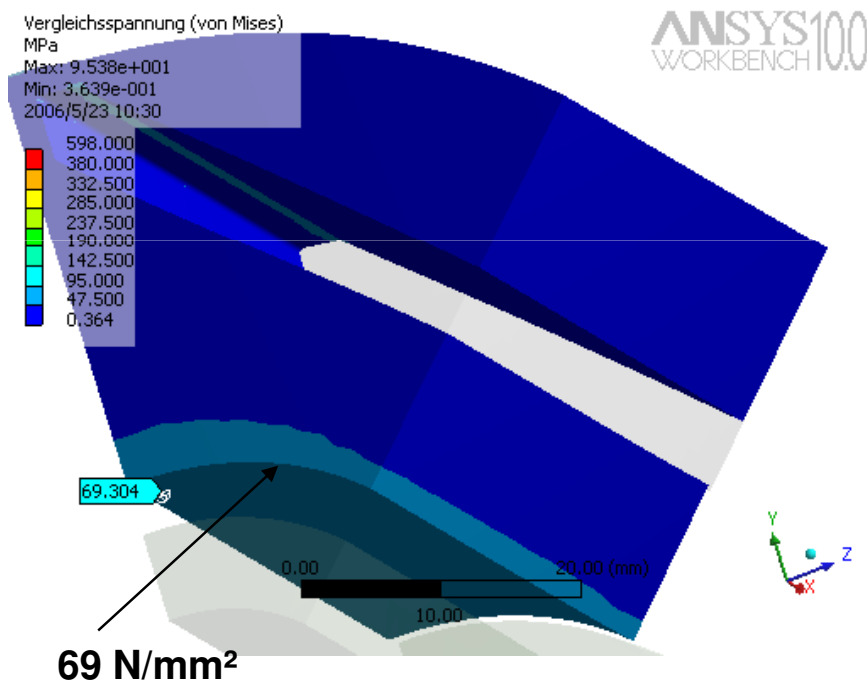
Elektromagnetische FE-Berechnung
Induktion B im Stator- und Rotorendblech



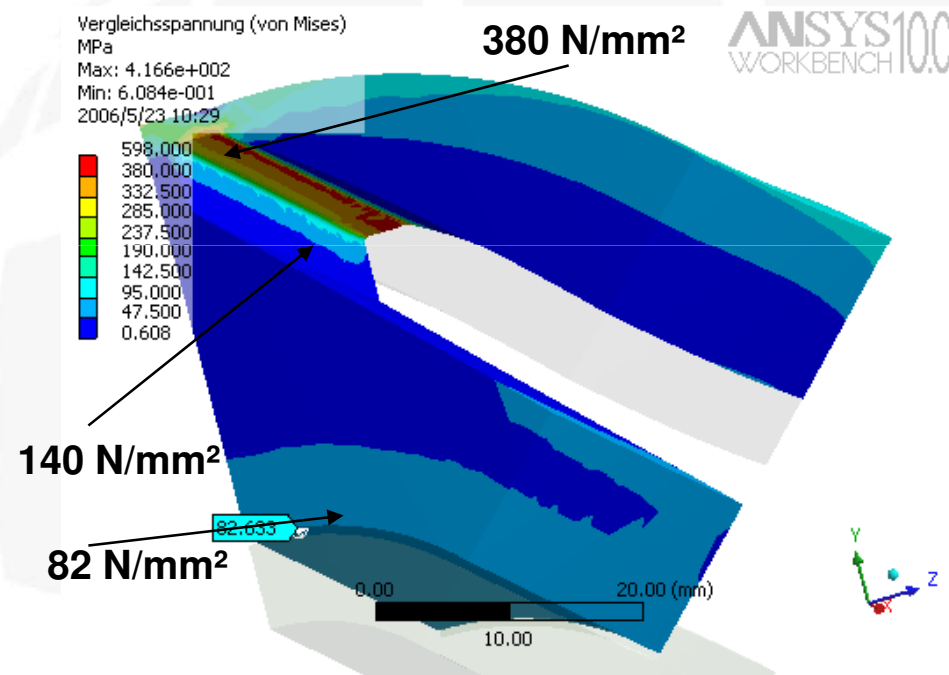
Längsinduktivität L_d in Abhängigkeit
vom Längsstrom I_d und Querstrom I_q

Elektrische Traktionsmaschine - PSM

Variante D: PSM mit verteilter Wicklung und vergrabenen Magneten PM 1812



Mechanische FE-Berechnung
Vergleichsspannung im Rotorblechpaket
bei $n = 0 \text{ min}^{-1}$

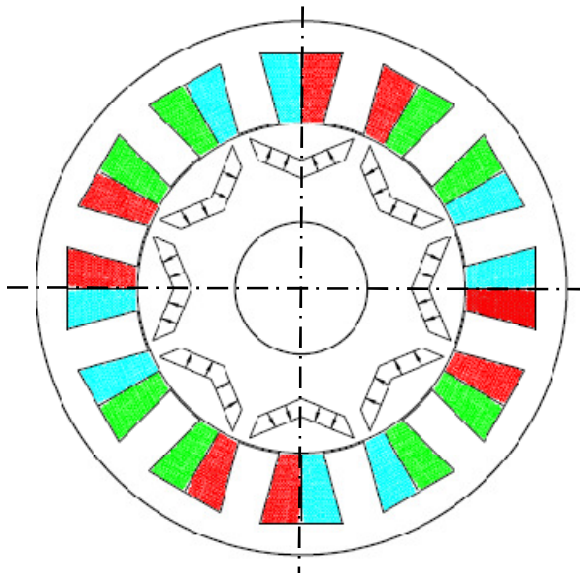


Mechanische FE-Berechnung
Vergleichsspannung im Rotorblechpaket
bei $n = 12000 \text{ min}^{-1}$

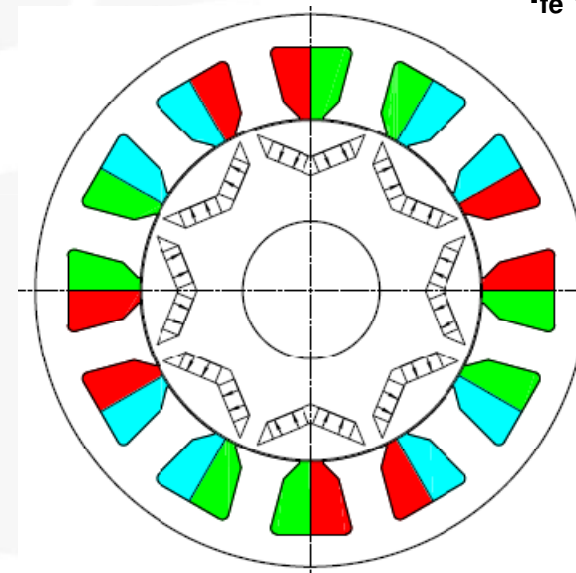
Elektrische Traktionsmaschine - PSM

Variante E: PSM mit Einzelzahnwicklung und vergrabenen Magneten PM 1812

$l_{fe} = 120 \text{ mm}$



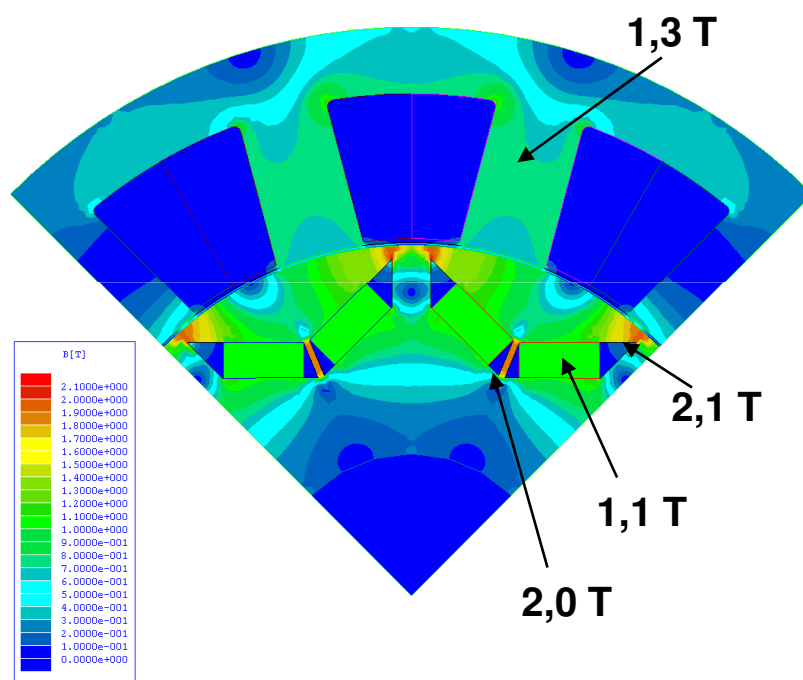
Variante E1: Querschnitt ohne Polschuh



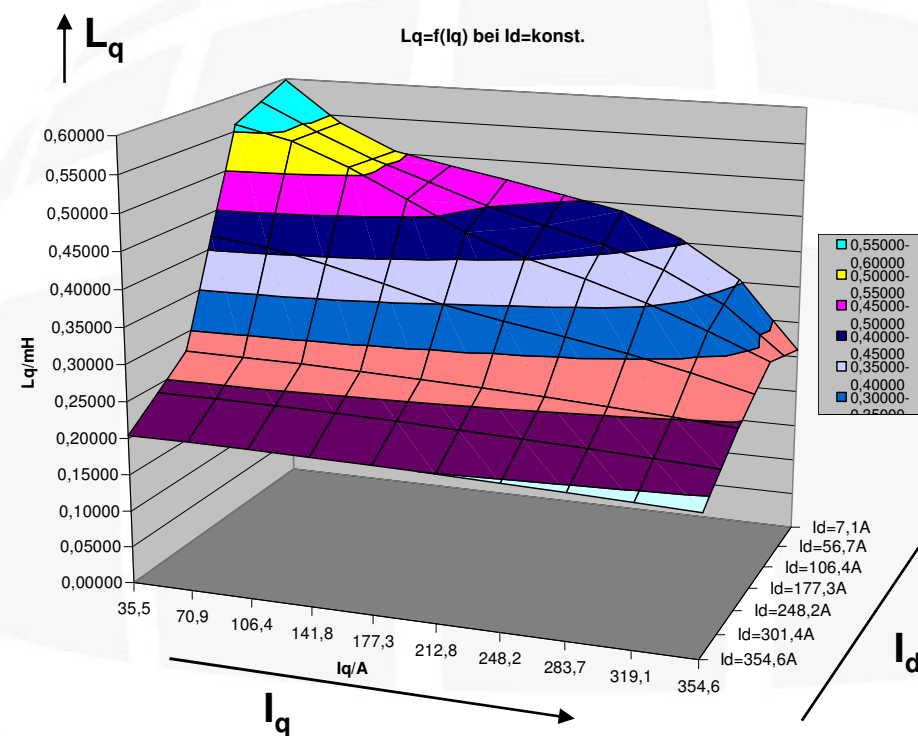
Variante E2: Querschnitt mit Polschuh

Vergrabene Magnete in V-Anordnung (Flußkonzentration)

Elektrische Traktionsmaschine - PSM



Elektromagnetische FE-Berechnung
Induktion B im Stator- und Rotorblech
Variante E1 ohne Polverbreiterung

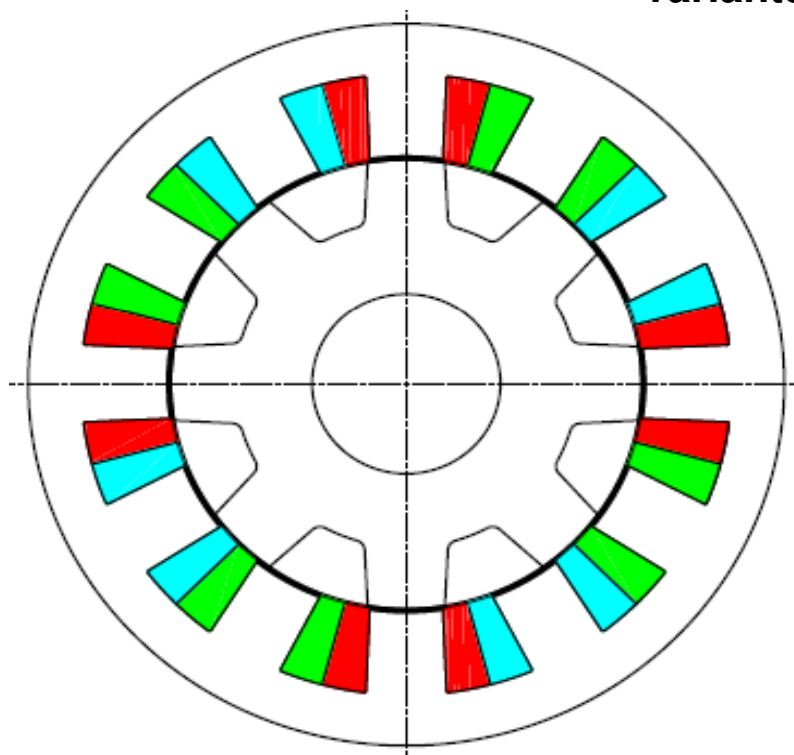


Querinduktivität L_q in Abhängigkeit
vom Querstrom I_q und Längsstrom I_d

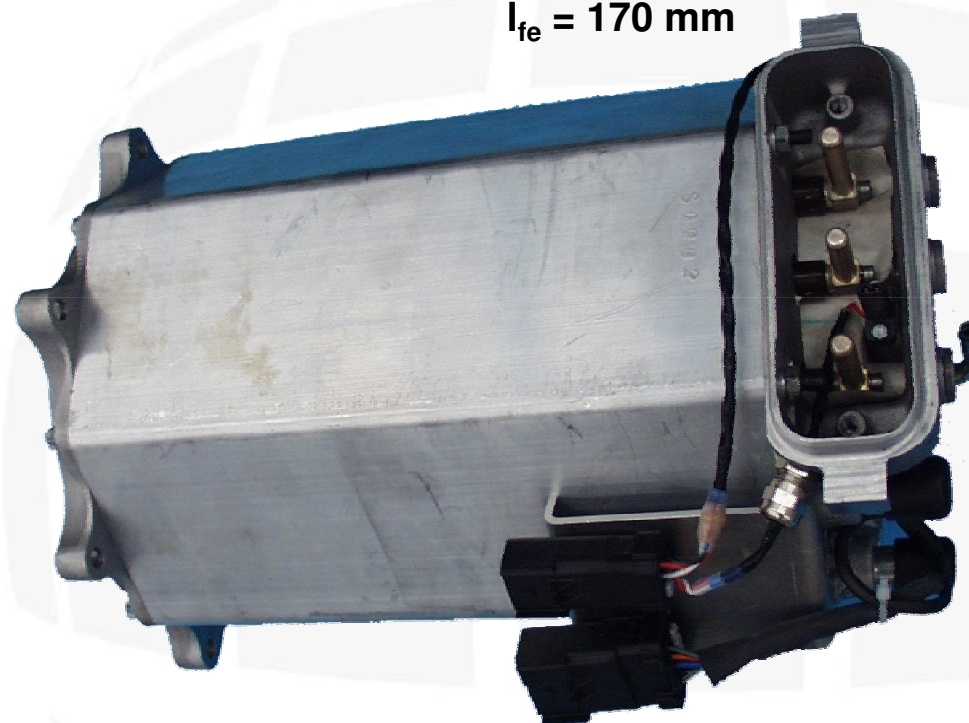
Elektrische Traktionsmaschine - SRM

Variante F: SRM 12/8 SR 1817

$l_{fe} = 170 \text{ mm}$



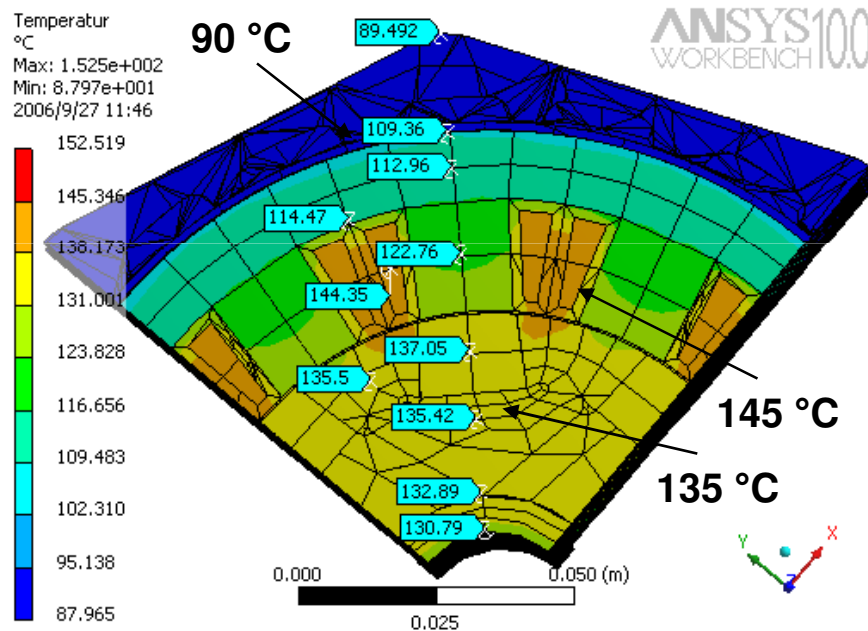
Blechquerschnitt
12 Statorzähne, 8 Rotorzähne



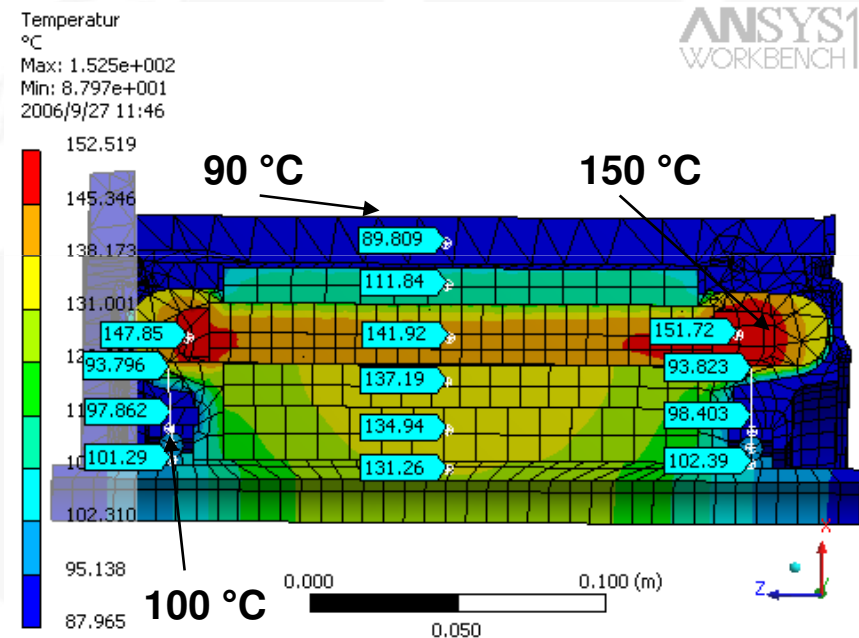
Motorbaureihe 18
Aluminiumgehäuse mit Steckeranschluß
Drehzahlgeber und Temperaturegeberanschluß

Elektrische Traktionsmaschine - SRM

Variante F: SRM 12/8 SR 1817

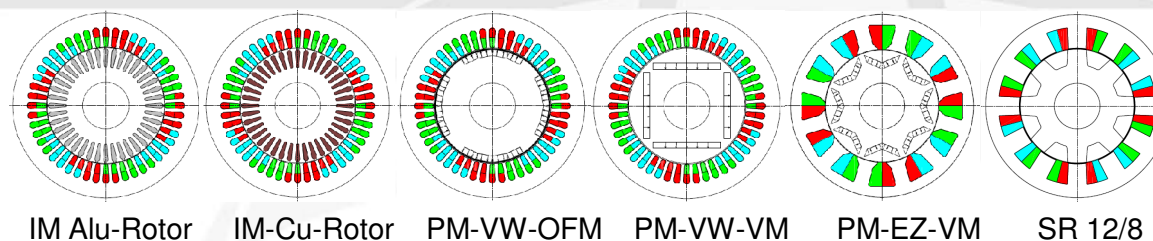


Thermische FE-Berechnung
 $P = 15 \text{ kW}$ S1, $n = 2800 \text{ min}^{-1}$
 Rotorblechpaket $\bar{\theta}_{\max} = 140 \text{ °C}$



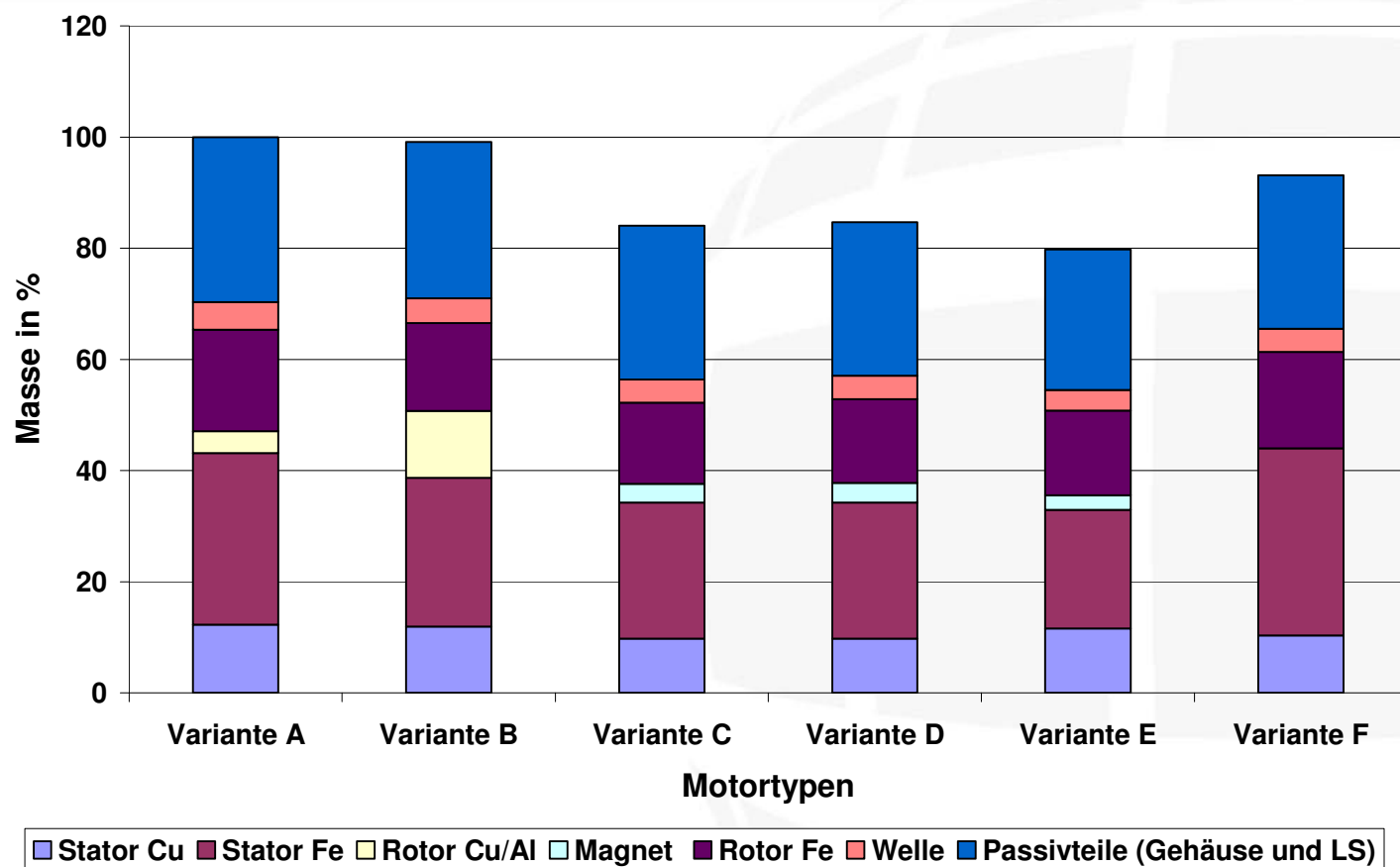
Thermische FE-Berechnung
 $P = 15 \text{ kW}$ S1, $n = 2800 \text{ min}^{-1}$
 Statorwicklung $\bar{\theta}_{\max} = 150 \text{ °C}$

Vergleich von unterschiedlichen Antriebsmaschinen



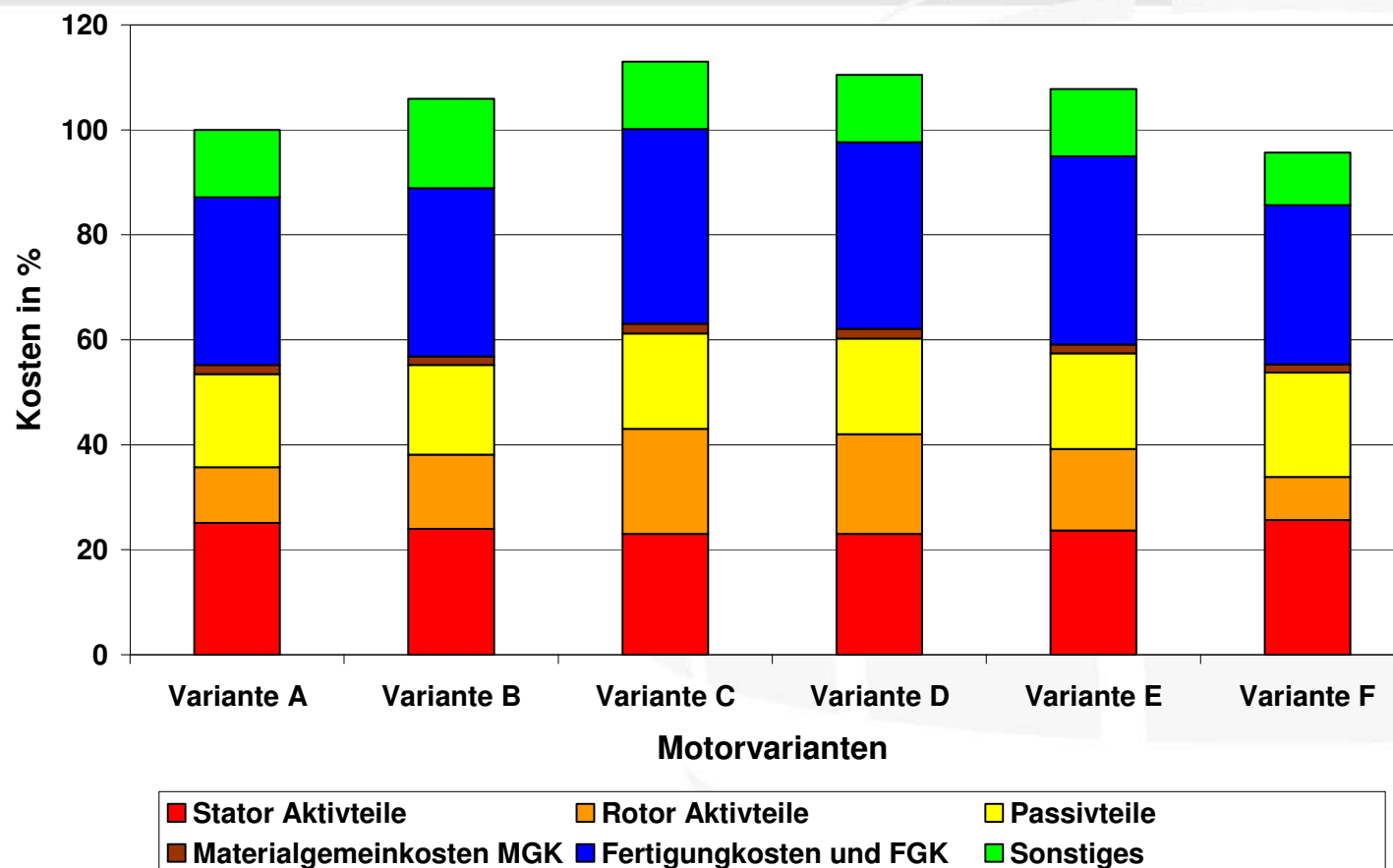
Statoraußendurchmesser	176,6	176,6	176,6	176,6	176,6	176,6
Eisenlänge	150	130	120	120	120	170
Gesamtvolumen	10,5	9,6	9,2	9,2	7,3	9,1
Gesamtmasse	38,0	37,7	31,9	32,2	30,3	35,4
Aktivmasse	24,8	25,3	19,8	20,1	19,3	23,3
Drehmoment S1 @ 2800 min ⁻¹	51	51	51	51	51	51
Esson'sche Leistungszahl	2,85	3,28	3,55	3,57	3,72	2,73
Wirkungsgrad @ 15kW, 2800 min ⁻¹	88,5	87,7	90,7	91,9	91,5	89,8
Drehmoment/Gesamtmasse	1,34	1,36	1,60	1,59	1,70	1,45
Wirkungsgrad @ 15 kW, 12500 min ⁻¹	87,3	88,5	79,8	84,3	91,9	89,9
Max. Leistung @ I _{ZK} = 320 A	42,4	44,0	40,1	44,0	44,3	36,1

Vergleich von unterschiedlichen Antriebsmaschinen



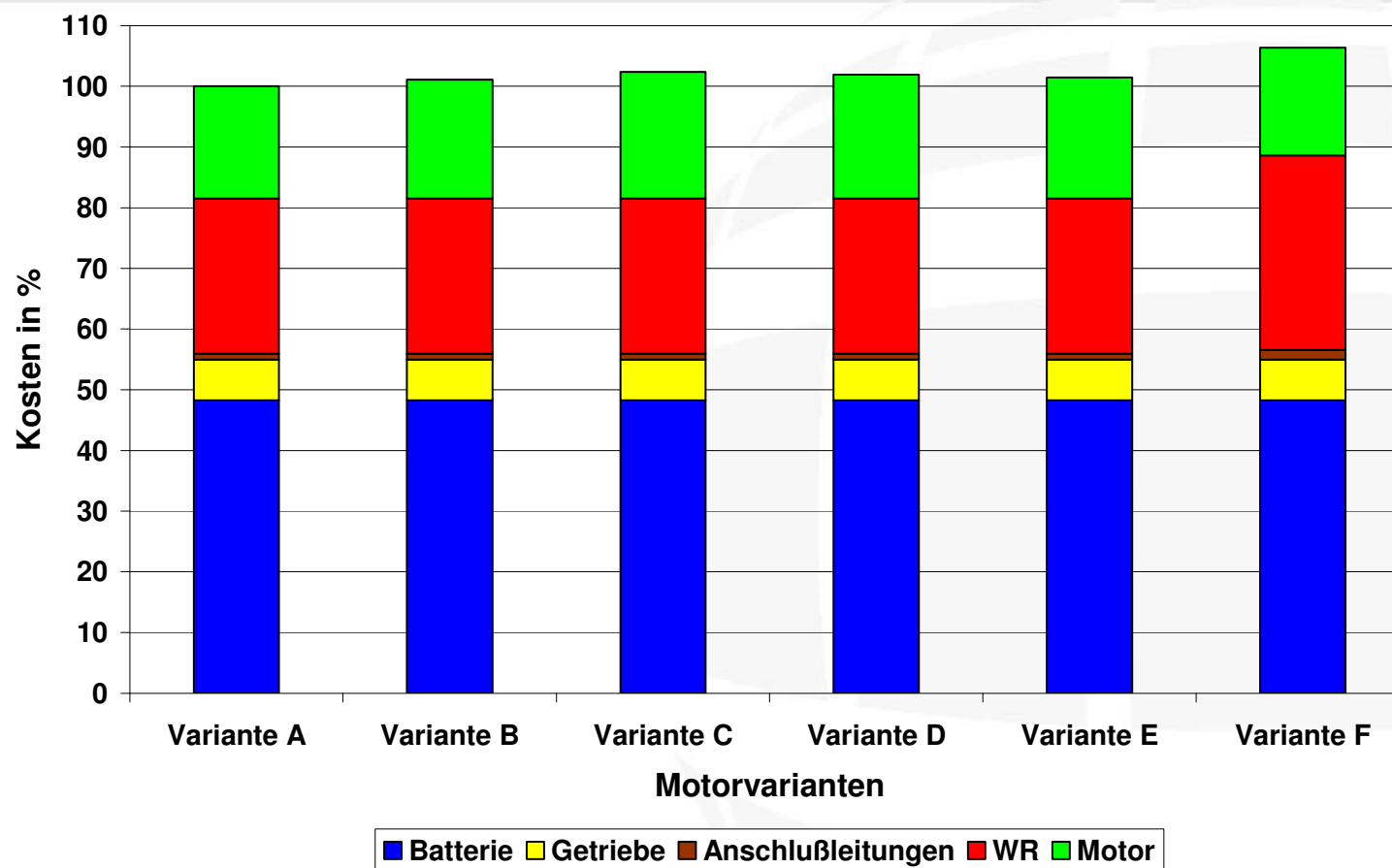
Massenaufteilung in %

Vergleich von unterschiedlichen Antriebsmaschinen



Motorkosten in %

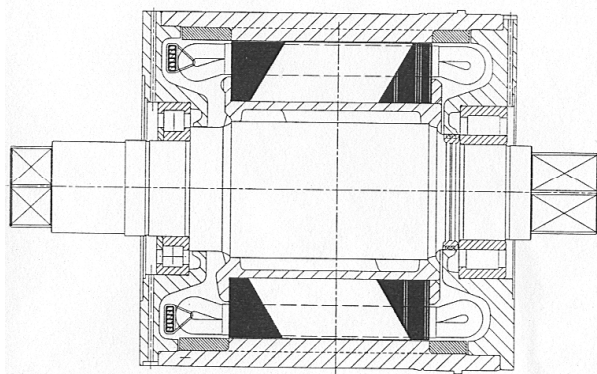
Vergleich von unterschiedlichen Antriebsmaschinen



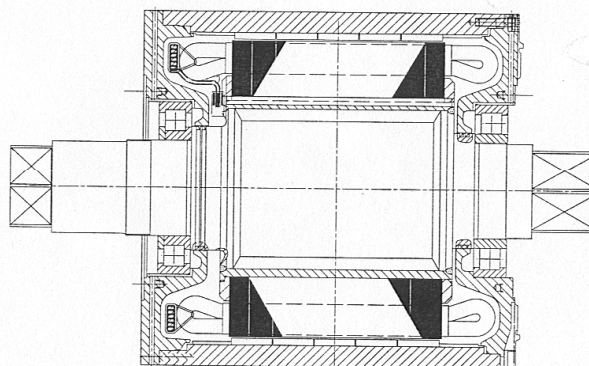
Gesamtkosten in %

Radnabenantrieb Vergleich ASM – PSM – TFM

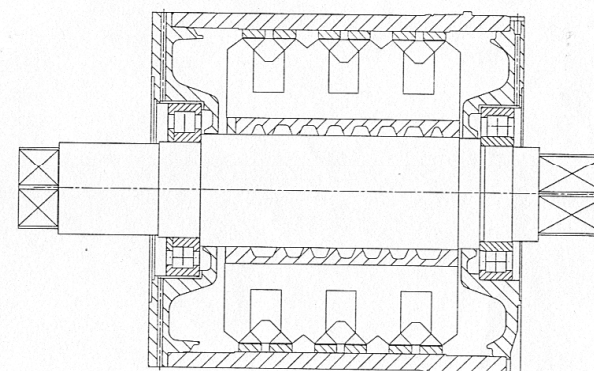
Asynchronmaschine



Permanentmagnet
Synchronmaschine



Transversalflußmaschine



Vergleichsdaten:

Außendurchmesser

ASM
440 mm

PSM
440 mm

TFM
440 mm

Polpaarzahl

4

4

30

Motorlänge

460 mm

460 mm

460 mm

Eisenlänge

260 mm

260 mm

290 mm

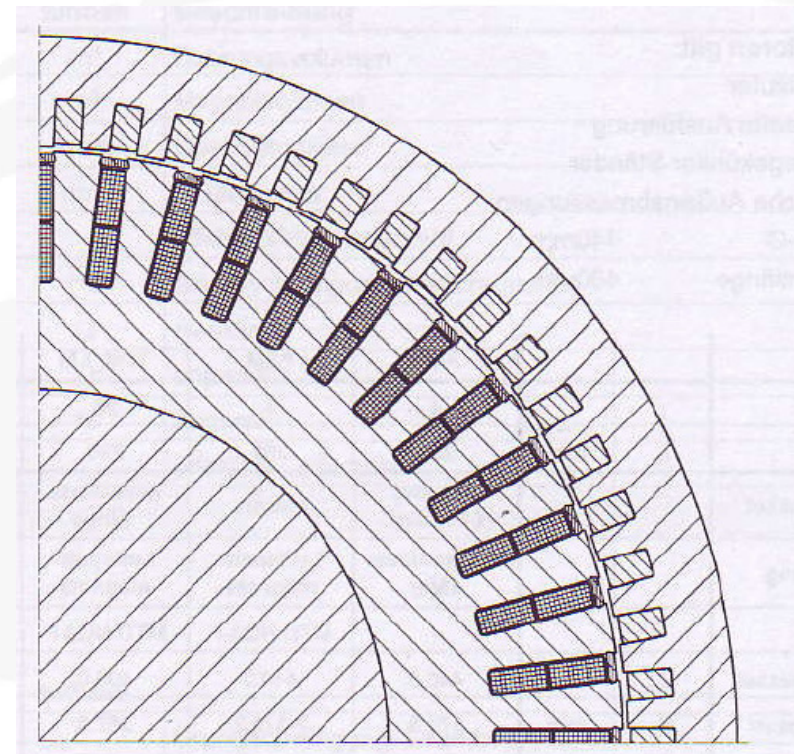
Radnabenantrieb mit Asynchronmaschine

Stator: Zweischichtwicklung

Rotor: Kupfer-Kurzschlussläufer
Massiver Rotor mit massiven Rotorzähnen

Vorteile: - Direktantrieb ohne Getriebe
- einfache Regelung
- einfaches Schutzkonzept

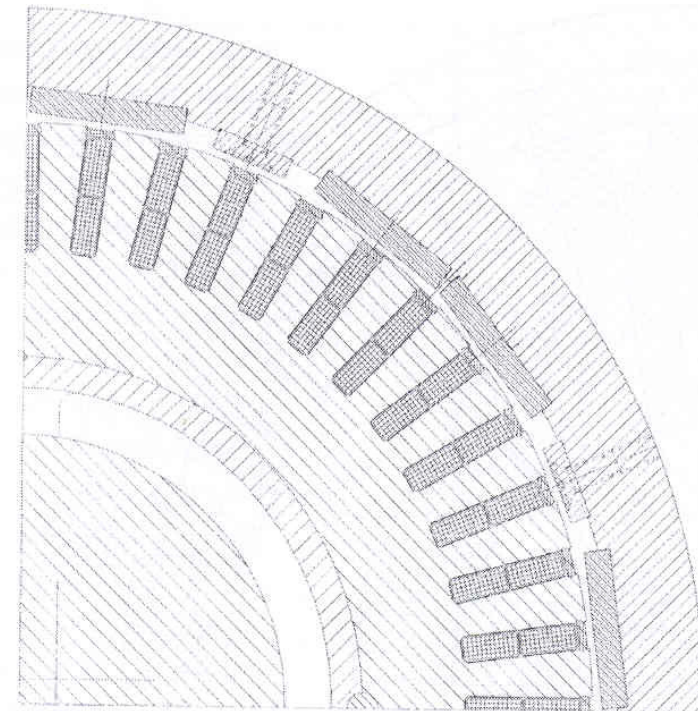
Nachteile: - Rotorverluste
- Wirkungsgrad durch niedrige Drehzahl
und relativ hohen Schlupf



Asynchronmaschine mit
massivem Rotorkörper

Radnabenantrieb mit Permanentmagnet-Synchronmaschine

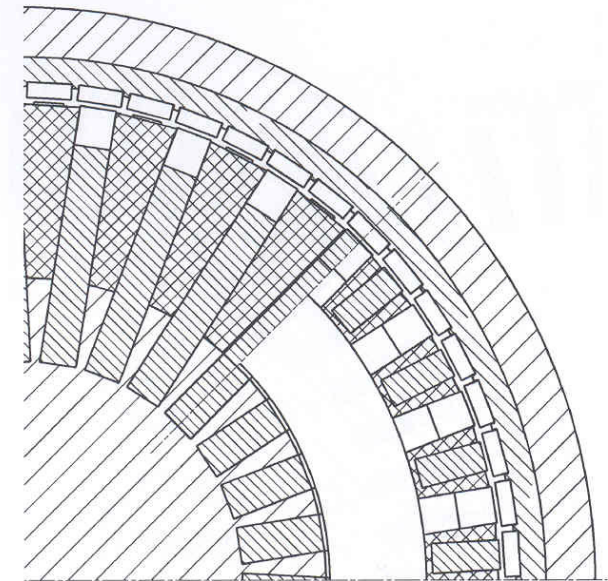
- Stator: geschrägte Nuten (sonst ident ASM)
- Rotor: 8-polige Anordnung von Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor)
- Vorteile: - geringere Rotorverluste (gegenüber ASM)
- besserer Wirkungsgrad
- Nachteile: - Verwendung eines Polradlagegebers
- komplexere Schutztechnik
- Feldschwächung durch negativen I_d -Strom
- Temperaturgrenze der Permanentmagneten (160 °C)



Permanenterregte
Synchronmaschine mit
Oberflächenmagneten

Radnabenantrieb mit Transversalflußmaschine

- Stator:** hochpolige Anordnung von U-Jochen
3 Einphasige-Statorringwicklungen
- Rotor:** hochpolige Anordnung von Permanentmagneten
Oberflächen- oder Flußkonzentrationsanordnung
- Vorteil:** höherer Wirkungsgrad
geringere Rotorverluste (gegenüber ASM)
höheres Drehmoment/Motormasse
hohe Streuung: niedrigerer Kurzschlußstrom
einfach automatisierbarer Produktionsprozeß
- Nachteil:** hohe Statorgrundfrequenz (bis über 1 kHz)
hohe Streuung – höherer Blindleistungsbedarf
Verwendung Polradlagegeber



Transversalflußmaschine
mit Oberflächenmagneten

Vergleich ASM – PSM – TFM - Bewertung

	ASM	PSM	TFM
Drehmoment pro Aktivvolumen	+/- (100 %)	+ (130 %)	+ (150 %)
Drehmoment pro Aktivmasse	+/- (100 %)	+ (130 %)	+ (160 %)
Verluste	+ (100 %)	+ (75 %)	+ (90 %)
Gruppenantrieb	+	-	-
magnetisches Geräusch	+	+	-
Störfälle	+	-	-
Stoß- und Schwingungsbelastung	+	- (?)	- (?)
Korrosionsanfälligkeit	+	-	-
Kosten	+/- (100 %)	- (125 %) (?)	- (150 %) (?)
Wartung	+	- (?)	- (?)

+ Vorteil

- Nachteil

+/- neutral

? Noch keine Fertigungs- bzw. Betriebserfahrung

Elektrisches Antriebssystem

- Zusammenfassung Systemvergleich ASM - PSM – SRM – TFM

- Für Straße

- PSM mit Einzelzahnwicklung und vergrabenen Magneten hat beste Gesamteigenschaften
 - PSM Vorteilen in den Bereichen
 - Wirkungsgrad im Kennlinienfeld
 - Momentendichte bzw. Leistungsdichte
 - Kostenvorteile (Maschine alleine) für SRM
 - Kostenneutral bei Betrachtung des Gesamtsystems
 - PSM Nachteile durch Schlepp- bzw. Auslaufverluste
 - Ergebnis des Vergleiches auch von Bauart (Hybridsystem) abhängig
 - Hersteller von Hybridfahrzeugen (Toyota, Lexus, DC,...) verwenden als Antriebseinheit die PSM mit vergrabenen Magneten

- Für Schiene

- ASM die Antriebsmaschine im erprobten Einsatz
 - PSM als Traktionsmotor: Optimierung beim Schutzkonzept noch notwendig
als Traktionsgenerator: die Zukunftslösung

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

**Lieber Hans – lieber Prof. Kleinrath!
Danke für Deine Unterstützung
– Danke für Deine Wissensvermittlung!**