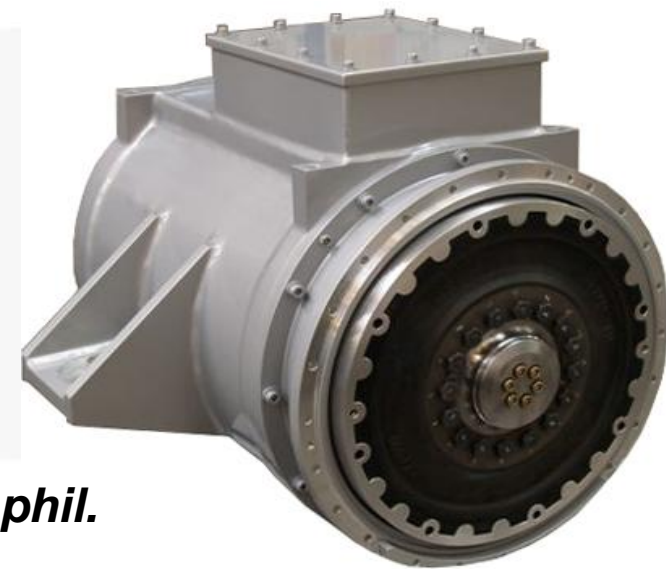
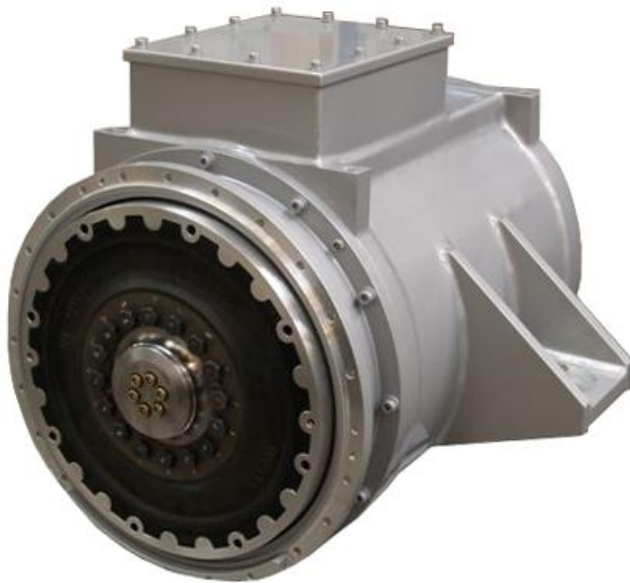


38. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“ Graz

Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten Traktions-Synchrongenerators in Permanentmagnet-Technologie



*Univ.-Lektor Dr. techn. Dr. phil.
Harald Neudorfer*

16.9.2008

Präsentationsübersicht

- Technische Daten des PM-Generators
- Permanentmagnete / Rotorgeometrie bei PM-Maschinen
- Achsigkeit des PM-Rotors mit vergrabenen Magneten
- Elektromagnetische Berechnung
- Mechanische Berechnung Stator und Rotor
- Prüfanordnung
- Ergebnisse aus Typenprüfung
- Wirkungsgradkennfeld
- Vergleichswerte von unterschiedlichen Generatortechnologien bei gleicher Leistungsklasse
- Einsparungspotential für ein dieselektrisches Triebfahrzeug

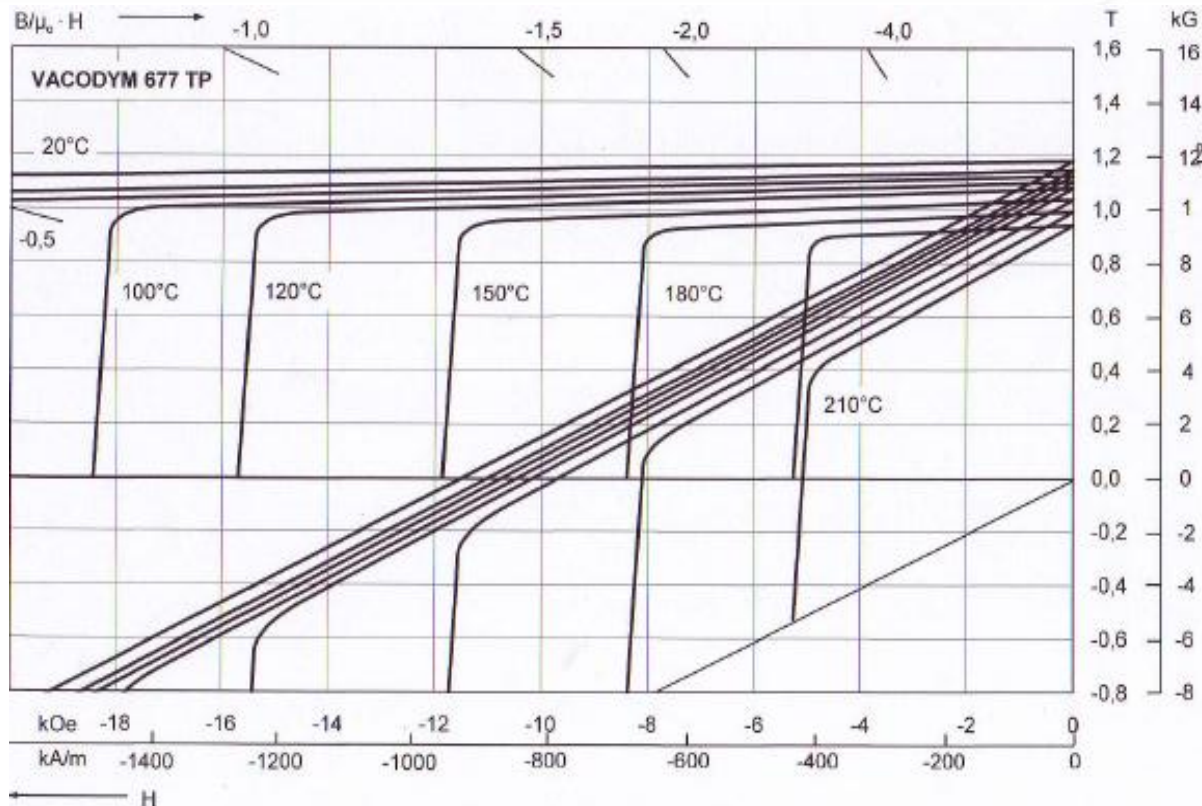
Technische Daten des PM-Generators (1)

Eingangsleistung mechanisch	P_{mech}	kW	390
Zwischenkreisspannung	U_{DC}	V	860
max. Zwischenkreisspannung	$U_{\text{DC,max}}$	V	1100
Nenndrehzahl	n_{nenn}	min ⁻¹	1900
Drehmoment mechanisch	M_{mech}	Nm	1960
Drehzahlbereich	n	min ⁻¹	600-1900
Kühlmitteleintrittstemperatur	ϑ_{in}	°C	65
Kühlmitteldurchflussmenge	V/t	l/min	30

Technische Daten des PM-Generators (2)

Druckabfall	Δp	Pa	10000
Polzahl	$2p$	-	8
Wirkungsgrad	η	%	> 97
Masse (ohne Kupplung)	m	kg	650
Trägheitsmoment Rotor (ohne Kupplung)	J	kgm ²	3
Länge	l	mm	720
Durchmesser	d	mm	530
Schutzart nach EN 60529	-	-	IP 56

Permanentmagnete PM



B - H -Kennlinie im 2. Quadranten

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

Arten von Magneten:

- Ferrite

$$\begin{aligned} B_R &= 0,8 - 1,2 \text{ T} \\ H_c &= 80-120 \text{ kA/m} \\ w &= 100 - 150 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

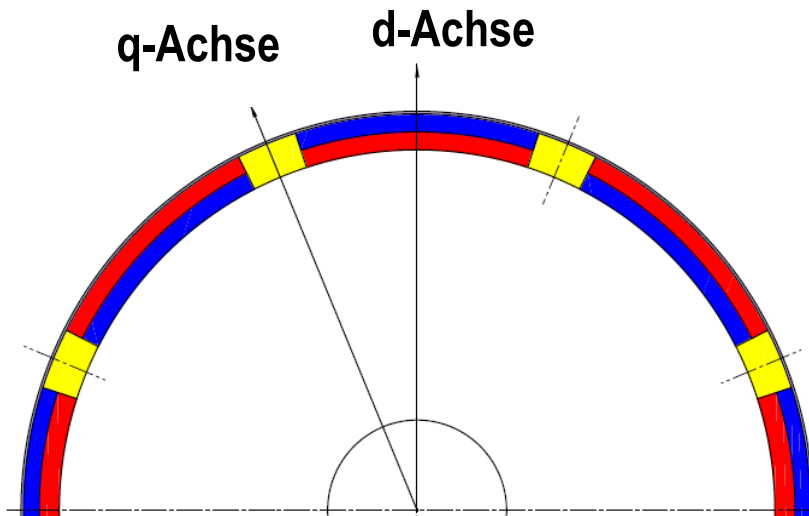
- Aluminium Nickel Kobalt

$$\begin{aligned} B_R &= 0,3 - 0,5 \text{ T} \\ H_c &= 200-400 \text{ kA/m} \\ w &= 30 - 50 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

- Selten-Erde (NdFeB)

$$\begin{aligned} B_R &= 1,0 - 1,2 \text{ T} \\ H_c &= 800-1400 \text{ kA/m} \\ w &= 300 - 350 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

Rotorgeometrie bei PM-Maschinen

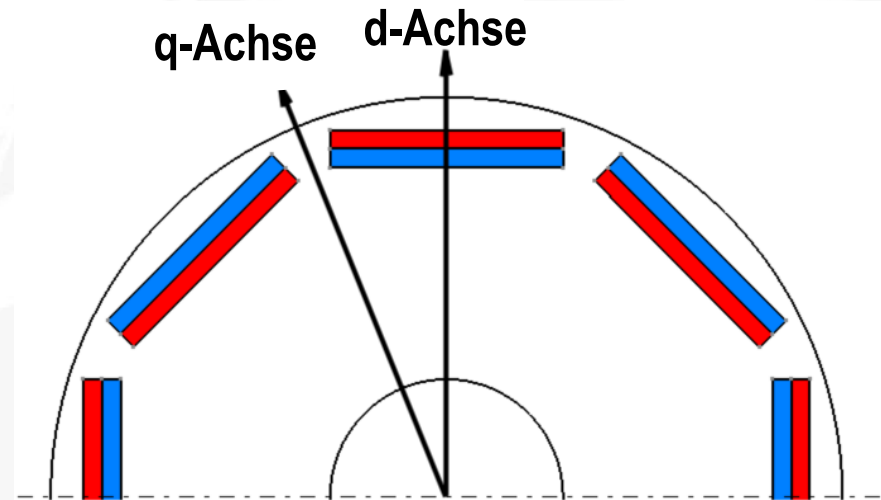


Prinzipielle Anordnung von
Oberflächenmagneten

$$X_d = X_q$$

Nachteile:

- Verwendung einer Bandage
- Wirbelstromverluste in PM



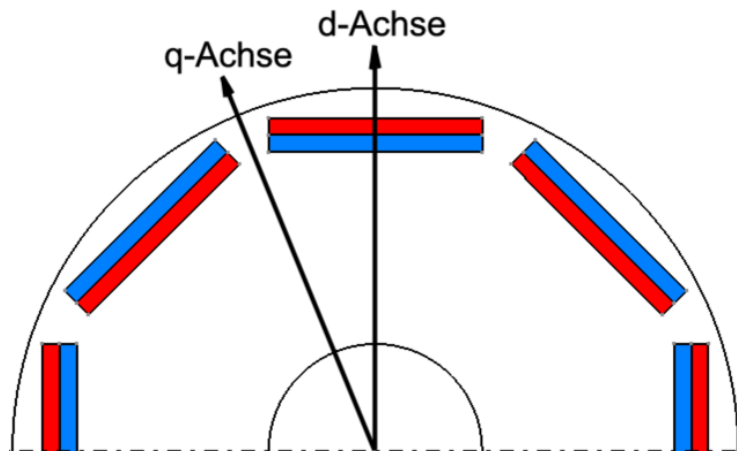
Prinzipielle Anordnung von
vergrabenen Magneten

$$X_d < X_q$$

Vorteile:

- mechanische Belastung in Rotorblechpaket
- geringe Verluste in PM

Achsigkeit des PM-Rotors mit vergrabenen Magneten



Reaktanz in d und q-Richtung
bei konventioneller Schenkel-
polmaschine:

$$X_d < X_q$$

Magnetischer Widerstand:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$

Induktivität:

$$L = N^2 \cdot \Lambda = \frac{N^2}{R_m}$$

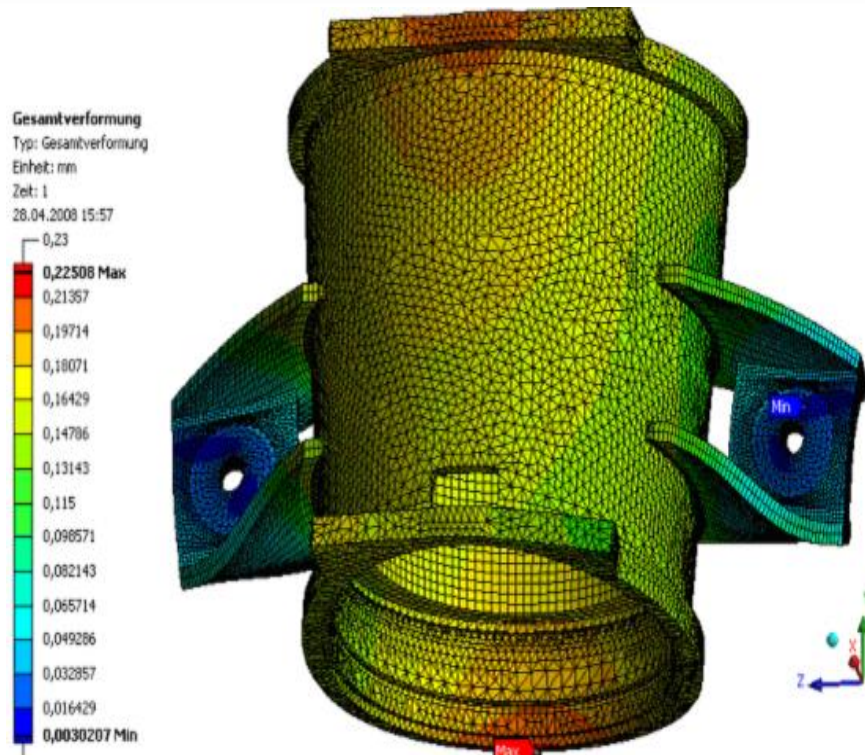
Innere Leistung:

$$P_i = m \cdot \frac{U_1 \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta + m \cdot \frac{U_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta$$

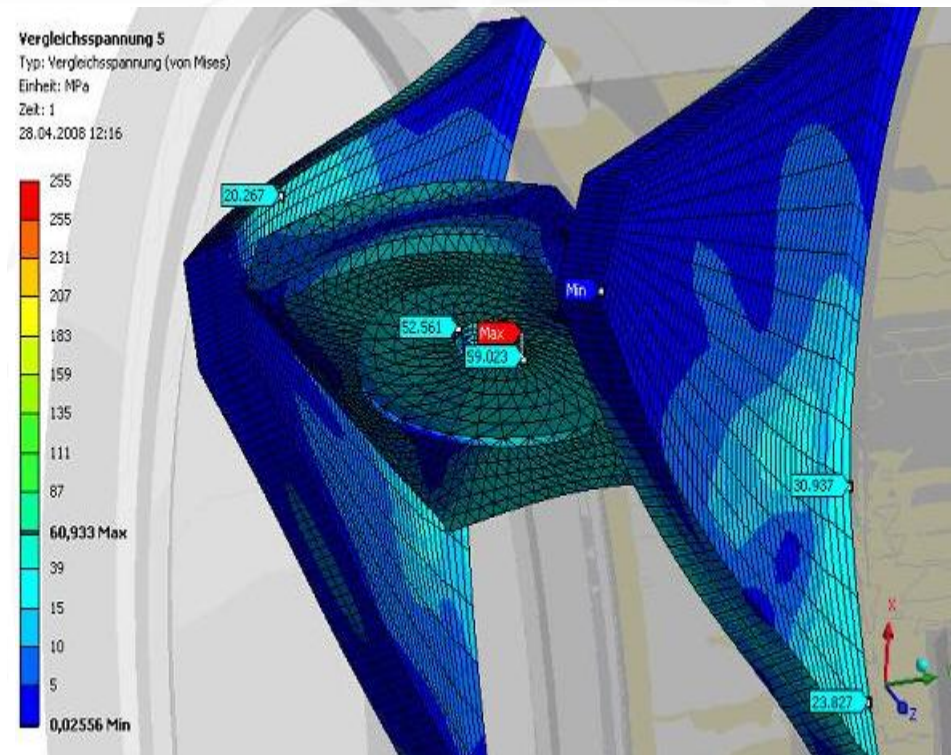
Drehmoment:

$$M \sim \frac{U_1 \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta + \frac{U_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta$$

Mechanische Berechnung Stator

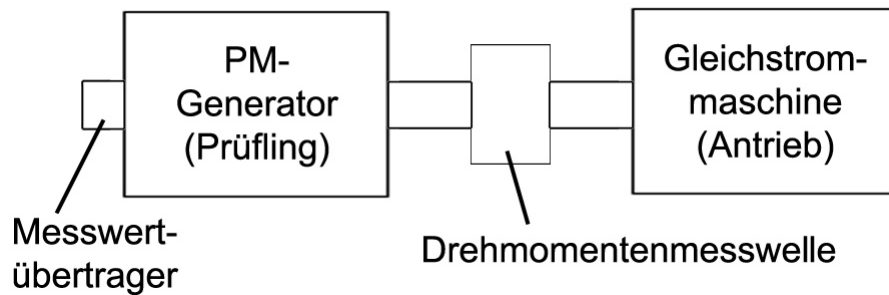


3D-Finite-Elemente-Berechnung des
Aluminium-Gehäuses
Berechnung der Verformung

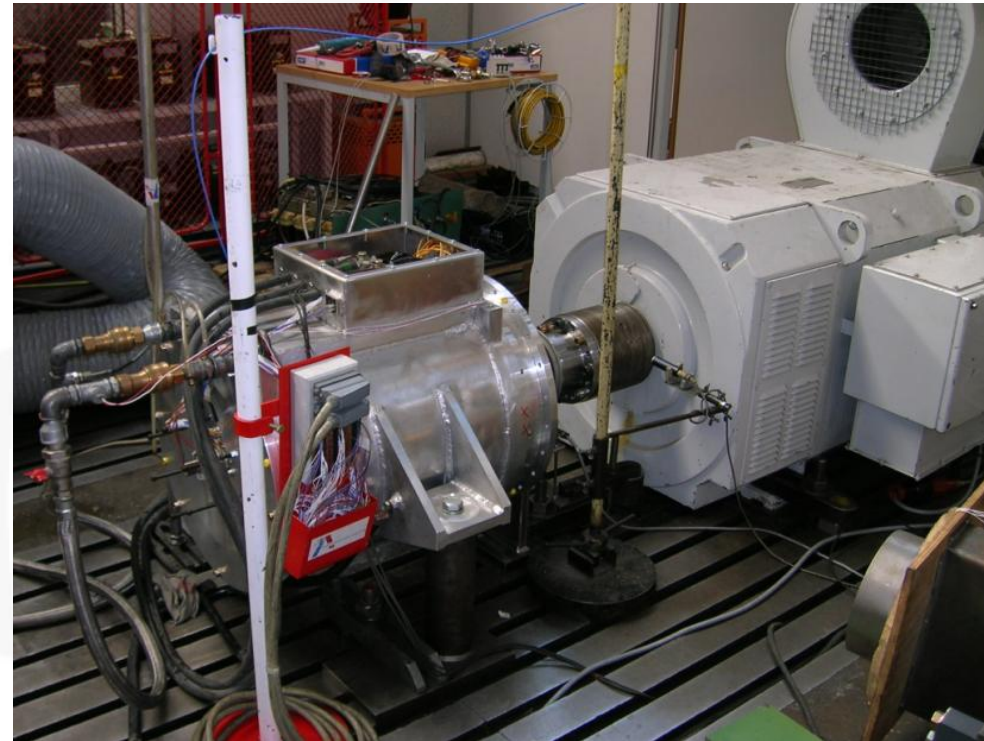


3D-FE-Berechnung der Generatöraufhängung
Berechnung der Vergleichsspannung nach von Mises

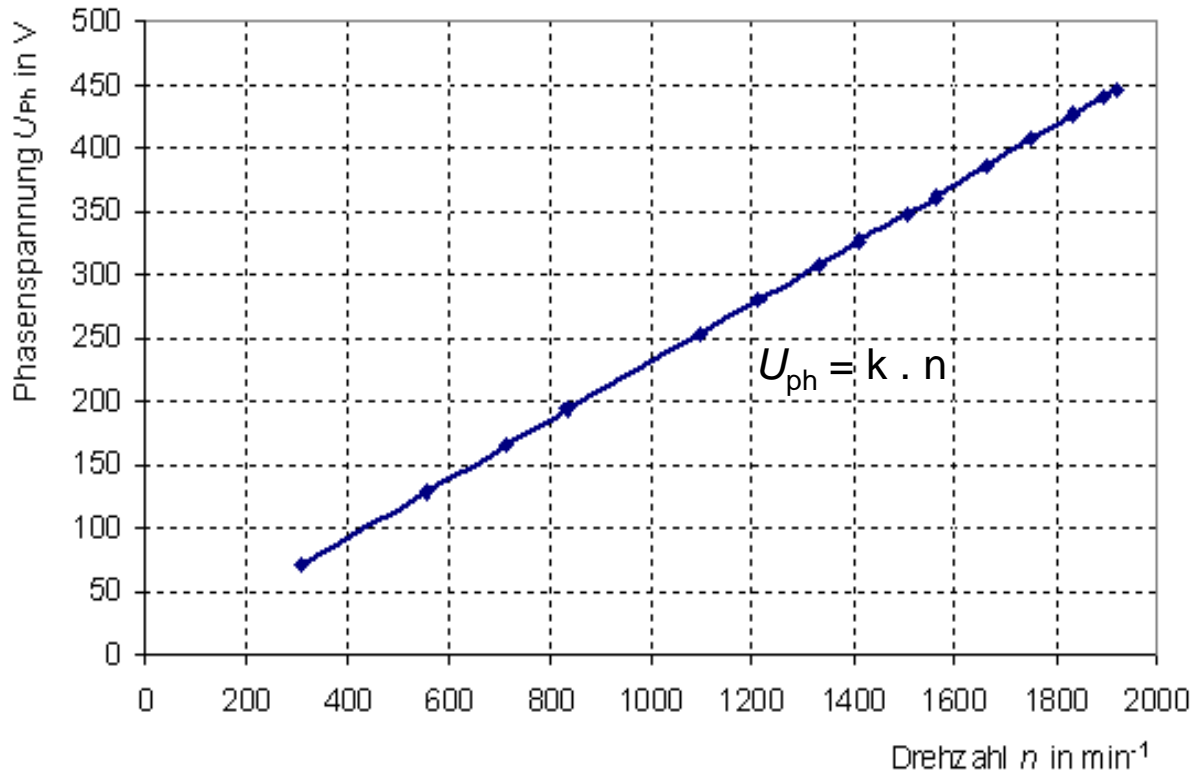
Prüfanordnung



Prüfaufbau zur Messung des PM-Generators
Direkte Wirkungsgradberechnung
28 Temperaturfühler: (Pt 100) davon
3 Temperaturfühler im Rotor



Messergebnisse Leerlauf



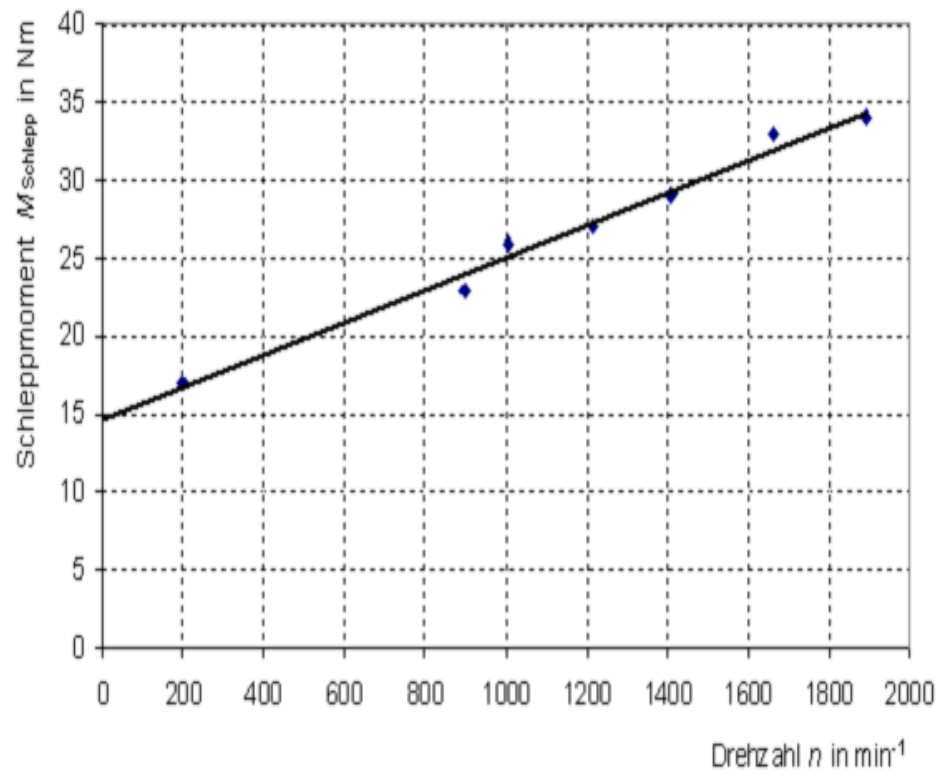
Leerlaufspannung (Grundschiwingung) in
Abhängigkeit der Drehzahl

Ordnung	U_{ph} in V
1	446,8
3	0,4
5	0,9
7	1,6
9	0,1
11	0,5
13	5,0
15	0,1
17	0,1
19	0,0

Anteil der Grundschiwingung und
der Oberschiwingungen von der
Leerlaufspannung

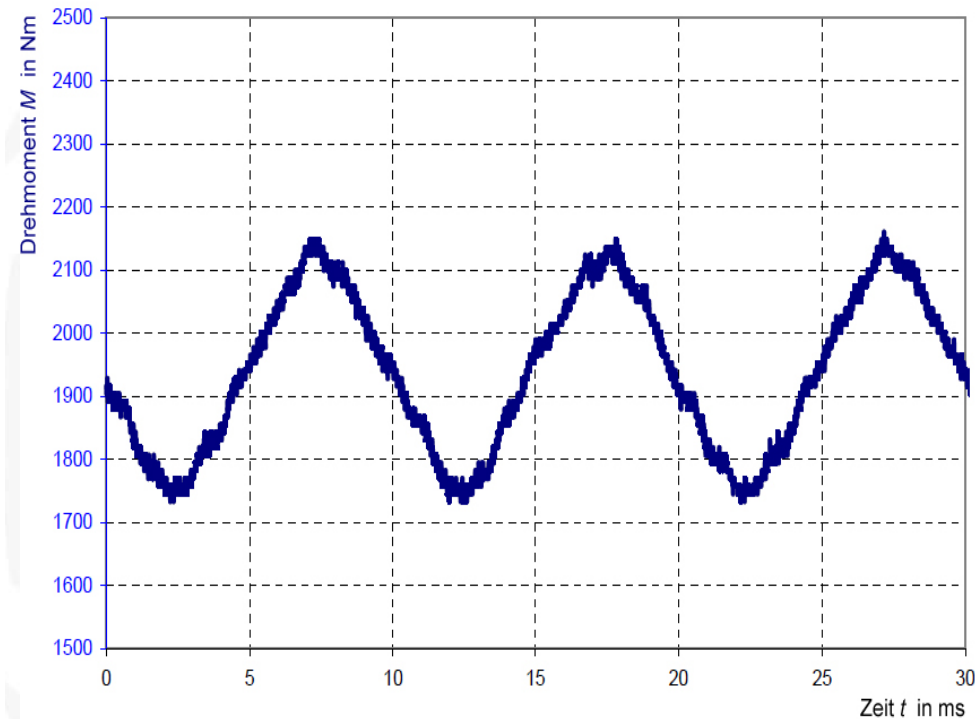
Messergebnisse

Schleppmoment



Schleppmoment in Abhängigkeit der Drehzahl

Rippelmoment



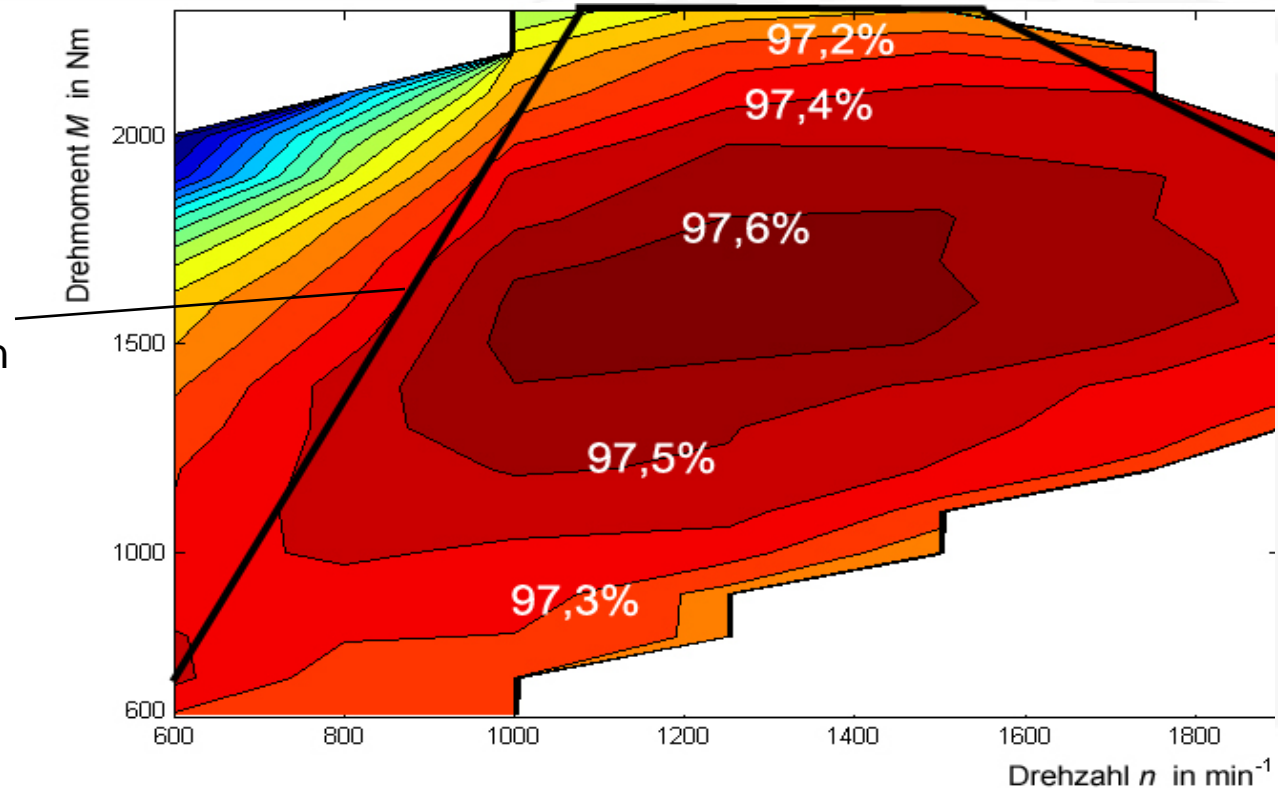
Zeitlicher Momentenverlauf bei einem mittleren Drehmoment von 1952 Nm

Messwerte: Erwärmungslauf S1-Betrieb $P_{ab} = 375 \text{ kW}$

Spannung	U	V	612	mittlere Statorwicklungstemperatur	$\vartheta_{\text{Wicklung}}$	°C	151
Strom	I	A	354	mittlere PM-Temperatur	ϑ_{PM}	°C	164
Frequenz	f	Hz	126,46	mittlere Wickelkopftemperatur	$\vartheta_{\text{Wickelkopf}}$	°C	162
Drehzahl	n	min ⁻¹	1897	Lagertemperatur AS	$\vartheta_{\text{LagerAS}}$	°C	85
Drehmoment	M	Nm	1952	Lagertemperatur NS	$\vartheta_{\text{LagerNS}}$	°C	80
Leistung mech.	P_{mech}	W	387670	mittlere Kühlmitteltemperatur	$\vartheta_{\text{Kühlmittel}}$	°C	65
Summe der Verluste	P_V	W	12850	Messergebnisse und daraus errechnete Verluste bei maximaler Dauerleistung Erreichung der Beharrungstemperaturen nach ca. 3,5 h			
abgegebene Wirkleistung el.	P_{ab}	W	374820				

Wirkungsgradkennfeld

maximale Betriebskennlinie
des Dieselmotors
Momenten-/Drehzahlkennlinien
des Dieselmotors



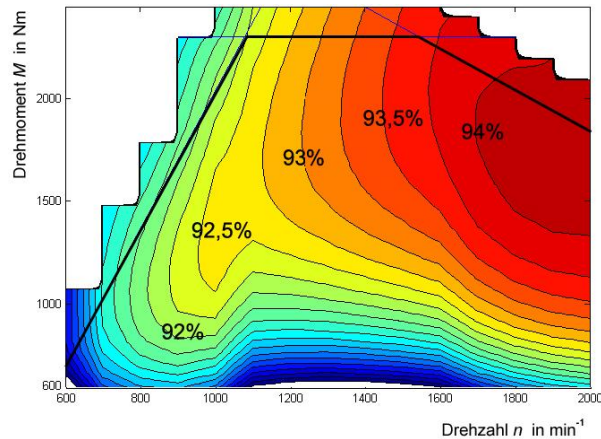
Wirkungsgradkennfeld („Muschelkurve“) des PM-Generators
Statorwicklungstemperatur ca. 120 °C

Vergleichswerte von unterschiedlichen Generatortechnologien bei gleicher Leistungsklasse

			konventioneller Synchrongenerator	Asynchrongenerator	PM-Generator
Leistung	P	kW	408	370	390
Spannung	U	V	816 (DC)	429 (AC)	860 (DC)
Masse	m	kg	1320	1020	650
Polzahl	$2p$	-	6	4	8
Höhe	h	mm	660	630	530
Breite	b	mm	720	620	530
Länge	l	mm	1200	880	720
Kühlungsart	-	-	Luft eigenbelüftet	Luft eigenbelüftet	Flüssigkeit
Sonstiges	-	-	mitrotierende Erregermaschine	Kurzschlussläufer	vergrabene Magnete

Wirkungsgradkennfelder der drei Generatortechnologien

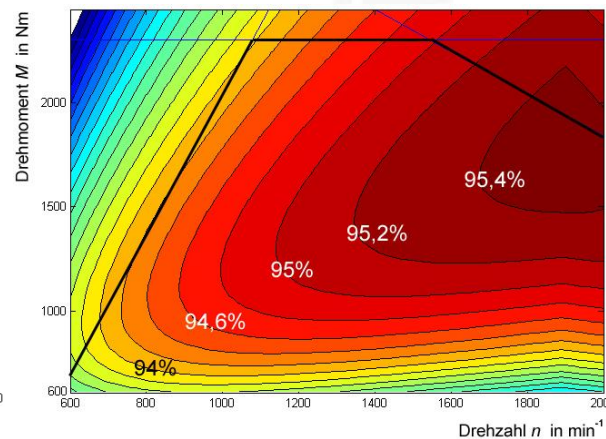
konventioneller
Synchrongenerator



Wirkungsgradbereich:
 $\eta = 92 \% - 94 \%$

Verluste bei Betriebspunkt $M = 1910 \text{ Nm}$, $n = 1800 \text{ min}^{-1}$, $P_{mech} = 360 \text{ kW}$
 $P_v = 21,6 \text{ kW}$

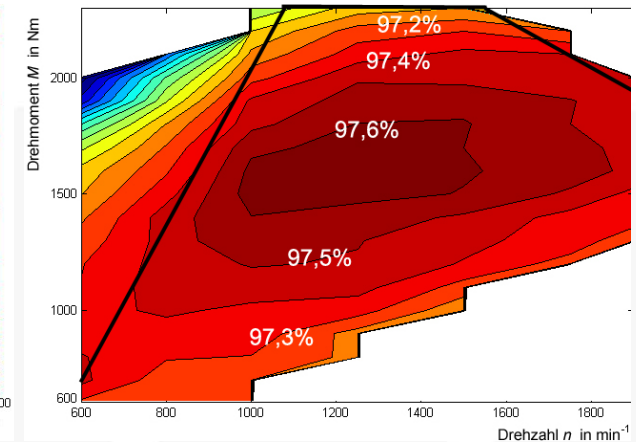
Asynchrongenerator



$\eta = 94 \% - 95,4 \%$

$P_v = 16,6 \text{ kW}$

Permanenterregter
Synchrogenerator



$\eta = 97,2 \% - 97,6 \%$

$P_v = 9 \text{ kW}$

Berechnetes Einsparungspotential für einen dieselelektrischen Personentriebwagen

Berechnung mit Simulationstool Matlab Simulink
Dieselelektrischer Personentriebwagen Type GTW
Masse des Fahrzeuges ca. 87 t und ca. 187 Sitzplätze
Simulierte Strecke Wr. Neustadt – Aspang – Friedberg

	Konventionelle SG	ASG	PSG
Verbrauchsreduzierung von Dieseltreibstoff	-	ca. 2,5%	ca. 5%
Reduktion der CO ₂ -Emission	-	ca. 2,5 %	ca. 5 %

Reduktion durch: besseren Wirkungsgrad, geringfügige Reduktion der Masse
Weitere Vorteile: geringfügig höhere max. Leistung am Rad

Zusammenfassung

Permanenterregte Synchrongeneratoren haben folgende Vorteile:

- Ausführung als flüssigkeitsgekühlte Maschine durch geringe Rotorverluste möglich
- Anordnung mit vergrabenen PM bietet fertigungstechnische Vorteile
- Massenreduzierung gegenüber einem konventionellen Synchrongenerator ca. 50 %
- Massenreduzierung gegenüber Asynchrongenerator ca. 35 %
- Wirkungsgrad im technisch relevanten Bereich beträgt 97% - 98%
- Schalldruckpegel im gesamten Drehzahlbereich < 87 dB(A)
- Steigerung der Leistungsdichte gegenüber konventionellen Generatoren ca. 30 %
- Berechnetes Einsparungspotential des Dieseltreibstoffes bei dieselektrischem Personentriebzug gegenüber konventionellen Synchrongenerator ist ca. 5 %

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Univ.-Lektor Dr. techn. Dr. phil. Harald Neudorfer

E-Mail: harald.neudorfer@traktionssysteme.at

Tel.: 02236/8118 250