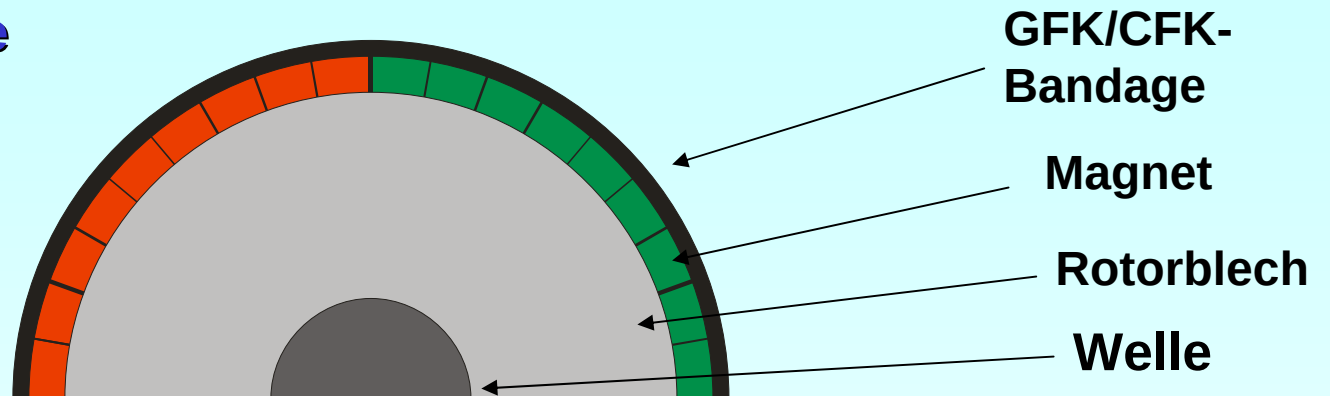


5. PM-Rotoren mit Oberflächen- und vergrabenen Magneten

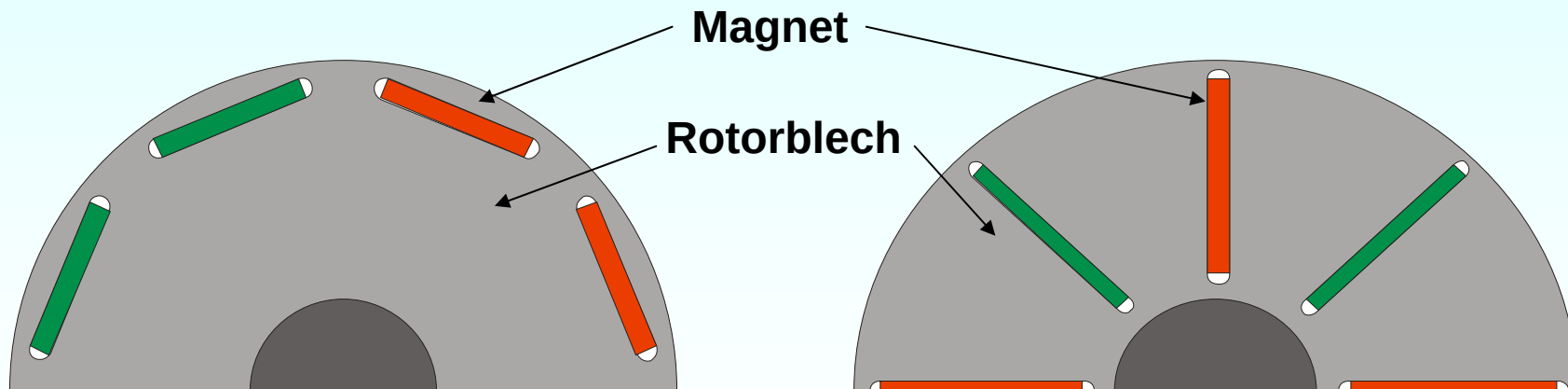
Rotorvarianten für PM Maschinen

Oberflächenmagnete

GFK: Glasfaserkomposit
CFK: Kohlefaserkomposit



Vergrabene Magnete



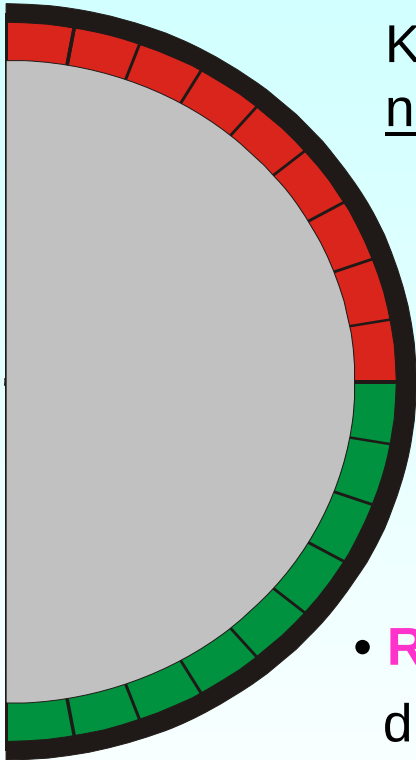
Ohne Flusskonzentration

Mit Flusskonzentration

Oberflächenmagnete

Befestigung der Magnete durch Bandage:

Befestigung der aufgeklebten Magnete durch eine Glas- oder Kohlefaserhülse (Faser-Harz-„Matrix“ = „Bandage“). Klebung geht nicht in Festigkeitsbetrachtung ein.



Aufpressen oder Aufschrumpfen („Kaltschrumpfen“) der vorgefertigten Hülse (Bandage) mit Untermaß ΔD . Es entstehen ein **Anpressdruck** auf die Magnete und eine tangential **Vorspannung** σ_v in der Bandage

Zusätzliche Effekte während des Betriebs:

- **Rotorerwärmung/Dehnung** erhöht die Vorspannung, denn die Bandage dehnt sich thermisch nahezu nicht !
- **Fliehkräfte auf die Bandage** erhöhen Tangentialspannung
- **Fliehkräfte auf die Magnete** zehren den Anpressdruck auf
- An event. **Pollücken** entstehen Spannungsüberhöhungen!

Festigkeitswerte: Kohlefaser versus Dynamoblech

	E_{11} GPa	E_{12} GPa	σ_t N/mm ²
Glasfaser (GF)	73	73	2400 (20°C)
Kohlefaser (CF)	240	16.4	4800 (20°C)
C-Faser-Matrix (CFK) 60% *)	142	9.7	2475 (20°C) (ca. - 50%)
Temperatureinfluß auf $\sigma_{t,lim}$			1650 (150°C)
Fertigungseinfluß auf $\sigma_{t,lim}$			1100 (150°C)
Dynamoblech M330-35	200	220	330 (0.2% plast. Dehnung)
aus Zugversuch			470 Streckgrenze
M230-35	185	200	430 $R_{p0,2}$
			550 Streckgrenze
Sonderblech			820 Streckgrenze

*) 60% Faseranteil in der Matrix

Auslegung der Bandage auf Untermaß

- Aufschumpfen oder Aufpressen der Hülse mit Untermaß ΔD :

Hooke'sches Gesetz: $\sigma_V = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta D}{D} E$

- Bestimmung des **Anpressdrucks** aus der „Kesselformel“:

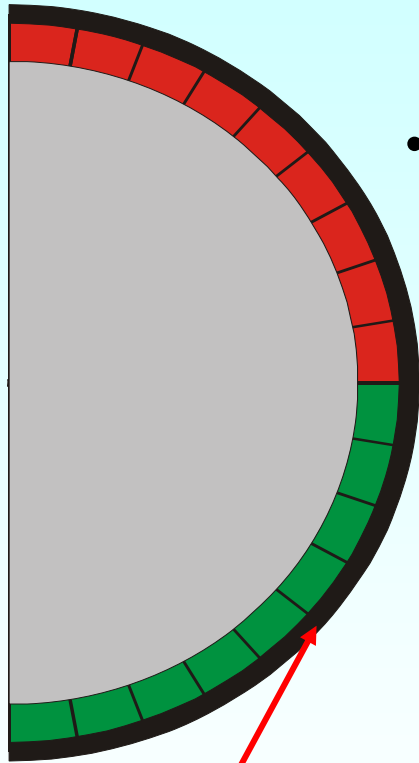
$$p_V = \frac{\sigma_V \cdot d_{\text{Bandage}}}{r_{\text{Bandage}}} \quad \text{„dünne Schale“}$$

- Erhöhung des Untermaßes ΔD durch Rotorerwärmung:

Die Bandage dehnt sich mit der Temperatur nahezu nicht!
Dehnung der Welle und der Magnete gemäß:

$$\Delta l = l \cdot \alpha_{\text{therm}} \cdot \Delta \vartheta$$

Es ergeben sich neue Werte für ΔD und D **und damit erhöhte Spannungen:** $\sigma_{V,\text{warm}}$ und $p_{V,\text{warm}}$!



Bandage ist „dünne Schale“

Auslegung der Bandage auf Überdrehzahl

- Einfluss der Fliehkraft (massgeblich: Schleuderdrehzahl $1,2 \cdot n_N$!):

Zusätzliche Tangentialspannung durch Bandagenfliehkraft:

$$\sigma_{t,\omega}(r = r_i) = 0,4125 \cdot \rho_{\text{Bandage}} \cdot \varpi_{\text{schl}}^2 (0,424 \cdot r_i^2 + 2 \cdot r_a^2) \text{ dicke Schale}$$

$$p_{B,\omega} = r_{\text{Bandage}} \cdot \rho_{\text{Bandage}} \cdot \varpi_{\text{schl}}^2 \cdot h_{\text{Bandage}}$$

Zusätzlicher Innendruck durch Fliehkraft auf die **Magnetsegmente**:

$$p_{M,\omega} = r_M \cdot \rho_M \cdot \varpi_{\text{schl}}^2 \cdot h_M$$

- Prüfung der Bandage auf Bruchbedingungen:

Bei der Schleuderdrehzahl müssen 2 Bedingungen eingehalten werden:

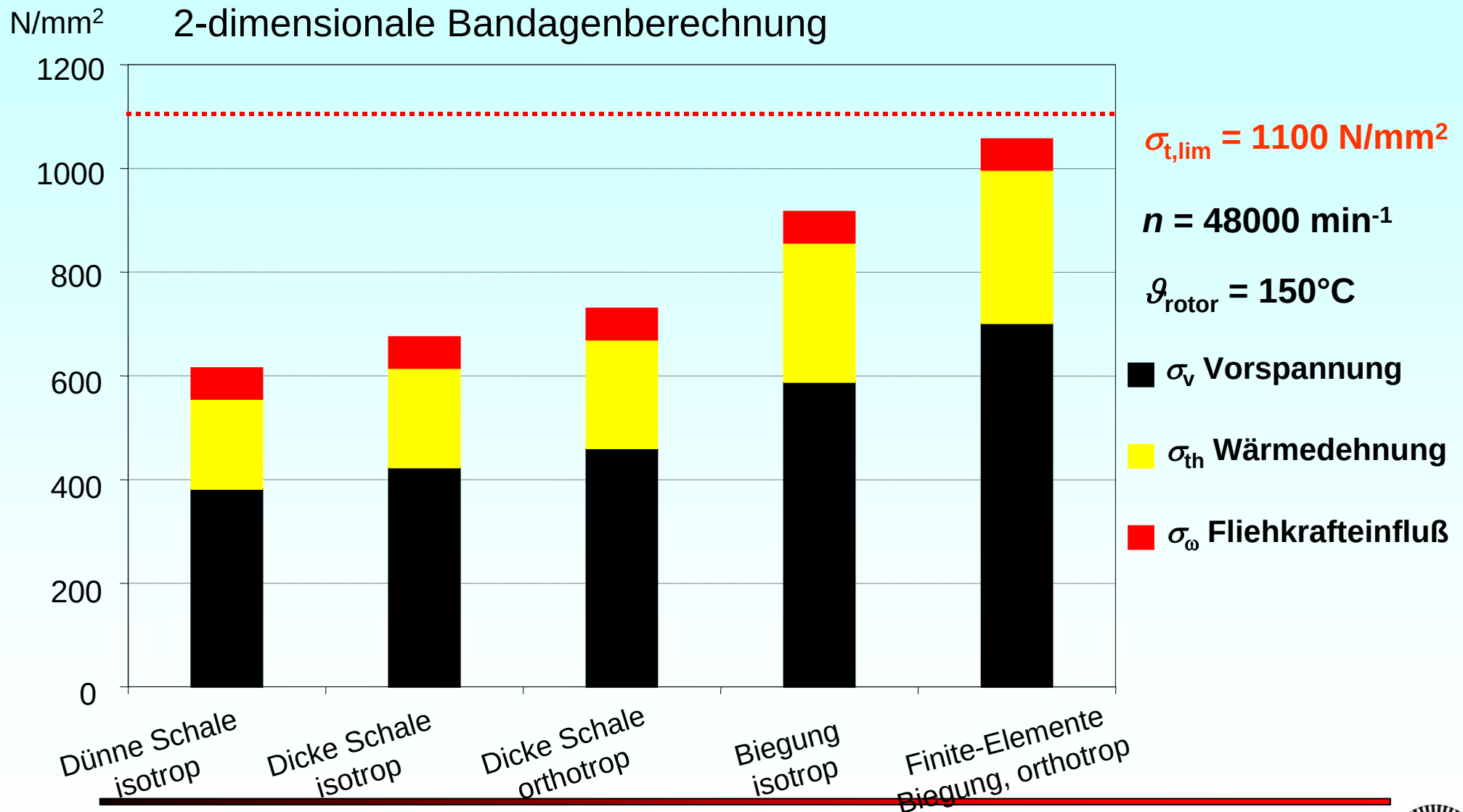
1. Tangentialspannung in der Bandage unterhalb der Maximalspannung?

$$\sigma_t = \sigma_{V,\text{warm}} + \sigma_{t,\omega} < \sigma_{\text{Bandage,max}}$$

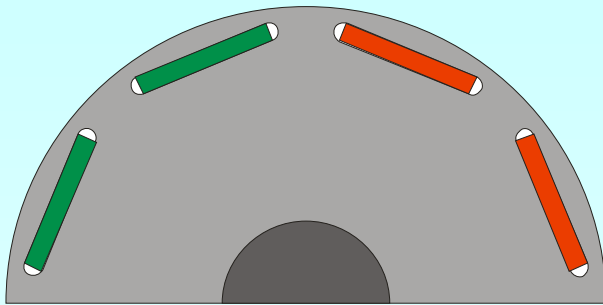
2. Restanpressdruck auf die Magnete größer Null?

$$p_A = p_V - p_{M,\omega} - p_{B,\omega} > 0$$

Beispiel: Magnetgelagerter Antrieb - Rotor M1



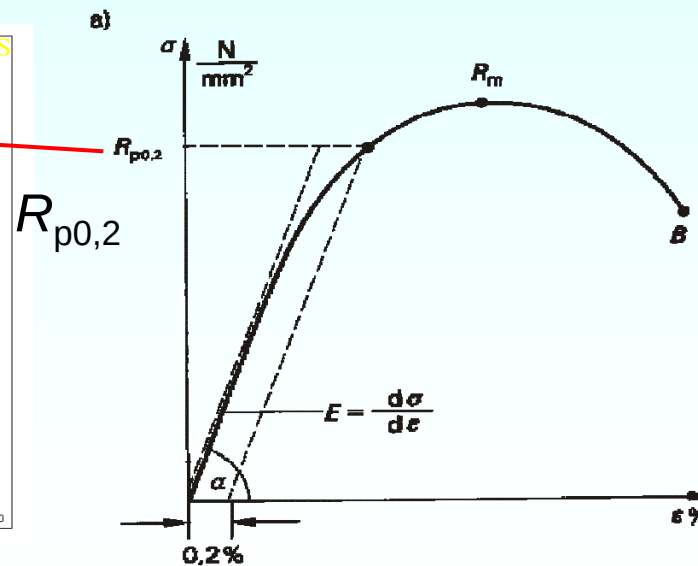
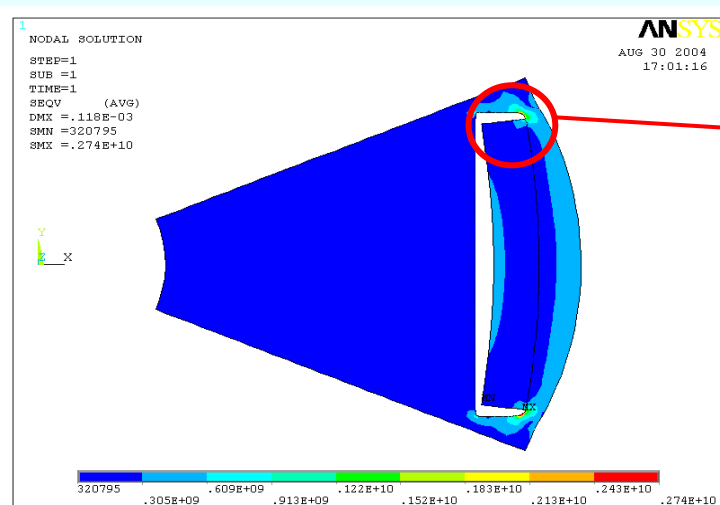
Vergrabene Magnete - Festigkeit des Dynamoblechs



Magnete werden vom Rotorblech gehalten:

- keine Bandage mehr
- Luftspalt wird kleiner
- weniger Magnetmaterial erforderlich

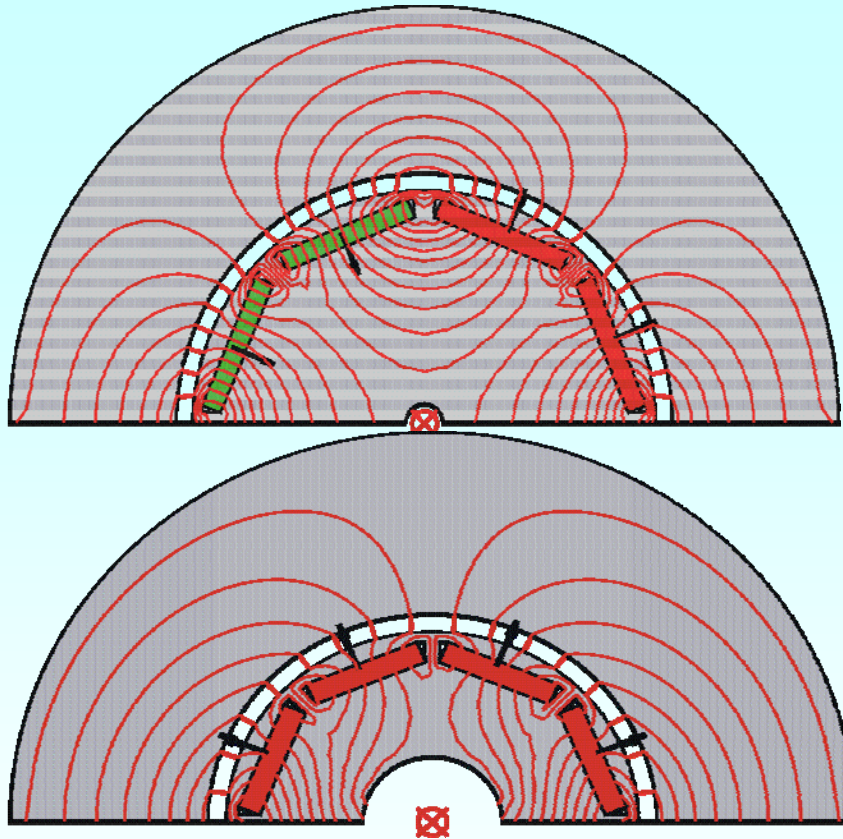
- Genaue analytische Spannungsberechnung schwierig $\Rightarrow$ FEM-Berechnung!
- max. Spannung muss unterhalb der 0,2%-Dehngrenze des Bleches bleiben



Spannungs-
Dehnungs-
Diagramm
(Zugversuch)

Quelle: VDI Physik für Ingenieure

Magnetfelder von vergrabenen und Oberflächenmagneten

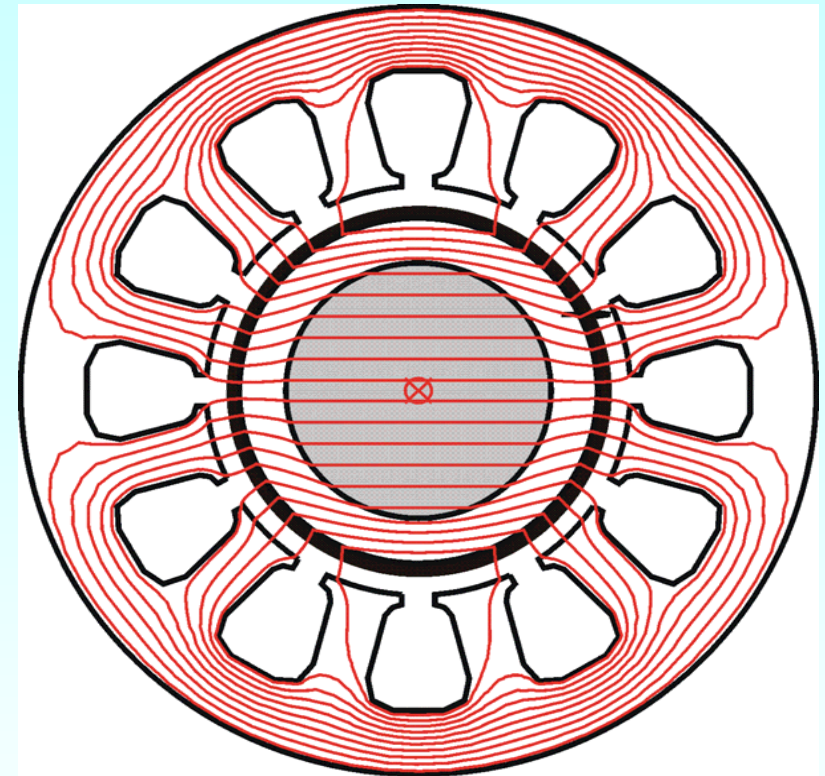


Vergrabene Magnete OHNE Flußkonzentration

oben: vierpolige Maschine

unten: 2-polige Maschine

(Nuten nicht dargestellt)

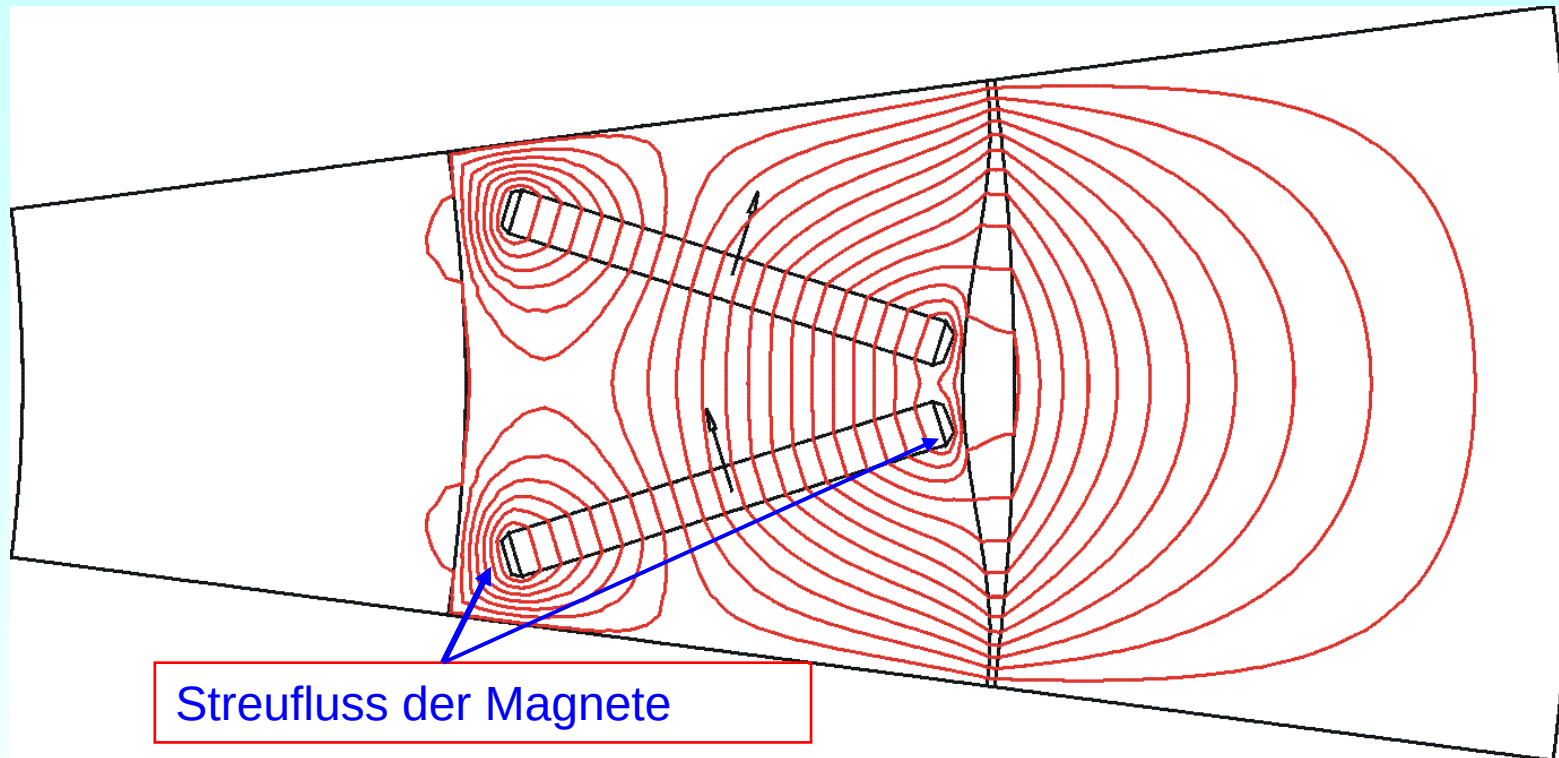


Oberflächenmagnete

2-polige Maschine



Magnetfelder von vergrabenen Magneten mit Flußkonzentration



Vergrabene Magnete MIT Flußkonzentration:

24-polige Maschine

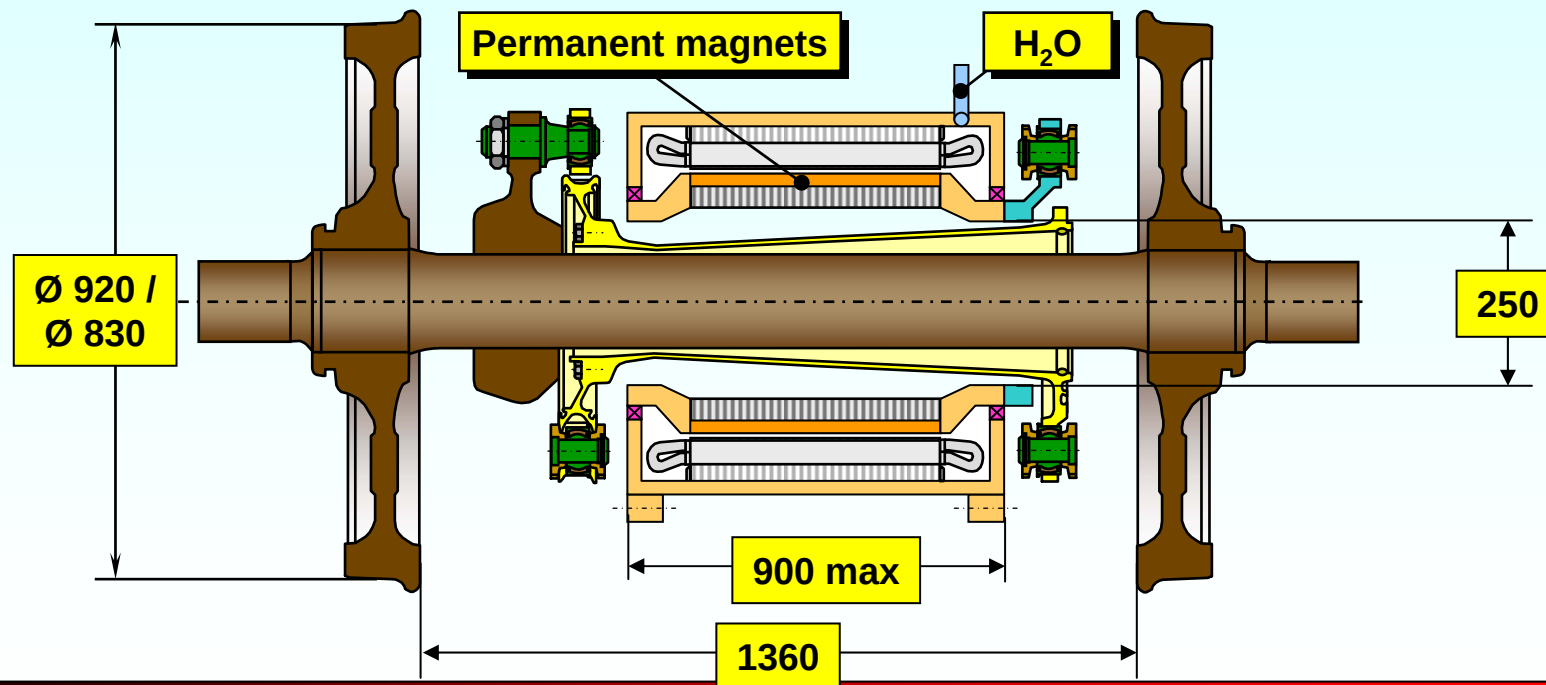
Flußkonzentration funktioniert besser bei höheren Polzahlen

(Nuten nicht dargestellt)

Beispiel: Vergleich PM-Rotoren mit Oberflächen- und vergrabenen Magneten

Beispielmotor: Direktantrieb für Bahnen

Rated output P_N per motor	500 kW
Maximum outer diameter $d_{\max}$ of the motor	590 mm
Minimum inner diameter $d_{\min}$ of the motor	250 mm
Maximum axial length of the motor	900 mm



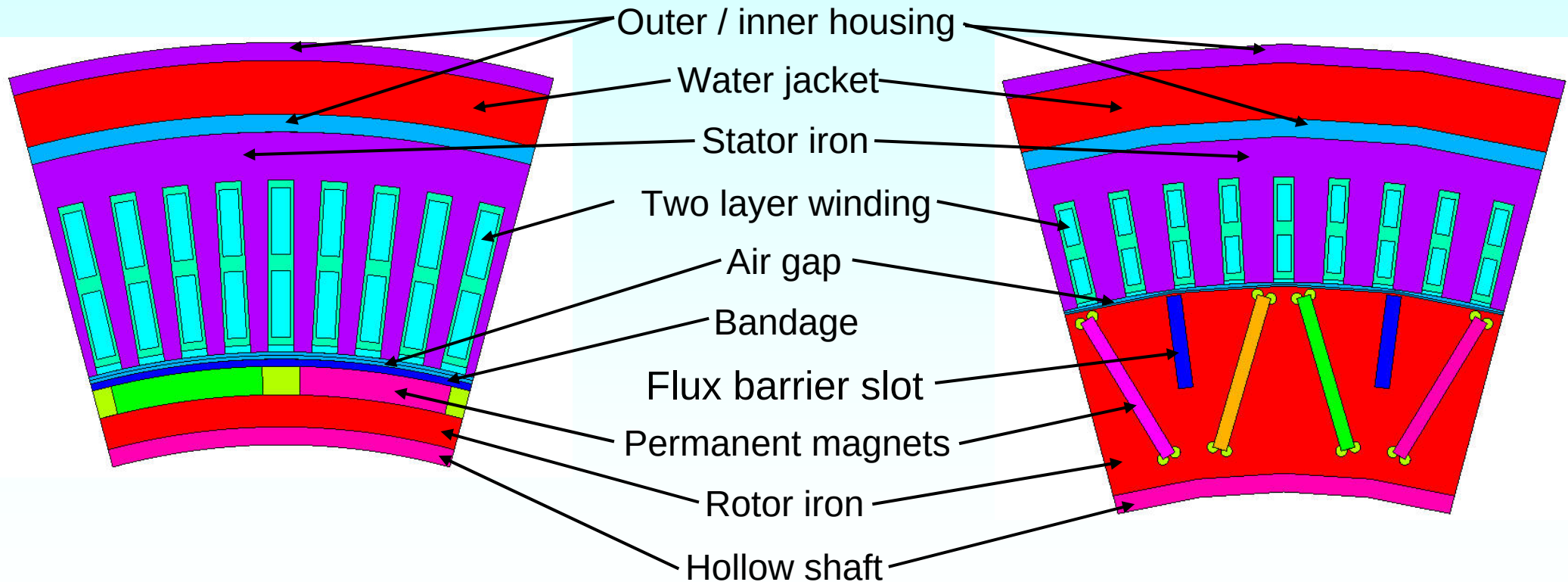
Geometry of the two designed motors

Motor A

Surface mounted magnets

Motor B

Buried magnets

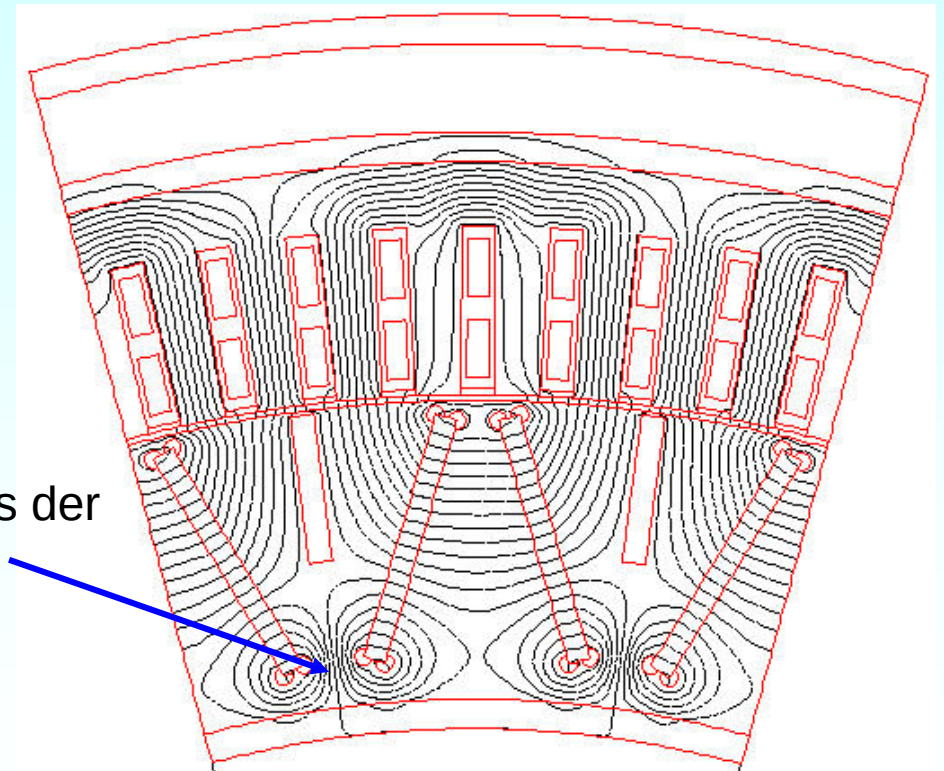
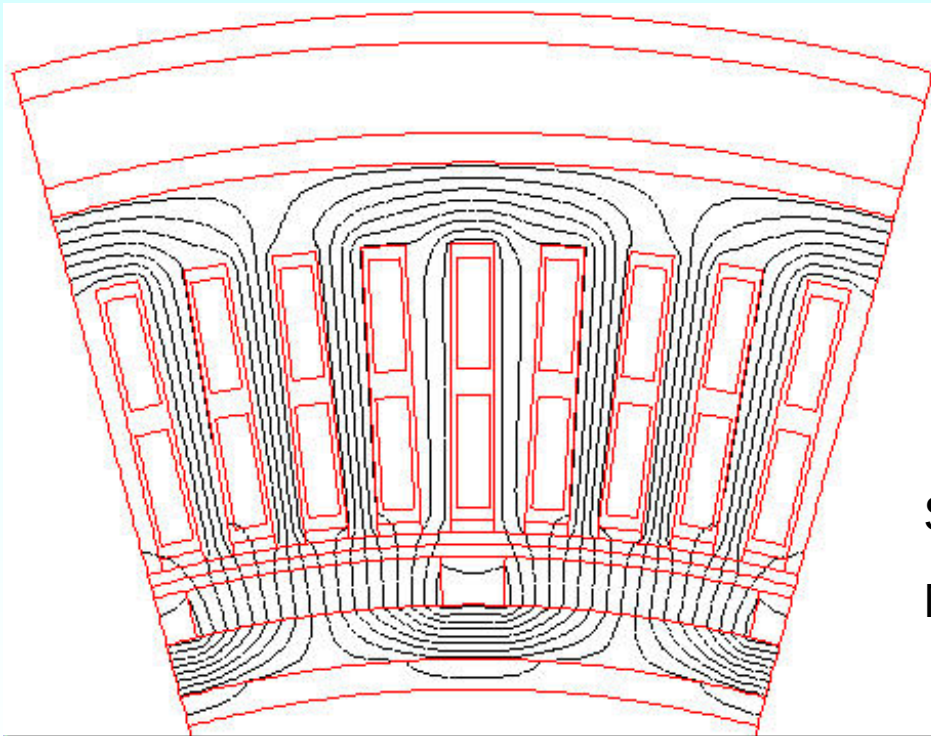


Flux pattern of motor A and motor B at no-load operation

Motor A

$$I_s = 0$$

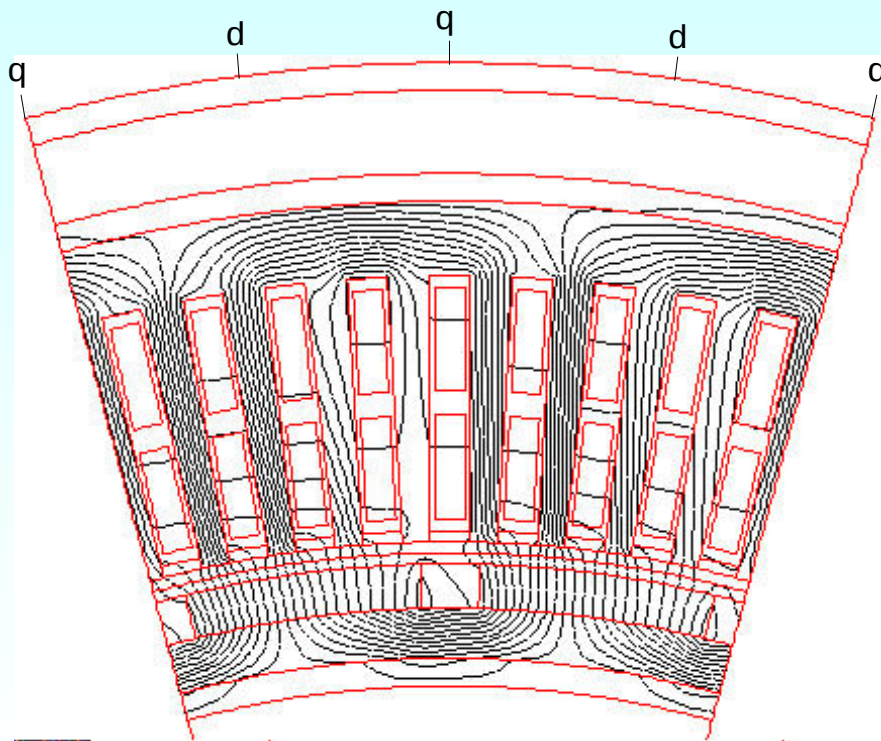
Motor B



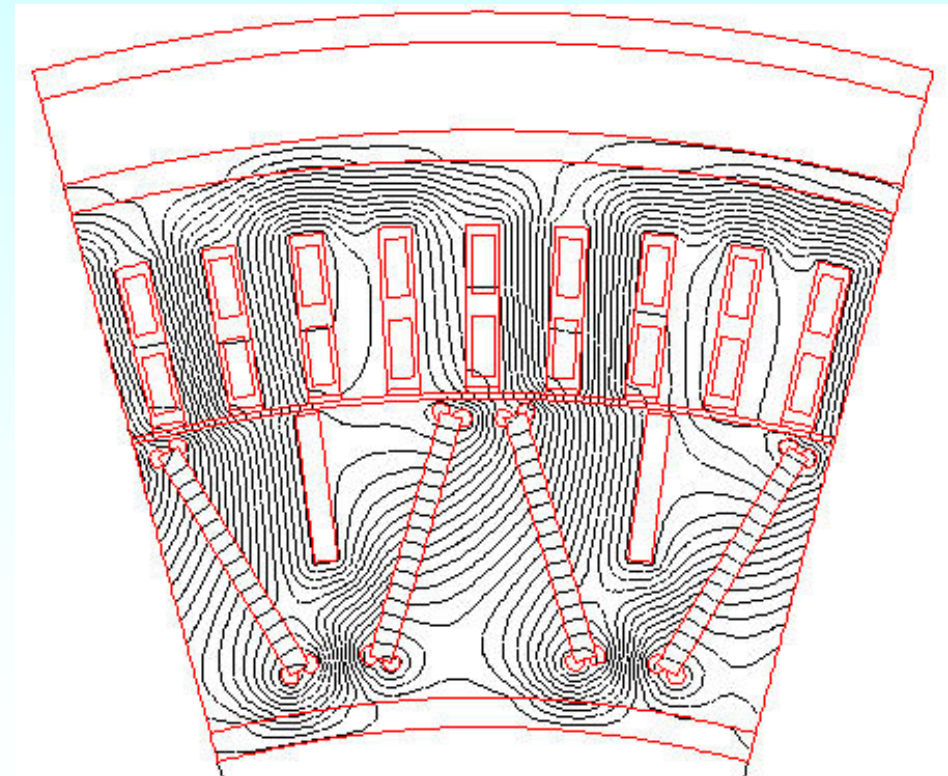
Streufluss der
Magnete

Flux pattern of motor A and motor B at rated speed and power

Motor A ($I_s = 251 \text{ A}$)



Motor B ($I_s = 283 \text{ A}$)



Calculated losses at sinusoidal supply and rated operation

➡ 500 kW, 617 /min, 7700 Nm, 123.4 Hz ⬅

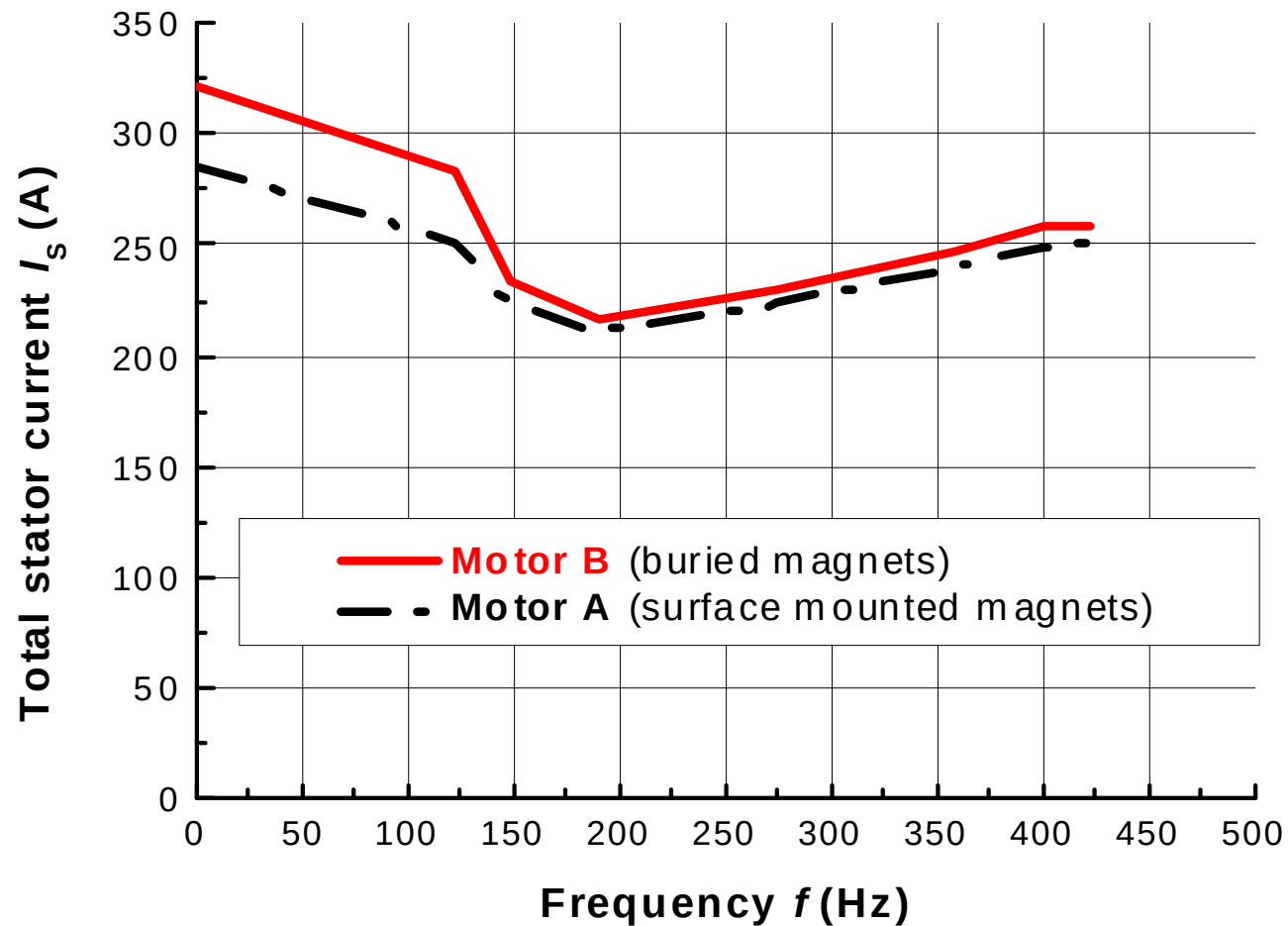
	Motor A	Motor B
> Current	251 A	283 A
> Ohmic and conductor eddy current losses at 115 °C	14820 W	15881 W
> Iron losses	5419 W	6519 W
> Friction and windage losses	71 W	160 W
> Eddy-current losses in the massive housing	251 W	465 W
> Losses in the permanent magnets	20 W	0 W
> Total losses <i>P</i>	20581 W	23025 W

Calculated losses at sinusoidal supply and maximum speed

➡ 500 kW, 2110 /min, 2270 Nm, 422 Hz ⬅

	Motor A	Motor B
> Current	253 A	260 A
> Ohmic and conductor eddy current losses at 115 °C	26864 W	15818 W
> Iron losses	7755 W	19223 W
> Friction and windage losses	357 W	521 W
> Eddy-current losses in the massive housing	61 W	410 W
> Losses in the permanent magnets	101 W	- W
> Total losses <i>P</i>	35138 W	35972 W

Total stator current of motor A and motor B



Active masses of motor A and motor B

