

Untersuchung des utopia Pedelec-Antriebs

Power Engineering Saar

Institut für Elektrische Energiesysteme der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

Prof. Dr.-Ing. Michael Igel

Prof. Dr.-Ing. Stefan Winterheimer

www.powerengs.de





Controller



Bedienfeld



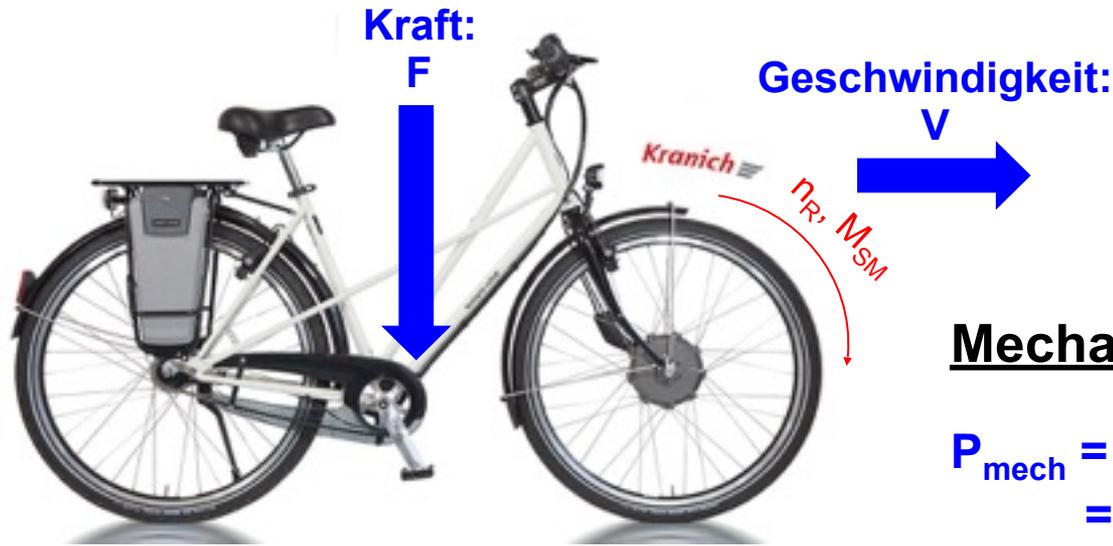
- Direktantrieb im Vorderrad mit permanenterregter Synchronmaschine (PMSM)
- Anschiebehilfe bis $v_{AH} = 5 \text{ km/h}$

Batteriesystem:

- $U_{Batt,N} = 36 \text{ V}$
- $U_{Batt,LS} = 42 \text{ V}$
- $Q_{Batt} = 6,4 \text{ Ah}$
- $E_{Batt} = 230,4 \text{ Wh}$

zu ermitteln:

- maximales Drehmoment
- Wirkungsgrad

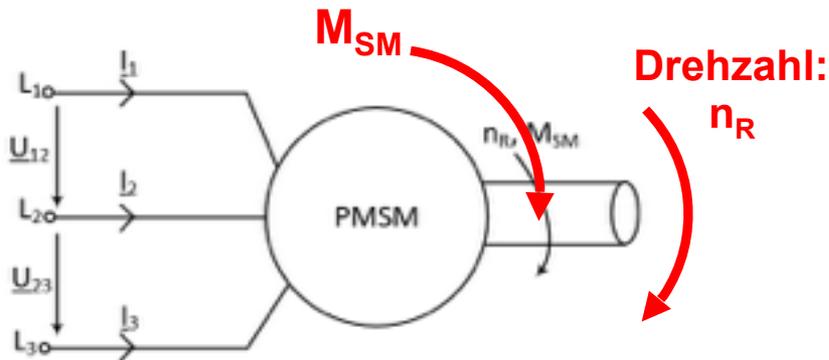


Mechanische Leistung:

$$P_{\text{mech}} = F * V$$

= Kraft * Geschwindigkeit

Drehmoment:

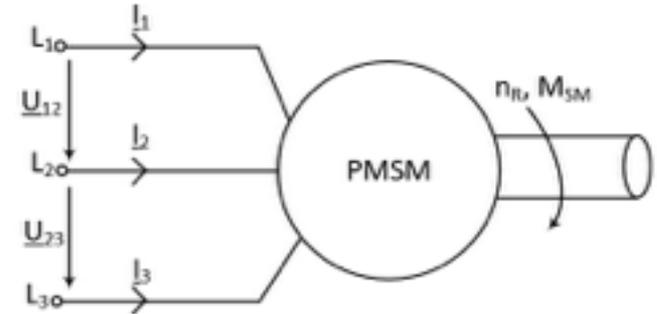
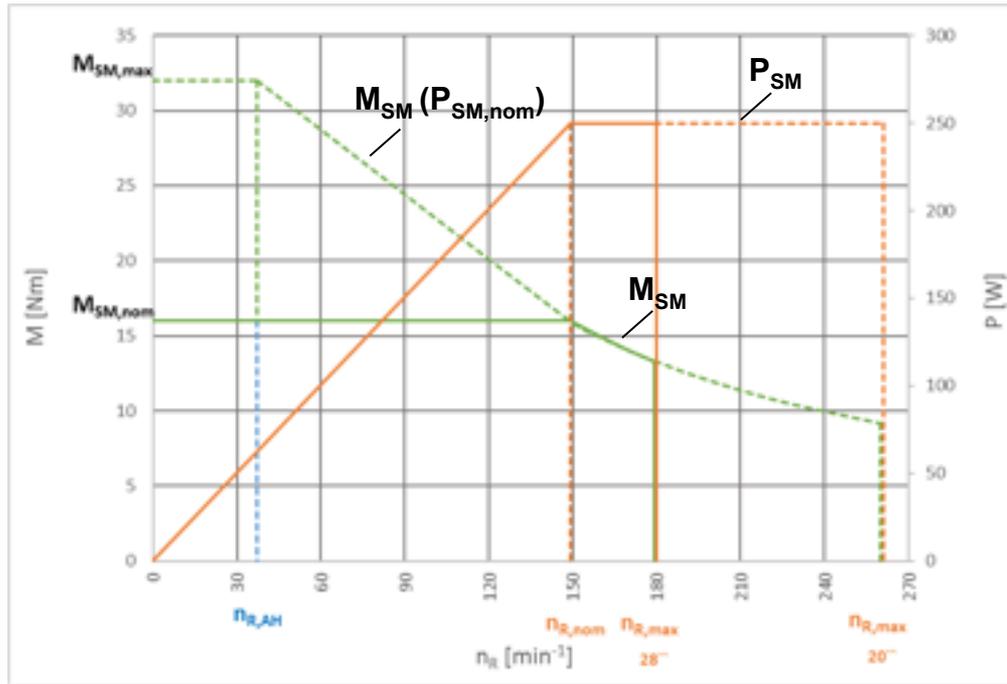


$$P_{\text{mech}} = M_{\text{SM}} * 2\pi * n_{\text{R}}$$

= Drehmoment * Drehzahl

Permanenterregte Synchronmaschine

Im Stillstand ($V = n_{\text{R}} = 0$) ist die Leistung gleich Null



$$v_{max} = 25 \text{ km/h}$$

$$\varphi_{Rad} = 28'' \quad | \quad \varphi_{Rad} = 20''$$

$$n_{R,max} = 180 \text{ min}^{-1} \quad | \quad 261 \text{ min}^{-1}$$

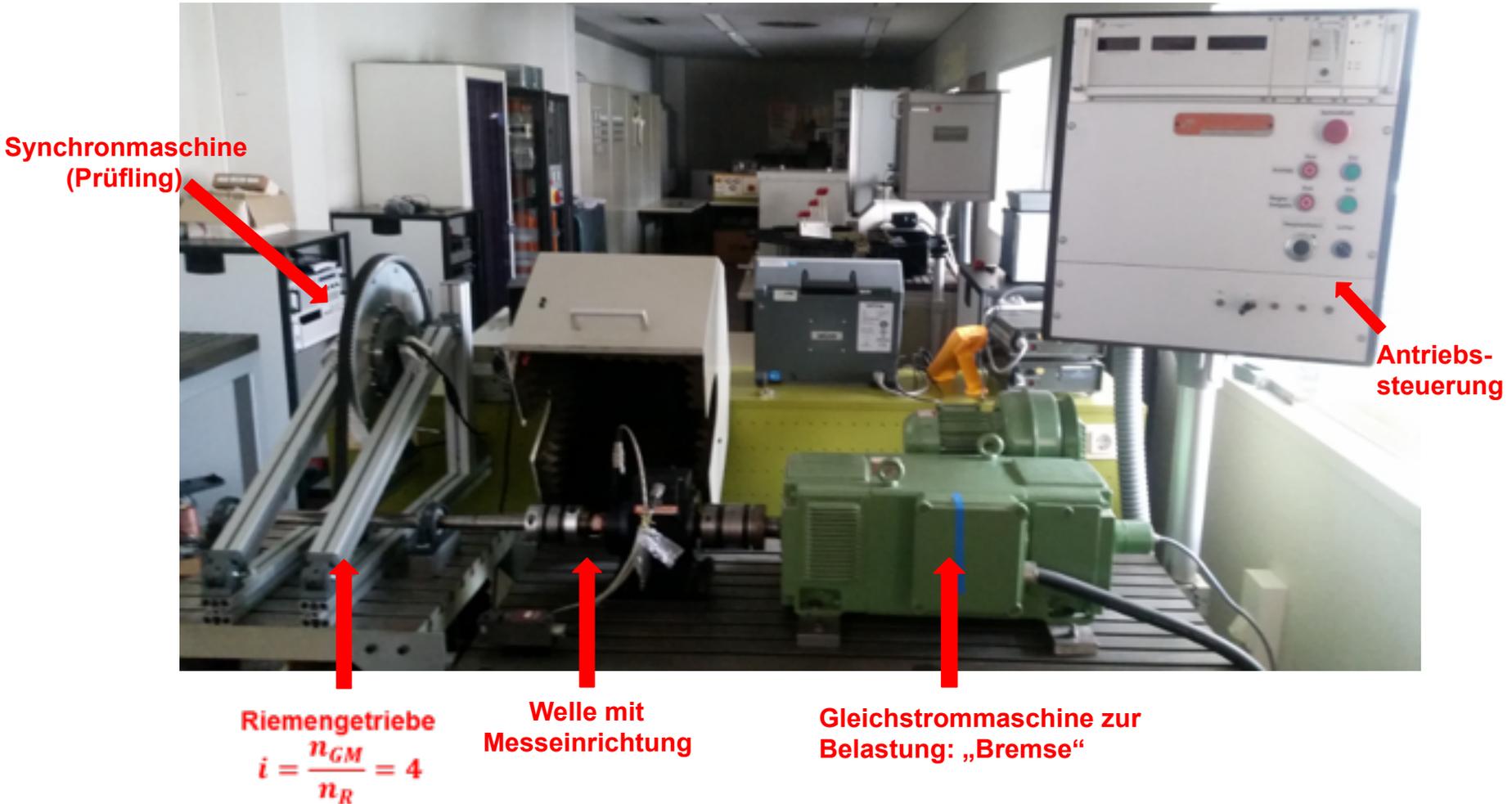
$$P_{SM} = \Omega_R \cdot M_{SM} \leq 250 \text{ W} = P_{SM,nom}$$

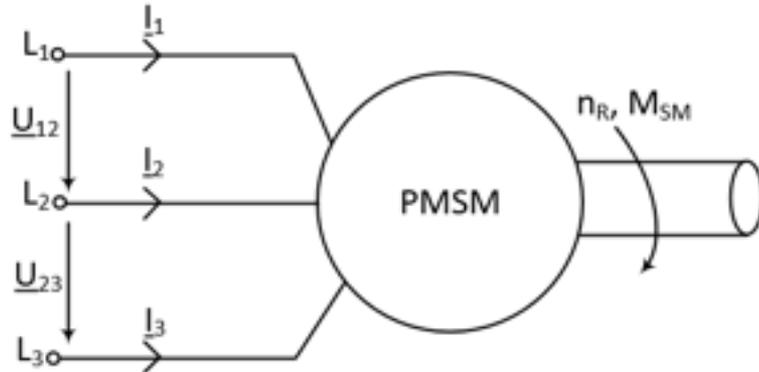
$$\Rightarrow \Omega_{R,nom} = \frac{P_{SM,nom}}{M_{SM,nom}}$$

$$M_{SM} = f(I_1)$$

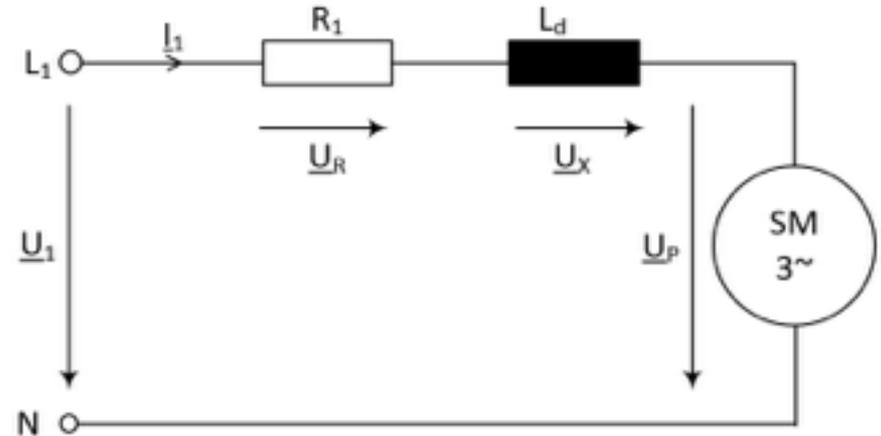
→ $M_{SM,nom}$: dauerhaft zulässiges Drehmoment (Kühlung)

→ $M_{SM,max}$: kurzzeitig zulässiges Drehmoment (Polradwinkel ϑ) z.B.: $M_{SM,max} = 2 \cdot M_{SM}$

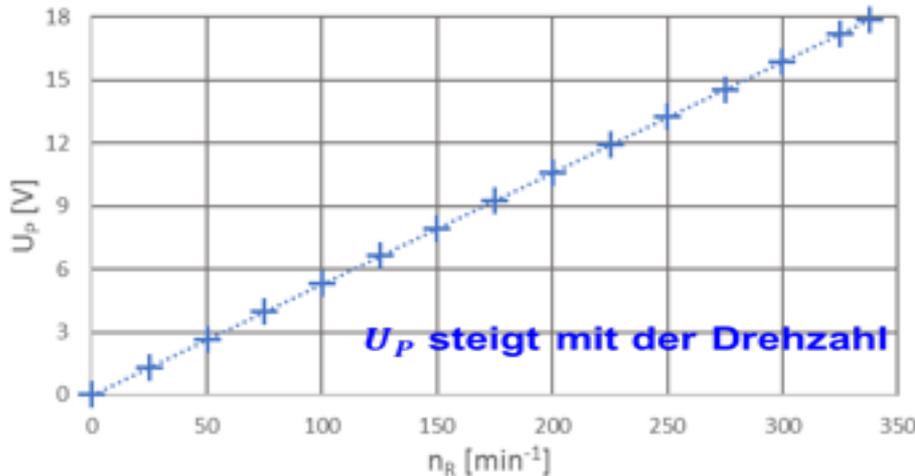




U_P : Polradspannung
 $U_P = \Psi_{PM} \cdot 2\pi \cdot n_R$



Leerlaufkennlinie



Leerlaufversuch:

$$\Psi_{PM} = \frac{\hat{u}_P}{\omega_{el}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_P}{Z_p \cdot \omega_R} = 0,0357 \text{ Vs}$$

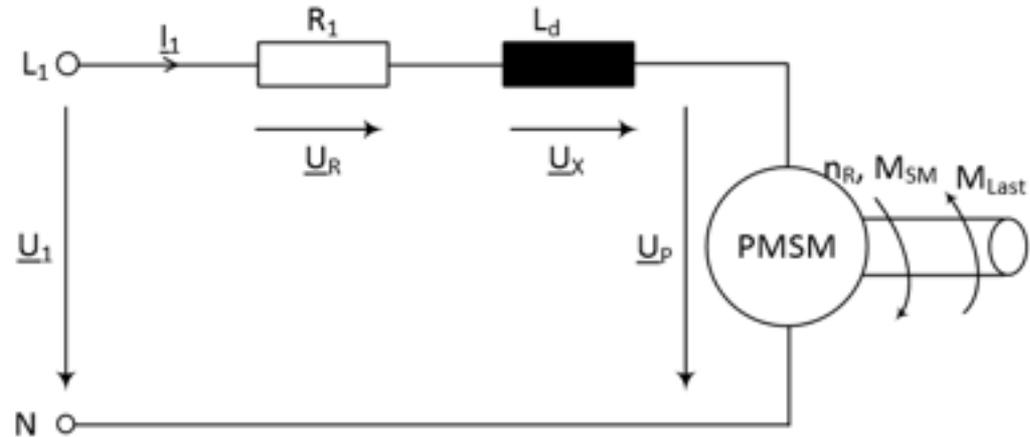
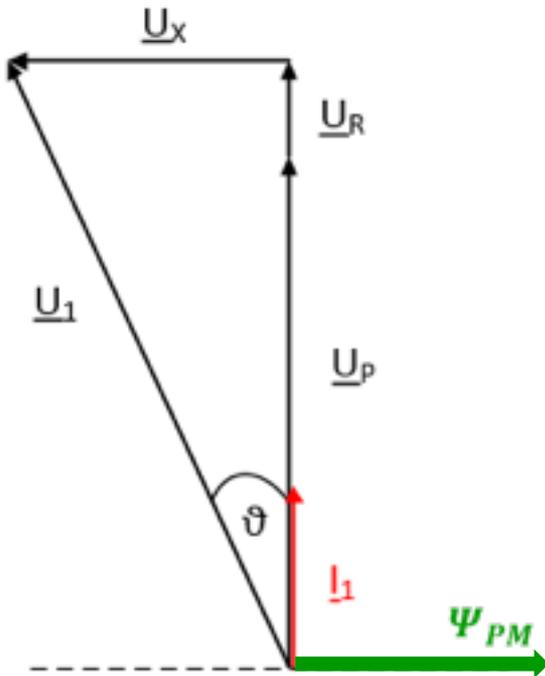
Ψ_{PM} : magnetischer Fluss
 = „Magnetkraft“

R_1 aus DC – Messung:

$$R_1 = \frac{R_{LL}}{2} = 0,22 \Omega$$

Elektrischer Widerstand

Antrieb mit PMSM



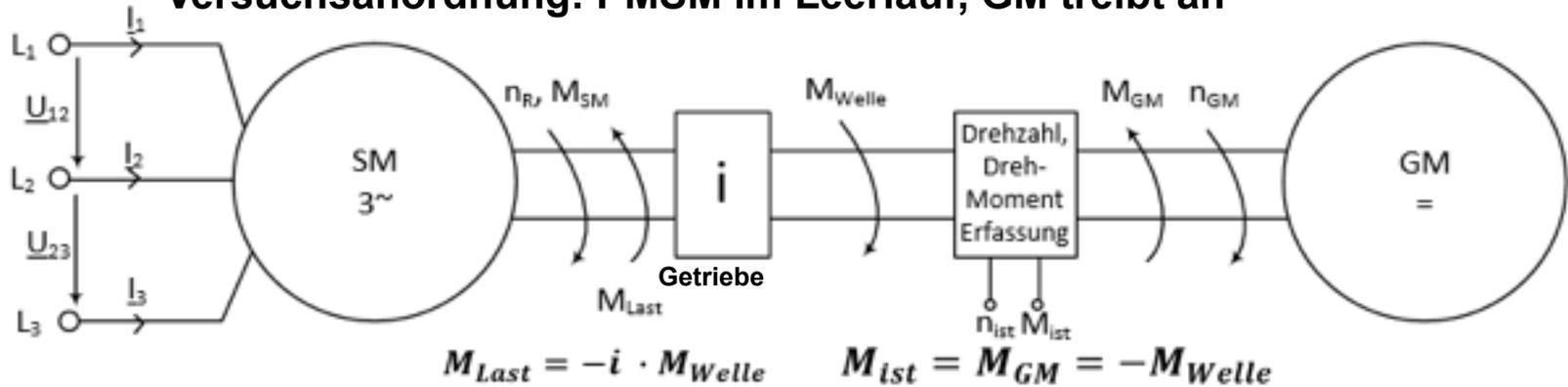
Optimaler Betrieb: $\underline{I}_1 \perp \underline{\Psi}_{PM}$

$$M_{SM} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \Psi_{PM} \cdot \hat{i}_1$$

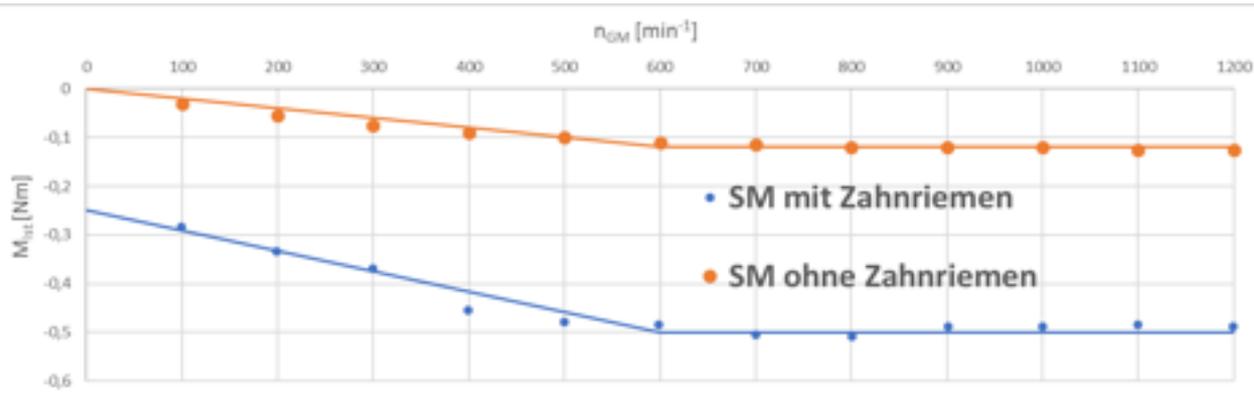
Polpaarzahl: Z_p

- Ständerstrom \underline{I}_1 erzeugt Drehmoment
- Ständerstrom \underline{I}_1 erzeugt Verluste im Widerstand

Versuchsanordnung: PMSM im Leerlauf, GM treibt an



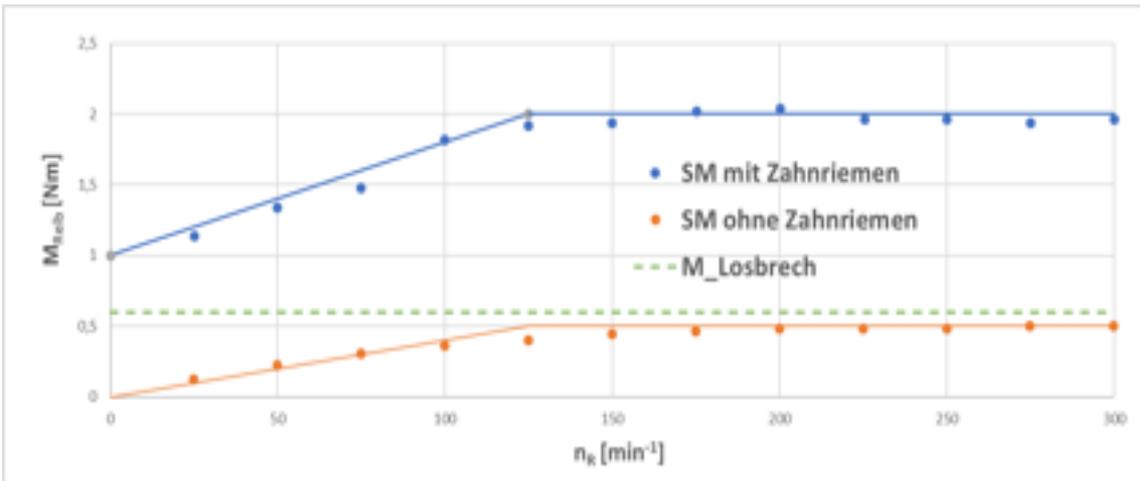
Ziel: Ermittlung der Reibverluste der Anordnung



- $n_{GM} > 600 \text{ min}^{-1}$:
 $M_{ist} \approx \text{konstant}$
- $n_{GM} < 600 \text{ min}^{-1}$:
linearer Abfall von M_{ist}

PMSM im Leerlauf $\rightarrow M_{Last} = -M_{Retb}$

Reibmoment als Funktion der Drehzahl n_R



- $n_R > 125 \text{ min}^{-1}$:
 $M_{Retb} \approx \text{konstant}$
- $n_R < 125 \text{ min}^{-1}$:
linearer „Anstieg“ von M_{Retb}

Losbrechmoment aus Kraftmessung: $M_{LM} = 0,601 \text{ Nm}$

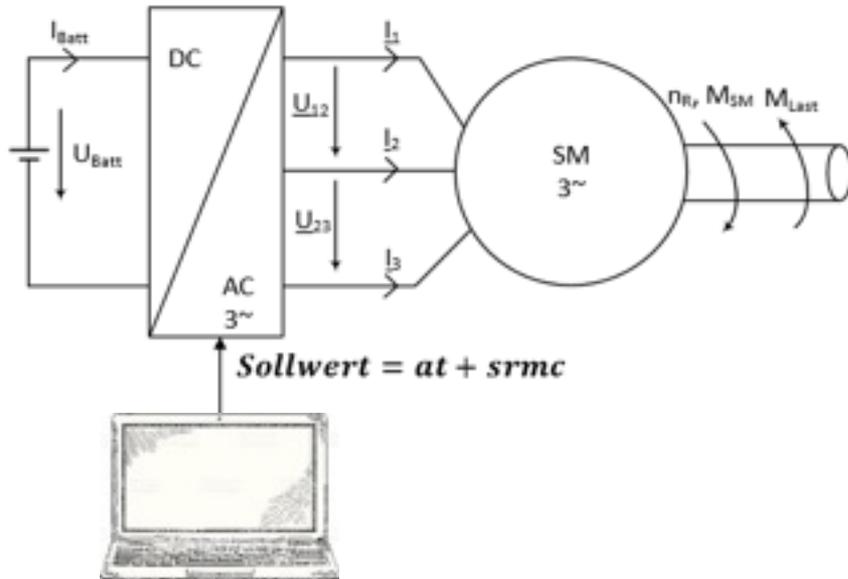
Reibmomente entstehen in:

- Lagern der Welle: M_{Lager}
- dem Getriebe: $M_G = M_{Retb} - M_{Lager} - M_{LM} \approx 0,9 \text{ Nm}$
- der PMSM: $M_{l,Retb} = M_{LM}$

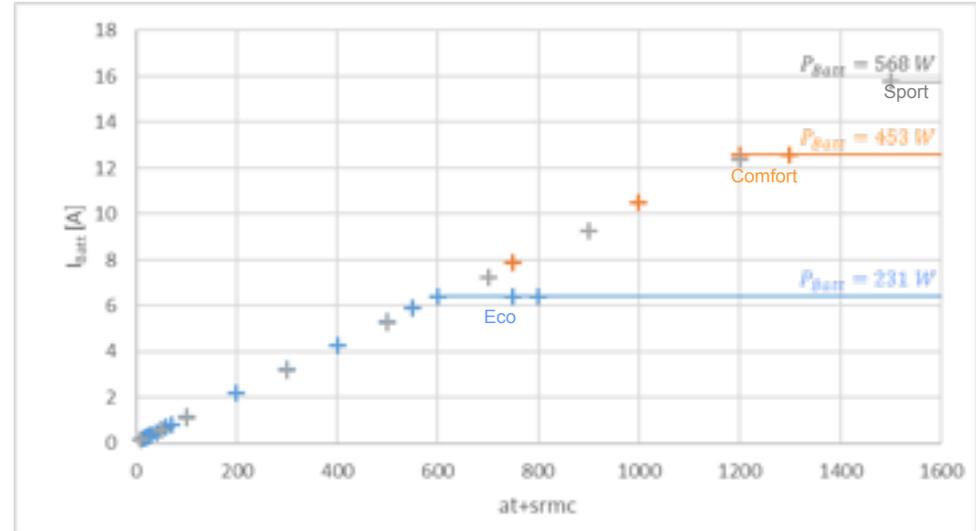
$$M_{Retb} = f(n_R)$$

$$M_{Reib} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 \text{ Nm} \left(1 + \frac{n_R \cdot \text{min}}{125} \right) & \text{für } n_R < 125 \text{ min}^{-1} \\ 2 \text{ Nm} & \text{für } n_R \geq 125 \text{ min}^{-1} \end{array} \right\}$$

PMSM treibt an



Steuersignal at+srmc:
Vorgabe des Batteriestromes I_{Batt}^*



Controller:

Verschiedene Betriebsarten einstellbar:

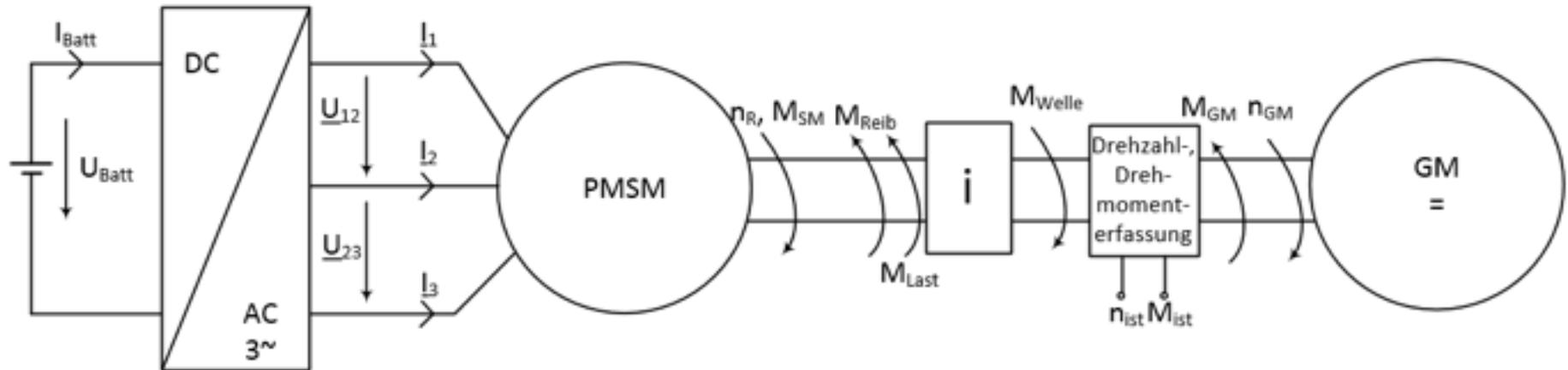
- Eco Stufe 1
- Comfort Stufe 2
- Sport Stufe 3

Betriebsart begrenzt Maximalstrom

→ begrenzt Batterieleistung:

$$P_{Batt} = U_{Batt} \cdot I_{Batt}$$

PMSM treibt an, GM bremst



- Erfassung von U_{Batt} und I_{Batt} :

$$P_{Batt} = U_{Batt} \cdot I_{Batt}$$

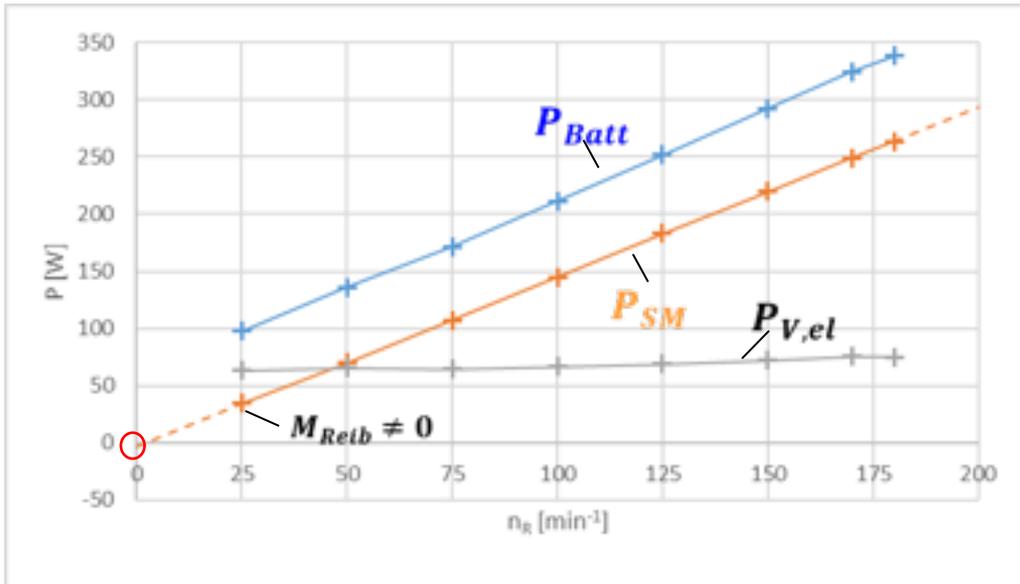
- Erfassung von n_{GM} und M_{GM} :

$$P_{mech} = \omega_{GM} \cdot M_{GM}$$

- Ermittlung der mechanischen Leistung der PMSM:

$$P_{SM} = \omega_R \cdot [4 \cdot M_{GM} + M_{Reib}]$$

Leistung als Funktion der Drehzahl n_R bei $M_{Last} = 12 Nm$



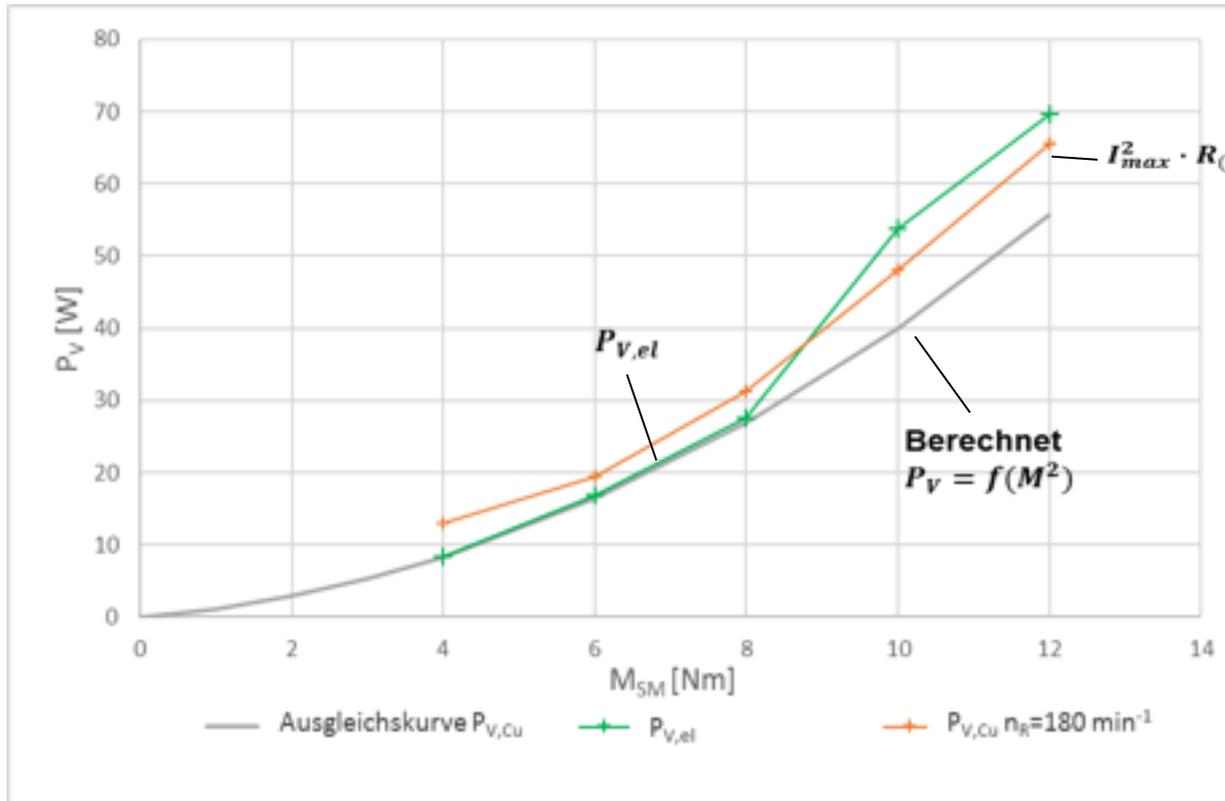
$$P_{SM} = \omega_R \cdot [4 \cdot M_{GM} + M_{Reib}]$$

- P_{SM} steigt linear mit n_R
- bei $n_R = 0$: $P_{SM} = 0$ wegen $M_{Reib} = 0$
- P_{Batt} steigt linear mit n_R
- $P_{V,el} = P_{Batt} - P_{SM}$
fast unabhängig von n_R
- $P_{V,el} \approx 65 - 75 W$
bei $n_R = 75 \text{ min}^{-1} - 180 \text{ min}^{-1}$

Weitere Messungen bei 4, 6, 8 und 10 Nm

Ideeller Wirkungsgrad: $\eta_{SM} = \frac{P_{SM}}{P_{Batt}} \cdot 100\%$

Verlustleistung über Drehmoment



- bei $M_{SM} \leq 8 \text{ Nm}$:
 $P_{V,el} \approx P_{V,Cu}$

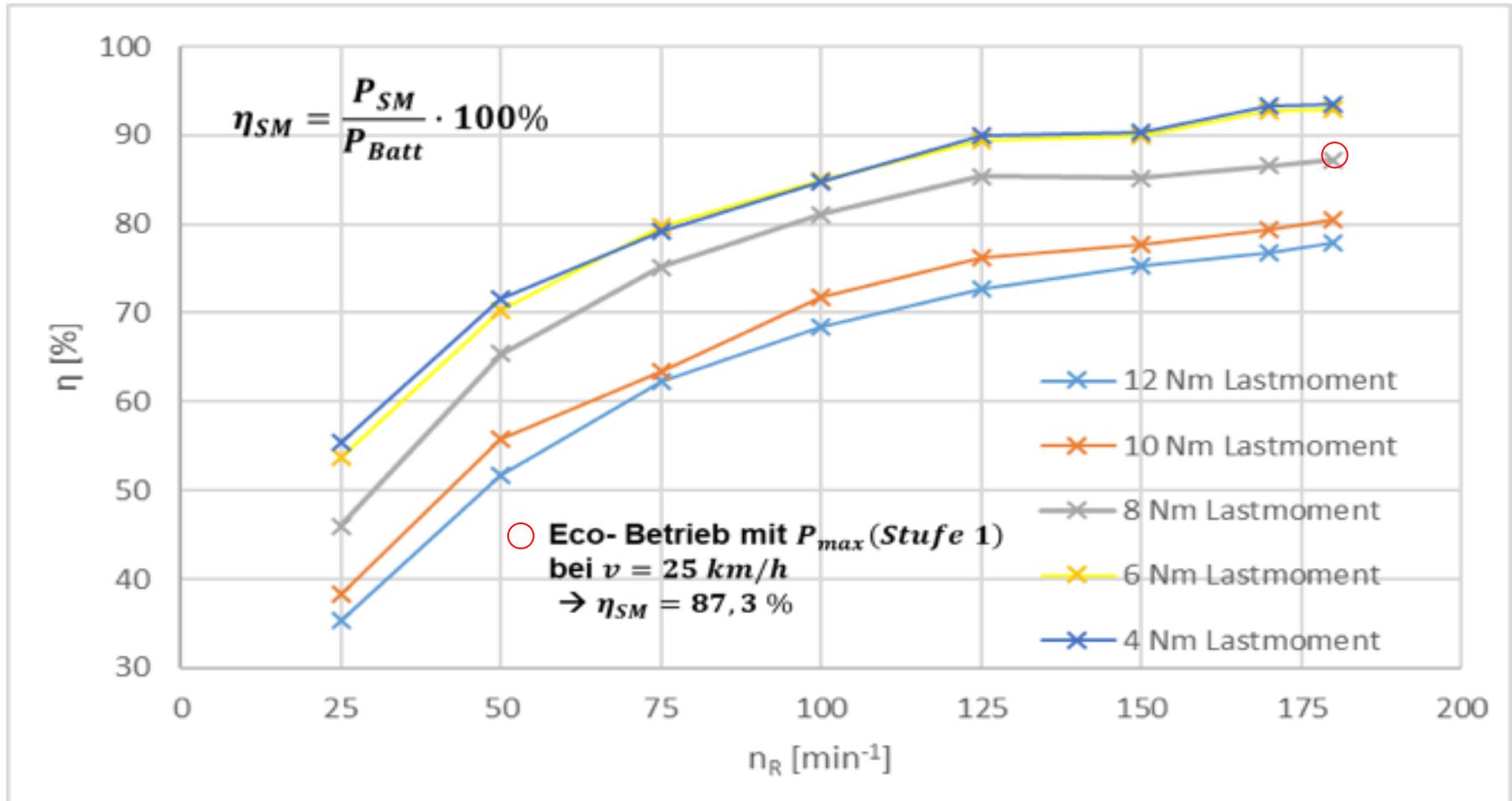
- bei $M_{SM} > 8 \text{ Nm}$:
 $P_{V,el} > P_{V,Cu}$

$\Delta P_{V,el}$:

- Wechselrichterverluste

Verlustleistung steigt mehr als quadratisch mit dem **Drehmoment**

Wirkungsgrad η über Drehzahl n_R





Geschwindigkeit:
 $V = 25 \text{ km/h}$

**Gesamtgewicht
(Fahrrad + Fahrer):**
 $m = 100 \text{ kg}$

Kraft:
 F_W

Luftwiderstand:

$F_{\text{Luft}} (25\text{km/h}) = 4 \text{ N} \sim V^2$

Fahrwiderstand ebene Strecke:

$F_{\text{Fahr}} (100\text{kg}) = 8 \text{ N} \sim m$

Benötigte Kraft:

$F_W = F_{\text{Fahr}} + F_{\text{Luft}} = 12 \text{ N}$

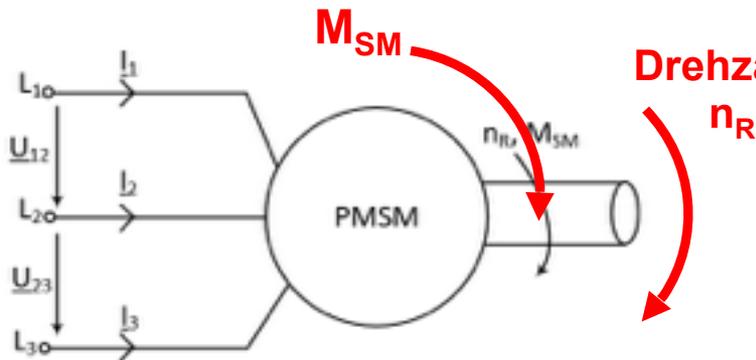
Benötigtes Drehmoment:

$M_{\text{SM}} = F_W * d/2 + M_{\text{LM}}$
 $= 4,2 \text{ Nm} + 0,6 \text{ Nm} = 4,8 \text{ Nm}$

Drehmoment bei 1% Steigung:

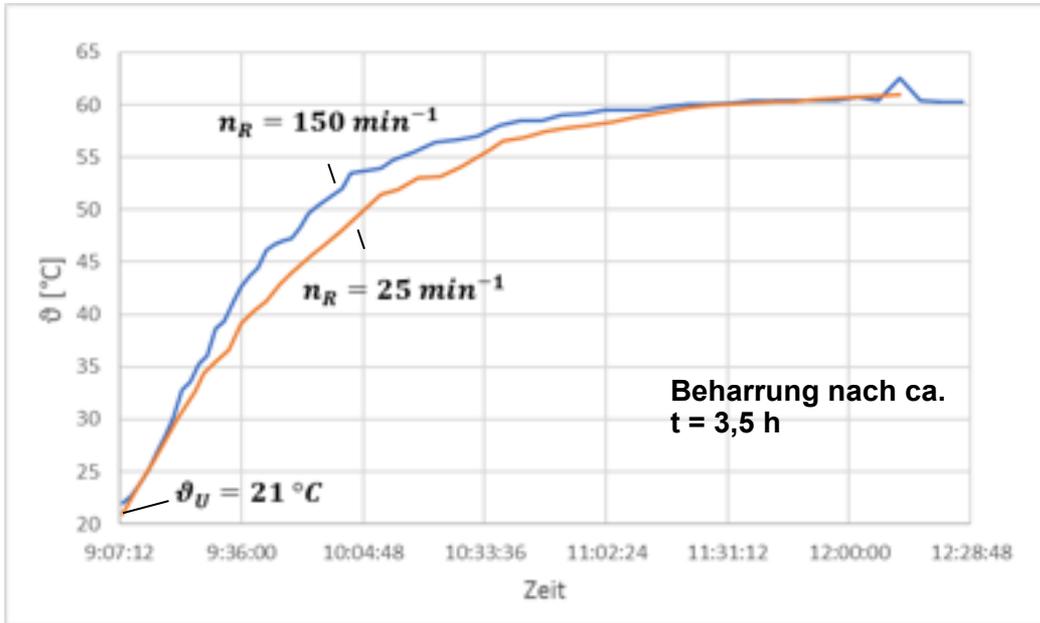
$M_{\text{SM}} = 8 \text{ Nm}$

Drehmoment:



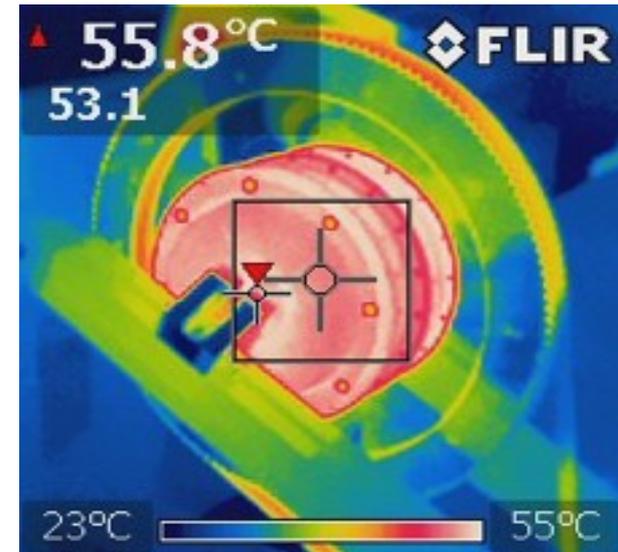
Permanenterregte Synchronmaschine

Gehäusetemperatur



Betriebsfall:

- $n_R = 150 \text{ min}^{-1} \triangleq 20 \text{ km/h}$
- $M_{SM} = M_{SM,nom} = 16 \text{ Nm}$
→ $P_{SM} = 250 \text{ W}$
- Kühlung durch Konvektion



ϑ_{Cu} ermittelt aus $R(\vartheta)$:

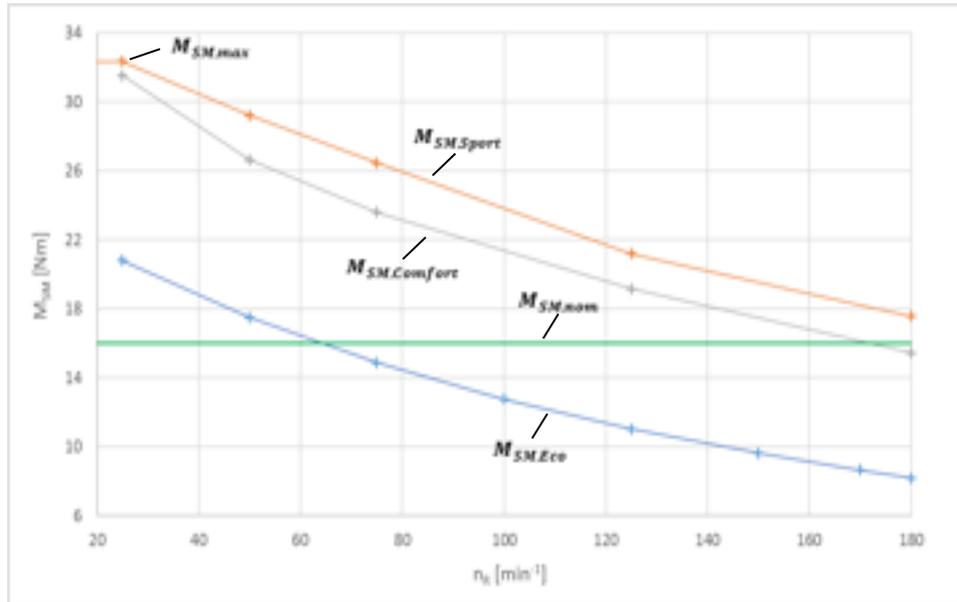
$$R(\vartheta) = R_{21} \cdot (1 + \alpha_{21,Cu} \cdot \Delta\vartheta)$$

$$\vartheta_{Cu,(16Nm)} = \vartheta_U + \Delta\vartheta = 80 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \vartheta_{Cu,max} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

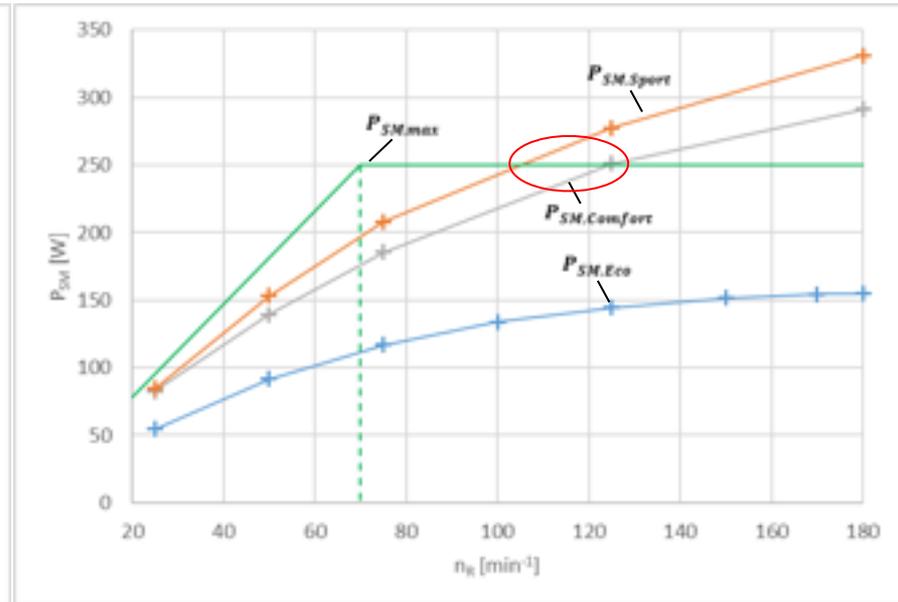
ab $\vartheta_{Cu} > 80 \text{ }^\circ\text{C}$: Probleme mit Entmagnetisierung

Fazit: $M_{SM,nom} = 16 \text{ Nm}$

Drehmoment über Drehzahl n_R



Mechanische Leistung über Drehzahl n_R



- Dauerhaft zulässiges Drehmoment:
 - $M_{SM,nom} = 16 \text{ Nm}$
 - $M_{SM,max} = 32 \text{ Nm} = 2 \cdot M_{SM,nom}$
 wird bei Comfort und Sport erreicht
- Unterhalb von ca. 60 min^{-1} sollte nicht dauerhaft gefahren werden

- Eco Betrieb immer unterhalb $P_{SM,max}$
- Bei hohen Drehzahlen: Sport + Comfort über $P_{SM,max}$
- Bis ca. 17 km/h $P_{SM,max}$ eingehalten
 $n_R = 120 \text{ min}^{-1}$

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !