

# Fahrzeugmechatronik I

## Aktoren



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller**

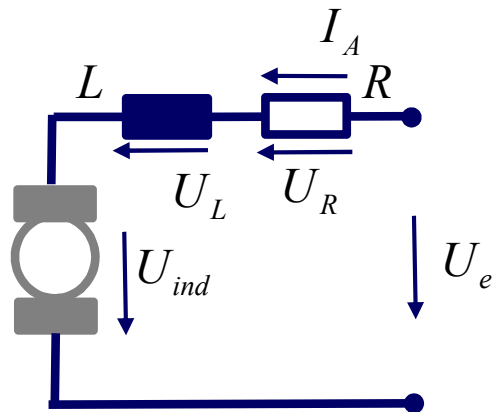
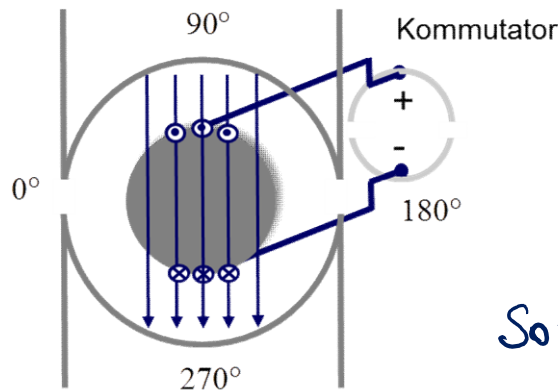
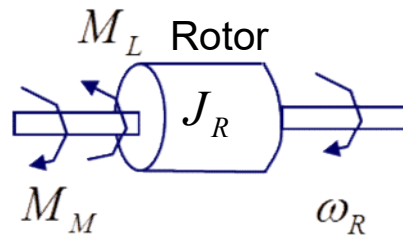
**M. Sc. Osama Al-Saidi**

**Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin**

---

# Gleichstrommaschine

## Mathematisches Modell der GM - Zustandsraum



Drehmoment

ind. Verlustmoment  
/ im Motor  $M_L$

$$J_R \dot{\omega}_R = M_M - M_L = k_M \varphi_A - M_L$$

Maschengleichung

$$-U_e + U_R + U_L + U_{ind} = 0$$

$$R \varphi_A + L \dot{\varphi}_A + k_M \omega_R = U_e$$

Somit folgt für die Beschreibung im Zustandsraum

$$\begin{Bmatrix} \dot{\omega}_R \\ \dot{\varphi}_A \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_M / J_R \\ -k_M / L & -R / L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_R \\ \varphi_A \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 1/L \end{Bmatrix} U_e - \begin{Bmatrix} 1/J_R \\ 0 \end{Bmatrix} M_L$$

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \underline{x} + \underline{B} \underline{u} + \underline{F} \underline{d}$$

GM mit permanentmagnetisch erregtem Feld

# Gleichstrommaschine

## Mathematisches Modell der GM - Laplacaum

### 2. Kirchhoffsches Gesetz - Maschengleichung

$$U_e = R I_A + L \dot{I}_A + U_{ind}$$

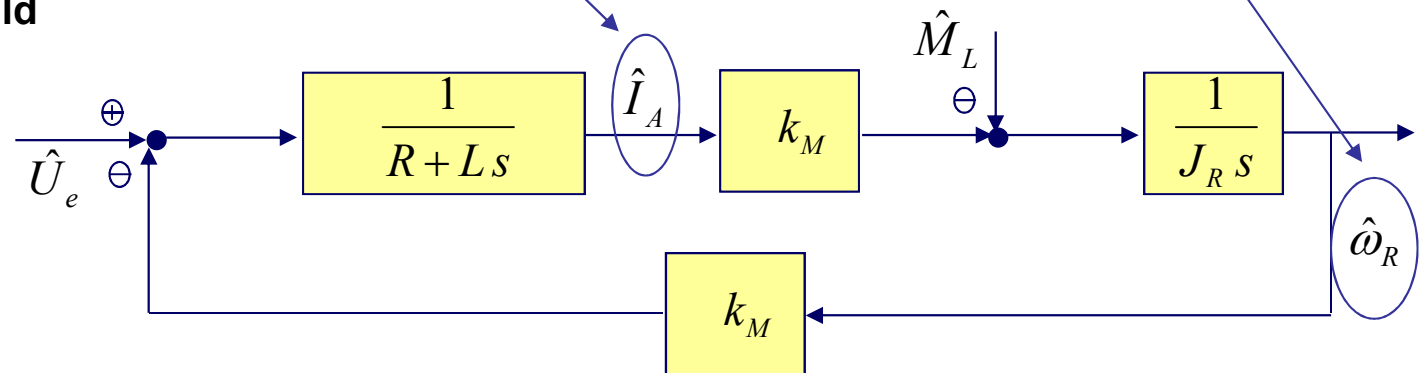
$$\hat{I}_A = \frac{\hat{U}_e - k_M \hat{\omega}_R}{R + L s}$$

### Drallsatz

$$J_R \dot{\omega}_R = M_M - M_L$$

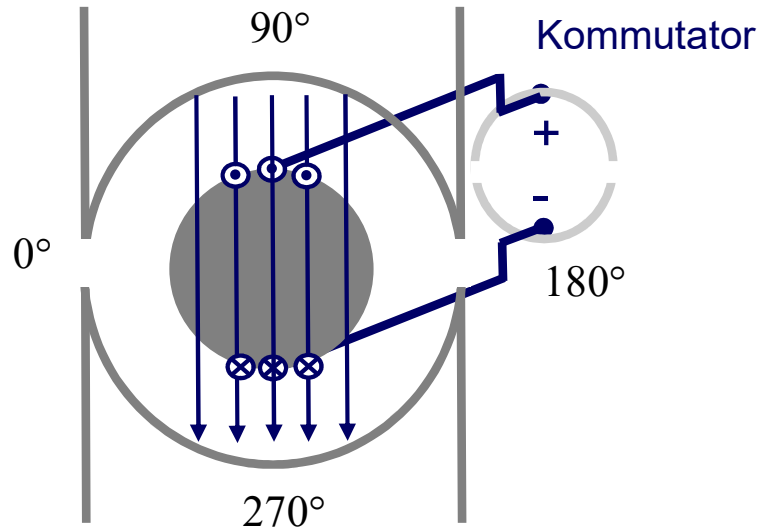
$$\hat{\omega}_R = \frac{1}{J_R s} (k_M \hat{I}_A - \hat{M}_L)$$

### Blockschaltbild

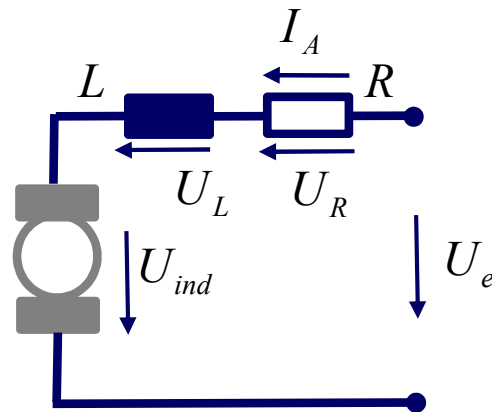


# Gleichstrommaschine

## Nicht-ohmsche Verluste – Verlustmoment $M_v$



Ein Teil des im Rotor erzeugten Drehmomentes wird benötigt, um „innere Hemmnisse“ im Rotor zu überwinden

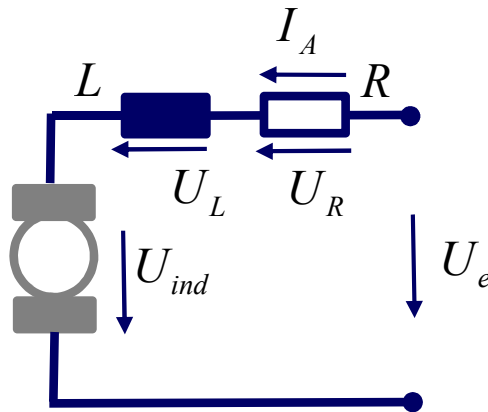


- ▷ Lagerreibung :  $M_v \approx \text{const.}$
- ▷ Reibung Kommutator :  $M_v \approx \text{const.}$
- ▷ Ventilation :  $M_v \sim n^2$
- ▷ Ummagnetisierung :  $M_v = \text{const.}$   
(+ Hystereseeffekte)
- ▷ Wirbelströme :  $M_v \sim n$

Praxis :  $M_v = \sigma_v \omega_R$

# Gleichstrommaschine

## Strom- und Momentenkennlinie



Im stationären Betrieb ( $\dot{I}_A = 0$ ) gilt

$$R \dot{I}_A + k_m \omega_R = U_e$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot{I}_A = \frac{1}{R} (U_e - k_m \omega_R)}$$

Hauptgleichung des Glt-Motors

mit

$$\omega_R = \frac{2\pi n}{60} \quad (n \text{ in } \frac{1}{\text{min}})$$

Für das am Rotor verfügbare Moment gilt

$$M_R = M_m - M_v$$

$$= k_m \dot{I}_A - k_v \omega_R$$

$$M_R = \frac{k_m U_e}{R} \left( \frac{k_m^2}{R} + k_v \right) \omega_R$$

$M_K$  - Kurzschluss- bzw. Anlaufmoment

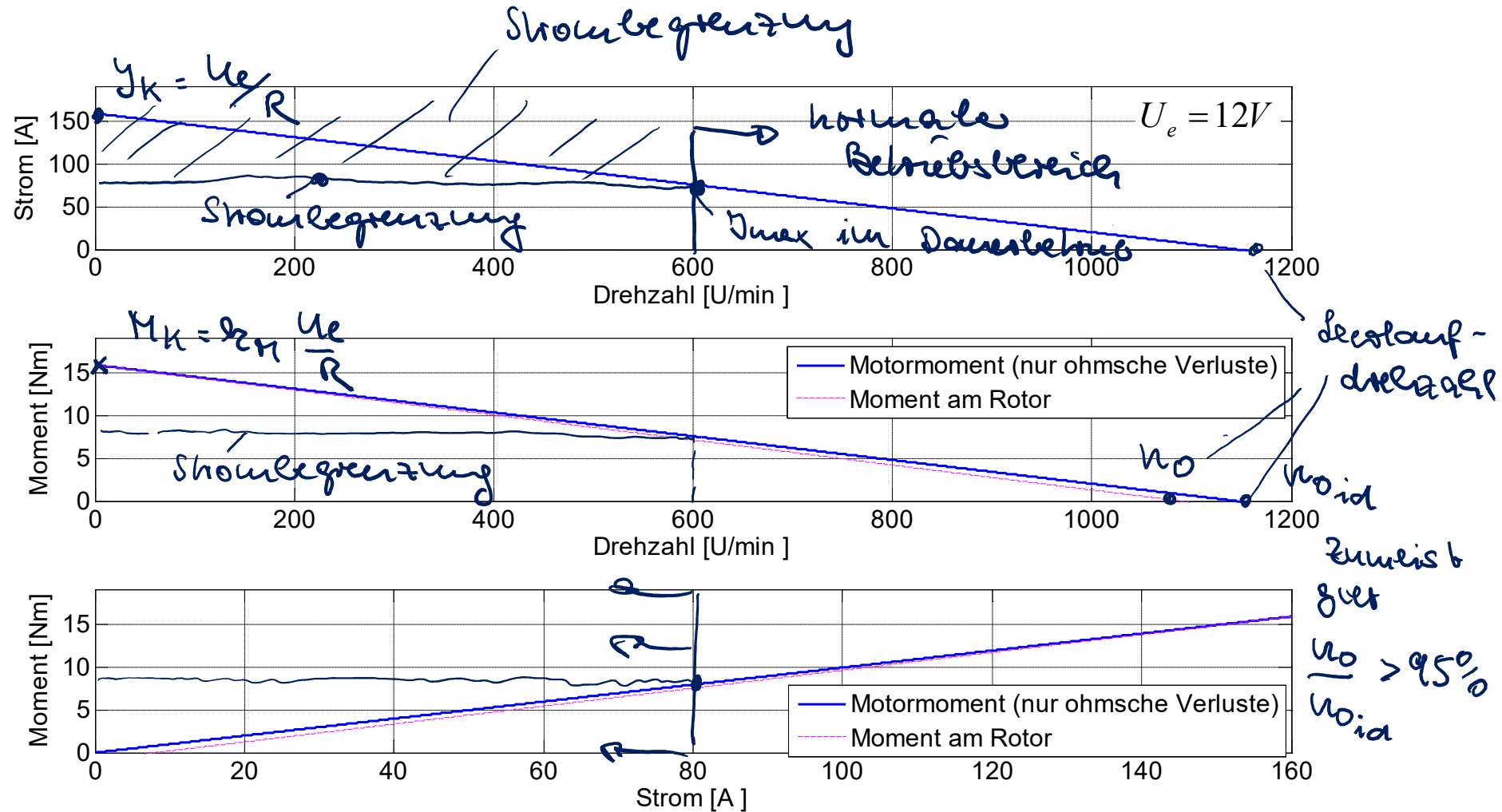
Außerdem

$$M_R = k_m \dot{I}_A - \frac{k_v}{k_m} (U_e - R \dot{I}_A)$$

$$M_R = \left( k_m + \frac{k_v R}{k_m} \right) \dot{I}_A - \frac{k_v}{k_m} U_e$$

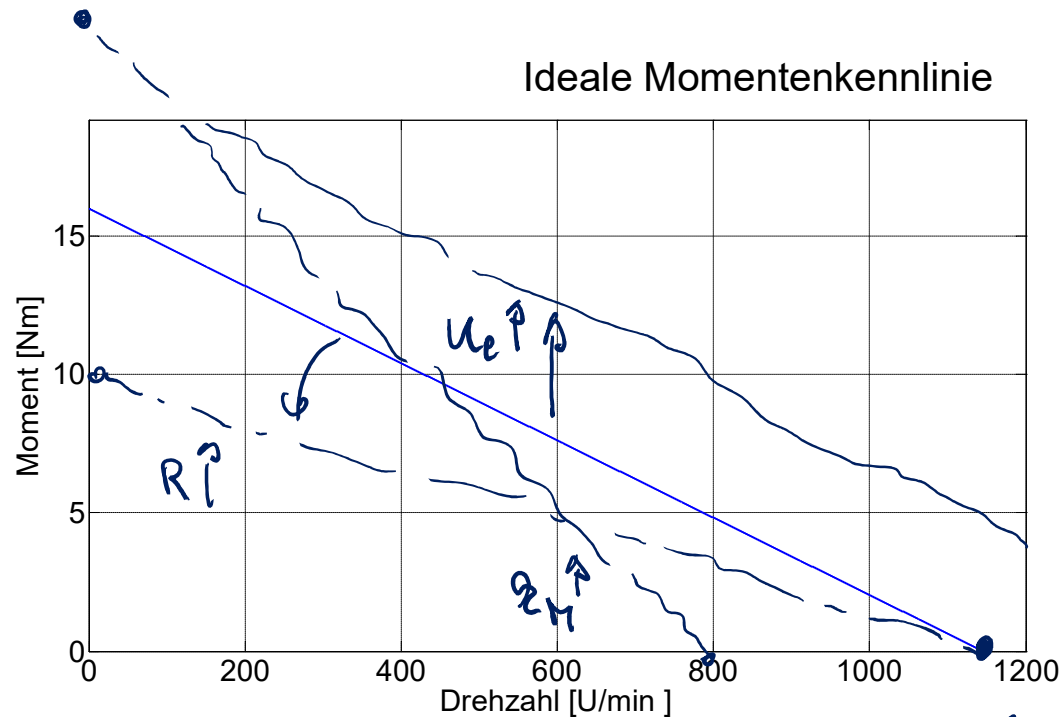
# Gleichstrommaschine

## Strom- und Momentenkennlinie



# Gleichstrommaschine

## Einflussanalyse und experim. km-Ermittlung



Für  $M_H$  gilt (ohne Verluste)

$$M_H = \frac{z_m}{R} (U_e - z_m \omega_R)$$

Hieraus folgt für  $M_H = 0$

$$\omega_R = \frac{U_e}{z_m} = \frac{2\pi n}{60}$$

Somit

$$n_{0id} = \frac{60}{2\pi} \frac{U_e}{z_m}$$

Praxis:  $z_m$  kann über

$$z_m = \frac{60}{2\pi} \frac{U_e}{n_0}$$

abgeschätzt werden

Dann  
immer etwas  
zu groß (~5%)

$$z_m = \frac{60}{2\pi} \frac{U_e}{n_{0id}}$$

# Gleichstrommaschine

## Leistungs- und Wirkungsgradkennlinie

Eingangsleistung  $P_{el}$

$$\begin{aligned} P_{el} &= U_e I_A = \frac{U_e}{R} (U_e - r_M \omega_R) \\ &= \frac{U_e^2}{R} - \frac{U_e r_M}{R} \omega_R \end{aligned}$$

Ausgangsleistung  $P_M$  (nur  
ohmsche  
Verluste)

$$\begin{aligned} P_M &= M_M \omega_R = r_M \frac{1}{R} (U_e - r_M \omega_R) \omega_R \\ &= \frac{r_M U_e}{R} \omega_R - \frac{r_M^2}{R} \omega_R^2 \end{aligned}$$

Ausgangsleistung am Rotor  $P_R$

$$\begin{aligned} P_R &= M_R \omega_R \\ &= \frac{r_M}{R} U_e \omega_R - \left( \frac{r_M^2}{R} + r_v \right) \omega_R^2 \end{aligned}$$

Maximale Leistung für  $r_v = 0$

$$\frac{dP_M}{d\omega_R} = \frac{r_M U_e}{R} - \frac{2 r_M^2}{R} \omega_R = 0$$

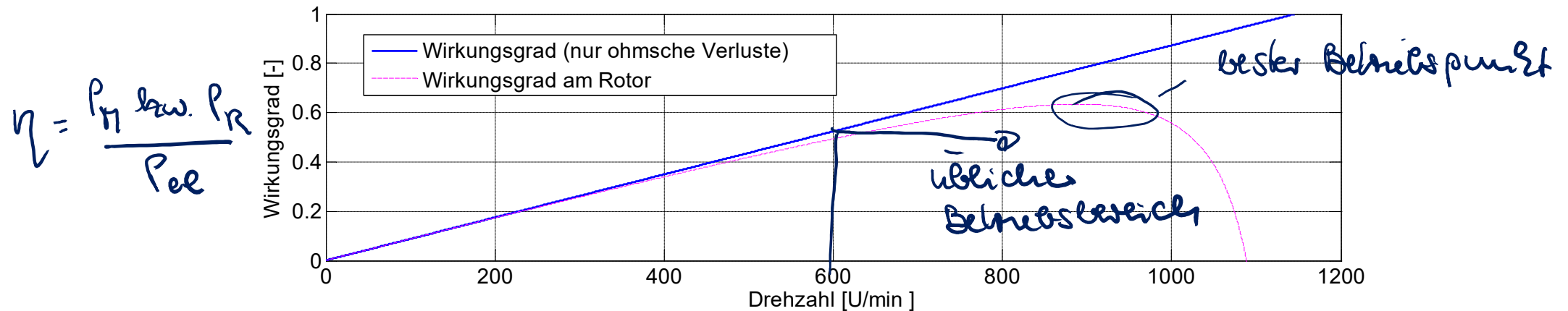
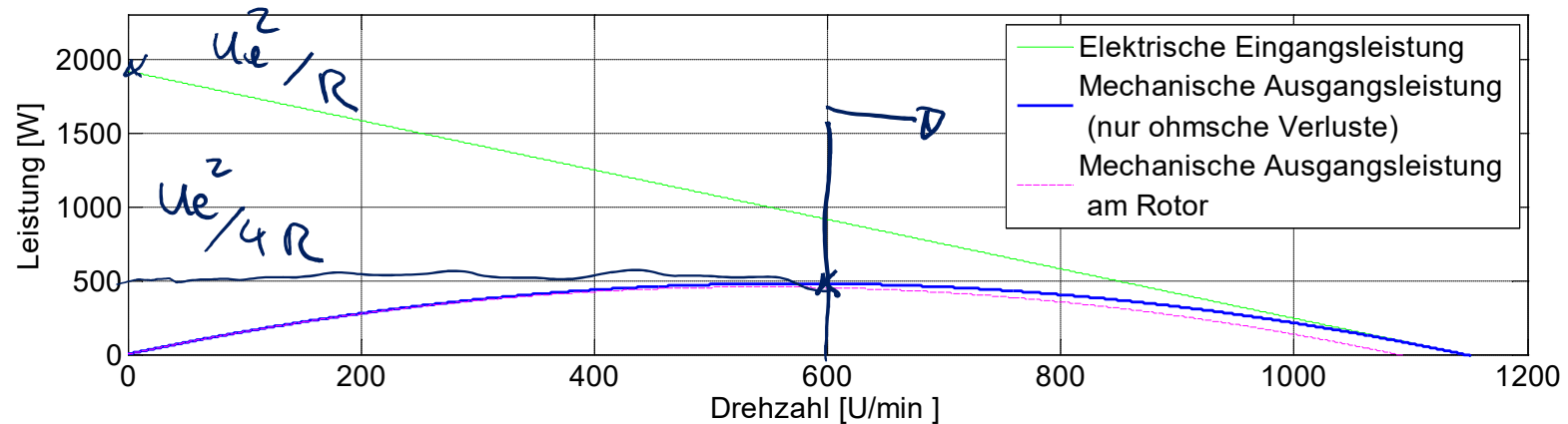
$$\Rightarrow \omega_{R \max} = U_e / 2 r_M$$

$$\Rightarrow P_{M \max} = \frac{U_e^2}{2R} - \frac{U_e^2}{4R} = \frac{U_e^2}{4R} \ll$$



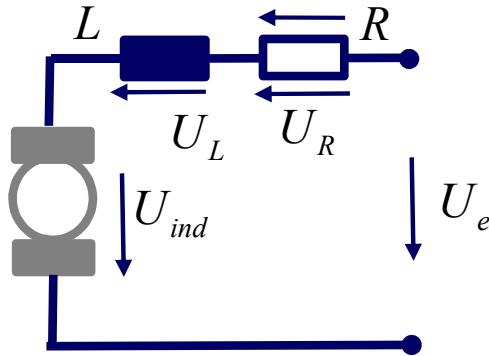
# Gleichstrommaschine

## Leistungs- und Wirkungsgradkennlinie



# Gleichstrommaschine

## Drehzahlregelung



Im stationären Betrieb gilt

$$U_e = R I_A + R_L \omega_R$$

hieraus folgt

$$\omega_R = \frac{U_e - R I_A}{R_L}$$

Es ergeben sich somit 3 Arten der Drehzahlregelung

- ▷ Feldregelung  $\rightarrow R_L$
- ▷ Widerstandsregelung  $\rightarrow R$
- ▷ Spannungsregelung  $\rightarrow U_e$

# **Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**