Springer-Lehrbuch

Elektrische Antriebe - Grundlagen

Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben

Bearbeitet von
Dierk Schröder

1. Auflage 2013. Buch. XXV, 775 S. Softcover
ISBN 978 3 642 30470 5
Format (B x L): 16,8 x 24 cm
Gewicht: 1320 g

Weitere Fachgebiete > Technik > Technik Allgemein

Zu Inhaltsverzeichnis

schnell und portofrei erhältlich bei

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

2 Verluste und Erwärmung im Antriebssystem

2.1 Verluste an der Übertragungsstelle

2.1.1 Leistungsbilanz

Die Verlustleistung an der Übertragungsstelle bei der Energieübertragung bzw. -wandlung läßt sich in gleicher Weise an einem mechanischen Modell (Kupplung) wie an einem elektrischen Modell (Luftspalt einer elektrischen Maschine) ermitteln. Angetrieben wird jeweils eine Anordnung mit der Schwungmasse Θ, an der das Widerstandsmoment M_W angreift.

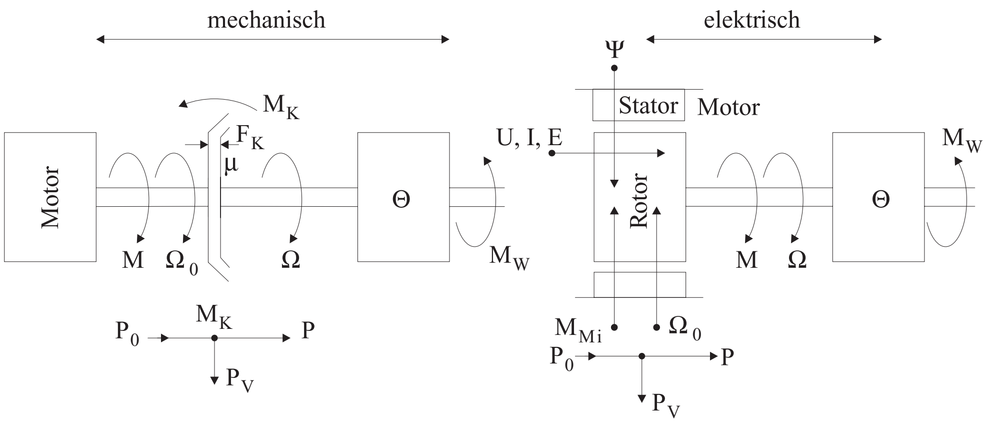


Abb. 2.1: *Modelle für Antriebssysteme*

Für das übertragene Moment gilt:

– in der Kupplung: $M = M_K \sim F_K \cdot \mu$

– im Luftspalt: $M = M_{Mi} \sim I \cdot \Psi$

– in beiden Fällen: $M = M_W + \Theta \cdot \dfrac{d\Omega}{dt}$

D. Schröder, *Elektrische Antriebe - Grundlagen,*
DOI 10.1007/978-3-642-30471-2_2, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Die Leistungsbilanz lautet dann:

– zugeführt: $P_0 = M \cdot \Omega_0$

– übertragen: $P = M \cdot \Omega$

– abgeführt (Verluste):
$$P_V = P_0 - P = M \cdot (\Omega_0 - \Omega) = (M_W + \Theta \cdot \frac{d\Omega}{dt}) \cdot (\Omega_0 - \Omega)$$

Die Übertragungsstelle kann synchrones oder asynchrones Verhalten zeigen. Eine Übersicht vermittelt die Darstellung der Leistungsbilanz im Kennlinienfeld.

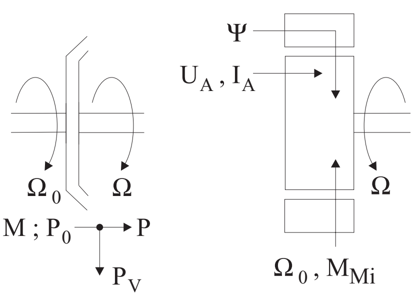
Analoge Berechnung am elektrischen Modell (Beispiel GNM, siehe Kap. 3):

– zugeführt:
$$P_0 = I_A \cdot U_A = I_A \cdot (E_A + R_A \cdot I_A)$$
$$P_0 = I_A \cdot E_A + R_A \cdot I_A^2$$
(Betrachtung nur des Ankerkreises)

– übertragen:
$$M_{Mi} = C_M \cdot \Psi \cdot I_A = C_M \cdot \frac{E_A}{C_E \cdot N} \cdot I_A$$
$$P = M_{Mi} \cdot \Omega = \frac{2\pi \cdot C_M}{C_E} \cdot E_A \cdot I_A = E_A \cdot I_A$$

– Verlust:
$$P_V = P_0 - P = R_A \cdot I_A^2$$
(ohne Erregerverluste)

<u>Leistungsaufteilung:</u>



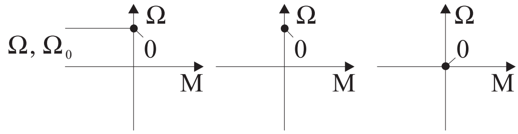
Ω_0: Antrieb (Leerlauf-)Drehzahl
Ω: Abtrieb (Belastungs-)Drehzahl
M: Moment

Antrieb	=	Abtrieb	+	Verlust
$M_{Mi} \cdot \Omega_0$	=	$M_{Mi} \cdot \Omega$	+	$M_{Mi} \cdot (\Omega_0 - \Omega)$
P_0	=	P	+	P_V

Abb. 2.2: *Leistungsaufteilung*

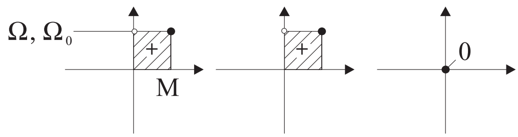
1. Leerlauf

$$\begin{array}{ccccc} & M & = & 0 & \\ 0 & < & \Omega & = & \Omega_0 \end{array}$$



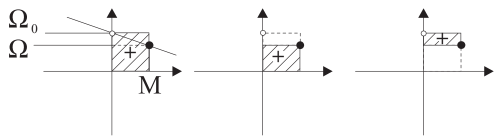
2. Treiben synchron (mot)

$$\begin{array}{ccccc} & M & > & 0 & \\ 0 & < & \Omega & = & \Omega_0 \end{array}$$



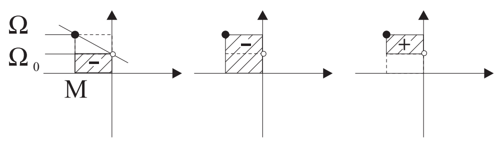
3. Treiben asynchron (mot)

$$\begin{array}{ccccc} & M & > & 0 & \\ 0 & < & \Omega & < & \Omega_0 \end{array}$$



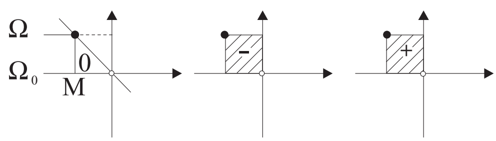
4. Bremsen asynchron (gen)

$$\begin{array}{ccccc} & M & < & 0 & \\ 0 & < & \Omega_0 & < & \Omega \end{array}$$



5. Bremsen im Kurzschluß (mot)

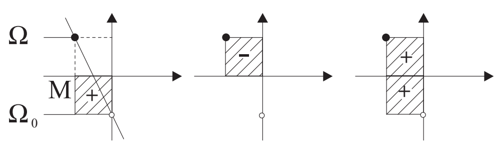
$$\begin{array}{ccc} M & < & 0 \\ \Omega_0 & = & 0 \\ \Omega & > & 0 \end{array}$$



6. Bremsen mit Gegenstrom (mot)

$$\begin{array}{ccccc} M & < & 0 & & \\ \Omega_0 & < & 0 & < & \Omega \end{array}$$

Ziel: Bremsmoment kann noch bei kleinem $E_A \sim N$ aufgebracht werden



7. Treiben asynchron (mot)

$$\begin{array}{ccccc} M & < & 0 & & \\ \Omega_0 & < & \Omega & < & 0 \end{array}$$

umgekehrte Drehrichtung zu 3.

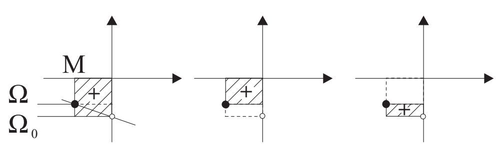


Abb. 2.3: *Idealisierte Leistungsbilanzbetrachtung*

Die Darstellung der Verlustleistung im Kennlinienfeld gestattet eine Übersicht über die physikalisch notwendigerweise auftretenden Verluste bei einer bestimmten Betriebsart. Zusätzliche Verluste, die je nach Art und Aufgaben der Übertragungsstelle (Maschine) auftreten, sind hierbei nicht erfaßt.

Die Tatsache, daß eine synchrone Übertragung (Fall 2) idealisiert verlustfrei ist, bedeutet noch nicht, daß in einer realen Synchronmaschine keine Verluste auftreten.

Zu beachten ist, daß beim Bremsen (Fall 4,5,6) von der Abtriebsseite her Leistung zugeführt wird. Diese wird beim Bremsen im Kurzschluß (Fall 5) vollständig in Verlustleistung (Wärme) umgesetzt. Beim Gegenstrombremsen (Fall 6) wird von beiden Seiten her Leistung zugeführt und vollständig in Verluste umgesetzt.

Zu beachten ist außerdem, daß in einigen Betriebszuständen wie 5 und 6 erhöhte Strombelastungen des elektromechanischen Energiewandlers auftreten.

2.1.2 Verlustarbeit an der Übertragungsstelle „Motor"

Durch Integration der Verlustleistung ergibt sich die Verlustarbeit. Entsprechend der Momentbilanz läßt sie sich in zwei Anteile zerlegen:

– die Verluste bei der Übertragung des Widerstandmomentes und
– die Verluste bei der Beschleunigung der Schwungmasse

Moment:

$$M_M = M_W + M_B = M_W + \Theta \cdot \frac{d\Omega}{dt} \tag{2.1}$$

Verlustleistung bei Nebenschlußverhalten (siehe Kap. 1.3.2.1):

$$P_V = M_M \cdot (\Omega_0 - \Omega) = \left(M_W + \Theta \cdot \frac{d\Omega}{dt} \right) \cdot (\Omega_0 - \Omega) \tag{2.2}$$

Verlustarbeit:

$$\begin{aligned} W_{V12} &= \int_{t_1}^{t_2} M_M \cdot (\Omega_0 - \Omega) \cdot dt \qquad (2.3) \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \left(M_W + \Theta \cdot \frac{d\Omega}{dt} \right) \cdot (\Omega_0 - \Omega) \cdot dt \end{aligned}$$

M_M : Motormoment, verfügbares Gesamtmoment

Zerlegung:

$$W_{V12} \;=\; W_{VW12} \;+\; W_{V\Theta 12} \tag{2.4}$$

W_{VW12}: Anteil zur Übertragung des Widerstandsmoments
$W_{V\Theta 12}$: Anteil zur Beschleunigung der Schwungmassen

$$W_{VW12} \;=\; \int_{t_1}^{t_2} M_W \cdot (\Omega_0 - \Omega) \cdot dt \qquad \text{(zeitabhängig)} \tag{2.5}$$

Ω: an die Arbeitsmaschine übertragen
Ω_0: zugeführt

$$W_{V\Theta 12} \;=\; \int_{t_1}^{t_2} \Theta \cdot \frac{d\Omega}{dt} \cdot (\Omega_0 - \Omega) \cdot dt \tag{2.6}$$

für $\Theta \;=\;$ const. gilt:

$$W_{V\Theta 12} \;=\; \Theta \cdot \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} (\Omega_0 - \Omega) \cdot d\Omega \qquad \text{(drehzahlabhängig)} \tag{2.7}$$

als kinetische Energie gespeichert: $\frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \Omega^2$

zugeführte Energie: $\frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \Omega_0^2$

Für die Normierung gelten folgende Bezugswerte:

- Leerlauf-Nenndrehzahl: $N_{0N} = \dfrac{\Omega_{0N}}{2\pi}$
- Luftspalt-Nennmoment: M_{iN}
- Trägheits-Nennzeitkonstante: $T_{\Theta N} = \dfrac{\Theta \cdot \Omega_{0N}}{M_{iN}}$
- bei Ω_{0N} gespeicherte Energie: $W_{0N} = \dfrac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \Omega_{0N}^2 = \dfrac{1}{2} \cdot T_{\Theta N} \cdot M_{iN} \cdot \Omega_{0N} = \dfrac{1}{2} \cdot T_{\Theta N} \cdot P_{0N}$
- und: $\omega = n = \dfrac{\Omega}{\Omega_{0N}} = \dfrac{N}{N_{0N}}\,; \quad m = \dfrac{M}{M_{iN}}$

  $w_V = \dfrac{W_V}{W_{0N}}$

Normierung:

$$w_{V12} = \frac{W_{V12}}{W_{0N}} = 2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{M_W}{M_{iN}} \cdot \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_{0N}} \cdot \frac{dt}{T_{\Theta N}} + 2 \cdot \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_{0N}} \cdot \frac{d\Omega}{\Omega_{0N}} \tag{2.8}$$

$$\Downarrow$$

$$w_{V12} = \underbrace{2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} m_W \cdot (n_0 - n) \cdot \frac{dt}{T_{\Theta N}}}_{w_{VW12}} + \underbrace{2 \cdot \int_{n_1}^{n_2} (n_0 - n) \cdot dn}_{w_{V\Theta 12}} \tag{2.9}$$

$$\text{Anteile:} \qquad w_{V12} = w_{VW12} + w_{V\Theta 12} \tag{2.10}$$

Beispiel: Gleichstrom–Nebenschlußmaschine GNM (siehe Kap. 3)

$$\psi = \psi_N = 1 \tag{2.11}$$

$$n_0 = u_A \tag{2.12}$$

$$n = u_A - m_{Mi} \cdot r_A \tag{2.13}$$

$$i_A = m_{Mi} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} w_{V12} &= 2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} m_{Mi} \cdot (n_0 - n) \cdot \frac{dt}{T_{\Theta N}} \\ &= 2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} m_{Mi} \cdot (u_A - u_A + m_{Mi} \cdot r_A) \cdot \frac{dt}{T_{\Theta N}} \\ &= 2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} m_{Mi}^2 \cdot r_A \cdot \frac{dt}{T_{\Theta N}} = 2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} i_A^2 \cdot r_A \cdot \frac{dt}{T_{\Theta N}} \end{aligned} \tag{2.15}$$

2.1.3 Verluste beim Beschleunigen

Die Verluste $w_{V\Theta}$ zum Beschleunigen der Schwungmasse beispielsweise beim Anfahren werden im folgenden unter vereinfachenden Voraussetzungen untersucht.

Mit $u_A = n_0 = \text{const.}$ (Einspeisung) und der Anfangsdrehzahl n_1 wird $n_2 = n_0$ (Enddrehzahl $=$ Leerlauf-Drehzahl).

Es ergibt sich mit zeitlich ansteigender Drehzahl $n(t)$:

$$\begin{aligned} w_{V\Theta 12} &= 2 \cdot \int_{n_1}^{n_2} n_0 \, dn - 2 \cdot \int_{n_1}^{n_2} n \, dn = 2 \cdot n_0 \cdot (n_2 - n_1) - \left(n_2^2 - n_1^2\right) \\ &= 2 \cdot n_0 \cdot (n_0 - n_1) - \left(n_0^2 - n_1^2\right) = (n_0 - n_1)^2 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Bezieht man die Verluste auf die gespeicherte Energie $w_{\Theta 12}$, so erhält man:

$$\frac{w_{V\Theta 12}}{w_{\Theta 12}} = \frac{(n_0 - n_1)^2}{n_0^2 - n_1^2} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \tag{2.17}$$

$$w_{\Theta 12} = \frac{W_{\Theta 12}}{W_{0N}} = {n_0}^2 - {n_1}^2 \, ; \quad W_{\Theta 12} = \frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot (\Omega_2^2 - \Omega_1^2) \, ; \quad W_{0N} = \frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \Omega_{0N}^2$$

Für einen **Anfahrvorgang** aus dem Stillstand $n_1 = 0$ bis zum Endwert $n_2 = n_0$ ergibt sich dann (siehe auch Kap. 3):

in einer Stufe ($z = 1$):

$$\frac{w_{V\Theta}}{w_\Theta} = 1 \qquad \begin{aligned} n_0 &= u_{A0} \quad \text{angelegt} \\ n &= e_A \, ; \quad \psi = 1 \end{aligned}$$

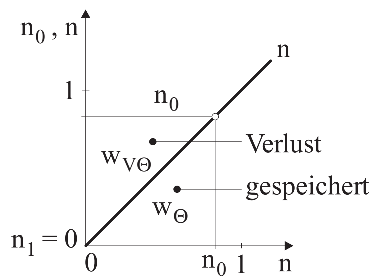


Abb. 2.4: *Energiebilanz*

Beachte: das Antriebssystem kann durch den Anfahrvorgang im Moment überlastet werden!

in z beliebigen Stufen (Abb. 2.5, 2.6):

$$\frac{w_{V\Theta}}{w_\Theta} = \frac{(n_{01} - 0)^2 + (n_{02} - n_{01})^2 + \ldots + (n_{0z} - n_{0z-1})^2}{(n_{01}^2 - 0^2) + (n_{02}^2 - n_{01}^2) + \ldots + \left(n_{0z}^2 - n_{0z-1}^2\right)} \tag{2.18}$$

$$\frac{w_{V\Theta}}{w_\Theta} = \frac{\sum_{k=1}^{z} (n_{0k} - n_{0k-1})^2}{n_{0z}^2} \leq 1 \tag{2.19}$$

z.B. geschaltete Ankerspannung:

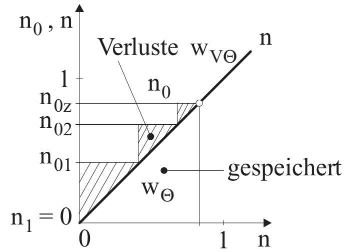


Abb. 2.5: *Energiebilanz*

<u>in z gleichen Stufen:</u>

$$n_{0k} - n_{0k-1} = \frac{n_{0z}}{z}$$

$$\frac{w_{V\Theta}}{w_\Theta} = \frac{z \cdot \left(\frac{n_{0z}}{z}\right)^2}{n_{0z}^2} = \frac{1}{z} \qquad \leq 1$$

Bei gleichen Stufen sind die Verluste minimal.

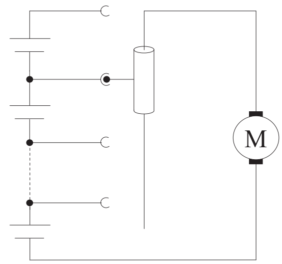


Abb. 2.6: *Prinzip-Schaltbild*

<u>stufenlos in $z \to \infty$ Stufen:</u>

$$\lim_{z\to\infty} \frac{w_{V\Theta}}{w_\Theta} = \lim_{z\to\infty} \frac{1}{z} = 0$$

(keine Verluste; synchroner Betrieb; Reibung, Leerlaufverluste vernachlässigt)

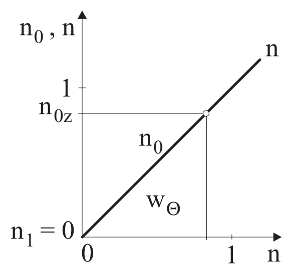


Abb. 2.7: *Energiebilanz*

Beachte: der Beschleunigungsvorgang dauert aber unendlich lange !

<u>stufenloses Hochlaufverhalten:</u>

(z.B. Hochlauf bei konstantem Beschleunigungsmoment:)

$$n_{0z} - n \;=\; \Delta n \sim m_B \;=\; \text{const.} \tag{2.20}$$

$$\frac{w_{V\Theta}}{w_\Theta} = \frac{2 \cdot n_{0z} \cdot \Delta n}{n_{0z}^2} = \frac{2 \cdot \Delta n}{n_{0z}} \tag{2.21}$$

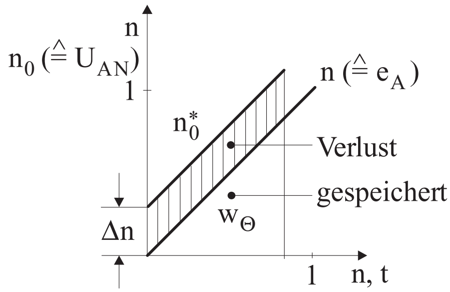


Abb. 2.8: *Beispiel: Energiebilanz einer stromgeregelten GNM*

$i_A \cdot \psi =$ const. ; $i_A =$ const. während der Beschleunigung, $\psi = 1$
$m_B \quad =$ const.

$$N_0^\star \quad \hat{=} \quad U_A \quad = \quad E_A + \underbrace{R_A \cdot I_A}_{\hat{=}\Delta N} \tag{2.22}$$

$$n_0^\star \quad \hat{=} \quad u_A \quad = \quad e_A + \underbrace{r_A \cdot i_A}_{\hat{=}\Delta n} \tag{2.23}$$

wobei $\Delta n =$ const. $\quad \hat{=} \quad i_A =$ const. $= m_M = m_B$; $\quad m_W = 0$

2.2 Erwärmung elektrischer Maschinen

2.2.1 Verlustleistung und Temperatur

Die Verluste werden im elektromechanischen Wandler in Wärme umgesetzt. Für die Berechnung der Erwärmung einer Maschine wählen wir ein vereinfachtes Modell, das als homogen angenommen wird. Der Wärmetransport erfolgt durch Wärmeleitung und Konvektion:

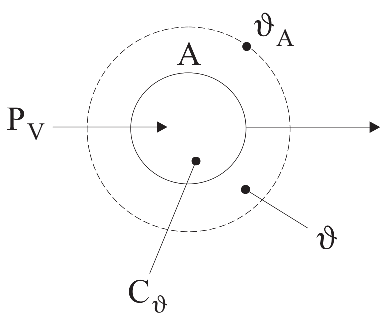


Abb. 2.9: *Kühlmedium*

Verwendete Größen:

$P_V(t)$	Wärme-(Verlust-)Leistung	
$\vartheta(t)$	Temperatur des Körpers	
$\vartheta_A(t)$	Außentemperatur	
$\vartheta - \vartheta_A = \Delta\vartheta(t)$	Übertemperatur	
C_ϑ	Wärmekapazität	$\left[\dfrac{kcal}{°C}, \dfrac{Ws}{°C}\right]$
A	Wärmeabgabefähigkeit	$\left[\dfrac{kcal}{°C \cdot s}, \dfrac{W}{°C}\right]$
$\dfrac{1}{A} = R_\vartheta$	Wärmewiderstand	
$\dfrac{C_\vartheta}{A} = T_\vartheta$	Wärmezeitkonstante $[s]$ – Betrieb $T_{\vartheta b} = 10 \ldots 60\ min$ – Pause $T_{\vartheta p} = (1 \ldots 2) \cdot T_{\vartheta b}$	

Betrachtung für einen Körper, Ableitung der Differentialgleichung:

$$\begin{array}{cccccc} \text{zugeführt} & & \text{abgeführt} & & \text{gespeichert} \\ P_V \cdot dt & = & A \cdot (\vartheta - \vartheta_A) \cdot dt & + & C_\vartheta \cdot d\vartheta \\ \dfrac{P_V}{A} & = & (\vartheta - \vartheta_A) & + & \dfrac{C_\vartheta}{A} \cdot \dfrac{d\vartheta}{dt} \end{array}$$

Vereinfacht mit Außentemperatur $\underline{\vartheta_A = \text{const.}}$:
Differentialgleichung:

$$\frac{1}{A} \cdot P_V(t) \;=\; \Delta\vartheta(t) + T_\vartheta \cdot \frac{d\,(\Delta\vartheta(t))}{dt} \tag{2.24}$$

Bildbereich:

$$\frac{1}{A} \cdot P_V(s) \;=\; \Delta\vartheta(s) + T_\vartheta \cdot [s \cdot \Delta\vartheta(s) - \Delta\vartheta(+0)] \tag{2.25}$$

Die zugehörige Übertragungsfunktion lautet:

$$G(s) \;=\; \frac{\Delta\vartheta(s)}{\dfrac{1}{A} \cdot P_V(s)} \;=\; \frac{1}{1 + sT_\vartheta} \tag{2.26}$$

http://www.springer.com/978-3-642-30470-5

Elektrische Antriebe - Grundlagen
Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben
Schröder, D.
2013, XXV, 775 S. Mit Online-Extras., Softcover
ISBN: 978-3-642-30470-5