

Grundlagen der Mess- und Automatisierungstechnik

Laborübung: Regelkreis

Teilversuch: Temperatur-Regelkreis mit Zweipunkt- Regler

bearbeitet von:

Aufgabe 3.1

Temperaturachse: $5mV = 250mm \rightarrow 1mm = \frac{1}{50}mV$
Zeitachse: $10mm = 1min \rightarrow 1mm = 6s$

$$\begin{aligned}V_W &= 3,7l \\C_{BE} &= 3,5 \frac{kJ}{K} \\c_W &= 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K} \\\rho_W &= 1000 \frac{kg}{m^3} \\t_E &= 99mm \frac{6s}{mm} = 594s \\W_{el} &= 197,0Wh\end{aligned}$$

Die von den Thermoelementen gemessene Temperatur wird mit Hilfe des Auszuges aus DIN 43710 für Thermoelemente des Typs L ermittelt. Dazu wird innerhalb des Bereichs in welchem der Messwert liegt interpoliert.

$$y = y_1 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} + y_0 \frac{x - x_1}{x_0 - x_1}$$

vor dem Einschalten der Heizung:

$$\begin{aligned}U_{TE} &= -66mm \frac{1mV}{50mm} + 2,56mV = 1,33mV \\ \vartheta_A &= 30^\circ C \frac{1,33mV - 1,05mV}{1,58mV - 1,05mV} + 20^\circ C \frac{1,33mV - 1,58mV}{1,05mV - 1,58mV} \\ \vartheta_A &= \underline{\underline{25,28^\circ C}}\end{aligned}$$

nach dem Erreichen des Sollwertes:

$$U_{TE} = -37mm \frac{1mV}{50mm} + 2,56mV = 3,39mV$$

$$\vartheta_E = 70^\circ\text{C} \frac{3,39\text{mV} - 3,19\text{mV}}{3,73\text{mV} - 3,19\text{mV}} + 60^\circ\text{C} \frac{3,39\text{mV} - 3,73\text{mV}}{3,19\text{mV} - 3,73\text{mV}}$$

$$\vartheta_E = \underline{\underline{63,70^\circ\text{C}}}$$

maximale Temperaturänderungsgeschwindigkeit ($\dot{\vartheta}_1$) aus dem Badtemperaturverlauf

$$\dot{\vartheta}_1 = \frac{\vartheta_E - \vartheta_A}{t_E} = \underline{\underline{0,0646 \frac{\text{K}}{\text{s}}}}$$

maximale Temperaturänderungsgeschwindigkeit ($\dot{\vartheta}_2$) aus den Messwerten

$$\Delta Q = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab}$$

$$c_W \cdot V_W \cdot \rho_W \cdot \dot{\vartheta}_2 = \frac{W_{el}}{\Delta t} - C_{BE} \dot{\vartheta}_2$$

$$\dot{\vartheta}_2 = \frac{1}{t_E} \cdot \frac{W_{el}}{c_W \cdot V_W \cdot \rho_W + C_{BE}}$$

$$\dot{\vartheta}_2 = \underline{\underline{0,0628 \frac{\text{K}}{\text{s}}}}$$

Fehler von $\dot{\vartheta}_1$:

Der Fehler von $\dot{\vartheta}_1$ setzt sich zusammen aus dem Fehler des Y,t Schreibers und dem Fehler des Thermoelements Typ L.

$$\Delta t_E = \pm 1\text{mm} \cdot \frac{6\text{s}}{\text{mm}} = \pm 6\text{s}$$

$$\Delta \vartheta_{Th} = \pm 3\text{K} \quad \text{Fehler des Thermoelementes}$$

$$\Delta U_{TE} = \pm \left(\frac{\text{Skalenendwert} \cdot \text{Klasse}}{100} + \text{Ableseungenauigkeit} \right)$$

$$\Delta U_{TE} = \pm \left(\frac{5\text{mV} \cdot 0,5}{100} + 1\text{mm} \frac{1\text{mV}}{50\text{mm}} \right) = \pm 0,045\text{mV}$$

$$\Delta \vartheta_{A-Schr} = 30^\circ\text{C} \frac{(1,33\text{mV} + U_{TE}) - 1,05\text{mV}}{1,58\text{mV} - 1,05\text{mV}} + 20^\circ\text{C} \frac{(1,33\text{mV} + U_{TE}) - 1,58\text{mV}}{1,05\text{mV} - 1,58\text{mV}} - \vartheta_A$$

$$\Delta \vartheta_{E-Schr} = 70^\circ\text{C} \frac{(3,39\text{mV} + U_{TE}) - 3,19\text{mV}}{3,73\text{mV} - 3,19\text{mV}} + 60^\circ\text{C} \frac{(3,39\text{mV} + U_{TE}) - 3,73\text{mV}}{3,19\text{mV} - 3,73\text{mV}} - \vartheta_E$$

$$\Delta \vartheta_A = \Delta \vartheta_{Th} + \Delta \vartheta_{A-Schr} = \pm(3\text{K} + 0,849\text{K}) = \pm 3,849\text{K}$$

$$\Delta \vartheta_E = \Delta \vartheta_{Th} + \Delta \vartheta_{E-Schr} = \pm(3\text{K} + 0,833\text{K}) = \pm 3,833\text{K}$$

$$\Delta \dot{\vartheta}_1 = \frac{1}{t_E} \Delta \vartheta_E + \frac{1}{t_E} \Delta \vartheta_A + \frac{\vartheta_E - \vartheta_A}{t_E^2} \Delta t_E$$

$$\Delta \dot{\vartheta}_1 = \underline{\underline{\pm 0,0136 \frac{K}{s}}}$$

$$\frac{\Delta \dot{\vartheta}_1}{\dot{\vartheta}_1} = \underline{\underline{\pm 21,0\%}}$$

Fehler von $\dot{\vartheta}_2$:

$$\Delta V_W = \pm 0,1l$$

$$\Delta W_{el} = \pm(3\% + 3Digit) = \pm(0,03W_{el} + 0,3Wh)$$

$$\Delta t_E = 0 \quad \text{angenommen}$$

$$\Delta \dot{\vartheta}_2 = \frac{1}{t_E} \cdot \frac{1}{c_W \cdot V_W \cdot \rho_W + C_{BE}} \cdot \Delta W_{el} + \frac{1}{t_E} \cdot \frac{-W_{el}}{(c_W \cdot V_W \cdot \rho_W + C_{BE})^2} \cdot c_W \cdot \rho_W \Delta V_W$$

$$\Delta \dot{\vartheta}_2 = \underline{\underline{\pm 3,36 \cdot 10^{-3} \frac{K}{s}}}$$

$$\frac{\Delta \dot{\vartheta}_2}{\dot{\vartheta}_2} = \underline{\underline{\pm 5,357\%}}$$

Prüfung ob Ergebnisse zulässig:

$$\dot{\vartheta}_1 = (0,0646 \pm 0,0136) \frac{K}{s}$$

$$\dot{\vartheta}_2 = (0,0628 \pm 0,0034) \frac{K}{s}$$

Die Ergebnisse sind zulässig, da sich die Bereiche überschneiden.

Typ und Kennwerte für das Übertragungsverhalten

Thermoelement 3m (rot):

$$x_e = \Delta P_{el}$$

$$x_a = \Delta \vartheta$$

Sprungantwort -> ITO Verhalten

$$x_a = K_I \int x_e dt$$

$$K_I = \frac{x_a}{\int x_e dt} = \frac{\Delta \vartheta}{\int \Delta P_{el} dt} = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta W_{el}}$$

$$K_I = \frac{38,42K}{197,0Wh} = 5,4175 \cdot 10^{-5} \frac{K}{Ws}$$

$$\Delta\vartheta = 5,4175 \cdot 10^{-5} \frac{K}{W_s} \int \Delta P_{el} dt$$

Thermoelement 14 (blau):

$$\begin{aligned} x_e &= \Delta\vartheta && \text{im Wasserbad} \\ x_a &= \Delta U_{TE} && \text{in der Anzeige} \end{aligned}$$

Anstiegsantwort \rightarrow PT1 Verhalten

$$T_1 \dot{x}_a + x_a = K_P \cdot x_e$$

$$x_e(t) = c \cdot t$$

T_1 lässt sich aus der Aufzeichnung des Kurvenverlaufes bestimmen

$$T_1 = 19mm \cdot 6 \frac{mm}{s} = 114s$$

$$K_P T_1 c = 19mm \cdot \frac{1mV}{50mm} = \frac{19}{50} mV$$

$$c = \dot{\vartheta} = 0,0646 \frac{K}{s}$$

$$K_P = \frac{\frac{19}{50} mV}{114s \cdot 0,0646 \frac{K}{s}} = 0,051599 \frac{mV}{K}$$

$$114s \cdot \dot{x}_a + x_a = 0,051599 \frac{mV}{K} \cdot x_e$$

Thermoelement 3 (grün):

$$\begin{aligned} x_e &= \Delta\vartheta && \text{im Wasserbad} \\ x_a &= \Delta U_{TE} && \text{in der Anzeige} \end{aligned}$$

Anstiegsantwort \rightarrow PTO Verhalten

$$\begin{aligned} x_a &= K \cdot x_e \\ K &= \frac{U_{Ende} - U_{Anfang}}{\vartheta_{Ende} - \vartheta_{Anfang}} = 1 \frac{mV}{K} \end{aligned}$$

$$x_a = \frac{mV}{K} x_e$$

Fehler des Übertragungsfaktors

$$P_{el} \leq 1,17kW$$

$$x_a = \widetilde{K}_I \int x_e dt$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_a &= \widetilde{K}_I \cdot x_e \\ \widetilde{K}_I &= \frac{\dot{\vartheta}_2}{P_{el}} = \frac{0,0628 \frac{K}{s}}{1,17 kW} = 5,37 \cdot 10^{-5} \frac{K}{Ws} \\ \frac{\widetilde{K}_I - K_I}{K_I} \cdot 100\% &= \underline{\underline{0,88\%}}\end{aligned}$$

Aufgabe 3.2

Temperaturachse: $1mV = 250mm \rightarrow 1mm = \frac{1}{250}mV$

Hg- Kontaktthermometer:

$$\begin{aligned}t &= 45,5mm \cdot 6 \frac{s}{mm} = 273s \\ n &= 11 \\ T &= \frac{t}{n} = \frac{273s}{11} = 24,8s \\ f_{Sch} &= \frac{1}{T} = 0,0403s^{-1} \\ 2\Delta U &= 4mm \cdot \frac{1mV}{250mm} = 0,016mV \\ \Delta\vartheta &= \Delta U \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{U_2 - U_1} = 0,008mV \cdot \frac{70^\circ C - 60^\circ C}{3,73mV - 3,19mV} = 0,148K\end{aligned}$$

Thermoelement 3m (rot):

$$\begin{aligned}t &= 33mm \cdot 6 \frac{s}{mm} = 198s \\ n &= 9 \\ T &= \frac{t}{n} = \frac{198s}{9} = 22s \\ f_{Sch} &= \frac{1}{T} = 0,045s^{-1} \\ 2\Delta U &= 3,5mm \cdot \frac{1mV}{250mm} = 0,014mV \\ \Delta\vartheta &= \Delta U \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{U_2 - U_1} = 0,007mV \cdot \frac{70^\circ C - 60^\circ C}{3,73mV - 3,19mV} = 0,1296K\end{aligned}$$

Thermoelement 3 (grün):

$$\begin{aligned}t &= 37,5\text{mm} \cdot 6 \frac{\text{s}}{\text{mm}} = 225\text{s} \\n &= 9 \\T &= \frac{t}{n} = \frac{225\text{s}}{9} = 25\text{s} \\f_{Sch} &= \frac{1}{T} = 0,04\text{s}^{-1} \\2\Delta U &= 3,5\text{mm} \cdot \frac{1\text{mV}}{250\text{mm}} = 0,014\text{mV} \\\Delta\vartheta &= \Delta U \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{U_2 - U_1} = 0,007\text{mV} \cdot \frac{70^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{3,73\text{mV} - 3,19\text{mV}} = 0,1296\text{K}\end{aligned}$$

Thermoelement 14 (blau):

$$\begin{aligned}t &= 63,5\text{mm} \cdot 6 \frac{\text{s}}{\text{mm}} = 381\text{s} \\n &= 1 \\T &= 381\text{s} \\f_{Sch} &= \frac{1}{T} = 2,625 \cdot 10^{-3}\text{s}^{-1} \\2\Delta U &= 73\text{mm} \cdot \frac{1\text{mV}}{250\text{mm}} = 0,292\text{mV} \\\Delta\vartheta &= \Delta U \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{U_2 - U_1} = 0,146\text{mV} \cdot \frac{70^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{3,73\text{mV} - 3,19\text{mV}} = 2,7037\text{K}\end{aligned}$$

Thermoelement 14 (mit beschränkter Heizleistung):

$$\begin{aligned}t &= 75,5\text{mm} \cdot 6 \frac{\text{s}}{\text{mm}} = 453\text{s} \\n &= 1 \\T &= 453\text{s} \\f_{Sch} &= \frac{1}{T} = 2,207 \cdot 10^{-3}\text{s}^{-1} \\2\Delta U &= 18\text{mm} \cdot \frac{1\text{mV}}{250\text{mm}} = 0,072\text{mV}\end{aligned}$$

$$\Delta\vartheta = \Delta U \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{U_2 - U_1} = 0,036mV \cdot \frac{70^\circ C - 60^\circ C}{3,73mV - 3,19mV} = 0,6K$$

| | ϑ_{Hg} | TE3m | TE3 | TE14 | TE14 (beschränkt) |
|---|------------------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|
| $U_{TE}[mV]$ | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,146 | 0,036 |
| $\Delta\vartheta [K]$ | 0,148 | 0,1296 | 0,1296 | 2,7037 | 0,6 |
| Schaltfrequenz (f_{Sch}) [s^{-1}] | 0,0403 | 0,045 | 0,04 | $2,625 \cdot 10^{-3}$ | $2,207 \cdot 10^{-3}$ |

- Je kleiner die Schaltfrequenz um so größer ist $\Delta\vartheta$.
- Zwischen dem Sensor mit thermischer Rückführung und dem 3mm Sensor im Wasserbad ist nur ein minimaler Unterschied bezüglich $\Delta\vartheta$ und der Schaltfrequenz festzustellen.
- Eine hohe Temperaturänderungsgeschwindigkeit bewirkt bei hoher thermischer Trägheit des Sensors ein hohes $\Delta\vartheta$. Bei Sensoren geringer thermischer Trägheit ist der Einfluss nicht so stark, da diese auch bei einer großen Temperaturänderungsgeschwindigkeit ausreichend schnell reagieren.
- Bei geringer thermischer Trägheit des Sensors erhöht sich die Schaltfrequenz.
- Beim Thermoelement mit 14 mm Durchmesser spielt die thermische Trägheit bei der Erwärmung eine große Rolle. Dieses Thermoelement sollte nur bei geringen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten zum Regeln verwendet werden.

Aufgabe 3.3

$$\Delta\vartheta_{\ddot{U}} = 15,5mm \cdot \frac{1mV}{250mm} \cdot \frac{70^\circ C - 60^\circ C}{3,73mV - 3,19mV} = 1,15K$$

$$T_{E,\emptyset 14} = 34mm \cdot \frac{6s}{1mm} = 204s$$

Im statischen Betrieb sollte, wenn nur geringe Temperaturschwankungen zugelassen sind, ein Sensor mit geringer thermischer Trägheit in Verbindung mit einem Zweipunktregler verwendet werden. Je größer die thermische Trägheit des Sensors ist, um so größer wird die Temperaturschwankung. Die Nutzung eines höherwertigen Reglers (PID) ist hier nicht nötig.

Im dynamischen Betrieb werden mit dem 14mm Thermoelement in Verbindung mit dem PID Regler gute Ergebnisse erzielt. Durch die umfassenden Abstimmungsmöglichkeiten des PID-Reglers auf den 14mm Sensor ist die Nutzung eines Sensors mit geringerer thermischer Trägheit nicht notwendig.