

Systemverfahrenstechnik

1. Projektübung

Katharina Holstein,
STK 03

Aufgabe 1

- 1.) Zur Modellierung eines verfahrenstechnischen Systems werden *Bilanzen*, *kinetische Ansätze* und *thermodynamische Zusammenhänge* als Grundbausteine benötigt. So werden *Bilanzen* für die Stoffmenge, die Energie und den Impuls gebraucht. Für die *kinetischen Ansätze* werden zum Beispiel chemische Reaktionen benötigt, Gleichungen für den Transport (Stoff-, Impulstransport) oder für Quellen und Senken der bilanzierten Systeme, sowie Gleichungen für die Wärmeübertragung. Weiterhin werden für *kinetische Ansätze* Kennlinien (Ventilkennlinie) genutzt. Zur Berechnung der *thermodynamischen Zusammenhänge* werden die thermischen und kalorischen Zustandsgleichungen, die idealen Gasgesetze, sowie Gesetze über Phasen- und Reaktionsgleichgewichte angewendet.

- 2.) - Eingangsgrößen: T_{in} , $c_{\alpha,in}$, F_{in} , T_W
- Zustandsgrößen: T , c_{α}
- Ausgangsgrößen: F_{out} , c_{α} , T

Eingangsgrößen sind Größen, die auf das System einwirken (z.B. Stoff- und Energieflüsse). Sie sind veränderbar um das System zu regulieren, bzw. zu steuern. Somit sind F_{in} , T_{in} , c_{in} und T_W Eingangsgrößen, da diese Größen stellbar sind.

Zustandsgrößen sind Größen, die den Zustand (wie z.B. Volumen, Stoffmenge, Temperatur) des betrachteten Systems beschreiben. Bei der Beschreibung des Zustandes wird die minimalste Anzahl an Zustandsgrößen verwendet.

Ausgangsgrößen sind diejenigen Größen, die außerhalb des Systems gemessen werden. D.h. sie können wie die Eingangsgrößen auch Stoff- und Energieflüsse darstellen, aber auch Messgrößen, die an dem System aufgenommen werden sollen.

Systemparameter beschreiben die Eigenschaften des Systems, wie zum Beispiel die Geometrie eines Reaktors (Volumen) oder Reaktionsparameter (Reaktion erster Ordnung, exotherme Reaktion): $k_W A$, V , E_A , $\Delta_r h$, ...

- 3.) Das vorliegende System ist ein kontinuierliches System. Das heißt dieses System besitzt kontinuierliche Eingangs-, Zustands-, und Ausgangsgrößen sowie einen kontinuierlichen Zeitablauf. Weiterhin ist es örtlich konzentriert, da keine Abhängigkeit vom Ort (Ableitungen nach dem Ort) auftreten, weil das System als ideal durchmischt angenommen wird. Es ist ein mehrdimensionales System, weil es mehrere Ein- und Ausgangsgrößen besitzt (Betrachtung der Konzentration und der Temperatur). Das System ist nichtlinear, da das Superpositionsprinzip nicht erfüllt wird (Temperatur steht im Exponenten). Außerdem ist es ein deterministisches, gedächtnisloses, zeitinvariantes, kausales und nicht stochastisches System.
- 4.) Allgemeine Herleitung der Kinetik für die Reaktionsgeschwindigkeit:

$$\sigma_{\alpha} = \sum_j \nu_{\alpha j} r_j \quad (1)$$

$$r = k(T) \prod_{\text{Edukte}} c_{\alpha}^{|\nu_{\alpha}|} \quad (2)$$

$$k(T) = k_j \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (3)$$

Hierbei sind: σ_{α} : Quelledichte; r : volumenbezogene Reaktionsgeschwindigkeit; k_j : Stöckfaktor; c_{α} : Konzentration der Komponente α ; E_A : Aktivierungsenergie; R : allgemeine Gaskonstante; T :

Temperatur; ν_α : stöchiometrische Koeffizient der Komponente α aus den Reaktionsgleichungen; j : Index für die momentane Reaktion.

Die gegebenen Gleichungen in die vorliegende Reaktion *Edukt* \rightarrow *Produkt* eingesetzt, ergeben unter der Annahme einer Reaktion erster Ordnung ($\alpha = E$):

$$r = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) c_E^{|-1|} = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) c_E$$

und somit

$$\sigma_E = -1 \cdot k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) c_E = -k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) c_E \quad (4)$$

Aufgabe 2

1.) Die allgemeine Differentialgleichung für die Stoffmengenbilanz lautet:

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = G_{\alpha,in} - G_{\alpha,out} + \sigma_\alpha^n \quad (5)$$

Mit

$$G_\alpha = c_\alpha F \quad \sigma_\alpha^n = V \sigma_\alpha$$

lässt sich die Gleichung (5) umschreiben in:

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = c_{\alpha,in} F_{in} - c_{\alpha,out} F_{out} + V \sigma_\alpha$$

An dieser Stelle wird $c_{\alpha,out} = c_\alpha$ gesetzt, da die Konzentration der Komponente α im Reaktor gleich der Konzentration im Ausfluss ist.

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = 0 \quad V = const. \quad \rightarrow \rho = const.$$

$$\frac{dm}{dt} = F_{in}\rho - F_{out}\rho = 0 \quad \rightarrow F_{in} = F_{out}$$

$$n_E = c_E V : \quad \frac{d(c_E V)}{dt} = V \frac{dc_E}{dt} + c_E \frac{dV}{dt} \quad \text{wobei} \quad c_E \frac{dV}{dt} = 0$$

auf Grund des konstanten Volumens. Hieraus ergibt sich die Gleichung für die molare Konzentration des Eduktes:

$$V \frac{dc_E}{dt} = F c_{E,in} - F c_E + V \sigma_E$$

$$\frac{dc_E}{dt} = \frac{F}{V} (c_{E,in} - c_E) + \sigma_E$$

An dieser Stelle wird die Gleichung (4) eingesetzt:

$$\frac{dc_E}{dt} = \frac{F}{V} (c_{E,in} - c_E) - k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) c_E \quad (6)$$

2.) Die Enthalpiebilanz in ihrer allgemeinen Form lautet:

$$\frac{dH}{dt} = \rho F_{in} h_{\alpha,in}^m - \rho F_{out} h_{\alpha,out}^m + Q + V \frac{dp}{dt} + W_s + \sum_{\alpha} m_\alpha (f_\alpha \vec{v}) \quad (7)$$

Hierbei können noch einige Annahmen für das vorliegende System getroffen werden:

- keine Änderung der potentiellen Energie: $\sum_{\alpha} m_\alpha (f_\alpha \vec{v}) = 0$
- keine Druckänderungsarbeit: $V \frac{dp}{dt} = 0$
- kein Arbeitseintrag durch sonstige Arbeit (z.B. Rührer): $W_s = 0$

Somit vereinfacht sich die Gleichung (7) zu:

$$\frac{dH}{dt} = F_{in}\rho h_{\alpha,in}^m - F_{out}\rho h_{\alpha,out}^m + Q \quad (8)$$

Nun kann man $F\rho h_{\alpha}^m = H$ setzen. Für dieses H lässt sich auch $H = \sum_{\alpha} G_{\alpha} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T)$ schreiben. Und somit ergeben sich folgende Gleichungen:

$$H_{in} = \sum_{\alpha} G_{\alpha,in} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T_{in}) \quad H_{out} = \sum_{\alpha} G_{\alpha,out} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T)$$

$h_{f,\alpha}^{\ominus}(T)$ kann mit folgender Gleichung angenähert werden:

$$h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) = h_{f,\alpha}^{\ominus}(T^{\ominus}) + \int_{T^{\ominus}}^T c_{p,\alpha}(\vartheta) d\vartheta \quad (9)$$

Die Gleichung für den Wärmestrom erhält man aus:

$$Q = k_W A_W (T_W - T) \quad (10)$$

Außerdem lässt sich

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{\alpha} n_{\alpha} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) \right) \quad (11)$$

umschreiben. Diese Gleichung kann noch weiter umgeformt werden:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \sum_{\alpha} \left(h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) \frac{dn_{\alpha}}{dt} + n_{\alpha} \frac{dh_{f,\alpha}^{\ominus}(T)}{dt} \right) \\ \frac{dh_{f,\alpha}^{\ominus}(T)}{dt} &= \frac{\partial h_{f,\alpha}^{\ominus}(T)}{\partial T} \frac{dT}{dt} = c_{p,\alpha} \frac{dT}{dt} \end{aligned}$$

An dieser Stelle wird die Gleichung (5) eingesetzt und man kombiniert die Gleichungen (8)=(11). Dies sieht dann wie folgt aus:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \sum_{\alpha} \left(n_{\alpha} c_{p,\alpha} \frac{dT}{dt} + h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) (G_{\alpha,in} - G_{\alpha,out} + V\sigma_{\alpha}) \right) \\ &= \sum_{\alpha} \left(G_{\alpha,in} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T_{in}) - G_{\alpha,out} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) \right) + Q \end{aligned} \quad (12)$$

Weiteres Umformen liefert:

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha} n_{\alpha} c_{p,\alpha} \frac{dT}{dt} &= \sum_{\alpha} \left(G_{\alpha,in} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T_{in}) - G_{\alpha,out} h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) \right) + Q \\ &\quad - \sum_{\alpha} \left(h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) (G_{\alpha,in} - G_{\alpha,out} + V\sigma_{\alpha}) \right) \end{aligned}$$

Hier heben sich die beiden $G_{\alpha,out}$ auf und die Gleichung vereinfacht sich zu:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sum_{\alpha} G_{\alpha,in} \left(h_{f,\alpha}^{\ominus}(T_{in}) - h_{f,\alpha}^{\ominus}(T) \right) + Q - \sum_{\alpha} V\sigma_{\alpha}}{\sum_{\alpha} n_{\alpha} c_{p,\alpha}}$$

Nun können einige Annahmen getroffen werden, z.B. dass dieses System äquimolar ist. Dadurch lassen sich folgende Ausdrücke umformen (am Ende wird $j = 1$ gesetzt):

$$\sum_{\alpha} n_{\alpha} = \sum_{\alpha} c_{\alpha} V \quad \sum_{\alpha} c_{\alpha} c_{p,\alpha} = c_t c_p$$

$$\begin{aligned}
\text{Aus } & \sum_{\alpha} G_{\alpha, in} (h_{f, \alpha}^{\ominus}(T_{in}) - h_{f, \alpha}^{\ominus}(T)) \quad \text{wird} \\
& \sum_{\alpha} G_{\alpha, in} \left(h_{f, \alpha}^{\ominus}(T^{\ominus} + c_{p, \alpha}(T_{in} - T^{\ominus})) - h_{f, \alpha}^{\ominus}(T^{\ominus} - c_{p, \alpha}(T - T^{\ominus})) \right) \\
= & \sum_{\alpha} G_{\alpha, in} c_{p, \alpha} (T_{in} - T) \\
& \sum_{\alpha} h_{f, \alpha}^{\ominus}(T) V \sigma_{\alpha} = V \sum_j r_j \sum_{\alpha} h_{f, \alpha}^{\ominus}(T) \nu_{j, \alpha} = Vr \Delta_R h
\end{aligned}$$

Mittels dieser ganzen Umformungen kann die Gleichung schließlich zu folgender Differentialgleichung vereinfacht werden:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sum_{\alpha} F_{in} c_{\alpha, in} c_{p, \alpha} (T_{in} - T) - Vr \Delta_R h + Q}{\sum_{\alpha} n_{\alpha} c_{p, \alpha}}$$

Jetzt wird die Gleichung (10) eingefügt und es wird gekürzt ($\sum_{\alpha} c_{\alpha} c_{p, \alpha} = c_t c_p$ wird hier eingesetzt):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_{in} - T) - \frac{r \Delta_R h}{c_t c_p} + \frac{k_W A_W (T_W - T)}{c_t c_p V} \quad (13)$$

Somit ist Gleichung (13) die Differentialgleichung für die Reaktortemperatur.

- 3.) Es handelt sich bei der Gleichungen (13) um eine nichtlineare Differentialgleichungen erster Ordnung und bei der Gleichung (6) um eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung. Für beide Gleichungen werden zusätzlich noch Anfangsbedingungen benötigt (T_0 und c_0) sowie ein Zeitbereich über den integriert werden kann (t_0 bis t). Somit ist dies ein nichtlineares System.
- 4.) Für den stationären Zustand des System ist die zeitliche Änderung aller Größen gleich Null. Dass heißt die jeweils gesuchten Größen sind/bleiben konstant:

$$\frac{dc_E}{dt} = 0 \quad \frac{dT}{dt} = 0$$

- 5.) Die linearisierte Zustandsraumdarstellung lautet:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx + Du$$

wobei die einzelnen Matrizen A , B , C und D wie folgt definiert sind:

$$\begin{aligned}
A &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \\
C &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} & D &= \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial u_n} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Hierbei bezeichnet x die Zustandsgrößen, u die Eingangsgrößen und y die Ausgangsgrößen des Systems. Die Dimensionen der einzelnen Matrizen stimmen allerdings nicht für die Berechnungen überein. Dies liegt daran, dass mehr Eingangsgrößen für dieses System gegeben sind, als für die

Berechnung benötigt werden. Sie werden in dieser Angabe stehen gelassen, obwohl es Fehler in der Dimension gibt, da bei der expliziten Berechnung diejenigen Größen (F_{in} , T_W) weggelassen werden können und bei der Berechnung der Eigenwerte aus der A-Matrix nicht stören. Für einen stationären Zustand des Systems sähe die Zustandsraumdarstellung somit wie folgt aus.

$$\begin{bmatrix} \dot{c}_E \\ \dot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{F}{V} - k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) & -\frac{E_A}{R} \frac{1}{T^2} \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) k_0 c_E \\ -\frac{\Delta_r h}{c_t c_p} k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) & -\frac{F}{V} - \frac{E_A}{R} \frac{1}{T^2} \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) k_0 c_E \frac{\Delta_r h}{c_t c_p} - \frac{k_W A_W}{c_t c_p V} \end{bmatrix}_{c_{ss}, T_{ss}} \begin{bmatrix} c_E \\ T \end{bmatrix}_{c_{ss}, T_{ss}} \\ + \begin{bmatrix} \frac{F}{V} & 0 & \frac{c_{E,in} - c_E}{V} & 0 \\ 0 & \frac{F}{V} & \frac{T_{in} - T}{V} & \frac{k_W A_W}{c_t c_p V} \end{bmatrix}_{c_{ss}, T_{ss}} \begin{bmatrix} c_{E,in} \\ T_{in} \\ F_{in} \\ T_W \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c_E \\ T \\ F_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_E \\ T \end{bmatrix}_{c_{ss}, T_{ss}} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{E,in} \\ T_{in} \\ F_{in} \\ T_W \end{bmatrix}$$

Aufgabe 3

- 1.) Der stationäre Punkt der Gleichungen für $T = 399K$ liegt bei:

$$c_{E_{ss}} = 71.02 \frac{mol}{m^3} \quad \text{und} \quad T_{ss} = 462.37K$$

Er wurde mittels `fsolve` in Matlab berechnet. Dabei wurde die unter 2.4. genannte Bedingung (Änderung über die Zeit gleich Null) genutzt.

- 2.) Die Eigenwerte für das linearisierte System wurden mittels Matlab aus der Matrix A berechnet. Dabei liefert Matlab durch den Befehl `[V,D]=eig(X)` die Eigenwerte der Matrix X , die in der Diagonalen der Matrix D liegen. Die Matrix V enthält die Eigenvektoren der Matrix X .

$$\lambda_{1/2} = -0.00158 \pm i0.0659$$

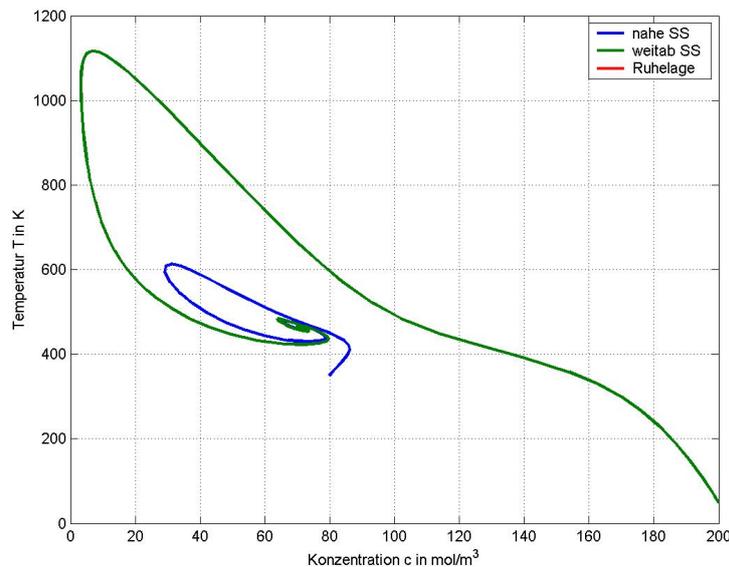


Abbildung 1: Phasenporträt bei korrekt eingestellter Manteltemperatur

Der Realteil beider Eigenwerte ist kleiner als Null, d.h. sie sind stabil. Da die Matrix konjugiert komplexe Eigenwerte besitzt, rotieren die Lösungen auf die Ruhelage zu. Das heißt es gibt einen Fixpunkt auf den die Lösungen spiralförmig hineinlaufen.

- 3.) Die numerische Integration nahe der Ruhelage und weitab der Ruhelage hat die Erwartungen aus Aufgabe 3.2 bestätigt. Die Lösungen laufen alle in die Ruhelage (zu Beginn ein leicht oszillierendes Verhalten auf Grund des imaginären Anteils).

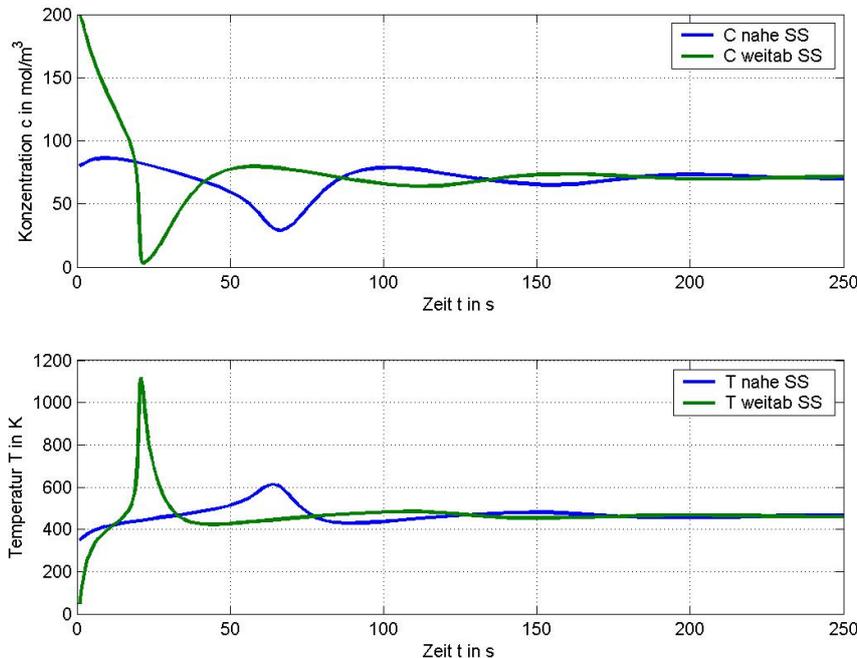


Abbildung 2: Verlauf vom c und T bei korrekt eingestellter Manteltemperatur

- 4.) Bei einer nicht korrekt einstellbaren Manteltemperatur verschiebt sich die Ruhelage des Systems ein wenig. Die neue Ruhelage wurde wiederum mittels `fsolve` berechnet, wobei die Manteltemperatur mit $T = 401K$ angesetzt wurde. Die neue Ruhelage liegt bei:

$$c_{E,2,ss} = 63.3 \frac{mol}{m^3} \quad \text{und} \quad T_{2,ss} = 484.14K$$

Auf Grund der neuen Ruhelage ergeben sich natürlich auch neue Eigenwerte für die Systemmatrix A :

$$\lambda_{1/2} = 0.0135 \pm i0.0579$$

Die neuen Eigenwerte lassen etwas ganz anderes für das System erwarten. Da dieses System konjugiert komplexe Eigenwerte besitzt, rotieren die Lösungen. Weil beide positiv sind (i.A. reicht es auch aus, wenn ein Eigenwert positiv ist), laufen die Lösungen von der Ruhelage weg, das heißt sie ist oszillierend instabil. Allerdings stimmen diese Aussagen und die aus der linearisierten Matrix gewonnenen Werte nur teilweise mit den Ergebnissen aus den Graphen überein. Denn das linearisierte System liefert nur wahre Lösungen in der Nähe der Ruhelage. Das heißt, in der Nähe der Ruhelage laufen die Lösungen spiralförmig weg. Ein Stück entfernt der Ruhelage gibt es aber einen Grenzzzyklus, den das linearisierte System nicht liefert, auf den die Lösungen die aus der Ruhelage kommen zulaufen. Weit ab der Ruhelage laufen die Lösungen alle in diesen Grenzzzyklus, der somit ein stabiler Grenzzzyklus ist. Das linearisierte System hätte hier Lösungen geliefert, die ins Unendliche wegschmelzen. Die numerische Integration dieser neuen Ruhelage liefert Lösungen, die nie auf diese Ruhelagen laufen, sondern um sie herum oszillieren.

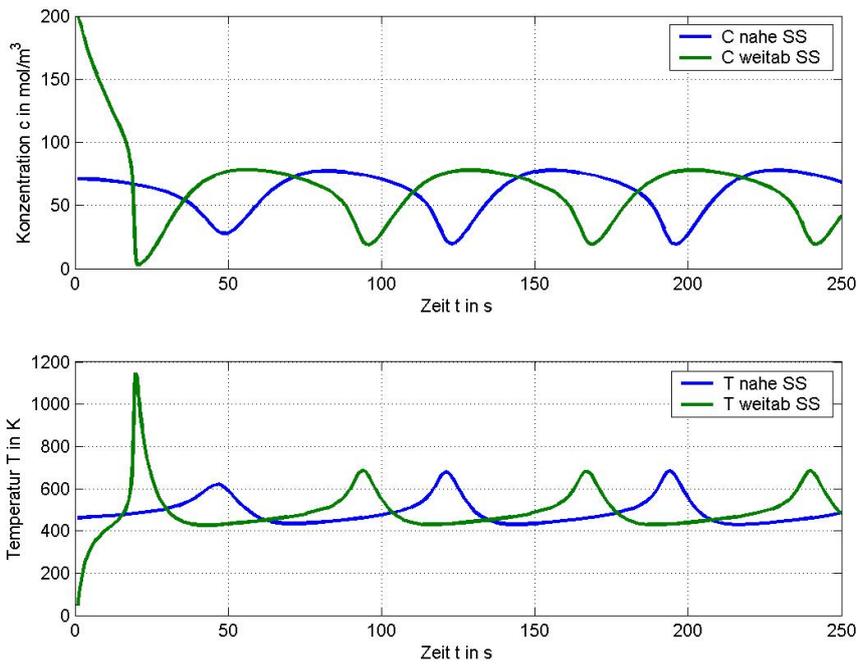


Abbildung 3: Verlauf vom c und T bei falsch eingestellter Manteltemperatur

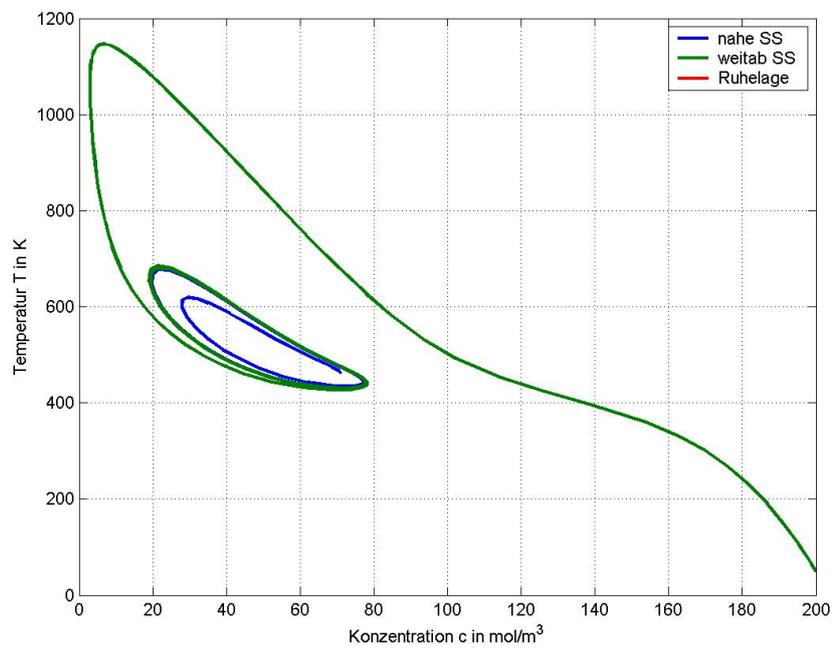


Abbildung 4: Phasenporträt bei falsch eingestellter Manteltemperatur

An dieser Stelle folgt nun der Matlab-Quellcode, mit dem der Aufgabeteil 3 gelöst wurde. Die Hauptfunktion steht dabei an erster Stelle, gefolgt von den in ihrer Aufruffreihenfolge dargestellten Nebenfunktionen.

```

1 % Projektübung 1 Systemverfahrenstechni Aufgabe 3
2 % Katharina Holstein STK 03
3 % Hauptprogramm
4
5 function Prue_haupt; close all; clear all; clc;
6
7 % Definition der globalen Variablen
8 p.V=0.1;           % Reaktorvolumen in m^3
9 p.Fin=0.01;       % Zulauf in m^3/s
10 p.cin=100;        % Konzentration im Zulauf in mol/m^3
11 p.Tin=350;        % Temperatur im Zulauf in K
12 p.k0=100;         % Stoßfaktor in 1/s
13 p.Ea=3e4;         % Aktivierungsenergie in J/mol
14 p.dRh=-1e6;       % Reaktionsenthalpie in J/mol
15 p.kA=2.8e3;       % Deklaration der Kühlfläche in W/K
16 p.ctcp=1e5;       % Wärmekapazität*Konzentration (äquimolarer Fall)
17 p.R=8.314;        % molare Gaskonstante
18 TW=399;          % Kühlmanteltemperatur
19 TW1=401;         % ungenaue Einstellung der Kühlmanteltemperatur
20
21 % Deklaration der Anfangsvariablen für die einzelnen Teilaufgaben
22 p.c0_1=80;        % c in der Nähe der Ruhelage (SS) für 3.3
23 p.T0_1=350;      % T in der Nähe der Ruhelage für 3.3
24 p.c0_2=200;      % c weitab der Ruhelage für 3.3
25 p.T0_2=50;       % T weitab der Ruhelage 3.3
26 x0_1=[p.c0_1 p.T0_1];
27
28 % Lösung der Aufgabe 3.1 mittels fsolve (Prue_nebena)
29 [x_s]=fsolve(@Prue_nebena, x0_1, optimset, p,TW)
30
31 % Lösung der Aufgabe 3.2 (Stabilitätseigenschaften) (Prue_nebenc)
32 c_ss=x_s(1); T_ss=x_s(2); EW=Prue_nebenc(p,c_ss,T_ss)
33
34 % Lösung der Aufgabe 3.3 mittels RungeKutta 2,3 (Prue_nebenb)
35 tspan=[1 250];   % Zeitintervall
36 x0_1=[p.c0_1 p.T0_1]; % in der Nähe der Ruhelage (SS)
37 x0_2=[p.c0_2 p.T0_2]; % weitab der Ruhelage
38 [t1,x1]=ode23s(@Prue_nebenb, tspan, x0_1, [], p, TW);
39 [t2,x2]=ode23s(@Prue_nebenb, tspan, x0_2, [], p, TW);
40
41 % Lösung der Aufgabe 3.4 (Prue_nebenb)
42 [t3,x3]=ode23s(@Prue_nebenc, tspan, x_s, [], p, TW1);
43 [t4,x4]=ode23s(@Prue_nebenc, tspan, x0_2, [], p, TW1);
44 [x_s2]=fsolve(@Prue_nebena, x0_1, optimset, p,TW1)
45 EW=Prue_nebenc(p,x_s2(1),x_s2(2))
46
47 % plotten der Lösungen aus 3.3
48 % zeitlicher Verlauf der Konzentration/Temperatur mit TW=399K
49 figure(1);
50 subplot(211);
51 plot(t1,x1(:,1),t2,x2(:,1),'LineWidth',2);
52 legend('C_nah_SS','C_weitab_SS');
53 xlabel('Zeit_t[in_s]');
54 ylabel('Konzentration_c[in_mol/m^3]');
55 grid on; subplot(212);

```

```

56 plot(t1,x1(:,2),t2,x2(:,2),'LineWidth',2);
57 legend('T_nae_SS','T
58 weitab_SS');
59 xlabel('Zeit_t_in_s');
60 ylabel('Temperatur_T_in_K');
61 grid on;
62
63 % zeitlicher Verlauf der Konzentration/Temperatur mit TW=401K
64 figure(2)
65 subplot(211);
66 plot(t3,x3(:,1),t4,x4(:,1),'LineWidth',2);
67 legend('C_nae_SS','C_weitab_SS');
68 xlabel('Zeit_t_in_s');
69 ylabel('Konzentration_c_in_mol/m^3');
70 grid on;
71 subplot(212);
72 plot(t3,x3(:,2),t4,x4(:,2),'LineWidth',2);
73 legend('T_nae_SS','T
74 weitab_SS');
75 xlabel('Zeit_t_in_s');
76 ylabel('Temperatur_T_in_K');
77 grid on;
78
79 % plotten der Phasenpoträts (3.2 und 3.4)
80 figure(3);
81 plot(x1(:,1),x1(:,2),x2(:,1),x2(:,2),x_s(1),x_s(2),'LineWidth',2);
82 legend('nae_SS','weitab_SS','Ruhelage');
83 xlabel('Konzentration_c_in
84 mol/m^3');
85 ylabel('Temperatur_T_in_K');
86 grid on;
87 figure(4);
88 plot(x3(:,1),x3(:,2),x4(:,1),x4(:,2),x_s2(1),x_s2(2),'LineWidth',2);
89 legend('nae_SS','weitab_SS','Ruhelage');
90 xlabel('Konzentration_c_in
91 mol/m^3');
92 ylabel('Temperatur_T_in_K');
93 grid on;
94
95
96 % Projektkübung 1 Systemverfahrenstechnik Aufgabe 3
97 % Katharina Holstein STK 03
98 % Nebenprogramm 1
99
100 function f=Prue_nebena(x,p,TW)
101
102 c=x(1); T=x(2);
103 dcdt = p.Fin/p.V*(p.cin-c)-p.k0*exp(-p.Ea/p.R/T)*c;
104 dTdt=p.Fin/p.V*(p.Tin-T)-p.dRh/p.ctcp*p.k0*exp(-p.Ea/p.R/T)*c+...
105     p.kA*(TW-T)/(p.ctcp*p.V);
106 f = [dcdt dTdt];
107
108
109 % Projektkübung 1 Systemverfahrenstechnik Aufgabe 3
110 % Katharina Holstein STK 03
111 % Nebenprogramm 2 Lösung mittels ode23
112
113 function a=Prue_nebenb(t,x,p,TW);
114
115 dcdt=p.Fin/p.V*(p.cin-x(1))-p.k0*exp(-p.Ea/p.R/x(2))*x(1);
116 dTdt=p.Fin/p.V*(p.Tin-x(2))-p.dRh/p.ctcp*p.k0*...

```

```

117     exp(-p.Ea/p.R/x(2))*x(1)+p.kA*(TW-x(2))/(p.ctcp*p.V);
118 a=[dcdt;dTdt];
119
120
121 % Projektübung 1 Systemverfahrenstechni Aufgabe 3
122 % Katharina Holstein STK 03
123 % Nebenprogramm 3 Stabilitätsüberprüfung
124
125 function f=Prue_nebenc(p,c,T);
126
127 A=[-p.Fin/p.V-p.k0*exp(-p.Ea/p.R/T)-p.Ea/p.R/T^2*...
128     exp(-p.Ea/p.R/T)*p.k0*c ; ...
129     -p.ΔRh/p.ctcp*p.k0*exp(-p.Ea/p.R/T) ...
130     -p.Fin/p.V-p.Ea/p.R/T^2*exp(-p.Ea/p.R/T)*p.k0*...
131     c*p.ΔRh/p.ctcp-p.kA/p.ctcp/p.V];
132 [EV, dEW]=eig(A);           % EV=Eigenvektoren,dEW=auf Diagonalen EW
133 lambda(1)=dEW(1,1);
134 lambda(2)=dEW(2,2);
135 f=[lambda];

```