

Prüfungsleistung WiSe2022/23

Alexander Stark

Simon Kaschner

Kiran Raj Krishnakumar

Projekt im Modul Höhere Regelungstechnik und
Modellierung

bei

Prof. Dr. K. Völtzer

Entwurf und Inbetriebnahme einer MPC-Regelung unter
Verwendung verschiedener MATLAB/Simulink-Toolboxen

Vorgelegt am

23.01.2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungsverzeichnis.....	2
Einleitung	3
Aufgabe 1	4
Stellgrößen MV im Arbeitspunkt	4
Untersuchung der Sprungantworten	5
Sprung 1:.....	5
Sprung 2:.....	8
Sprung 3:.....	8
Sprung 4:.....	9
Sprung 5:.....	10
Zusammenfassung	11
Aufgabe 2	12
Ermittlung der Abtastzeit	12
Auslegung des PRBS-Testsignals.....	13
Ermittlung eines linearen Modells.....	16
Testen anderer Modellformen	18
Aufgabe 3	20
Entwurf der MPC-Regelung.....	20
Vergleich der MPC- und PID-Regelung.....	26
Ausblick	28
Abbildungsverzeichnis	29

Abkürzungsverzeichnis

AP.....	<i>Arbeitspunkt</i>
CV.....	<i>controlled value</i>
DV	<i>disturbance value</i>
I/O.....	<i>Input/Output</i>
MPC.....	<i>model predictive controller</i>
MV.....	<i>manipulated value</i>
PRBS	<i>pseudorandom binary sequence</i>
TMU	<i>time units</i>

Einleitung

Unter Verwendung von MATLAB/SIMULINK soll für eine Zweistoffdestillationskolonne eine MPC-Mehrgrößenregelung entworfen, untersucht und simuliert werden.

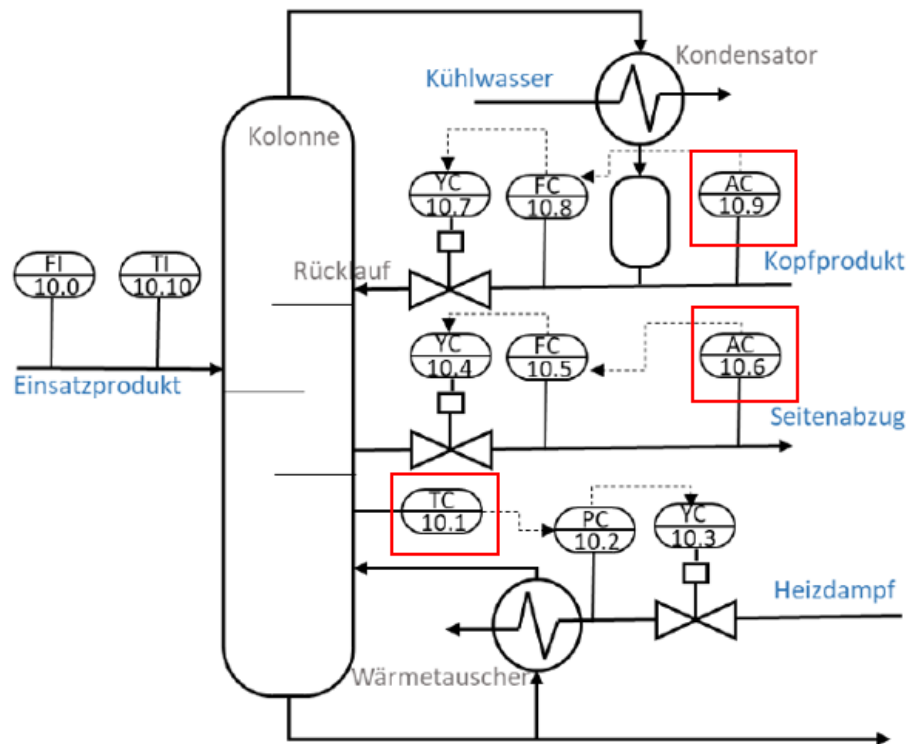


Abbildung 1: Geregelte Zweistoffdestillationskolonne mit R&I-Fließschema

Abbildung 1 zeigt den kontinuierlichen geregelten Destillationsprozess, bei dem das Einsatzprodukt (FEED) in zwei Komponenten getrennt wird. Dabei unterliegt die Funktionsweise der Kolonne dem natürlichen Temperaturgefälle in der Kolonne und den unterschiedlichen Siedetemperaturen der einzelnen Komponenten des zuvor bereits erhitzten Einsatzstoffes. Die leichter flüchtige (niedriger siedende) Einsatzkomponente, hier Ethanol, steigt als Gas in der Kolonne auf. Sie wird am oberen Ende der Kolonne in hoher Konzentration (ca. 70%) abgezweigt und als Kopfprodukt bezeichnet. In einem nachgelagerten Kondensationsprozess wird das Kopfprodukt wieder in einen flüssigen Aggregatzustand überführt. Die schwerer flüchtige (höher siedende) Einsatzkomponente, hier Wasser, sinkt auf den Boden der Kolonne. Sie wird als Sumpfprodukt bezeichnet und am Boden der Kolonne abgezweigt. Der Seitenabzug ist der dritte Abzweig aus der Kolonne und enthält ein Mischprodukt der beiden Komponenten mit einer niedrigeren Konzentration des Ethanols (ca. 50%).

Alle Durchflüsse, Temperaturen und Zusammensetzungen werden kontinuierlich gemessen. Die Temperaturregelung TC10.1 sowie auch die Konzentrationsregelungen AC10.9 und AC10.6 sind dezentral als Kaskadenregelungen ausgeführt, wobei die Durchflüsse des Rücklaufs bzw. der Heizdampfdruck als Hilfsregelgrößen verwendet und in Hilfsregelkreisen FC10.8, FC10.5 und PC10.2 geregelt werden. Als Hauptstörgrößen sind die Einsatzmenge FI10.0 und die Temperatur TI10.10 aufzufassen, die gemessen werden. Im Projekt soll die Temperaturregelung TC10.1 und die Konzentrationsregelungen AC10.9 und AC10.6 durch einen MPC-Dreigrößenregler ersetzt werden, der außerdem die Einsatzmenge und Temperatur im Sinne einer Störgrößenaufschaltung verarbeiten soll. In der MPC-Terminologie sind die Kopf-, die Seitenkonzentration und die Sumpftemperatur die MPC-

Regelgrößen CV1, CV2 und CV3, die Sollwerte der unterlagerten Durchfluss- und Druckregler die MPC-Stellgrößen MV1, MV2, MV3, und der gemessene Durchfluss und die Temperatur des Einsatzprodukts die Störgröße DV1 und DV2.

Das System kann in drei Regelkreise gegliedert werden, die jeweils als eine Kaskade aufgebaut sind. Der äußeren Regler der Kaskade (im R&I-Schema rot umrandet und gekennzeichnet durch AC 10.9, AC10.6, TC10.1) soll durch den MPC-Regler ersetzt werden.

Aufgabe 1

Ermittelt werden die Stellgrößen MV im Arbeitspunkt.

Dazu werden die Sprungantworten der für den Entwurf des MPCs relevanten Strecken ermittelt. Es folgen die Berechnungen der Verstärkung K_s , der Totzeit T_t und Summenzeitkonstanten T_Σ . Im Anschluss wird jeder Übertragungsfunktion ein geeignetes Prozessmodell der Form (PT1, IT1, PT1Tt, PT2Tt, PDT2Tt...) zugewiesen (Bezeichnungen siehe Anhang A1).

Stellgrößen MV im Arbeitspunkt

Die folgenden Stellgrößen ergaben sich bei bereits bekannten Sollgrößen (Regelgrößen CV) und einer Sample Time des Systems in SIMULINK über $T=1000$ TMU (≈ 16 min). Die Abbildungen 2 und 3 zeigen den Verlauf der Stellgrößen über die Sample Time bei einem Betrieb im Arbeitspunkt (AP). Aus ihnen können die Stellgrößen im AP abgelesen werden. Sie werden in Tabelle 1 dargestellt.

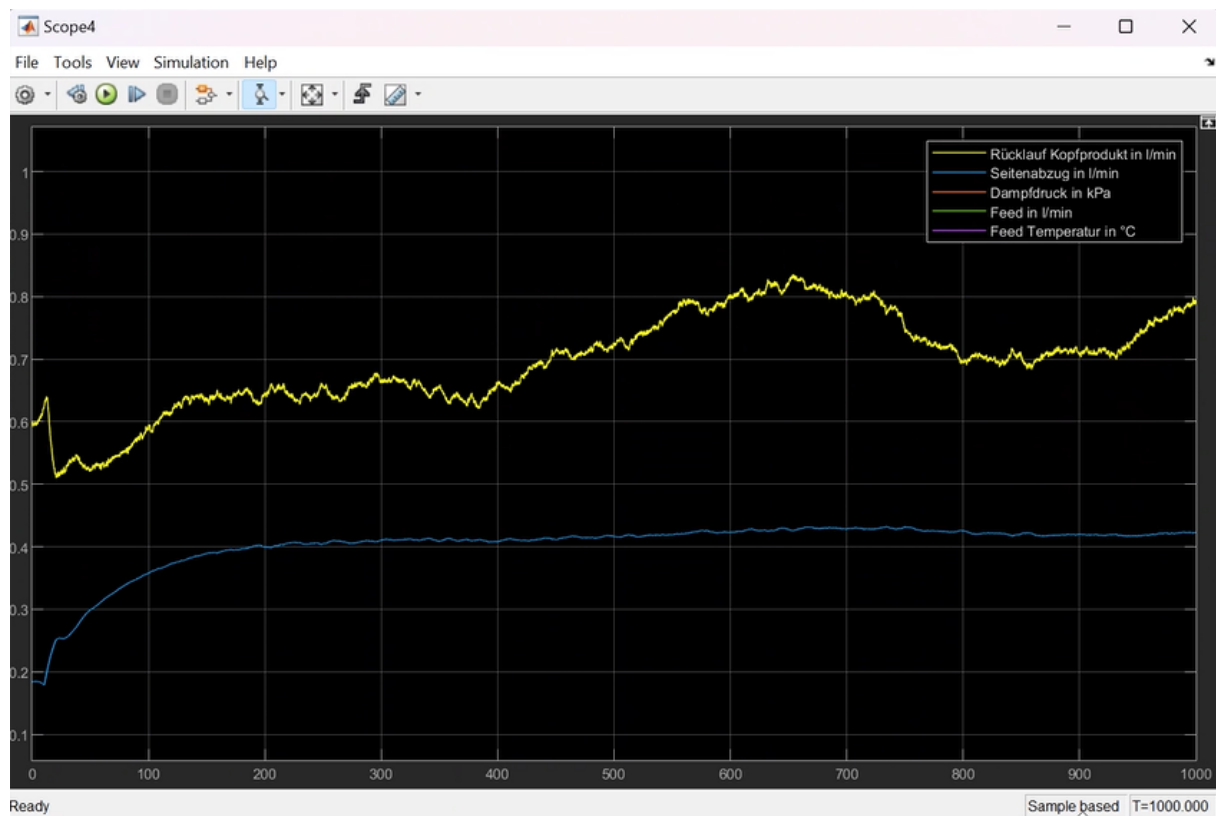


Abbildung 2: Rücklauf Kopfprodukt in l/min (gelb) und Durchfluss Seitenabzug in l/min (blau)

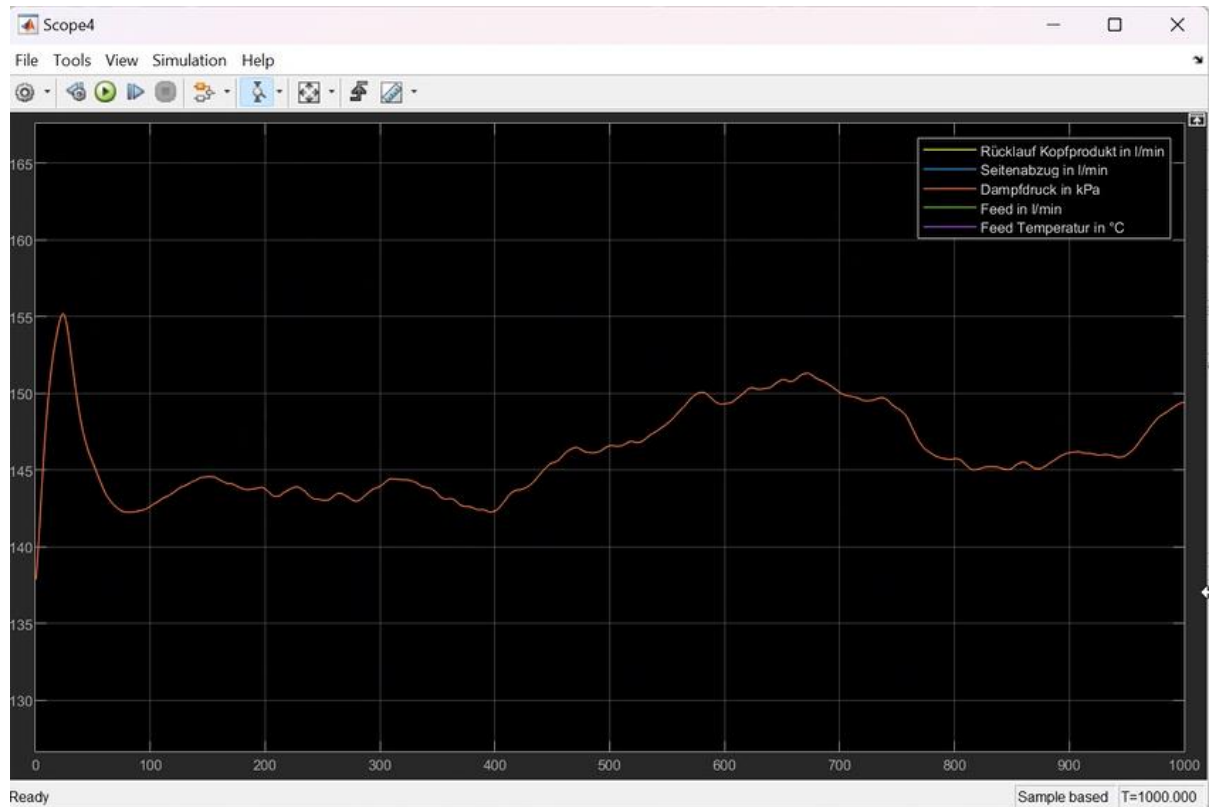


Abbildung 3: Druck Heizdampf in kPa

Regelgrößen CV		Stellgrößen im AP MV		Störgrößen DV	
Konz. Ethanol Kopf	0,7	Durchfluss Rücklauf Kopf	0,72 l/min	Zufluss Einsatzprodukt	4 l/min
Konz. Ethanol Seite	0,5	Durchfluss Seitenabzug	0,42 l/min	Temperatur Einsatzprodukt	75 °C
Temperatur Boden	92 °C	Druck Heizdampf	147 kPa		

Tabelle 1: Stellgrößen MV im AP

Untersuchung der Sprungantworten

Zur Ermittlung der Sprungantworten wird auf jeden Eingang des Systems (FC10.8, FC10.5 und PC10.2) bei $T = 600$ TMU ein Sprung von definierter Höhe gegeben. Im Anschluss werden die Sprungantworten aller drei Ausgänge (AC10.9, AC.10.6, TC10.1) auf den jeweiligen Eingangssprung untersucht und ausgewertet. Nachfolgend wird die Berechnung der Verstärkung und Zeitkonstanten an den drei Ausgängen exemplarisch den Sprung auf den Eingang FC10.8 dargestellt. Im Anschluss werden die Sprünge auf die weiteren Systemeingänge (Reglereingänge und Störgrößeneingänge) dargestellt und in Tabelle x zusammengefasst.

Sprung 1:

Am Eingang FC10.8 wird ein sprunghafter Anstieg des Durchflusses am Kopfrücklauf von $u(t_{\text{start}}) = 0,6$ l/min auf $u(t_{\text{start}} + 1) = 0,8$ l/min beim Zeitpunkt $t_{\text{start}} = 600$ s simuliert. Die Sprungantworten an den Ausgängen werden ausgewertet.

AC10.9:

$$\text{mit } \Delta u = \frac{0,2 \text{ l}}{\text{min}}; \Delta y = 12 \% \text{ gilt } k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{0,12}{0,2 \text{ l/min}} = 0,6 \text{ min/l}$$

$$T_1 = 0,9 * (T_{75\%} - T_{25\%}) = 0,9 * (614,681 \text{ TMU} - 605,737 \text{ TMU}) = 8,05 \text{ TMU} = 8,05 \text{ s}$$

$$T_t = (T_{75\%} - 1,39 * T_1) - t_{start} = (614,681 - 1,39 * 8,05) * s - 600 \text{ s} = 3,49 \text{ s}$$

$$T_{t,abgelesen} = 3 \text{ s}$$

$$T_{\Sigma} = T_1 + T_{t,abgelesen} = 8,05 + 3 \text{ s} = 11,05 \text{ s}$$

$$T_{anst} = T_{90} - T_{10} = 641,056 \text{ s} + 604,283 \text{ s} = 36,77 \text{ s}$$

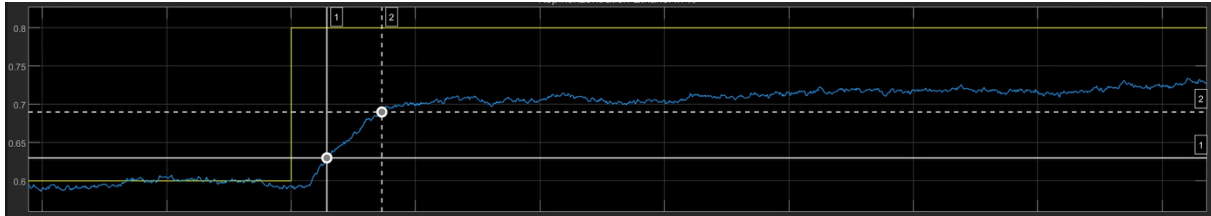


Abbildung 4: Sprungantwort an AC10.9, Sprung an FC10.8

Die Sprungantwort an AC10.9 weist ein PT_1 -Verhalten mit Totzeit auf. Die Übertragungsfunktion des PT_1T_t -Glieds ergibt sich mit den berechneten Zeitkonstanten und der Verstärkung zu

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{0,6 \text{ min/l}}{1 + s * 8,05s} * e^{-s * 3 \text{ s}}$$

AC10.6:

$$\text{mit } \Delta u = \frac{0,2 \text{ l}}{\text{min}}; \Delta y = 55 \% - 35 \% = 20 \% \text{ gilt } k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{0,2}{0,2 \text{ l/min}} = 1 \text{ min/l}$$

$$T_1 = 0,9 * (T_{75\%} - T_{25\%}) = 0,9 * (611,533 \text{ TMU} - 607,675 \text{ TMU}) = 3,472 \text{ TMU} = 3,472 \text{ s}$$

$$T_t = (T_{75\%} - 1,39 * T_1) - t_{start} = (611,533 - 1,39 * 3,472) * s - 600 \text{ s} = 6,7 \text{ s}$$

$$T_{t,abgelesen} = 6,5 \text{ s}$$

$$T_{\Sigma} = T_1 + T_{t,abgelesen} = 3,472 + 6,5 \text{ s} = 9,972 \text{ s}$$

$$T_{anst} = T_{90\%} - T_{10\%} = 614,455 \text{ s} + 606,938 \text{ s} = 7,517 \text{ s}$$

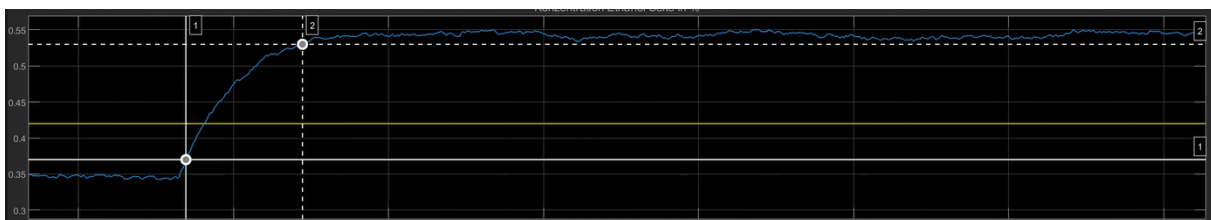


Abbildung 5: Sprungantwort an AC10.6, Sprung an FC10.8

Die Sprungantwort an AC10.6 weist ein PT_1 -Verhalten mit Totzeit auf. Die Übertragungsfunktion des PT_1T_t -Glieds ergibt sich mit den berechneten Zeitkonstanten und der Verstärkung zu

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{1 \text{ min/l}}{1 + s * 3,472 \text{ s}} * e^{-s * 6,5 \text{ s}}$$

TC10.1:

$$\text{mit } \Delta u = \frac{0,2 \text{ l}}{\text{min}}; \Delta y = 89 ^\circ\text{C} - 95,8 ^\circ\text{C} = -6,8 \text{ K} \text{ gilt } k_s = \frac{\Delta y}{\Delta u} = -\frac{6,8 \text{ K}}{0,2 \text{ l/min}} = -34 \frac{\text{Kmin}}{\text{l}}$$

$$T_1 = 0,9 * (T_{75\%} - T_{25\%}) = 0,9 * (622,288 \text{ TMU} - 611,692 \text{ TMU}) = 9,54 \text{ TMU} = 9,54 \text{ s}$$

$$T_t = (T_{75\%} - 1,39 * T_1) - t_{start} = (622,288 - 1,39 * 9,54) * s - 600 \text{ s} = 9,03 \text{ s}$$

$$T_{t,abgelesen} = 9,2 \text{ s}$$

$$T_{\Sigma} = T_1 + T_{t,abgelesen} = 9,54 + 9,2 \text{ s} = 18,74 \text{ s}$$

$$T_{anst} = T_{90} - T_{10} = 634,195 \text{ s} + 609,983 \text{ s} = 24,21 \text{ s}$$

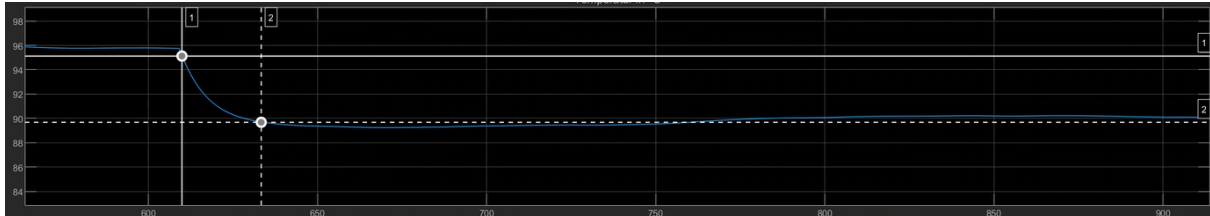


Abbildung 6: Sprungantwort an TC10.1, Sprung auf FC10.8

Die Sprungantwort an TC10.1 weist ein negatives PT_1 -Verhalten mit Totzeit auf. Die Übertragungsfunktion des PT_1T_t -Glieds ergibt sich mit den berechneten Zeitkonstanten und der Verstärkung zu

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{34 \text{ Kmin/l}}{1 + s * 9,54 \text{ s}} * e^{-s * 9,2 \text{ s}}$$

Zusammenfassend bewirkt der Sprung auf den Durchfluss am Kopfrücklauf der Ethanolkolonne einen Anstieg der Enthanolkonzentration am Kopf und an der Seite. Gleichzeitig fällt die Temperatur am Boden leicht ab. Die folgende Abbildung 7 stellt dieses Verhalten in übersichtlicher Weise noch einmal dar.

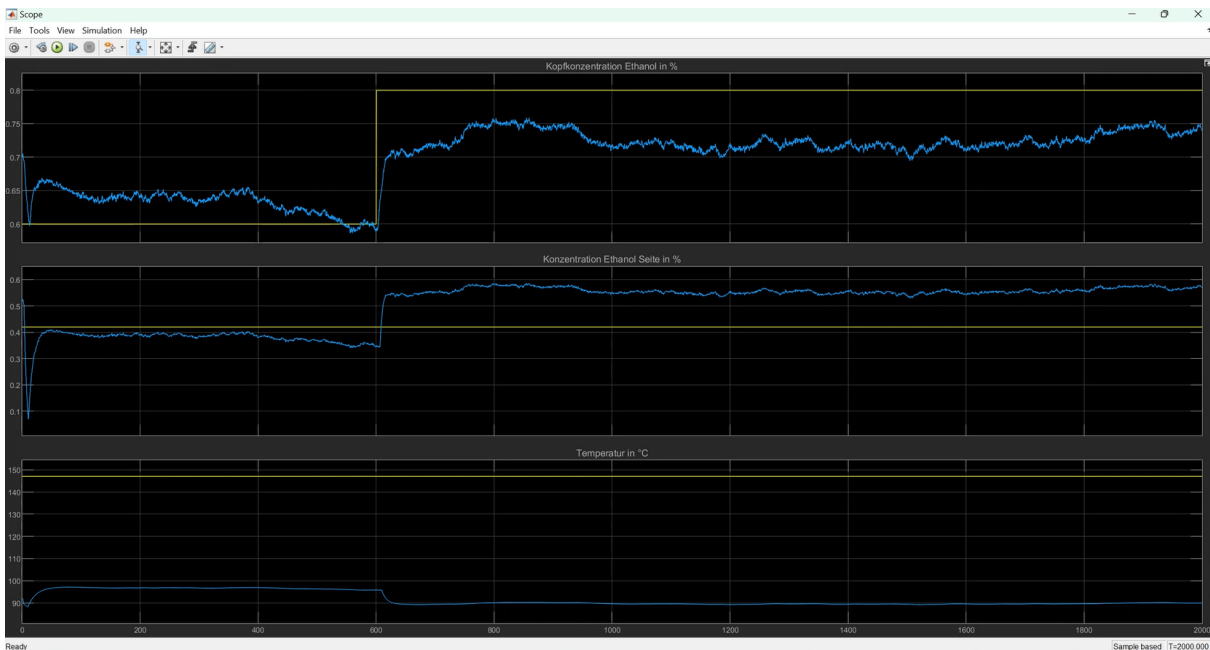


Abbildung 7: Gesamtbild des Sprungs auf FC10.8 mit den resultierenden Sprungantworten

Sprung 2:

Am Eingang FC10.5 wird ein Sprung auf den Durchfluss des Seitenabzugs gegeben. Dabei wird der Durchfluss bei $t_{\text{start}} = 600$ TMU von 0,3 l/min auf 0,55 l/min erhöht. Der Sprung bewirkt eine Reduzierung der Ethanol Kopf- und Seitenkonzentration und ein Anstieg der Bodentemperatur der Kolonne (vgl. Abbildung 8). Die Verstärkungen und Zeitkonstanten sind aus der Gesamttabelle zu entnehmen.

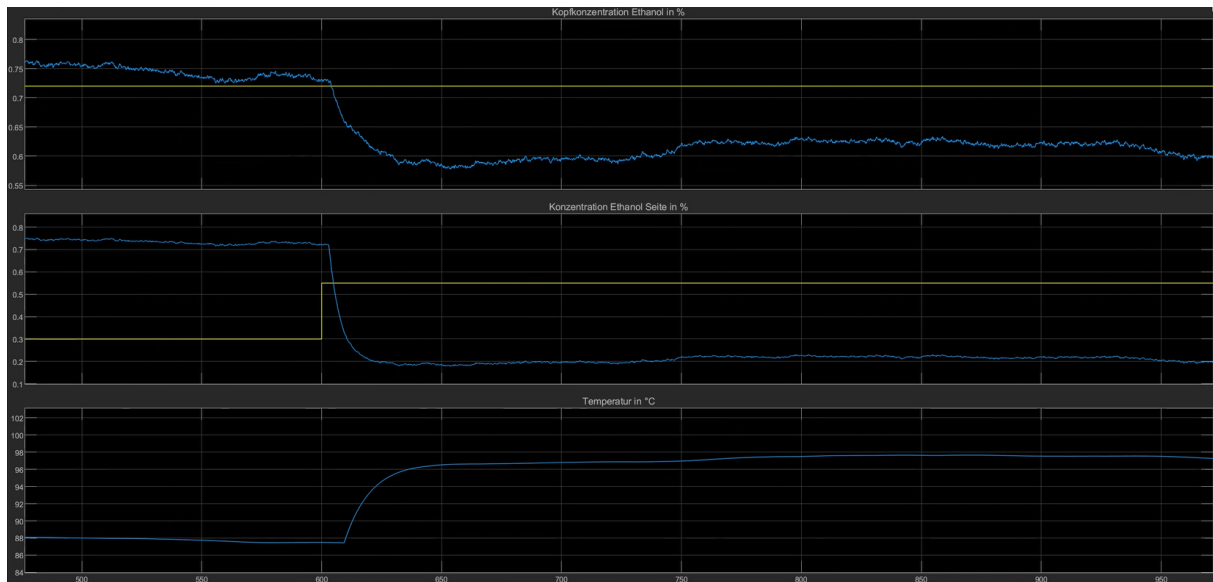


Abbildung 8: Gesamtbild des Sprungs auf FC10.5 mit den resultierenden Sprungantworten

Die erste Sprungantwort an AC10.9 weist ein negatives PT₁T_t- Verhalten mit Totzeit auf. Die Übertragungsfunktion des PT₁T_t-Glieds ergibt sich mit den Daten aus Tabelle 2 im Anhang und der Zusammenfassung zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{0,58 \text{ min/l}}{1 + s * 11,67 \text{ s}} * e^{-s * 3,5 \text{ s}}$$

Die Sprungantwort an AC10.6 weist ebenfalls ein negatives PT₁T_t-Verhalten auf. Die Übertragungsfunktion ergibt sich zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{2,08 \text{ min/l}}{1 + s * 4,62 \text{ s}} * e^{-s * 3 \text{ s}}$$

Die dritte Sprungantwort an TC10.1 weist ein positives PT₁T_t-Verhalten mit der folgender Übertragungsfunktion auf:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{38,4 \text{ Kmin/l}}{1 + s * 10,95 \text{ s}} * e^{-s * 9,5 \text{ s}}$$

Sprung 3:

Am Systemeingang PC10.2 wird ein sprunghafter Anstieg des Heizdampfdrucks von 130 kPa auf 160kPa bei $t_{\text{start}} = 600$ TMU simuliert. Der Anstieg des Druckes im Wärmetauscher bewirkt einen Anstieg der Bodentemperatur. Gleichzeitig ist ein Sinken der Ethanolkonzentration an Kopf- und Seitenabzug der Kolonne zu beobachten (vgl. Abbildung 9).

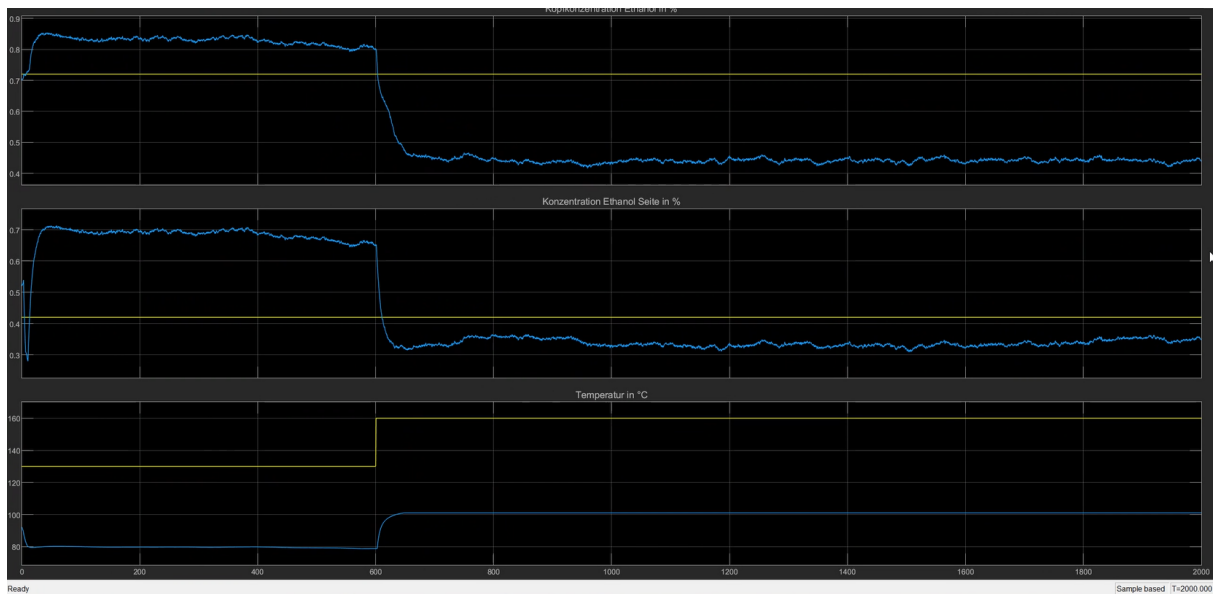


Abbildung 9: Gesamtbild des Sprungs auf PC10.2 mit den resultierenden Sprungantworten

Die erste Sprungantwort an AC10.9 weist ein negatives PT₁T_t- Verhalten mit Totzeit auf. Die Übertragungsfunktion des PT₁T_t-Glieds ergibt sich mit den Daten aus der Tabelle zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{0,012 \text{ min/l}}{1 + s * 23,5 \text{ s}} * e^{-s * 1,1 \text{ s}}$$

Die Sprungantwort an AC10.6 weist ebenfalls ein negatives PT₁T_t-Verhalten auf. Die Übertragungsfunktion ergibt sich zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{0,011 \text{ min/l}}{1 + s * 7,99 \text{ s}} * e^{-s * 1,2 \text{ s}}$$

Die dritte Sprungantwort an TC10.1 weist ein positives PT₁T_t-Verhalten mit der folgenden Übertragungsfunktion auf:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{0,74 \text{ Kmin/l}}{1 + s * 8,93 \text{ s}} * e^{-s * 2,6 \text{ s}}$$

Sprung 4:

Es wird ein Sprung auf die Störgröße DV1 „Zufluss Einsatzprodukt“ bei $t_{\text{start}} = 600$ TMU von 3,4 l/min auf 4,4 l/min simuliert. Der sprunghafte Anstieg des Einsatzproduktes bewirkt ein Anstieg der Kopf- und Seitenkonzentration an Ethanol in der Kolonne und ein Abfall der Bodentemperatur (vgl. Abbildung 10)

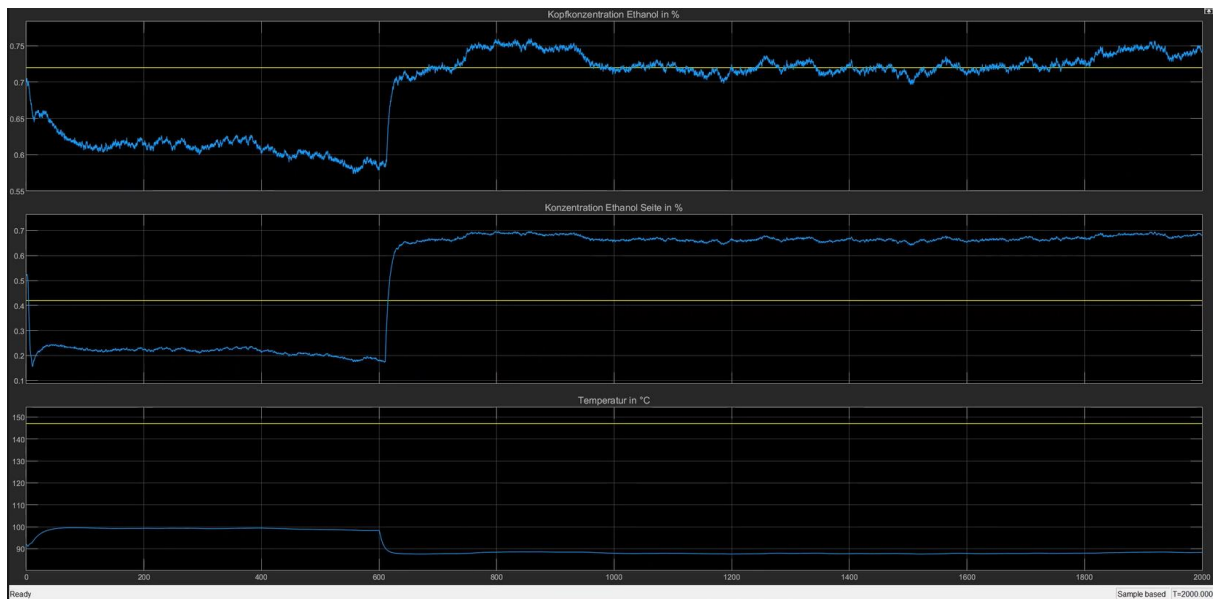


Abbildung 10: Gesamtbild des Sprungs auf DV1 mit den resultierenden Sprungantworten

Die erste Sprungantwort an AC10.9 weist ein positives PT_1T_t -Verhalten mit Totzeit auf. Die Übertragungsfunktion des PT_1T_t -Glieds ergibt sich mit den Daten aus der Tabelle zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{0,14 \text{ min/l}}{1 + s * 7,3 \text{ s}} * e^{-s * 12,8 \text{ s}}$$

Die Sprungantwort an AC10.6 weist ebenfalls ein positives PT_1T_t -Verhalten auf. Die Übertragungsfunktion ergibt sich zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{0,48 \text{ min/l}}{1 + s * 6,65 \text{ s}} * e^{-s * 10,5 \text{ s}}$$

Die dritte Sprungantwort an TC10.1 weist ein negatives PT_1T_t -Verhalten mit der folgenden Übertragungsfunktion auf:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{10,58 \text{ Kmin/l}}{1 + s * 6,77 \text{ s}} * e^{-s * 0,6 \text{ s}}$$

Sprung 5:

Es wird ein Sprung auf die Störgröße DV2 „Temperatur Einsatzprodukt“ bei $t_{\text{start}} = 600 \text{ TMU}$ von 65°C auf 85°C simuliert. Der Anstieg der Temperatur des Einsatzprodukts bewirkt einen Anstieg der Bodentemperatur und ein leichtes Abfallen der Kopf- und Seitenkonzentration (vgl. Abbildung 11).

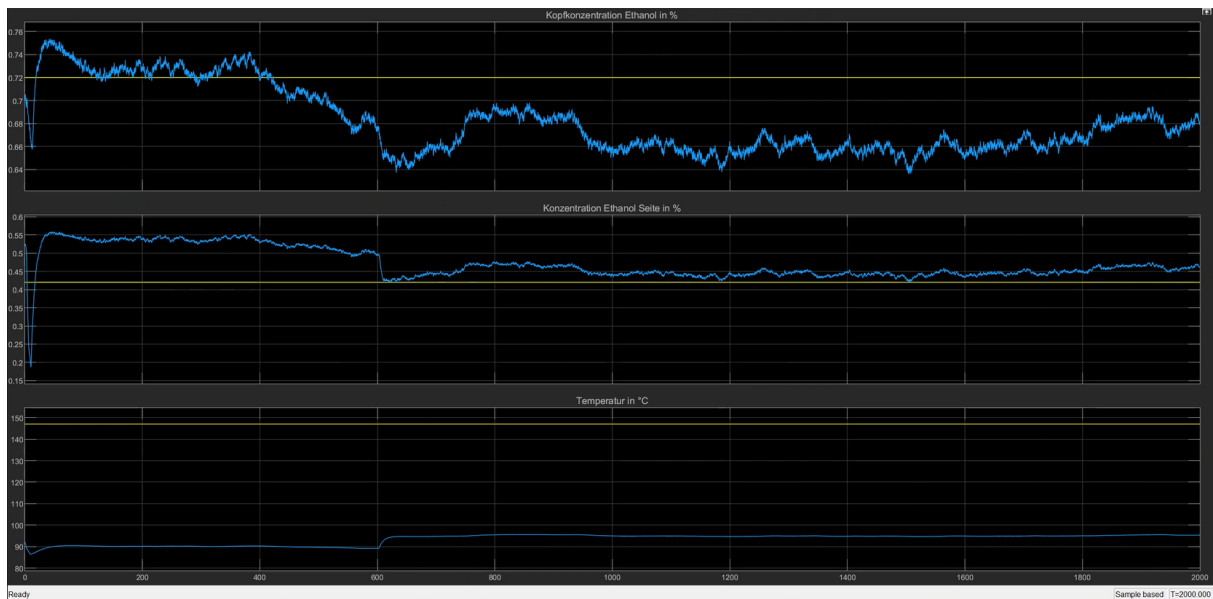


Abbildung 11: Gesamtbild des Sprungs auf DV2 mit den resultierenden Sprungantworten

Die erste Sprungantwort an AC10.9 weist ein stark rauschbehaftetes, negatives PT_1 oder PT_2 -Verhalten mit einem konjugiert komplexen Polpaar auf, da zwischen 600 s und 800 s eine Art Überschwinger beobachtet werden kann. Da eine genauere Bestimmung wegen des starken Rauschens nicht möglich ist, erfolgt für diese Sprungantwort keine Berechnung.

Die Sprungantwort an AC10.6 weist ein negatives PT_1T_t -Verhalten auf. Die Übertragungsfunktion ergibt sich zu:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = -\frac{0,004 \text{ min/l}}{1 + s * 2,77s} * e^{-s*3,5s}$$

Die dritte Sprungantwort an TC10.1 weist ein positives PT_1T_t -Verhalten mit der folgender Übertragungsfunktion auf:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_1} * e^{-sT_t} = \frac{0,275 \text{ Kmin/l}}{1 + s * 7,34s} * e^{-s*2,6s}$$

Zusammenfassung

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend alle Zeitkonstanten und Verstärkungen, sowie die zur Berechnung notwendigen Zeitvariablen, der im vorherigen Verlauf dargestellten Sprungantworten.

Kalkulation Summenzeitkonstante, Abtastzeit und Anstiegszeit											
	Signal	c(Kopf) Initialwert Amplitude	Verstärkung	Werte Sprungantwort	T25% T75%	T1	Tt	Tt (abgelesen)	Konzentration (Kopf) T(Summe)	T10% T90%	Anstiegszeit
c(Kopf)	Sprung	0,6 0,8	0,6	0,6 0,72	605,737 614,681	8,0496	3,492056	3	11,541656	604,283 641,056	36,773
Tstart	600	0,6 0,8	1	0,35 0,55	607,675 611,533	3,4722	6,706642	6,5	10,178842	606,938 614,455	7,517
		0,6 0,8	-34	95,8 89	611,692 622,288	9,5364	9,032404	9,2	18,568804	609,983 634,195	24,212
c(Seite)	Sprung	0,3 0,55	-0,576	0,73 0,586	606,162 619,134	11,6748	2,906028	3,5	14,580828	604,545 629,628	25,083
		0,3 0,55	-2,08	0,72 0,2	604,289 609,421	4,6188	3,000868	3	7,619668	603,441 613,915	10,474
Tstart	600	0,3 0,55	38,4	87,4 97	613,148 625,314	10,9494	10,094334	9,5	21,043734	610,715 638,02	27,305
T(Boden)	Sprung	130 160	-0,012	0,8 0,44	604,824 630,938	23,5026	-1,730614	1,1	21,771986	602,199 648,615	46,416
		130 160	-0,011	0,65 0,32	603,587 612,466	7,9911	1,358371	1,2	9,349471	602,137 621,527	19,39
Tstart	600	130 160	0,74033333	78,75 100,96	604,353 614,28	8,9343	1,861323	2,6	10,795623	603,3 625	21,7
Flow (Feed)	Sprung	3,4 4,4	0,14	0,58 0,72	614,155 622,271	7,3044	12,117884	12,8	19,422284	613,013 629,034	16,021
		3,4 4,4	0,475	0,175 0,65	612,339 619,733	6,6546	10,483106	10,5	17,137706	611,136 625,324	14,188
Tstart	600	3,4 4,4	-10,58	98,35 87,77	602,659 610,18	6,7689	0,771229	0,63	7,540129	601,31 616,785	15,475
Flow (Feed)	Sprung	65 85	0			0	0		0		0
		65 85	-0,0035	0,5 0,43	604,19 607,27	2,772	3,41692	3,5	6,18892	603,53 608,15	4,62
Tstart	600	65 85	0,275	89,2 94,7	604,676 612,833	7,3413	2,628593	2,6	9,969893	603,4 617,9	14,5

Tabelle 2: Verstärkung und Zeitkonstanten der Sprungantworten

Aufgabe 2

Ermittlung der Abtastzeit

Die Abtastzeit wurde mithilfe der Anstiegszeiten T_A aus den Sprungantworten ermittelt. Diese lassen sich in Tabelle 2 wiederfinden. Für die Abtastzeit gilt folgende Formel:

$$\frac{1}{6} T_{A,min} \leq T_s \leq \frac{1}{10} T_{A,max} \quad \text{mit } T_A = T_{90\%} - T_{10\%}$$

Da es sich um ein Multiple-Input-Output (MIMO) System handelt, werden die größte und die kleinste Abtastzeit aus Tabelle 2 für die Berechnung verwendet. Bei der Berechnung werden die kleinste Anstiegszeit mit dem kleinsten Teiler und die größte Anstiegszeit mit dem größten Teiler multipliziert. Aus beiden Ergebnissen wird dann eine Annahme für die Abtastzeit getroffen, die ungefähr in der Mitte beider Werte liegt:

$$\frac{1}{6} * 4,62 \text{ s} = T_{s,min} = 0,77 \text{ s}$$

$$\frac{1}{10} * 46,4 \text{ s} = T_{s,max} = 4,64 \text{ s}$$

Daraus folgt für die Abtastzeit des MPC-Reglers eine Annahme von:

$$T_s = 2 \text{ s}$$

Auslegung des PRBS-Testsignals

Für die Auslegung des PRBS-Testsignals wurden zunächst die Sequenzlänge L und der Faktor pT_s berechnet:

$$pT_s = 2,8 \frac{T_{dom}^L}{\alpha} \quad \text{mit } \alpha = 1$$

$$L \leq \frac{2\pi\beta * T_{dom}^H}{pT_s} \quad \text{mit } \beta = 5$$

Die dominierenden Zeitkonstanten T_{dom}^L und T_{dom}^H werden aus der Spalte der Summenzeitkonstante (T_{Summe}) der Tabelle 2 entnommen.

Für die Berechnung folgt:

$$pT_s = 2,8 \frac{6,2 \text{ s}}{1} = 17,36 \text{ s}$$

$$L \leq \frac{2\pi * 5 * 21,8 \text{ s}}{17,36 \text{ s}} = 39,45 \Rightarrow N = 6$$

Wie in der Formel für die Sequenzlänge bereits ersichtlich ist, folgt aus der Berechnung eine PRBS-Registerlänge von $N = 6$, dies ist in Abbildung 12 ersichtlich.

Registerlänge N	Sequenzlänge $L = 2^N - 1$	Register zur Eingangsimpuls- berechnung
2	3	1 and 2
3	7	1 and 3
4	15	3 and 4
5	31	3 and 5
6	63	5 and 6
7	127	4 and 7
8	255	2, 3, 4 and 8
9	511	5 and 9
10	1023	7 and 10

Abbildung 12: Zusammenhang Sequenz- und Registerlänge

Die Schaltzeit, oder auch Sampletime des PRBS-Signals, unterscheidet sich von der des MPC-Reglers. Hier muss die Anforderung nach einem stationären Zustand der Regelgröße nach dem kürzesten Impuls des PRBS-Signals berücksichtigt werden. Es gilt:

$$T_{s,PRBS} = pT_s$$

$$T_{s,PRBS} = 17,36 \text{ s} \Rightarrow \text{Wahl: } T_{s,PRBS} = 16 \text{ s}$$

Mit der Berechnung der obigen Daten ist die Auslegung des PRBS-Signals abgeschlossen. Es folgen die Implementierung der Signale in Matlab Simulink. Hier werden unter anderem die Verschiebung der Signale, aber auch die Sprungamplituden, konfiguriert. Ebenfalls ist ein Augenmerk auf die Periodendauer des Signals zu legen, da später eine ausreichende Datenmenge an Test- und Validierungsdaten gegeben sein muss. Für die Periodendauer ergibt sich in diesem Fall:

$$LpT_s = (2^N - 1)pT_s$$

$$LpT_s = (2^6 - 1) * 17,36 = 1039,68 \text{ s}$$

Eine Periode des Signals benötigt dementsprechend 1039,68 s. Um durch eine größere Datenmenge ein exakteres Modell ermitteln zu können, wurde sich dazu entschieden, jeweils zwei Perioden des Signals für Test- und Validierungsdaten zu verwenden. Dementsprechend muss die Simulationszeit in Simulink ungefähr auf das Vierfache der Periodendauer angepasst werden.

Bevor jedoch mit der eigentlichen Konfiguration der PRBS-Signale in Simulink begonnen werden kann, ist die Kenntnis der Stellgrößen im Arbeitspunkt der Kolonne notwendig. Die Stellgrößen im AP wurden in Simulink ermittelt und in Tabelle 3 eingetragen:

Regelgrößen CV		Stellgrößen im AP MV		Störgrößen DV	
Konz. Ethanol Kopf	0,7	Durchfluss Rücklauf Kopf	0,72 l/min	Zufluss Einsatzprodukt	4l/min
Konz. Ethanol Seite	0,5	Durchfluss Seitenabzug	0,42 l/min	Temperatur Einsatzprodukt	75°C
Temperatur Boden	92°C	Druck Heizdampf	147 kPa		

Tabelle 3: Übersicht der Regel-, Stell- und Störgrößen

In Abbildung 13 ist nun eine beispielhafte Konfiguration eines PRBS-Signals in Simulink dargestellt. Es handelt sich dabei um ein Subsystem, in dem die Sample Time und Initial Condition angepasst wurden. Überdies wurden Arbeitspunkt und Sprunghöhe festgelegt.

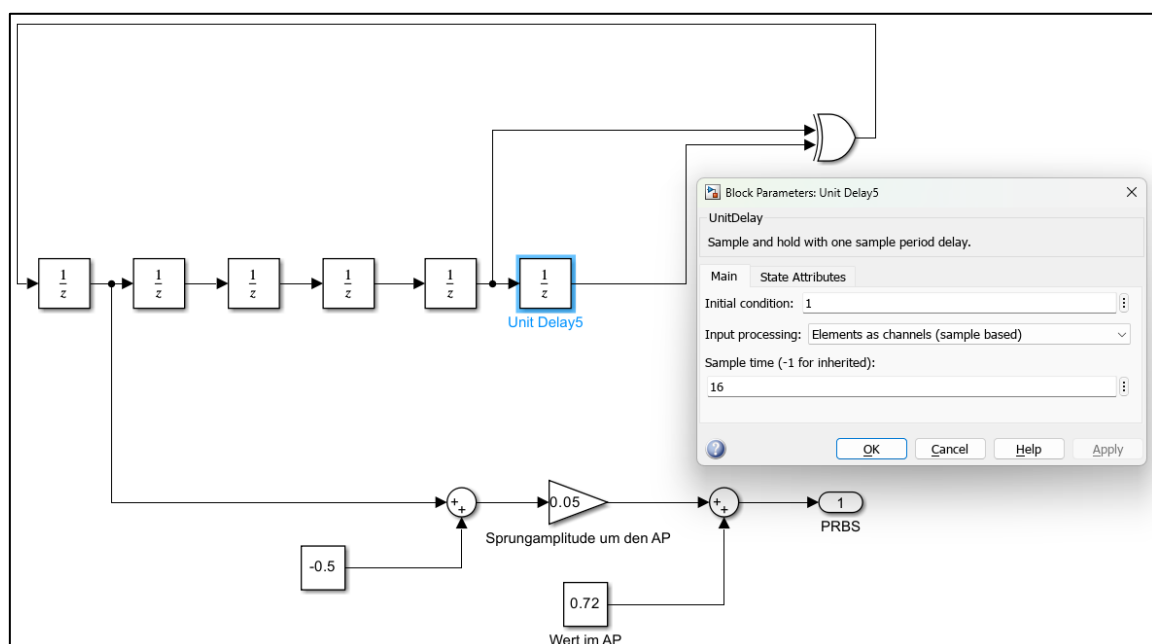


Abbildung 13: PRBS-Auslegung in Simulink

Entscheidend für die Auslegung des PRBS-Testsignals ist die Vermeidung der Korrelation der Signale untereinander. Damit dies vermieden wird, müssen die Signale über die Initial Condition, welche in Abbildung 13 bereits ersichtlich war, zueinander verschoben werden. Dies funktioniert nach dem Prinzip eines Schieberegisters.

Die Konfiguration wurde für die drei Stellgrößen und die beiden Störgrößen vorgenommen. Der Umbau des Modells wird in Abbildung 14 aufgezeigt.

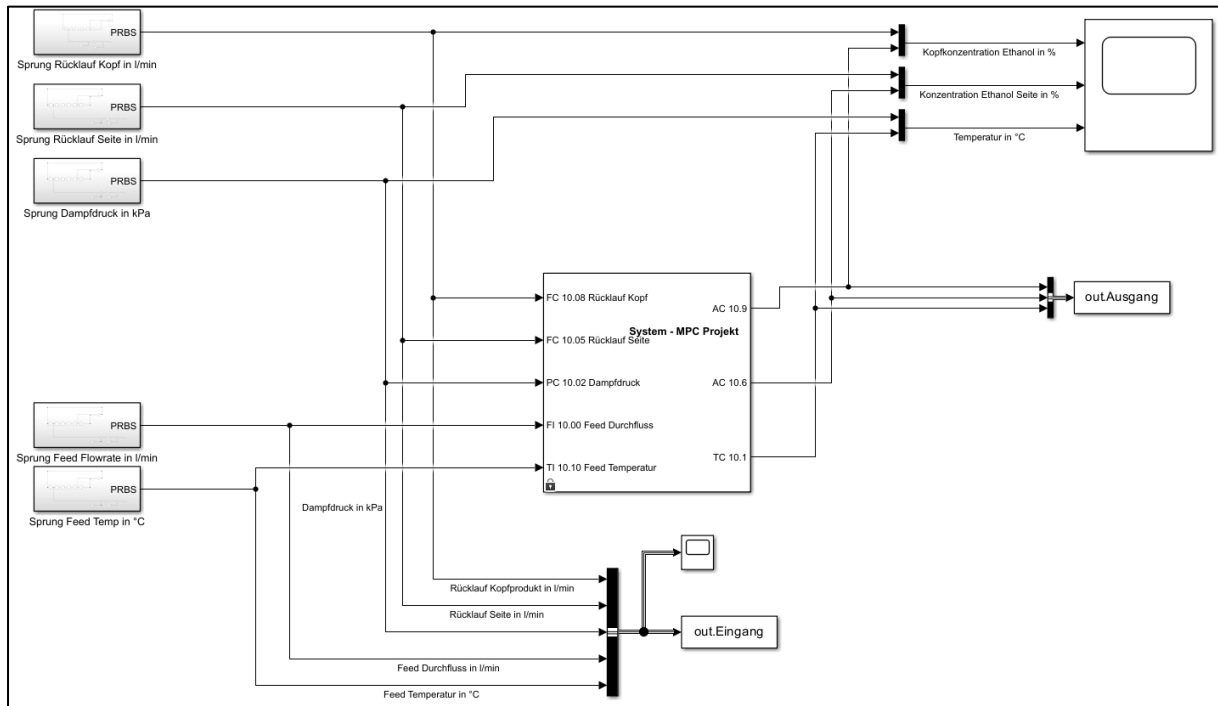


Abbildung 14: Simulink Modell der Kolonne mit PRBS-Testsignalen

Anschließend folgt die Überprüfung auf die Korrelation der Signale untereinander. Hierzu wird sich das Scope der Stellgrößen aus Abbildung 15 näher angeschaut:

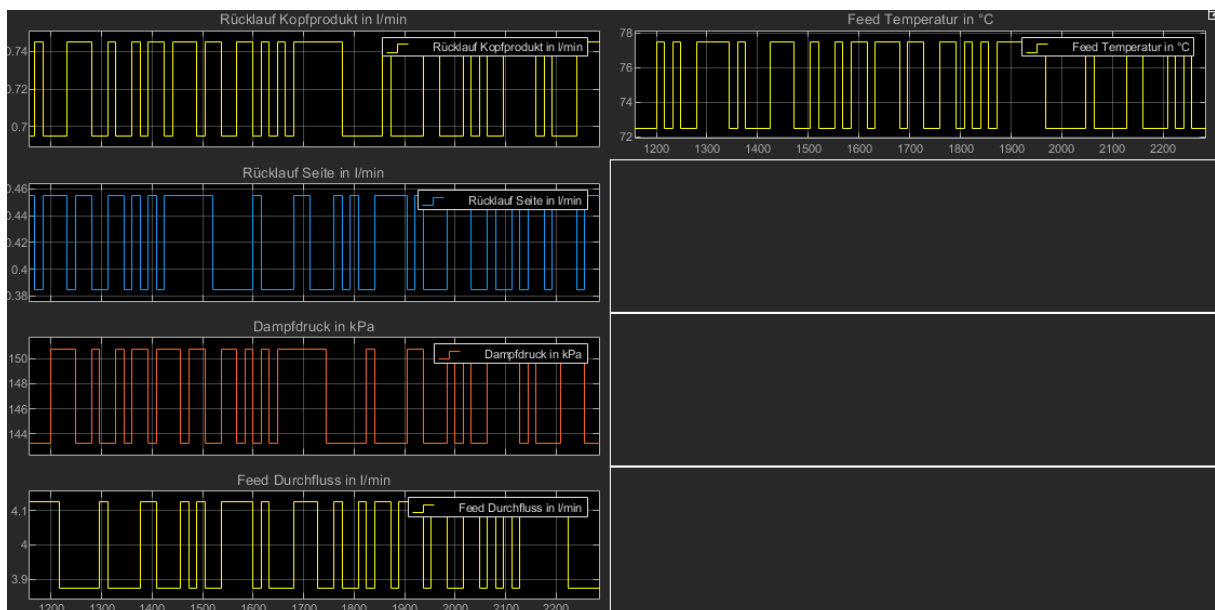


Abbildung 15: PRBS-Testsignale im Vergleich

Hierbei fällt auf, dass die Signale untereinander keinerlei Korrelation aufweisen, sie also nicht überlagert, sondern zueinander verschoben sind. Weiter ist erkennbar, dass eine Signalperiode ungefähr 1000 s andauert, was sich mit der vorig getätigten Berechnung deckt.

Bei Beobachtung des Signalverlaufes der Regelgrößen in Abbildung 16 ist erkennbar, dass diese wie gewollt um den Arbeitspunkt springen.

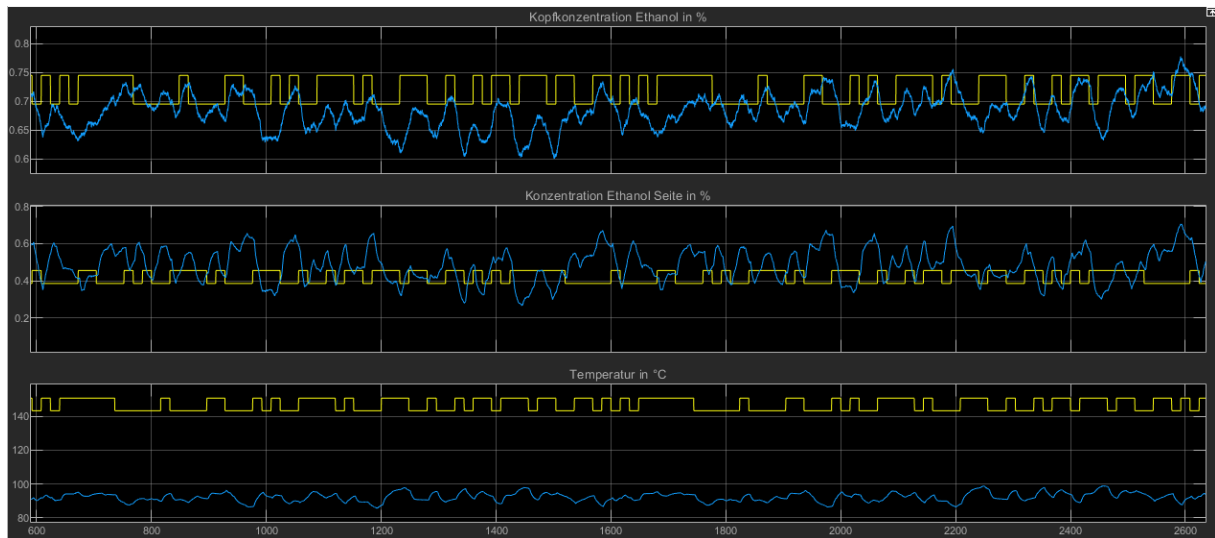


Abbildung 16: Reaktion der Regelgrößen auf das PRBS-Signal

Ermittlung eines linearen Modells

Mit Hilfe des PRBS-Signals wird zunächst ein lineares Modell erstellt. Die Vorgehensweise bestand dabei darin, die in Tabelle 2 errechneten Verstärkungsfaktoren und Zeitkonstanten für alle Teilsysteme als Initial Guess vorzugeben. Abbildung 17 zeigt exemplarisch den Fit in zwei Channels an. Die Korrelation wird exemplarisch für den ersten Channel Rücklauf Kopf auf Ethanol Kopfkonzentration in Abbildung 18 dargestellt. Das Modell zeigt dabei ein gutes Korrelationsverhalten innerhalb der Grenzen.

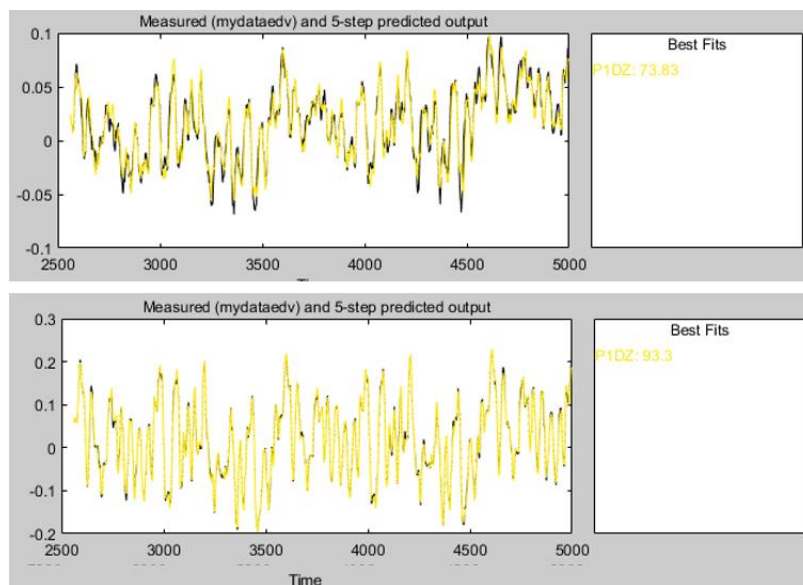


Abbildung 17: Fit lineares Modell

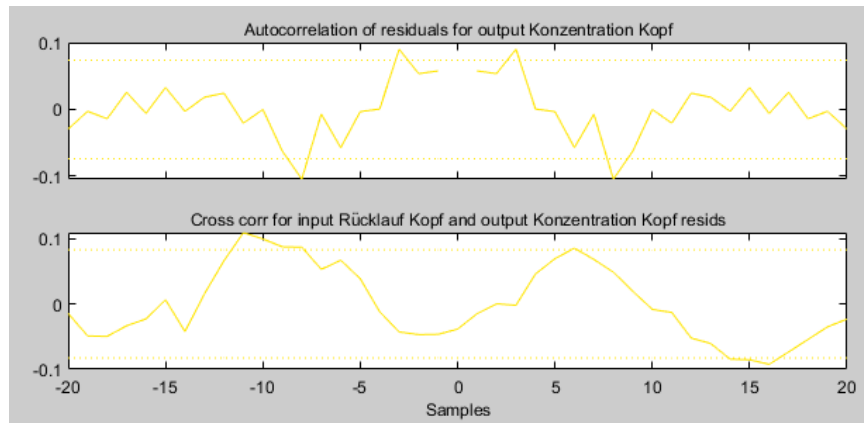


Abbildung 18: Autokorrelation und Crosskorrelation für die Kopfkonzentration

Das Modell liefert die im folgenden Schaubild dargestellten Sprungantworten der Teilsysteme.

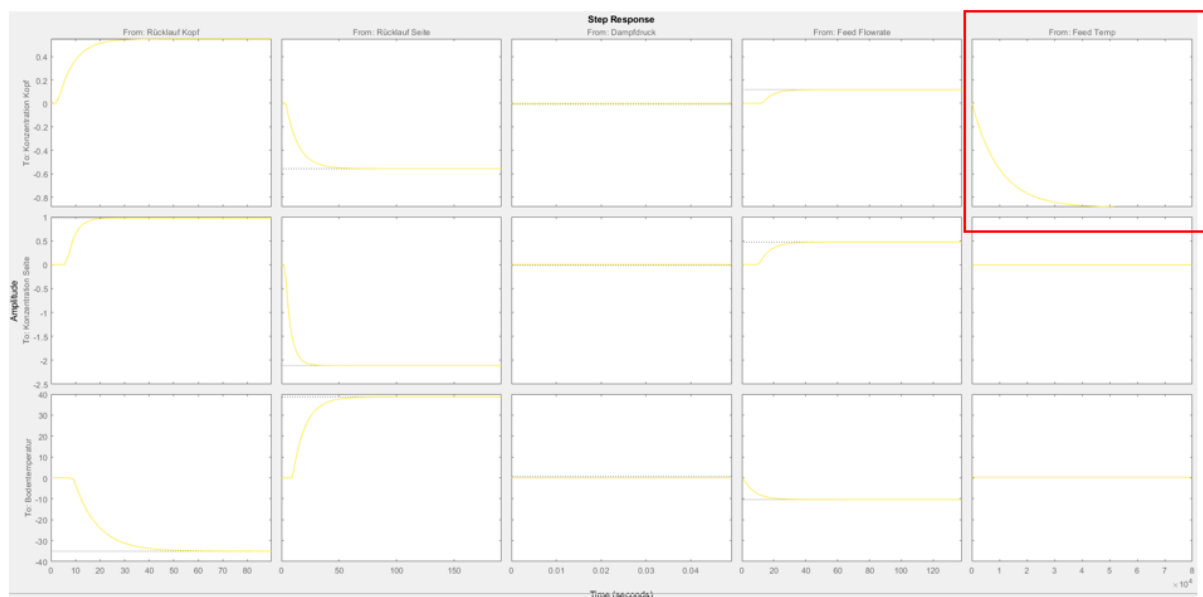


Abbildung 19: Sprungantworten lineares Modell

Auffällig hierbei ist das langsame Systemverhalten der Kopfkonzentration für den Systemeingang der Feed Temperatur (im Schaubild rot eingerahmt). Dabei handelt es sich um die Sprungantwort auf das einzige Teilsystem, für das in Tabelle 2 keine sinnvolle Berechnung möglich war. Die Übertragungsfunktion zeigt:

```

From input "Feed Temp" to output "Konzentration Kopf":
      1+Tz*s
G15(s) = Kp * ----- * exp(-Td*s)
      1+Tpl*s

      Kp = -0.888
      Tpl = 10000
      Td = 60
      Tz = -5.8991
  
```

Abbildung 20: Übertragungsfunktion Feed Temperatur auf Kopfkonzentration

Zusammenfassend liefert das Modell eine hohe Güte. Jedoch können sich die hohe Zeitkonstante für die Übertragungsfunktion des rot eingerahmten Teilsystems negativ auf die spätere Regelung

auswirken. Tatsächlich zeigt der mit diesem Modell erstellte MPC folgendes Verhalten für verschiedene Eingangssprünge. Bei $t = 1000$ (grüner Strich) erfährt der MPC einen Sprung der Störgröße Feed Temperatur von 78°C auf 60°C . Der Regler erfährt bei der Kopfkonzentration (oberstes Diagramm) eine starke Abweichung von der Sollgröße (gestrichelte gelbe Linie). Wie bereits aus den Sprungantworten des linearen Modells erwartet, zeigt der Regler hier nur ein sehr langsames Ausregelverhalten (rote Linie). Die Abweichung der Seitenkonzentration (mittleres Diagramm lässt sich vermutlich auf die lange abweichende Kopfkonzentration zurückführen. Eine Ermittlung der Konstanten für dieses Teilsystem müsste experimentell am Regler erfolgen und wäre ein weiterer Lösungsansatz. Es wurden jedoch weitere Modellformen getestet.

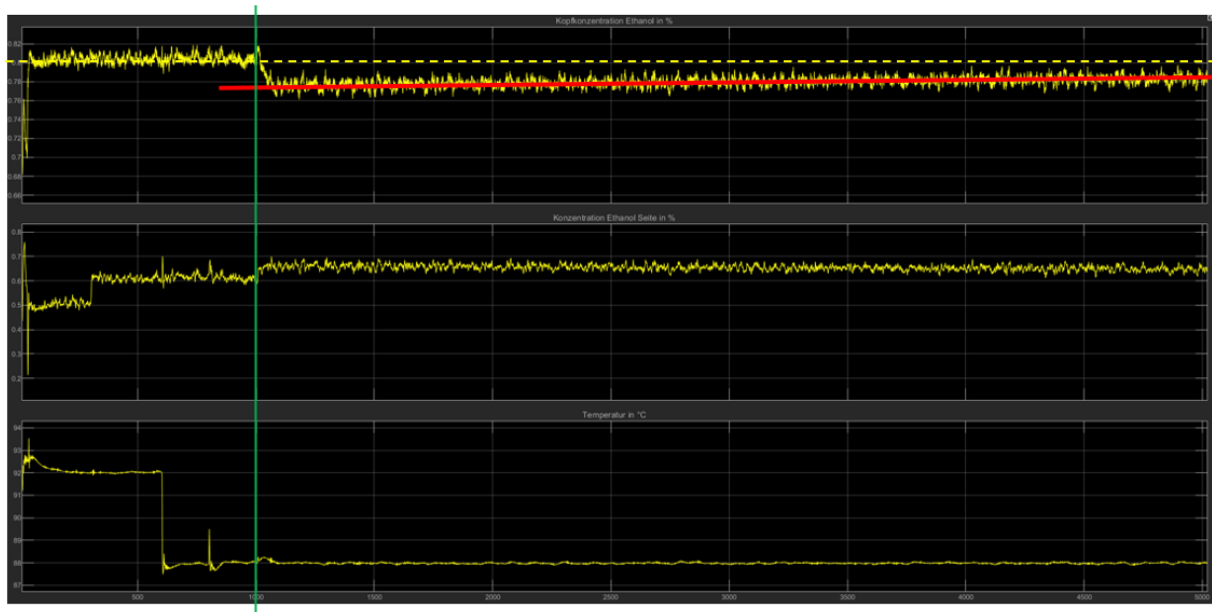


Abbildung 21: Verhalten des MPC mit dem linearen Modell

Testen anderer Modellformen

Beim Testen weiterer Modellformen wurden unter anderem ein Zustandsraummodell (violett dargestellt) und ein diskretes ARX-Modell (türkis dargestellt) getestet. Das ARX-Modell weist dabei in den meisten Kanälen den besten Fit auf, weshalb sich dafür entschieden wurde, mit diesem Modell weiter zu verfahren (vgl. Abbildung 22).

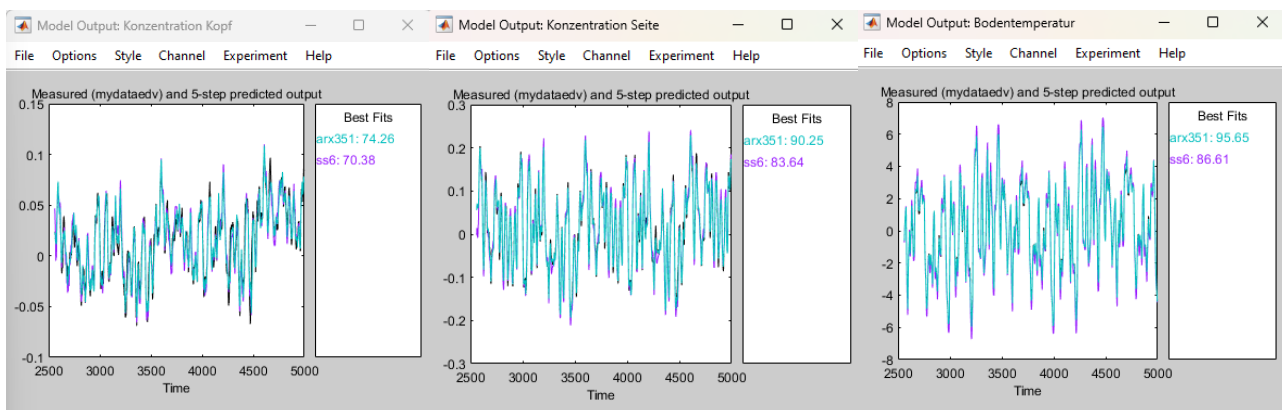


Abbildung 22: Übersicht Fit ARX-Modell

Weiter wurden die Korrelation und die Sprungantworten des Modells überprüft, wobei das ARX-Modell in den meisten Fällen eher in den Grenzen liegt als das Zustandsraummodell. Exemplarisch wird die Überprüfung für den ersten Channel „Rücklauf Kopf“ durchgeführt (vgl. Abbildung 23).

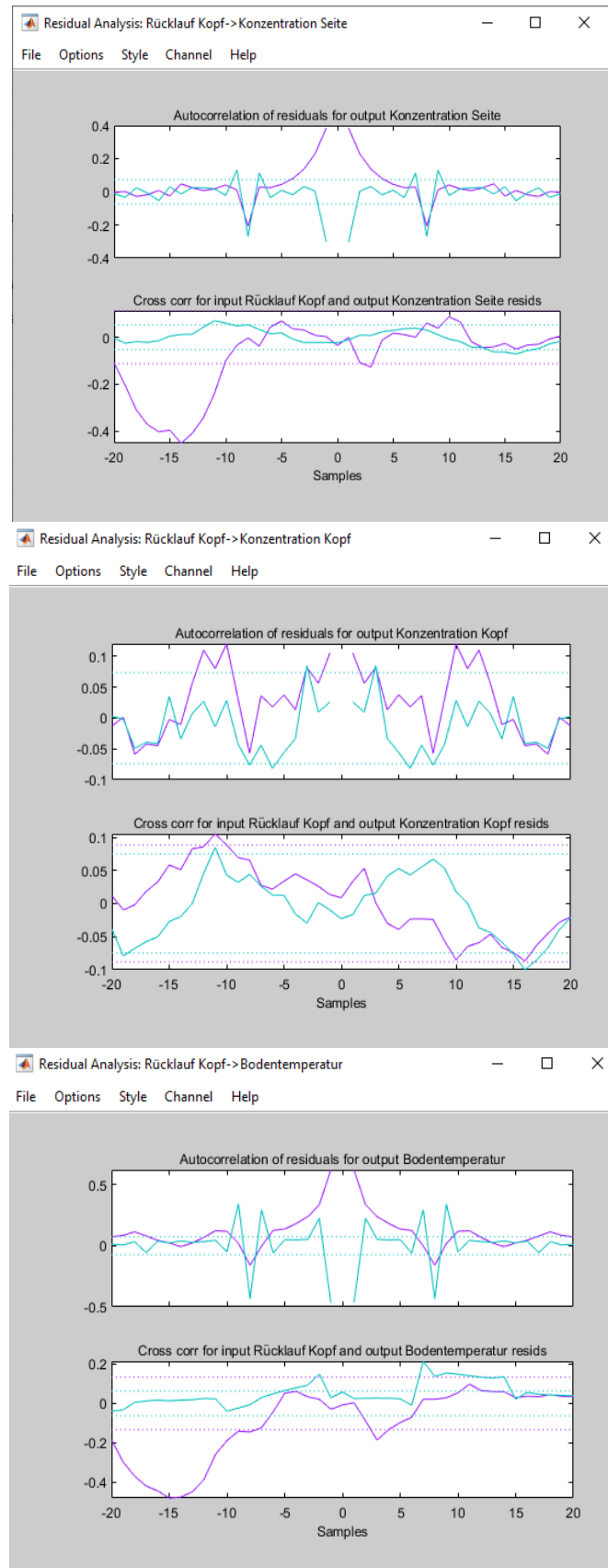


Abbildung 23: Residual Analysis von "Rücklauf Kopf"

In Abbildung 24 sind die verschiedenen Sprungantworten erkennbar. Es können hier keine instationären Zustände oder bleibende Regelabweichungen festgestellt werden, alle Sprungantworten zeigen ein stabiles Verhalten.

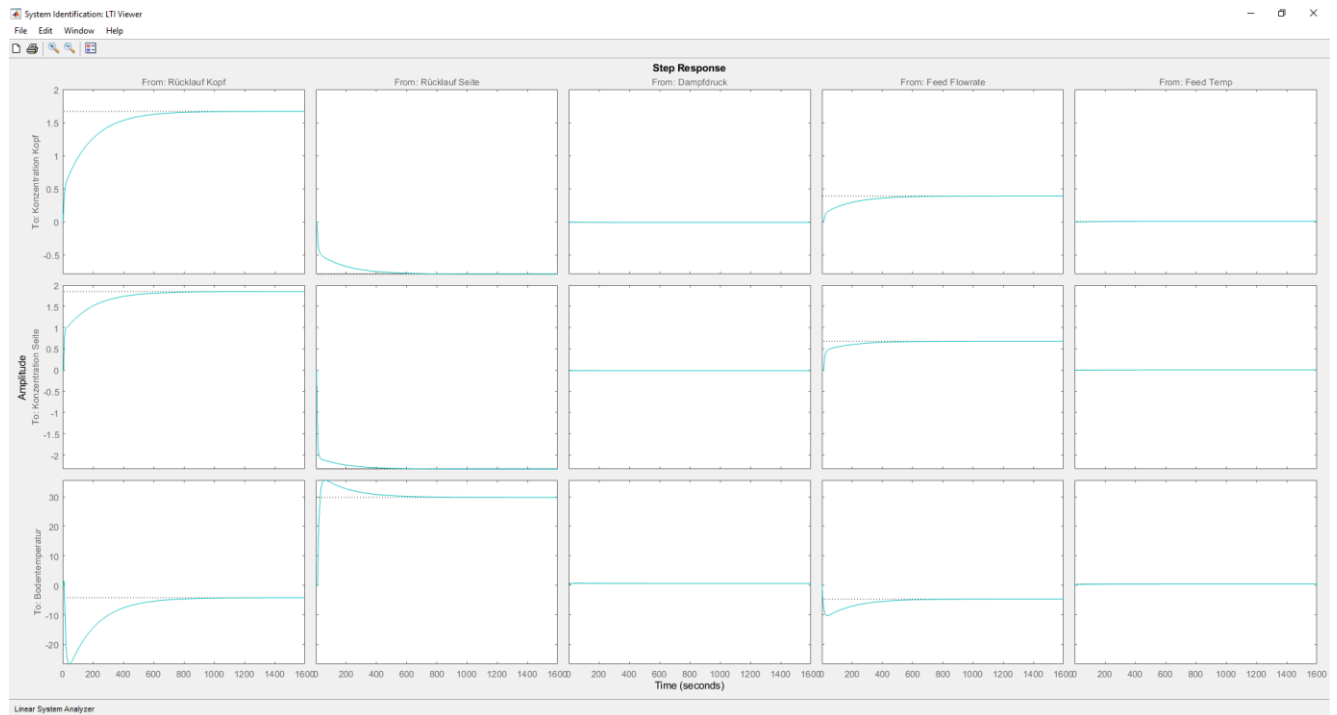


Abbildung 24: Sprungantworten des ARX-Modells

Aufgabe 3

Entwurf der MPC-Regelung

Zunächst wurde das ARX-Modell in den MPC-Designer importiert. Danach folgte die Festlegung der Stell-, Stör- und Regelgrößen (vgl. Abbildung 25).

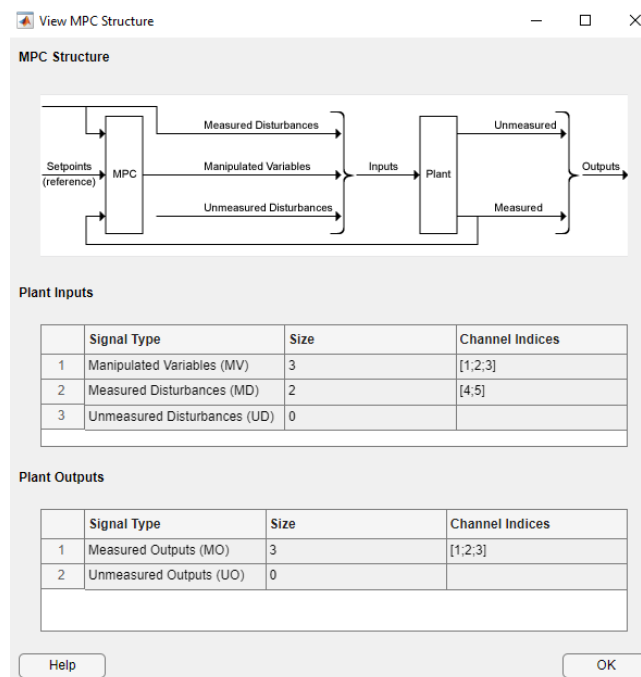


Abbildung 25: Festlegung der MPC-Struktur

In den I/O Attributes werden nun die Werte im Arbeitspunkt konfiguriert, wie in Abbildung 26 dargelegt.

Plant Inputs

	Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
1	u(1)	MV	Rücklauf Kopf		0.72	1
2	u(2)	MV	Rücklauf Seite		0.42	1
3	u(3)	MV	Dampfdruck		147	1
4	u(4)	MD	Feed Flowrate		4	1
5	u(5)	MD	Feed Temp		75	1

Plant Outputs

	Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
1	y(1)	MO	Konzentration Kopf		0.7	1
2	y(2)	MO	Konzentration Seite		0.5	1
3	y(3)	MO	Bodentemperatur		92	1

Buttons: Help, OK, Cancel, Apply

Abbildung 26: Konfiguration der I/O Attributes für den MPC

Überdies werden Prediction- und Controlhorizon mit folgenden Formeln ermittelt:

$$n_p = \max_{i,j} \left(\frac{5 * T_{dom,i,j}}{T_s} + \frac{T_{t,i,j}}{T_s} + 1 \right)$$

$$1 < n_c < 20 \text{ oder } n_c = \max_{i,j} \left(\frac{T_{dom,i,j}}{T_s} + \frac{T_{t,i,j}}{T_s} + 1 \right)$$

Es folgt, mit $T_{dom,i,j} = T_{dom}^H = 21,8 \text{ s}$ und $T_{t,i,j} = 1,1 \text{ s}$ und $T_s = 2 \text{ s}$

$$n_p = \left(\frac{5 * 21,8 \text{ s}}{2 \text{ s}} + \frac{1,1 \text{ s}}{2 \text{ s}} + 1 \right) \approx 56$$

$$n_p = \left(\frac{21,8 \text{ s}}{2 \text{ s}} + \frac{1,1 \text{ s}}{2 \text{ s}} + 1 \right) \approx 12$$

Im Anschluss wurden die Constraints angepasst und so reale Stellgrößenbeschränkungen vorgegeben (vgl. Abbildung 27).

Input and Output Constraints

Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
Inputs					
u(1)	MV	0.12	1.7	-Inf	Inf
u(2)	MV	0	0.8	-Inf	Inf
u(3)	MV	94	240	-Inf	Inf
Outputs					
y(1)	MO	0	1		
y(2)	MO	0	1		

Abbildung 27: I/O Constraints des MPC

Um im MPC-Designer in Simulink eine realistische Darstellung des Regelverhaltens zu bekommen, wurden im Scenario die Randbedingungen angepasst. Dies ist in Abbildung 28 ersichtlich.

Simulation Scenario: scenario1

Simulation Settings

Plant used in simulation: Default (controller internal model)

Simulation duration (seconds): 5000

☐ Run open-loop simulation ☐ Use unconstrained MPC

☐ Preview references (look ahead) ☐ Preview measured disturbances (look ahead)

Reference Signals (setpoints for all outputs)

	Channel	Name	Nominal	Signal	Size	Time	Period
1	r(1)	Ref of Konzentration Kopf	0.7	Step	0.1	200	
2	r(2)	Ref of Konzentration Seite	0.5	Step	0.1	500	
3	r(3)	Ref of Bodentemperatur	92	Step	4	1000	

Measured Disturbances (inputs to MD channels)

	Channel	Name	Nominal	Signal	Size	Time	Period
1	u(4)	Feed Flowrate	4	Constant			
2	u(5)	Feed Temp	75	Constant			

Abbildung 28: Anpassung des Scenarios im MPC-Designer

Mit Abbildung 29 folgt die schlussendliche Konfiguration des Regelverhaltens. Dieses wird über die Schieberegler im oberen Bildbereich konfiguriert, die Systemantwort des Reglers mit dem integrierten Streckenmodell ist dabei in der Mitte des Bildes zu sehen. Es sind leichte Überschwinge erkennbar, jedoch scheint der Regler in der Lage zu sein den Prozess anhand des Modells zuverlässig zu regeln.

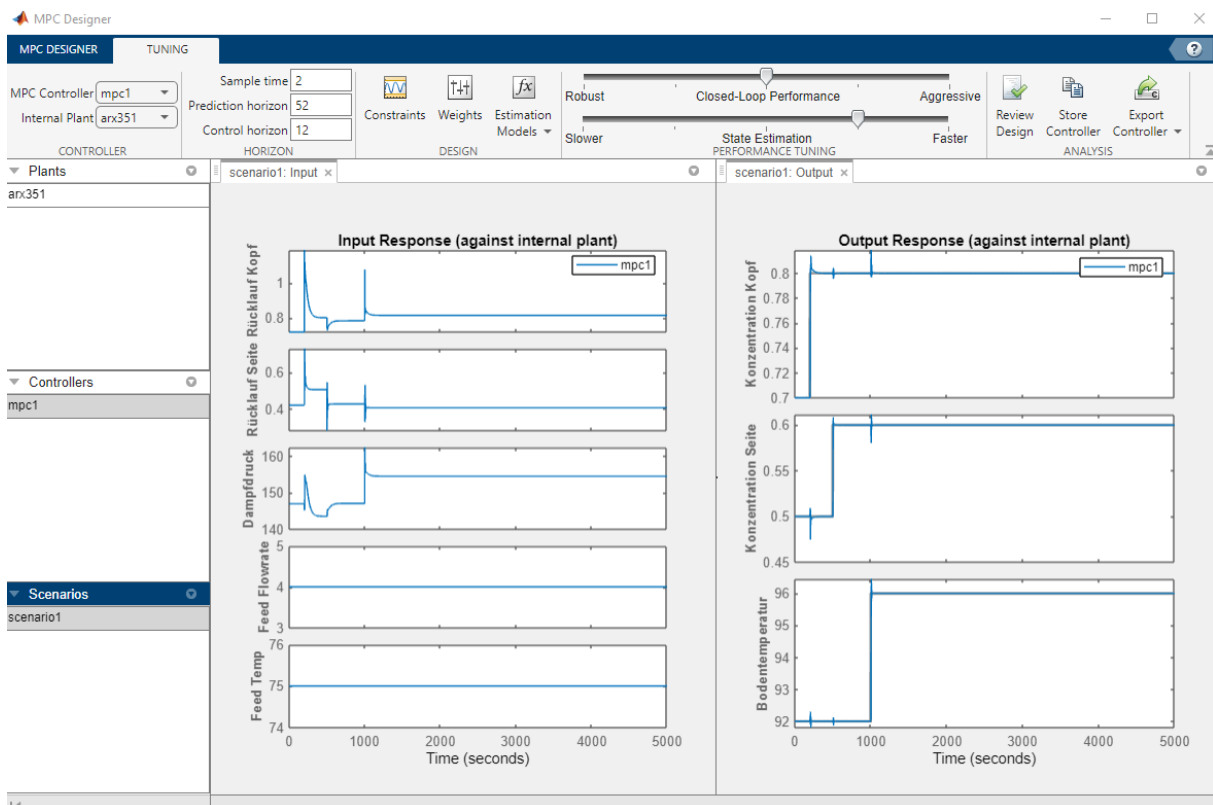
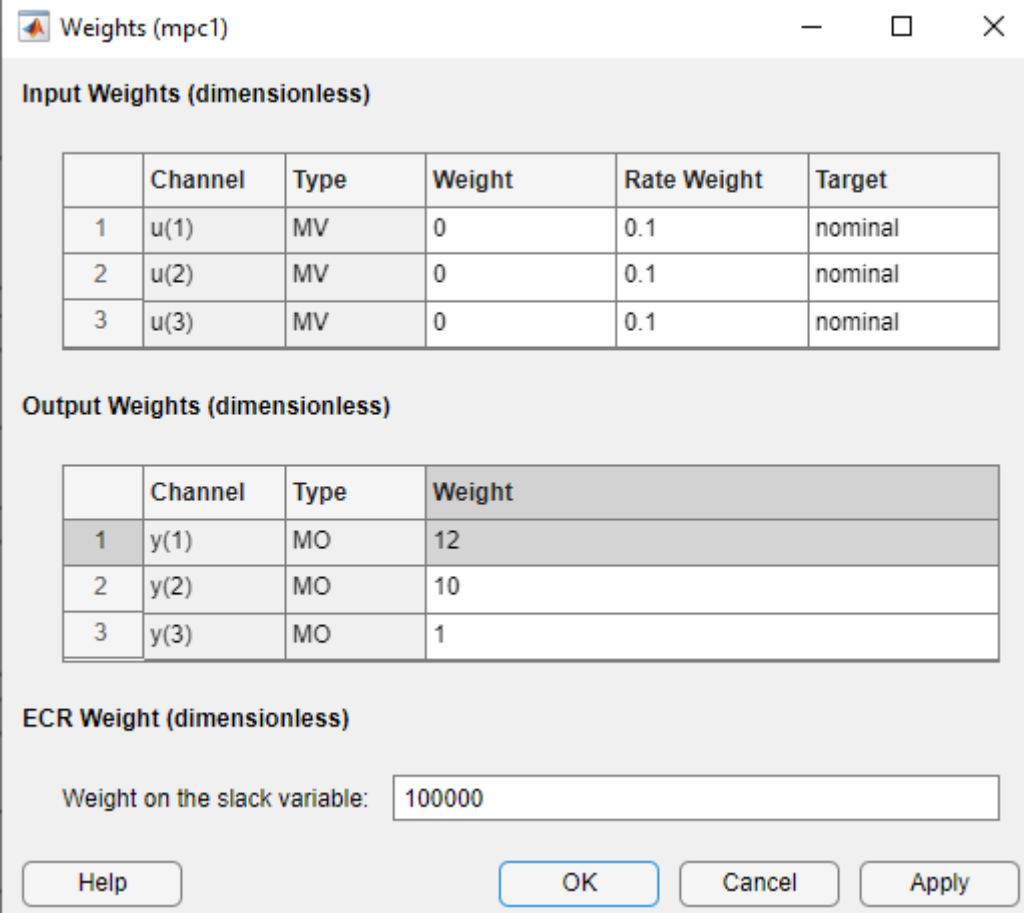


Abbildung 29: Konfiguration des MPC-Regelverhaltens

Bevor das Gesamtsystem simuliert wird, wird noch ein größeres Gewicht auf die Kopfkonzentration der Kolonne gegeben. Die Festlegung der Größe der Gewichtung erfolgt empirisch anhand der in Abbildung 29 dargestellten Systemantwort.

Abbildung 30 zeigt die eingestellten Gewichte für das System.



Weights (mpc1)

Input Weights (dimensionless)

	Channel	Type	Weight	Rate Weight	Target
1	u(1)	MV	0	0.1	nominal
2	u(2)	MV	0	0.1	nominal
3	u(3)	MV	0	0.1	nominal

Output Weights (dimensionless)

	Channel	Type	Weight
1	y(1)	MO	12
2	y(2)	MO	10
3	y(3)	MO	1

ECR Weight (dimensionless)

Weight on the slack variable:

Buttons: Help, OK, Cancel, Apply

Abbildung 30: Gewichtung der Ein- und Ausgänge des MPC-Reglers

Es folgt der erneute Umbau des Simulink Modells. Die alten PID-Regler AC10.9, AC10.6 und TC10.3 werden durch einen MPC ersetzt (s. Abbildung 31). Dabei werden folgende Vorgaben für die Eingangssignale eingestellt:

- Sollwertsprung Kopfkonzentration von 0.7 auf 0.8 zum Zeitpunkt 30 s
- Sollwertsprung Seitenkonzentration von 0.52 auf 0.62 zum Zeitpunkt 300 s
- Sollwertsprung Sumpftemperatur von 92°C auf 88°C zum Zeitpunkt 600 s
- Störwertsprung Feed flowrate von 4 auf 3,4 zum Zeitpunkt 800 s
- Störwertsprung Feed temp von 78 auf 60 zum Zeitpunkt 1000 s

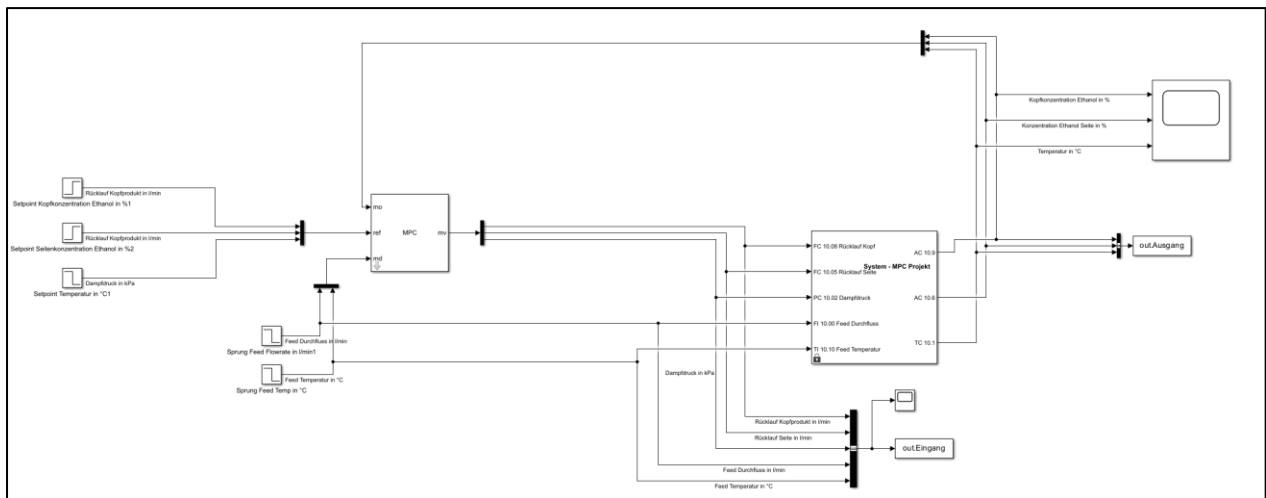


Abbildung 31: Umgebautes Simulink-Modell mit MPC-Regler

Die folgende Systemreaktion in Abbildung 32 zeigt den Verlauf der drei Sollwertgrößen, in Abbildung 33 sind die Reaktionen der Stör- und Stellgrößen dargestellt. Wie gut erkennbar ist, schafft es der MPC ohne Probleme das System zuverlässig zu regeln. Die Stellgrößen bleiben dabei in Ihrem vorher definierten Limit. Mit der Anpassung der Gewichtung für die Kopfkonzentration konnte im Projekt eine deutliche Reduzierung von Überschwingern beobachtet werden.

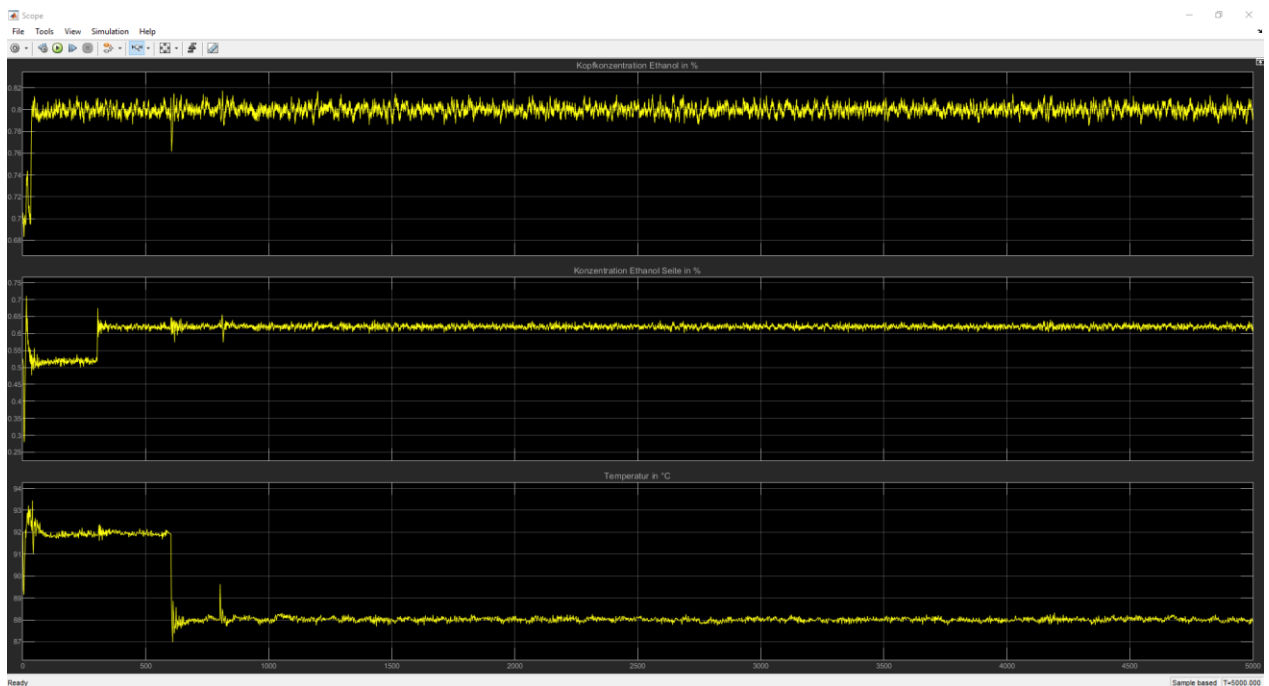


Abbildung 32: Systemreaktion der MPC geregelten Kolonne

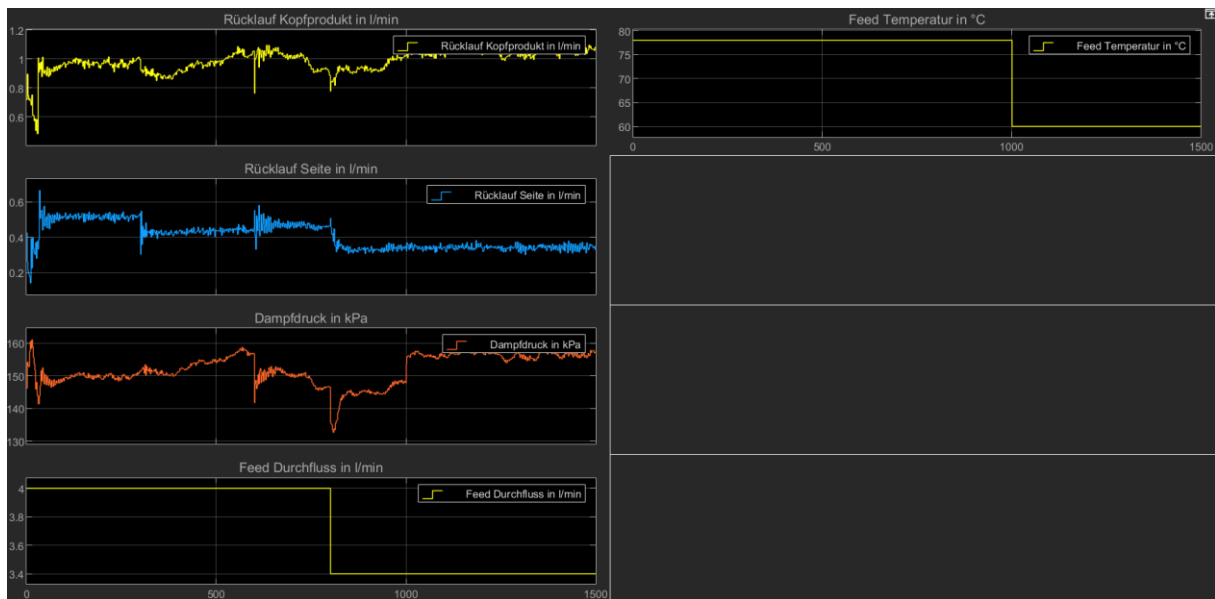


Abbildung 33: Verlauf der Stör- und Stellgrößen beim MPC geregelten System

Weiterhin ist aufgefallen, dass die zuvor vom MPC-Designer vorhergesagte Systemreaktion sehr gut zur „realen“ Systemreaktion des Kolonnenmodells passt. Werden die Systemantworten in Abbildung 34 verglichen, fällt unmittelbar auf, dass das Szenario im MPC genau die Schwingungen und Sprünge vorhergesagt hat. Im Szenario werden zwar nicht exakt die Sprünge, wie im Modell dargestellt, jedoch sind die Schwingungen nach einem Sollwertsprung sowohl im Szenario als auch im „realen“ Simulink Modell vorhanden (s. rote Markierungen).

Dennoch deutet dies auf ein gutes Modell aus der Systemidentifikation hin, da die realen Anlagenzustände gut beschrieben werden können.

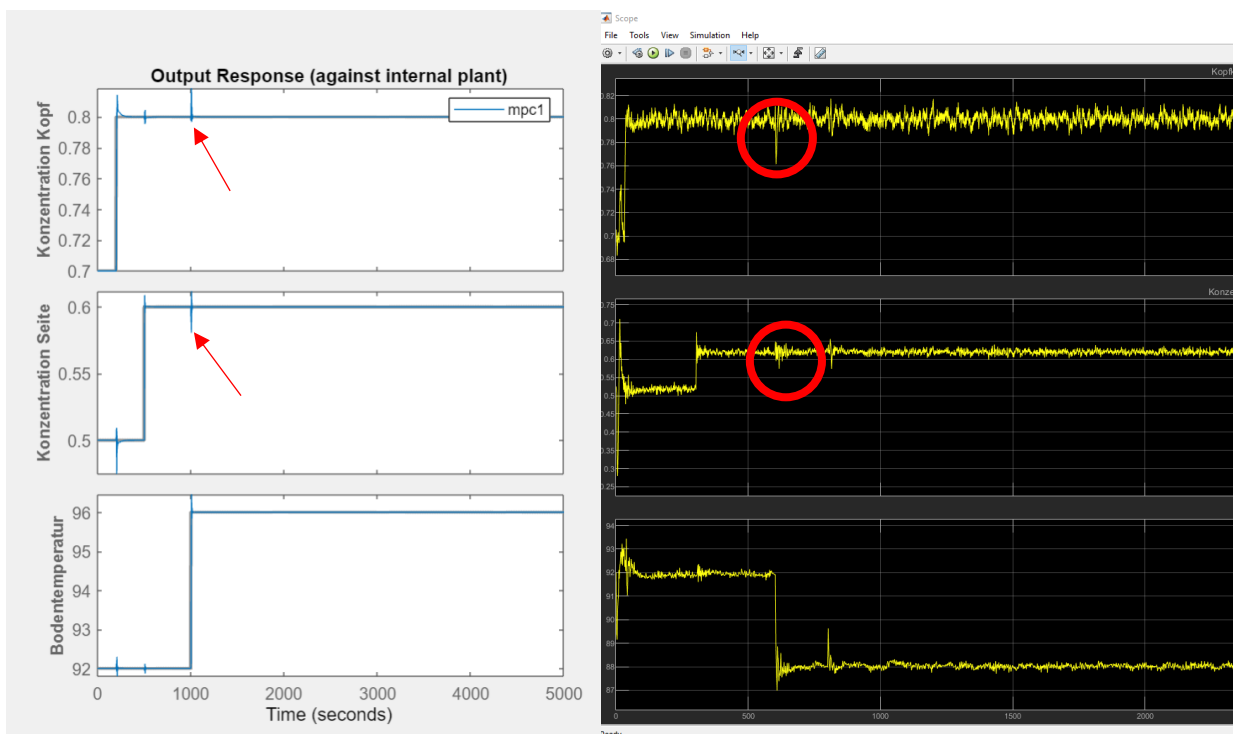


Abbildung 34: Vergleich von MPC Szenario mit MPC-Regelung im Modell

Vergleich der MPC- und PID-Regelung

Zum Vergleich der Anregelzeit, Ausregelzeit und Überschwingweite der PID- und MPC-Regelung wurde folgende Tabelle erstellt. Durch das Rauschen des MPCs bei der Kopf- und Seitenkonzentration wird ein Toleranzband um das Signal von $\pm 5\%$ festgelegt. Die Tabelle befindet sich in der Excel-Datei im Anhang. Aus ihr geht hervor, dass der MPC-Regler in allen Fällen eine deutlich dynamischere Regelung zulässt.

	Kopfkonzentration						Seitenkonzentration						Bodentemperatur					
	Anregelzeit [s]		Ausregelzeit [s]		Überschwingweite [%]		Anregelzeit [s]		Ausregelzeit [s]		Überschwingweite [%]		Anregelzeit [s]		Ausregelzeit [s]		Überschwingweite [%]	
Sprung auf	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC	PID	MPC
Kopfkonz.	12	6,5	13,9	6,5	0,75	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0
Seitenkonz.	/	/	/	/	/	/	100,1	4	100,1	6,3	/	8,065	/	/	/	/	/	/
Bodentemp.	/	1,2	/	11	/	5	24	/	48,4	/	5,645	/	16,9	5,5	16,9	14,5	0	1,1364
FeedFlow	26,8	0	33,5	/	1,75	/	155,3	/	155,3	/	0	/	26	6,2	65,4	6,2	4,205	1,7045
FeedTemp	/	0	/	/	/	/	13,8	/	24,3	/	6,935	/	29,1	/	29,1	/	3,273	/

/ keine Auswirkung auf die Regelgröße

-keine Aussage für PID möglich

Tabelle 4: Vergleich Anregelzeit, Ausregelzeit, Überschwingweite des PID- und MPC-Reglers

Folgend wurde ein Matlab Skript geschrieben, welches die Regeldifferenzen beider Regler in Datensätzen speichert und diese Daten innerhalb eines Histogramms visualisiert. Dies wurde für die drei Regelgrößen durchgeführt.

Beim Vergleich der Kopfkonzentration in Abbildung 35 fällt auf, dass die Regelgenauigkeit des MPC nur leicht besser als die des PID zu bewerten ist. Jedoch ist die Streuung ein wenig geringer, da der MPC nicht so sehr zu Überschwingungen neigt, wie der PID.

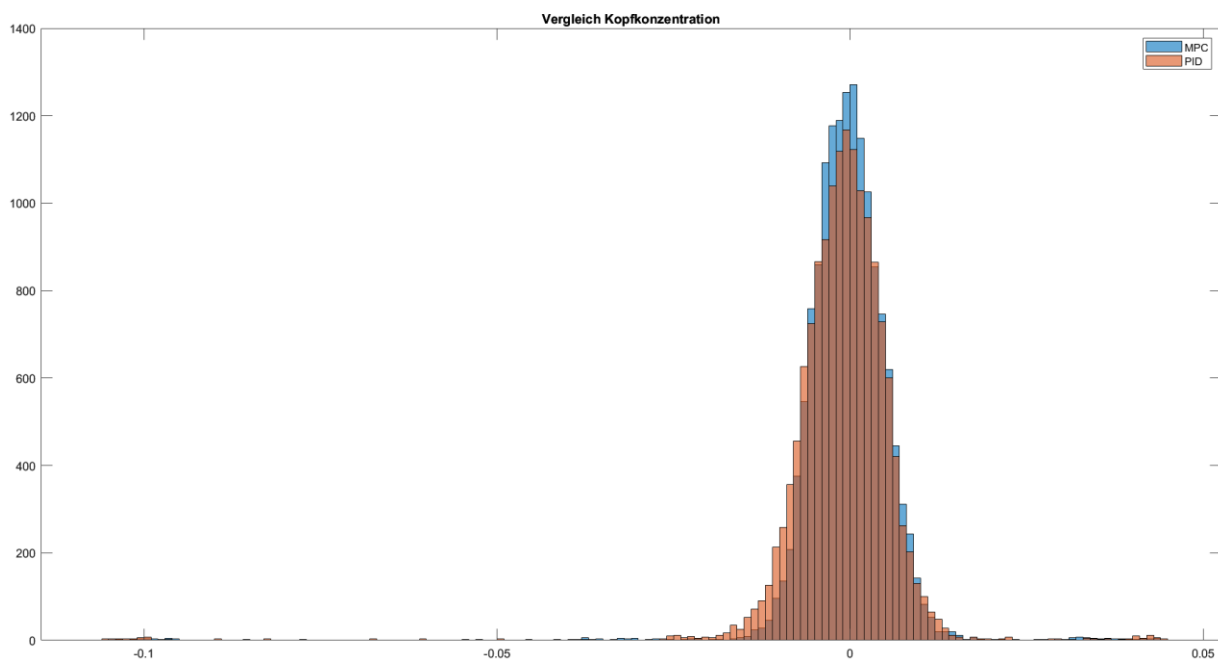


Abbildung 35: Vergleich der Regeldifferenz der Kopfkonzentration von MPC und PID

Bei der Seitenkonzentration in Abbildung 36 ist deutlich zu erkennen, dass der MPC ein wesentlich präziseres Regelungsverhalten aufzeigt. Die Streuung ist wesentlich geringer und die Anzahl der Messwerte, bei einer Regelabweichung von null ist beim MPC beinahe doppelt so groß wie beim PID-Regler.

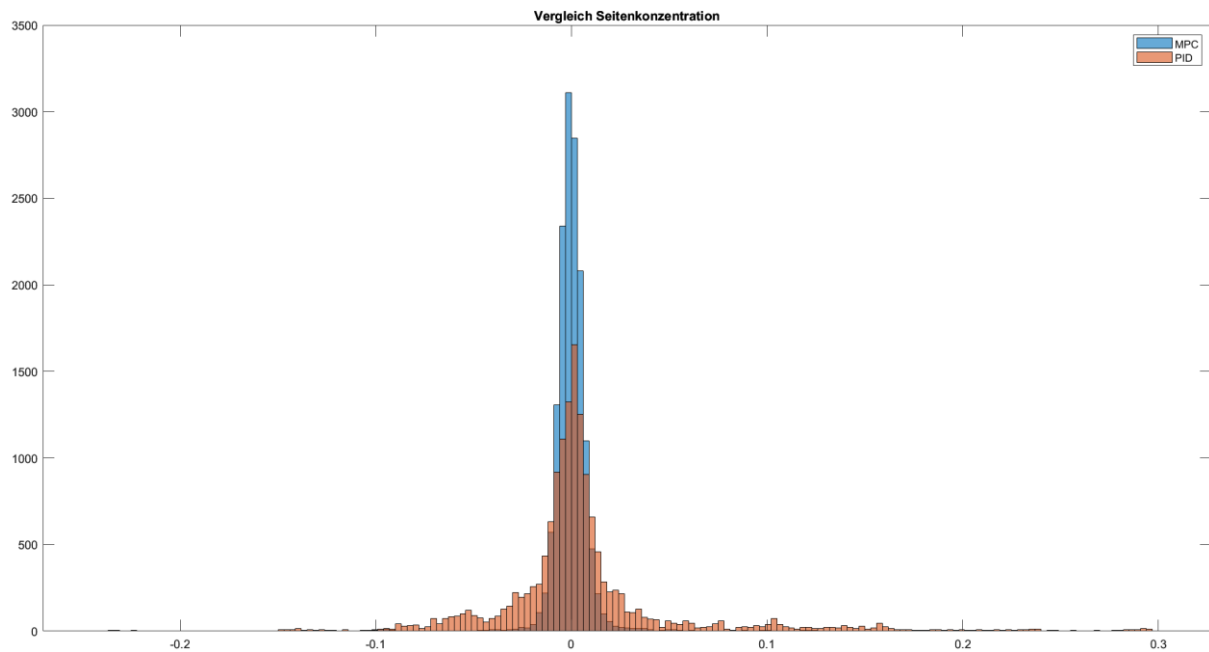


Abbildung 36: Vergleich der Regeldifferenz der Seitenkonzentration von MPC und PID

Ähnliches ist auch in Abbildung 37 zu beobachten. Hier hat der MPC eine wesentlich bessere Performance als der PID-Regler. Der MPC weist kaum Streuung auf und verfügt über eine doppelt so hohe Anzahl von Messwerten um eine Regelabweichung von null, als der PID-Regler.

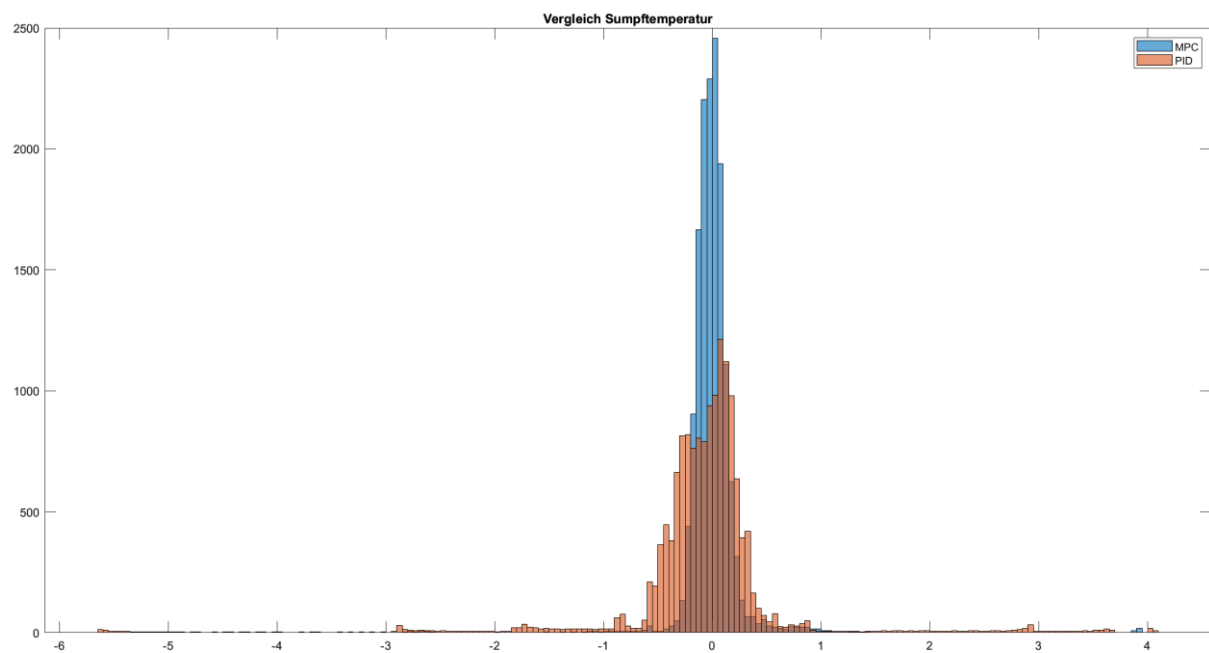


Abbildung 37: Vergleich der Regeldifferenz der Sumpftemperatur von MPC und PID

Schlussendlich ist zum Vergleich der PID- und MPC-Regelung zu sagen, dass der MPC eine größere Regelgenauigkeit aufweist und gleichzeitig auch die Streuung um den Sollwert wesentlich geringer ausfällt. So sind weniger Überschwingungen vorhanden, sodass die Sollwertabweichung im Mittel viel häufiger um den Nullpunkt gehalten werden kann als bei der PID-Regelung.

Beim Vergleich der Abbildung 38 und Abbildung 39 ist ebenfalls zu sehen, dass der PID-Regler eher zu Schwingen neigt als der MPC, außerdem sind An- und Ausregelzeit des MPC schneller als vom PID-Regler, was insbesondere bei der Seitenkonzentration zu beobachten ist.

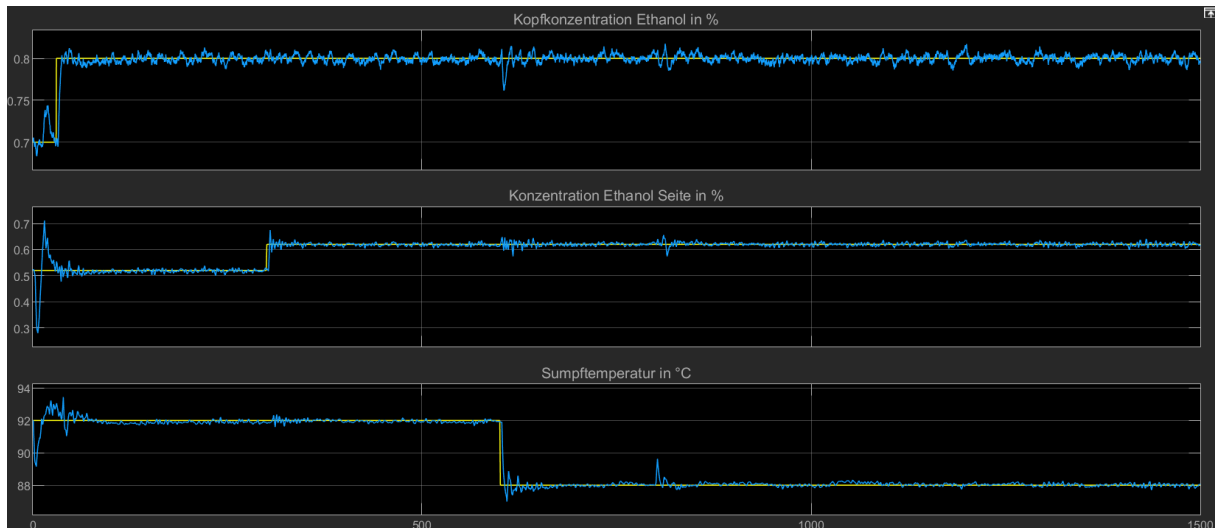


Abbildung 38: Regelgrößen der MPC-Regelung der Kolonne

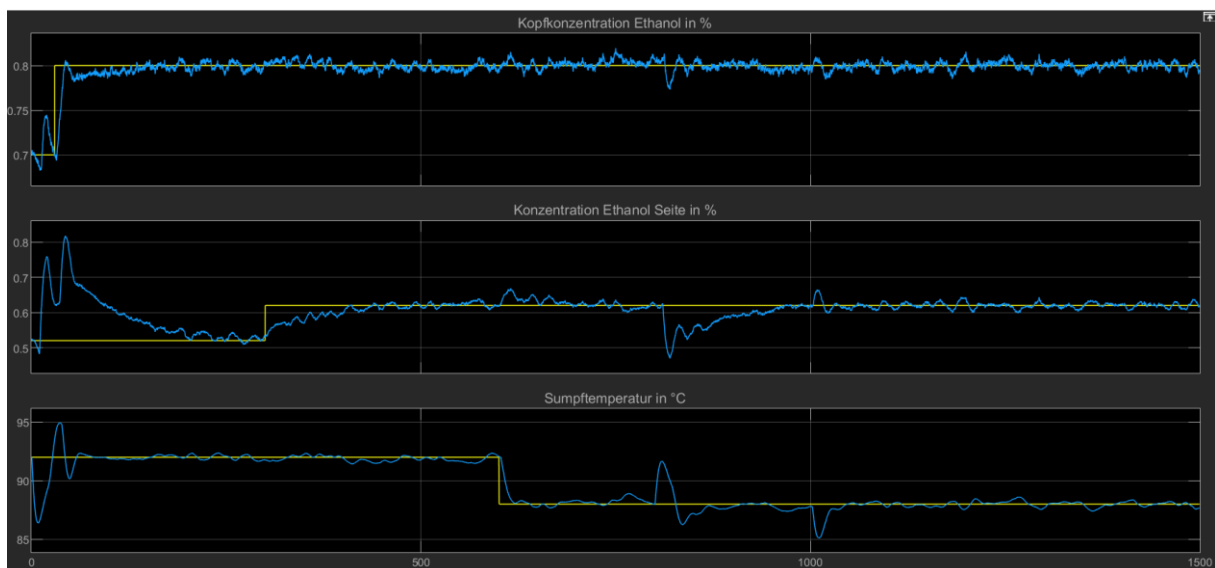


Abbildung 39: Regelgrößen der PID-Regelung der Kolonne

Ausblick

Ein möglicher nächster Schritt wäre es, für das lineare Modell in einem empirischen Verfahren die Parameter für das langsame Teilsystem „Feed Temperatur auf Kopfkonzentration“ zu ermitteln und damit den MPC zu trainieren. Aus dem Scope für den MPC mit dem linearen Modell (s. Abbildung 21) geht ein rauschärmerer Verlauf für die Bodentemperatur hervor. Im Histogramm könnten die beiden MPC-Regler (ARX und lineares Modell) nach dem gleichen Verfahren verglichen und ausgewertet werden, um Rückschlüsse auf die Modellauswahl zu gewinnen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geregelte Zweistoffdestillationskolonne mit R&I-Fließschema.....	3
Abbildung 2: Rücklauf Kopfprodukt in l/min (gelb) und Durchfluss Seitenabzug in l/min (blau).....	4
Abbildung 3: Druck Heizdampf in kPa.....	5
Abbildung 4: Sprungantwort an AC10.9, Sprung an FC10.8.....	6
Abbildung 5: Sprungantwort an AC10.6, Sprung an FC10.8.....	6
Abbildung 6: Sprungantwort an TC10.1, Sprung auf FC10.8.....	7
Abbildung 7: Gesamtbild des Sprungs auf FC10.8 mit den resultierenden Sprungantworten	7
Abbildung 8: Gesamtbild des Sprungs auf FC10.5 mit den resultierenden Sprungantworten	8
Abbildung 9: Gesamtbild des Sprungs auf PC10.2 mit den resultierenden Sprungantworten	9
Abbildung 10: Gesamtbild des Sprungs auf DV1 mit den resultierenden Sprungantworten.....	10
Abbildung 11: Gesamtbild des Sprungs auf DV2 mit den resultierenden Sprungantworten	11
Abbildung 12: Zusammenhang Sequenz- und Registerlänge.....	13
Abbildung 13: PRBS-Auslegung in Simulink.....	14
Abbildung 14: Simulink Modell der Kolonne mit PRBS-Testsignalen	15
Abbildung 15: PRBS-Testsignale im Vergleich	15
Abbildung 16: Reaktion der Regelgrößen auf das PRBS-Signal	16
Abbildung 17: Fit lineares Modell.....	16
Abbildung 18: Autokorrelation und Crosskorrelation für die Kopfkonzentration.....	17
Abbildung 19: Sprungantworten lineares Modell	17
Abbildung 20: Übertragungsfunktion Feed Temperatur auf Kopfkonzentration	17
Abbildung 21: Verhalten des MPC mit dem linearen Modell.....	18
Abbildung 22: Übersicht Fit ARX-Modell.....	18
Abbildung 23: Residual Analysis von "Rücklauf Kopf"	19
Abbildung 24: Sprungantworten des ARX-Modells	20
Abbildung 25: Festlegung der MPC-Struktur.....	20
Abbildung 26: Konfiguration der I/O Attributes für den MPC.....	21
Abbildung 27: I/O Constraints des MPC.....	21
Abbildung 28: Anpassung des Szenarios im MPC-Designer	22
Abbildung 29: Konfiguration des MPC-Regelverhaltens.....	22
Abbildung 30: Gewichtung der Ein- und Ausgänge des MPC-Reglers	23
Abbildung 31: Umgebautes Simulink-Modell mit MPC-Regler	24
Abbildung 32: Systemreaktion der MPC geregelten Kolonne	24
Abbildung 33: Verlauf der Stör- und Stellgrößen beim MPC geregelten System.....	25
Abbildung 34: Vergleich von MPC Szenario mit MPC-Regelung im Modell.....	25
Abbildung 35: Vergleich der Regeldifferenz der Kopfkonzentration von MPC und PID	26
Abbildung 36: Vergleich der Regeldifferenz der Seitenkonzentration von MPC und PID	27
Abbildung 37: Vergleich der Regeldifferenz der Sumpftemperatur von MPC und PID	27
Abbildung 38: Regelgrößen der MPC-Regelung der Kolonne	28
Abbildung 39: Regelgrößen der PID-Regelung der Kolonne	28