



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Florian Rater

Störgrößenbeobachter für ein Dreitankmodell

Florian Rater
Störgrößenbeobachter für ein Dreitankmodell

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.Ing. Ulf Claussen
Zweitgutachter : Prof. Dr.Ing. Florian Wenck

Abgegeben am 24. Januar 2013

Florian Rater

Thema der Bachelorthesis

Störgrößenbeobachter für ein Dreitankmodell

Stichworte

Störgrößenbeobachter, Zustandsraum, Polstellen, Proportionalregler, Integralregler, Matlab/Simulink

Kurzzusammenfassung

Bei dieser Arbeit handelt es sich um die Erstellung und Skalierung eines Störgrößenbeobachters, der für eine Regelung eines Dreitanksystems mit kontinuierlichem Abfluss benutzt wird. Zuerst wird auf die theoretischen Werte eingegangen, wie diese entstehen und auf was geachtet werden muss. Auch werden auf die Vor- und Nachteile gegenüber einem Beobachtersystem eingegangen. Anschließend wird dargestellt, wie sich die Skalierungen auf die Simulation und bei dem echten Modell verhält (Führungs- und Störungsverhalten). Als Vergleich wird ein Beobachtersystem mit den bekannten Daten der Störungen ergänzt und wie diese erzeugte Störung bei Fehlverhalten langsam aufintegriert.

Florian Rater

Title of the paper

Observer for disturbances for a three-tank model

Keywords

Observer for disturbances, state-space control, poles, proportional controller, integral controller, Matlab/Simulink

Abstract

This report is about the creation and scaling of an observer for disturbances. He is used for the control of a three-tank model. First discusses the theoretical values, as they arise, and what needs to be paid to. Also necessary to examine the advantages and disadvantages compared to an observer system. Then it is shown how the scaling of the simulation and the real model behavior (control and disturbance behavior). As a comparison, an observer system is added with the known data of the disorders and how these integrated up slowly generated fault for misconduct.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Leuten danken. Ich danke Herrn Prof. Dr. Ing. Claussen und Herrn Prof. Dr. Ing. Wenck für die Übernahme der Prüfung und für die Aufgabenstellung. Auch danke ich meinen Eltern, ohne die das alles hier nicht möglich gewesen wäre. Meinem Bruder, der wegen eines Schicksalsschlag sein zweites Studium nicht schneller beenden konnte als ich mein erstes. Dies hat meine Motivation ein bisschen beschleunigt. Dann natürlich Kim und meinen anderen Freunden, die mich immer mal wieder aus dieser Arbeit raus geholt haben, um einen freien Kopf zu bekommen. Insbesondere möchte ich meinen Kommilitonen danken. Auf sie konnte ich mich immer verlassen und wäre ich sonst nie so weit gekommen. Mit ihnen habe ich echt tolle Leute dort getroffen, was ich nicht missen möchte. Auch einen großen Dank an alle, die ich jetzt vergessen habe.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
I. Anfang	13
1. Einführung	14
1.1. Einleitung	14
1.2. Aufgabenstellung	16
II. Hauptteil	17
2. Anlagenbeschreibung	18
2.1. Anlagenteile	18
2.1.1. Wassertanks	18
2.1.2. Sensoren	19
2.1.3. Ventile	19
2.1.4. Pumpen	20
2.1.5. Verbindung zu Matlab/Simulink	20
2.1.6. Störgrößenbeschreibung	20
2.1.7. Theoretische Störgröße	21
2.2. Anlagenfunktion	22
3. Zustandsraumüberführung	24
3.1. Nichtlineares Modell	25
3.2. Linearisierung	27
3.3. Definitionen	31
4. Störgrößenbeobachter	33
4.1. Unterschied Störgrößenbeobachter zu Luenberger Beobachter	33
4.2. Beobachterentwurf	34
4.3. Integralreglerentwurf	41

4.4. Störgrößenbeobachterentwurf	44
5. Prototyp	48
6. Versuche	50
6.1. Ohne Regler	50
6.2. Zustandsregler	52
6.2.1. Störgrößenanalyse	55
6.2.2. Zustandsreglerzwischenfazit	58
6.3. Integralregler	59
6.3.1. Störgrößenanalyse	62
6.3.2. Integralreglerzwischenfazit	63
III. Schluss	65
7. Schluss	66
7.1. Fazit	66
Literaturverzeichnis	68
IV. Anhang	69
A. CD	70
B. Quellcode	71
C. Messungen ohne Regler	74
D. Messungen Zustandsregler	80
D.1. Messungen Zustandsregler510	102
D.2. Messungen Zustandsregler55Z3	125
D.3. Messungen Zustandsregler55Z3 drei Sensoren	130
E. Messungen Integralregler	141
E.1. Messungen Integralregler510	168
E.2. Messungen Integralregler55Z3	195
E.3. Messungen Integralregler55Z3 drei Sensoren	200

Tabellenverzeichnis

6.1. Führungssprungwerte für Aussteuerung Beobachtersysteme: 5x	50
6.2. Führungssprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x	53
6.3. Störungssprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x	53
6.4. Führungssprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x	54
6.5. Störsprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x	54
6.6. Störsprungwerte Tank 3 für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x	55
6.7. Störgrößenanalyse Tank2 in $\frac{cm^3}{sec}$	55
6.8. Zustand Störgrößenanalyse Tank3 in $\frac{cm^3}{sec}$	56
6.9. Zustand Störgrößenanalyse Tank3 mit 3 Sensoren in $\frac{cm^3}{sec}$	57
6.10. Führungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x	59
6.11. Störungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x	60
6.12. Führungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x	60
6.13. Störungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x	61
6.14. Störsprungwerte Tank 3 für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x	61
6.15. Störgrößenanalyse Tank2 in $\frac{cm^3}{sec}$	62
6.16. Integral Störgrößenanalyse Tank3 in $\frac{cm^3}{sec}$	62
6.17. Integral Störgrößenanalyse Tank3 mit 3 Sensoren in $\frac{cm^3}{sec}$	63

Abbildungsverzeichnis

2.1. Dreitankanlage	18
2.2. Dreitankmodell	22
3.1. Zustandsraumdarstellung	24
3.2. Nichtlineares Modell	25
4.1. Zustandsregler	34
4.2. Beobachter	37
4.3. BeobachterZustandsreglervergleich	40
4.4. Integralregler	41
4.5. Störgrößenbeobachter	44
5.1. Prototyp	49
C.1. Aussteuerung ohne Reglersystem mit Beobachter	74
C.2. Aussteuerung ohne Reglersystem mit Störgrößenbeobachter	75
C.3. Aussteuerung ohne Reglersystem mit Prototyp	75
C.4. Differenz ohne Reglersystem mit Beobachter	76
C.5. Differenz ohne Reglersystem mit Störgrößenbeobachter	77
C.6. Differenz ohne Reglersystem mit Prototyp	77
C.7. Störung ohne Reglersystem mit Störgrößenbeobachter	78
C.8. Störung ohne Reglersystem mit Prototyp	79
D.1. Simulation Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung	80
D.2. Simulation Differenz Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung	81
D.3. Simulation Zustandsregler mit Beobachter Störsprung	82
D.4. Simulation Differenz Zustandsregler mit Beobachter Störsprung	82
D.5. Real Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung	83
D.6. Real Differenz Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung	83
D.7. Real Zustandsregler mit Beobachter Störsprung	84
D.8. Real Differenz Zustandsregler mit Beobachter Störsprung	85
D.9. Simulation Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung	86
D.10.Simul. Differenz Zustandsregler Störgrößenbeobachter Führungssprung	86
D.11.Simulation St. Zustandsregler Störgrößenbeobachter Führungssprung	87

D.12.Simulation Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	88
D.13.Simulation Dif. Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	88
D.14.Simulation Störung Zustandsregler Störgrößenbeobachter Störsprung	89
D.15.Real Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung	90
D.16.Real Dif. Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung	90
D.17.Real St. Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung	91
D.18.Real Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	92
D.19.Real Differenz Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	92
D.20.Real Störung Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	93
D.21.Simulation Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung	94
D.22.Simulation Differenz Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung	94
D.23.Simulation Störung Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung	95
D.24.Simulation Zustandsregler mit Prototyp Störsprung	96
D.25.Simulation Differenz Zustandsregler mit Prototyp Störsprung	96
D.26.Simulation Störung Zustandsregler mit Prototyp Störsprung	97
D.27.Real Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung	98
D.28.Real Differenz Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung	98
D.29.Real Störung Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung	99
D.30.Real Zustandsregler mit Prototyp Störsprung	100
D.31.Real Differenz Zustandsregler mit Prototyp Störsprung	100
D.32.Real Störung Zustandsregler mit Prototyp Störsprung	101
D.33.Sim. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	102
D.34.Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	103
D.35.Sim. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung	104
D.36.Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung	104
D.37.Real Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	105
D.38.Real Differenz Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	106
D.39.Real Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung	107
D.40.Real Dif. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung	107
D.41.Sim. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	109
D.42.Simul. Dif. Zustandsregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	109
D.43.Sim. St. Zustandsregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	110
D.44.Sim. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	111
D.45.Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	111
D.46.Sim. Störung Zustandsregler5 Störgrößenbeobachter10 Störsprung	112
D.47.Real Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	113
D.48.Real Dif. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	113
D.49.Real St. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	114
D.50.Real Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	115
D.51.Real Dif. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	115

D.52.Real Störung Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	116
D.53.Sim. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	117
D.54.Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	117
D.55.Sim. Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	118
D.56.Sim. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung	119
D.57.Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung	119
D.58.Sim. Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung	120
D.59.Real Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	121
D.60.Real Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	121
D.61.Real Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	122
D.62.Real Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung	123
D.63.Real Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung	123
D.64.Real Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung	124
D.65.Sim. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	125
D.66.Sim. Dif. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	126
D.67.Sim. Störung Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	126
D.68.Real Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	127
D.69.Real Dif. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	128
D.70.Real Störung Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	128
D.71.Sim. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren	130
D.72.Sim. Dif. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren	131
D.73.Sim. Störung ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren	132
D.74.Real Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	133
D.75.Real Dif. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	134
D.76.Real Störung Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3	135
D.77.Sim. ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	136
D.78.Sim. Dif. ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	136
D.79.Sim. Störung ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	137
D.80.Real ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	138
D.81.Real Dif. ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	139
D.82.Real Störung ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	140
E.1. Simulation Integralregler mit Beobachter Führungssprung	141
E.2. Simulation Differenz Integralregler mit Beobachter Führungssprung	142
E.3. Simulation Integralregler mit Beobachter Störsprung	143
E.4. Simulation Differenz Integralregler mit Beobachter Störsprung	143
E.5. Real Integralregler mit Beobachter Führungssprung	144
E.6. Real Differenz Integralregler mit Beobachter Führungssprung	145
E.7. Real Integralregler mit Beobachter Störsprung	146
E.8. Real Differenz Integralregler mit Beobachter Störsprung	147

E.9. Simulation Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung	148
E.10.Sim. Dif. Integralregler Störgrößenbeobachter Führungssprung	149
E.11.Sim. Störung Integralregler Störgrößenbeobachter Führungssprung	150
E.12.Simulation Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	151
E.13.Simulation Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung . . .	151
E.14.Simulation Störung Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung . . .	152
E.15.Real Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung	153
E.16.Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung . . .	154
E.17.Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung . . .	155
E.18.Real Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	156
E.19.Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	156
E.20.Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung	157
E.21.Simulation Integralregler mit Prototyp Führungssprung	158
E.22.Simulation Differenz Integralregler mit Prototyp Führungssprung	159
E.23.Simulation Störung Integralregler mit Prototyp Führungssprung	160
E.24.Simulation Integralregler mit Prototyp Störsprung	161
E.25.Simulation Differenz Integralregler mit Prototyp Störsprung	162
E.26.Simulation Störung Integralregler mit Prototyp Störsprung	163
E.27.Real Integralregler mit Prototyp Führungssprung	164
E.28.Real Differenz Integralregler mit Prototyp Führungssprung	164
E.29.Real Störung Integralregler mit Prototyp Führungssprung	165
E.30.Real Integralregler mit Prototyp Störsprung	166
E.31.Real Differenz Integralregler mit Prototyp Störsprung	166
E.32.Real Störung Integralregler mit Prototyp Störsprung	167
E.33.Sim. Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	168
E.34.Sim. Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	169
E.35.Sim. Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung	170
E.36.Sim. Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung	171
E.37.Real Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	172
E.38.Real Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung	173
E.39.Real Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung	174
E.40.Real Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung	175
E.41.Sim. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	176
E.42.Sim. Dif. Integralregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	177
E.43.Sim. Störung Integralregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung . . .	178
E.44.Sim. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	179
E.45.Sim. Dif. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	179
E.46.Sim. Störung Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	180
E.47.Real Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	181
E.48.Real Dif. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	181

E.49.Real St. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung	182
E.50.Real Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	183
E.51.Real Dif. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	183
E.52.Real St. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung	184
E.53.Sim. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	185
E.54.Sim. Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	186
E.55.Sim. St. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	187
E.56.Sim. Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung	188
E.57.Sim. Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung	188
E.58.Sim. Störung Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung	189
E.59.Real Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	190
E.60.Real Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	191
E.61.Real Störung Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung	192
E.62.Real Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung	193
E.63.Real Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung	193
E.64.Real Störung Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung	194
E.65.Sim. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	195
E.66.Sim. Dif. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	196
E.67.Sim. Störung Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	196
E.68.Real Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	197
E.69.Real Dif. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	198
E.70.Real Störung Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	199
E.71.Sim. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren	200
E.72.Sim. Dif. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren	201
E.73.Sim. Störung ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren	202
E.74.Real Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	203
E.75.Real Dif. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	204
E.76.Real Störung Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3	205
E.77.Sim. IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	206
E.78.Sim. Dif. IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	207
E.79.Sim. Störung IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	208
E.80.Real IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	209
E.81.Real Dif. IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	210
E.82.Real Störung IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren	211

Teil I.

Anfang

1. Einführung

1.1. Einleitung

Beobachtersysteme sind eine gute Alternative bei Systemen, die eine Zustandsregelung erhalten sollen und bei denen nicht alle Systemzustandsgrößen bekannt sind. Ein Beobachtersystem ist eine virtuelle Nachbildung des realen Systems, welches parallel läuft. Die bekannten Systemzustandsgrößen, die meistens durch Sensorik aufgenommen werden, werden dem Beobachtersystem zugeführt und dadurch eventuelle Abweichungen abgeglichen. Dieses System kann natürlich nur erstellt werden, wenn die Anlagenparameter und die Systemgleichungen bekannt sind und somit auch die Wechselwirkungen der Zustandsgrößen aufeinander.

Warum könnten nicht alle Zustandsgrößen bekannt sein?

Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Es gibt Zustandsgrößen, die zu schwer oder gar nicht gemessen werden können. Manche Sensorik ist fest in der Anlage verbaut und nur dann auszuwechseln, wenn die ganze Anlage außer Betrieb genommen wird. Dies stört erheblich den Produktionsablauf und kann als Produktionspause gewertet werden, welches wiederum dem Unternehmen kein Geld einbringt. Kosten sind bei diesem Thema desöfteren der Grund. So wird Sensorik gespart, um die Anschaffungs- und Wartungskosten zu sparen. In manchen Fällen kann es natürlich auch vorkommen, dass ein Sensor in der Erstellung der Anlage einfach vergessen wurde. Hier kommen die Beobachtersysteme zum Einsatz, bei denen alle Zustandsgrößen jederzeit verfügbar sind.

Es geht auch ohne Sensoren?!

Nein, so ist es nicht. Das Beobachtersystem braucht einen Abgleich mit dem realen System, um eventuelle Differenzen auszugleichen, zum Beispiel unterschiedliche Startbedingungen oder falsche Parameter des nachgebildeten Systems. Auch ein Eingriff von außen, der kurzzeitig auf das System einwirkt, kann ohne Rückführung des realen auf das virtuelle Systems nicht registriert werden.

Wie sieht es mit Störungen aus?

Dies bringt uns zum Thema dieser Arbeit. In den folgenden Seiten wird ein Beobachter mit einem Störgrößenbeobachter verglichen. Das reale System hierfür ist ein Dreitankmodell, auf welches später noch einmal eingegangen wird. Liefert dieser Störgrößenbeobachter bessere Ergebnisse als der Beobachter? Wenn ja, liefert er diese bei beliebigen Störungen? Was ist zu beachten und wie skaliere ich das System? Hilft es, die Störung zu kennen und einzubauen? Diese Fragen werden in der folgenden Arbeit erläutert. In dieser Bachelorarbeit wird mit der Erstellung des Störgrößenbeobachters angefangen, er wird mathematisch beschrieben und zum Ende werden Versuchsreihen erstellt, um herauszufinden, ob seine Existenzberechtigung in den Lehrbüchern seine Richtigkeit hat.

1.2. Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist die Erstellung und Parametrierung eines Störgrößenbeobachters, der für eine Regelung und Störgrößenanalyse eines Dreitanksystems mit kontinuierlichem Zu- und Abfluss benutzt wird.

Dazu sind eine Anlagenbeschreibung und eine Zustandsdarstellung des Dreitankmodells zu fertigen.

In Anlehnung zum Luenberger-Beobachterentwurf ist eine Modellrückführung des Störgrößenbeobachters zum Integralregler vorzusehen.

Der Luenberger-Beobachter, der Störgrößenbeobachter und ein dritter, nichtlinearer Beobachter sind in der Simulation und am realen Modell miteinander zu vergleichen.

Das dritte, nichtlineare Beobachtermodell soll eine Erweiterung des Störgrößenbeobachters werden. Dieses Modell fünfter Ordnung nutzt die zwei weiteren Beobachterintegratoren, um die Störungen unter Berücksichtigung der Nichtlinearität nachzubilden. Ziel sind praxisnähere Ergebnisse.

Der Störgrößenbeobachter ist so zu entwickeln, dass dieser Störungen bestmöglich in seinem System rekonstruiert und das Dreitankmodell auch bei Störungsverhalten optimal geregelt werden kann.

Teil II.
Hauptteil

2. Anlagenbeschreibung



Abbildung 2.1.: Dreitankanlage

2.1. Anlagenteile

2.1.1. Wassertanks

Die Hauptbestandteile des Dreitanksystems sind die drei Wassertanks, in denen die Füllstände geregelt werden sollen. Sie haben die Form eines geometrischen Zylinders, in dem ein weiterer kleiner Zylinder enthalten ist. Dieser kleine Zylinder hat bei den beiden äußeren

Tanks oben zwei Löcher, die als Wasserzufuhr für den großen Zylinder dienen. Die Hülle der Behälter besteht aus dünnem Plexiglas, während die Hülle des inneren Zylinders und der Deckel aus Kunststoff besteht. Von außen ist eine Messskala angeklebt und so kann der Füllstand dank der Lichtdurchlässigkeit von außen immer leicht festgestellt werden. Als Ablauf und Verbindung zwischen den Tanks gibt es Ventile, die manuell betätigt werden müssen. Die Tanks haben außer der Befüllung und der Ventile keine Öffnungen. Dies ist für die Analyse sehr vorteilhaft, da somit kein Austausch mit der Umgebung stattfinden kann. Zur Füllstandsmessung sind auf dem Boden des Zylinders Drucksensoren installiert.

Die Tanks sind durchnummeriert. Von der Pumpenseite aus gesehen ist die Nummerierung Tank1, Tank3 und Tank2. Diese Nummerierung hat später bei der Zustandsraumüberführung Vorteile, da die externe Befüllung der Tanks durch die Pumpen nur im Tank1 und Tank2 geschieht. Alle Behälter haben einen Außendurchmesser von 14 cm und einen Innendurchmesser (der innere Zylinder) von 4 cm. Unter der Vernachlässigung des sehr dünnen Plexiglasses ergibt sich die Grundfläche:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2.1)$$

$$A_{Tank} = \pi \left(\frac{14 \text{ cm}}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{4 \text{ cm}}{2} \right)^2 = 141,372 \text{ cm}^2 \quad (2.2)$$

Mit Hilfe der Füllhöhe ist es ein Leichtes, das Volumen zu errechnen.

$$V = A \cdot h$$

2.1.2. Sensoren

Die Sensoren sollen die Wasserhöhe messen. Dies wird indirekt durch den Wasserdruck festgestellt. Dafür gibt es unten am Tank eine Leitung, die zum Sensor führt, so dass der gesamte Druck der Wassersäule auf den Sensor wirken kann. Um die richtigen Werte zu erhalten, wurden die Tanks befüllt und anschließend ein definierter Bereich entleert. In gleichmäßigen Abständen wurde dabei die Spannung gemessen. Um den jeweiligen Arbeitspunkt wurde bei der entstandenen Kennlinie eine Linearisierung vorgenommen.

2.1.3. Ventile

Die Anlage besitzt sechs Ventile, die manuell zu betätigen sind. Zwei Ventile verbinden die Tanks miteinander. Ventil HV13 verbindet Tank1 mit Tank3. Ventil HV32 verbindet Tank3 mit Tank2. Das Ventil HV2 ist für den kontinuierlichen Abfluss verantwortlich und befindet sich an Tank2. Diese drei Ventile sind während des Betriebs geöffnet. Jeder Tank besitzt ein

Ablassventil (Tank1: HV1, Tank3: HV3, Tank2: HV4), die in dieser Bachelorarbeit auch als Fehlerventile fungieren sollen.

2.1.4. Pumpen

Es gibt in dieser Anlage zwei Pumpen. Die erste Pumpe befüllt den Tank1. Die zweite Pumpe befüllt den Tank2. Wie die meisten Maschinen haben auch diese Pumpen keine lineare Kennlinie. Bei der Einstellung des Arbeitspunktes stellte sich dies als Herausforderung heraus. Durch die internen Integratoren des Systems und der nicht linearen Kennlinie veränderten sich die Füllstände bei jeder kleinsten Änderung stark und es war trotz des errechneten Arbeitspunktes und Linearisierung der Pumpenkennlinie in diesem Punkt nicht möglich, den Arbeitspunkt einzustellen, ohne starke Zeitverluste zu haben. Daraufhin wurde die Methode geändert und mit Hilfe von zwei PI-Reglern, die jeweils eine Pumpe regelten, konnten der Arbeitspunkt und zwei weitere Punkte für die Steigung um den Arbeitspunkt gefunden werden.

2.1.5. Verbindung zu Matlab/Simulink

Die Schnittstellen der Anlage (Sensorik und Aktorik) werden mit Hilfe einer Blackbox mit der I/O-Schnittstelle des Computers verbunden. Diese nutzt Matlab/Simulink, um die Signale in das eigene Modell einzubinden. So werden die Pumpen mit einer Spannung von -10 bis 10 Volt versorgt und die Sensoren liefern ebenfalls ein -10 bis 10 Volt Signal für die Regelung.

2.1.6. Störgrößenbeschreibung

Die für diese Bachelorarbeit benötigten Störungen werden, wie bei den Ventilen bereits erwähnt, durch die Ablassventile generiert. Durch sie entsteht ein weiterer Abfluss, der im normalen Betrieb nicht vorgesehen ist. Die Ventile haben, wenn sie komplett geöffnet werden, einen zu großen Durchfluss, welches die Pumpen nicht ausgleichen können. Daher werden diese gedrosselt, um brauchbare Ergebnisse zu erzielen. Das HV4-Ventil ist gedrosselt, weshalb dieses komplett geöffnet werden kann. Die Störgröße sollte annähernd die gleiche sein. Um die Größe der Störung zu ermitteln, wird ein Durchflusssensor beim Ventil eingesetzt. Dieser dient später als Vergleichsgröße für die Störsimulation.

2.1.7. Theoretische Störgröße

Aus dem nichtlinearen Modell (siehe später in [3.2](#)) werden die theoretischen Störgrößen ermittelt. Sie werden später zum Vergleich in den Messungen benötigt:

$$Z_{Tank1} = c_1 \sqrt{x_1 + 44cm} \quad (2.3)$$

$$Z_{Tank2} = c_4 \sqrt{x_2 + 22cm} \quad (2.4)$$

$$Z_{Tank3} = c_3 \sqrt{x_3 + 33cm} \quad (2.5)$$

Bilder der Anlage und der Aufbau der Störgrößenanalyse sind im Anhang [A](#) auf der CD.

2.2. Anlagenfunktion

Diese Anlage soll einen bestimmten Füllstandspegel halten, wodurch ein Volumen in den Tanks sichergestellt wird. Die Anlage hat beim letzten Tank (Tank2) einen kontinuierlichen Abfluss und benötigt daher einen Zufluss, der diesen Volumenstrom ausgleichen kann. Dies wird mit Hilfe von zwei Pumpen bewerkstelligt. Die erste Pumpe versorgt den ersten Tank (Tank1) und die zweite Pumpe versorgt Tank2. Die Zuflüsse werden mit q_1 und q_2 abgekürzt und der Abfluss mit q_{ab} . Ist das System eingeschwungen ($q_1 + q_2 = q_{ab}$ und die Füllstände ändern sich nicht mehr), befindet sich die Füllhöhe des mittleren Tanks (Tank3) genau zwischen den Füllhöhen von Tank1 und Tank2. Außerdem kann nun die Annahme getroffen werden, dass der Volumenstrom, der durch die Ventile HV13 und HV32 fließt, der gleiche ist wie der Zufluss q_1 . Vorher gibt es einen Austausch der drei Tanks über diese Ventile, der in beide Richtungen stattfinden kann. Sollte ein Störventil (HV1, HV2 und/oder HV4) geöffnet werden, so wird dort ein weiterer Abfluss entstehen und ist in die eben genannte Annahme mit einzubeziehen.

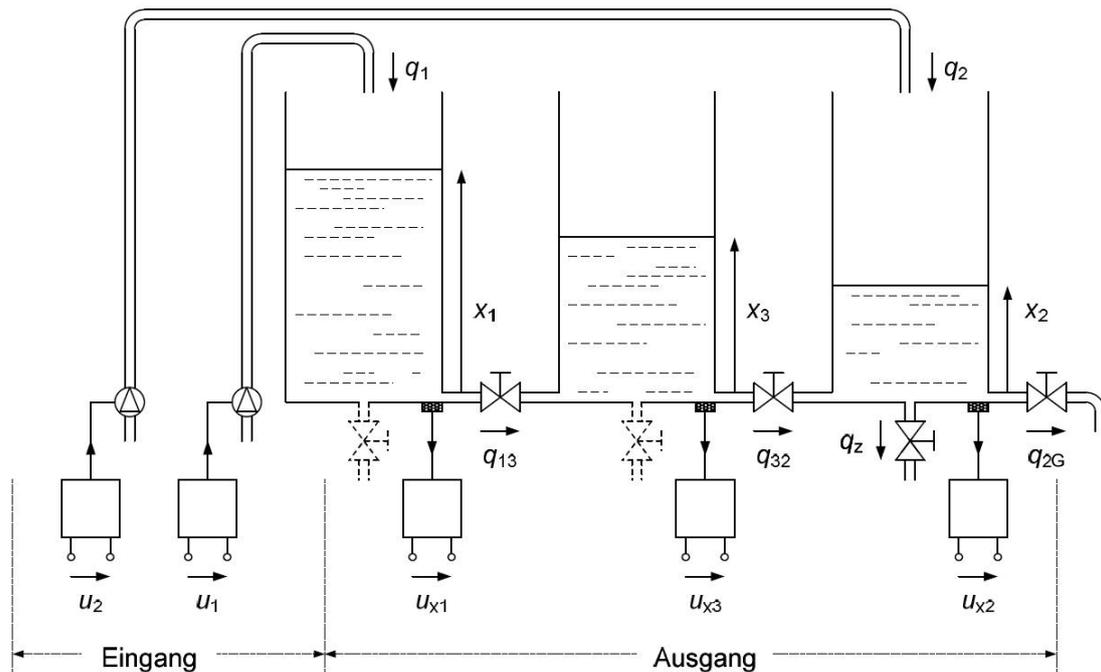


Fig. 1: Dreitanksystem

Abbildung 2.2.: Dreitankmodell^a

^aaus Claussen (2011a)

Um die genannten Parameter im Bild zu finden, ist eine kleine Übersetzung nötig:

$q_1 \hat{=} q_1$	$q_2 \hat{=} q_2$	$q_{ab} \hat{=} q_{2G}$
Tank1 mit Füllstand x_1	Tank3 mit Füllstand x_3	Tank2 mit Füllstand x_2
HV13 mit Durchfluss q_{13}	HV32 mit Durchfluss q_{32}	HV2 mit Durchfluss q_z
HV1: Ablassventil am Tank1		HV4: Ablassventil am Tank3

Dieses Modell ist ein Testobjekt, welches für unterschiedlichste Systeme dient. In der Natur kann es eine Kaskade oder Fischpass mit zwei Einmündungen (eine am Anfang, eine am Ende) darstellen. Veränderungen gibt es in der Natur genügend, so dass auch die Störventile ihre Funktion hier besitzen. In der Industrie könnte es ein drei Speichersystem in der Lebensmittelindustrie darstellen. Im ersten und zweiten Tank wird eine Flüssigkeit gepuffert und im letzten Tank eine weitere Flüssigkeiten hinzugefügt. Dies muss direkt verarbeitet werden und wird deshalb kontinuierlich abgelassen. Die drei Störventile würden dann zur Probenentnahme dienen oder auch allgemeine Störungen im System. Es gibt natürlich noch weitere Systeme, doch sollten diese an dieser Stelle reichen.

3. Zustandsraumüberführung

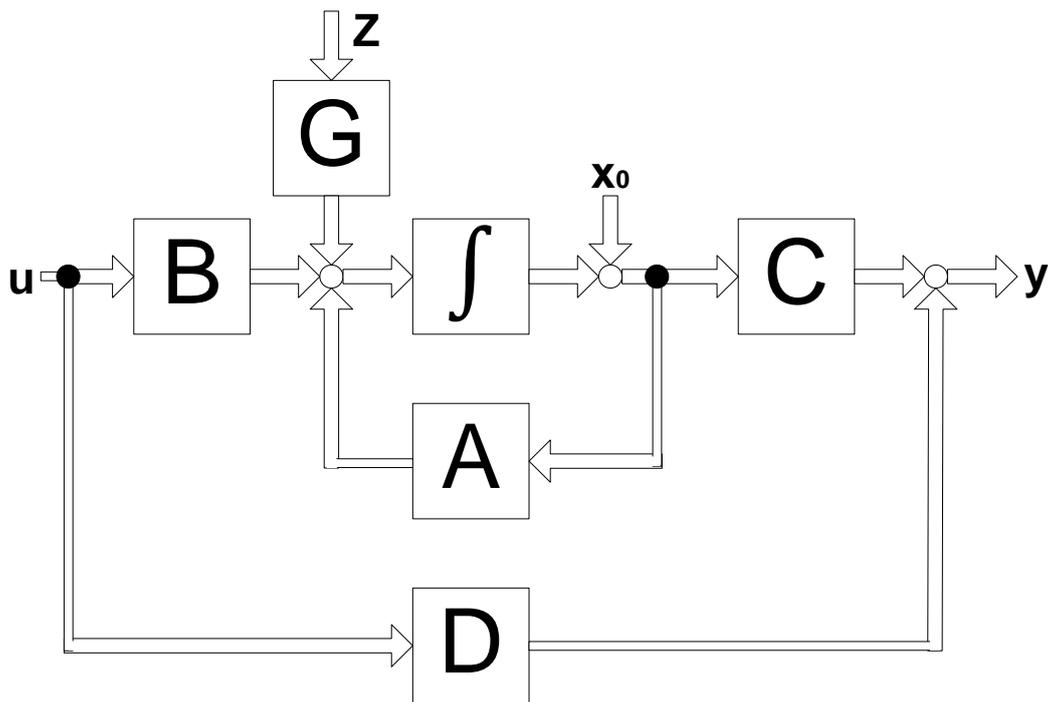


Abbildung 3.1.: Zustandsraumdarstellung^a

^aaus Steffenhagen (2010)

Um das System in den Zustandsraum zu überführen, muss dieses linear sein. Da dieses System nicht lineare Elemente (Betragsbildung, Multiplikation, ...) besitzt und somit nicht linear ist, wird um den Arbeitspunkt eine Linearisierung vorgenommen. Dies hat den Nachteil, dass die Anlage nur noch in der Nähe des Arbeitspunktes betrieben werden kann. Sollte davon abgewichen werden, werden die linearisierten Werte von den realen Werten immer weiter abweichen.

3.1. Nichtlineares Modell

Das System wurde unter physikalischen Aspekten analysiert und für das Verhalten wurden mehrere Formeln erstellt. Diese sind voneinander abhängig. Dadurch konnte ein Simulinkmodell erstellt werden:¹

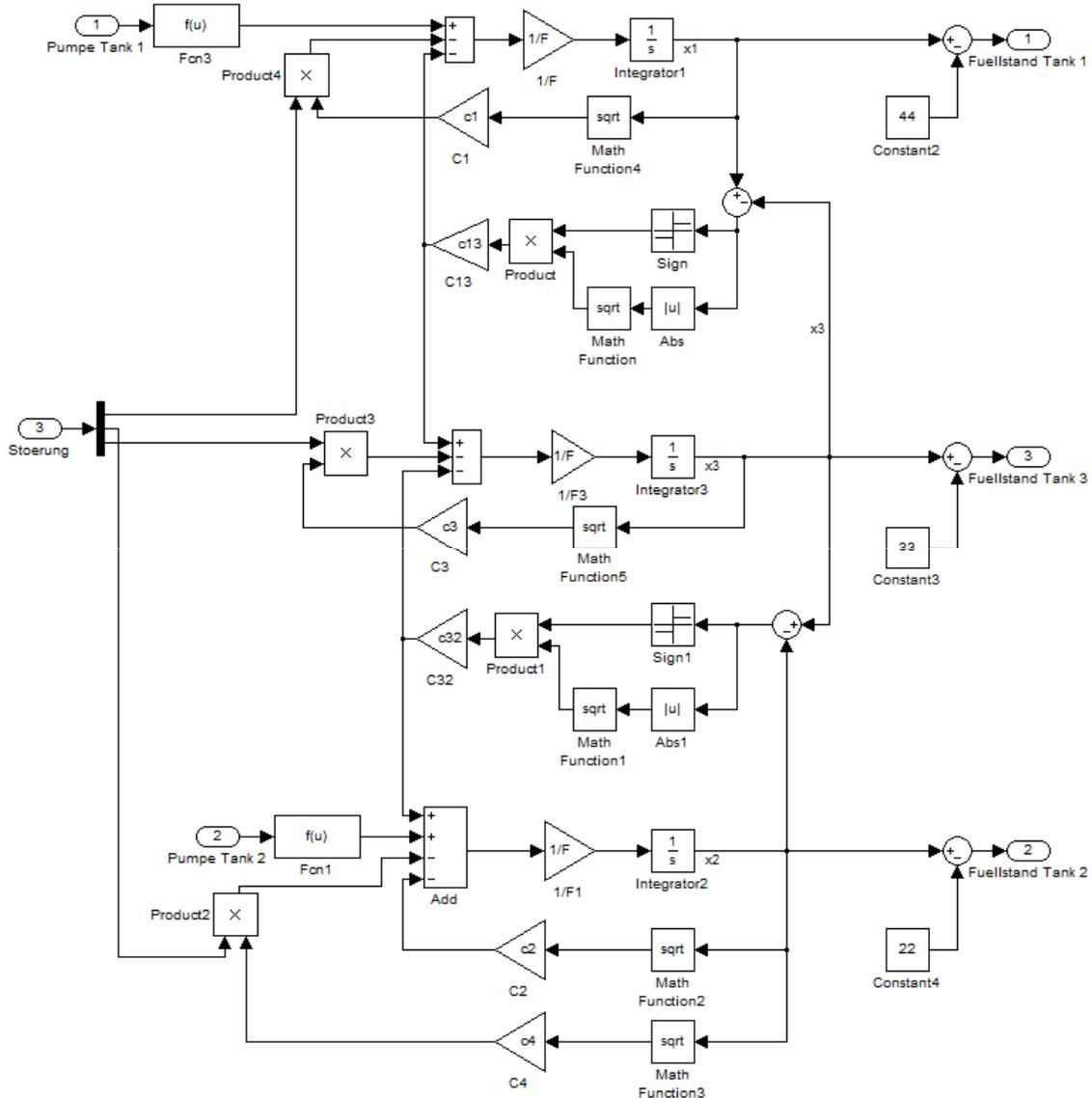


Abbildung 3.2.: Nichtlineares Modell

¹vgl. Schmidt u. a. (2012)

Dies entstand aus folgenden Gleichungen:

Flächengleichung des Tanks:

$$F = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (3.1)$$

Ausgangsvolumenstrom eines Tanks:

$$q_{AB} = c_{AB} \cdot \text{sign}(x_A - x_B) \cot \sqrt{|x_A - x_B|} \quad (3.2)$$

Die Zustände und Ausgänge des Systems werden durch 3.1 und 3.2 beschrieben:

$$\begin{aligned} x_1 &= \int \frac{(q_1 - q_{13}) dt}{F} \\ \dot{x}_1 &= \frac{q_1 - q_{13}}{F} \\ \dot{x}_1 &= \frac{q_1 - c_{13} \cdot \text{sign}(x_1 - x_3) \cdot \sqrt{|x_1 - x_3|}}{F} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= \int \frac{(q_{32} + q_2 - q_{2G}) dt}{F} \\ \dot{x}_2 &= \frac{q_{32} + q_2 - q_{2G}}{F} \\ \dot{x}_2 &= \frac{c_{32} \cdot \text{sign}(x_3 - x_2) \cdot \sqrt{|x_3 - x_2|} + q_2 - c_2 \cdot \sqrt{x_2}}{F} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} x_3 &= \int \frac{(q_{13} - q_{32}) dt}{F} \\ \dot{x}_3 &= \frac{q_{13} - q_{32}}{F} \\ \dot{x}_3 &= \frac{c_{13} \cdot \text{sign}(x_1 - x_3) \cdot \sqrt{|x_1 - x_3|} - c_{32} \cdot \text{sign}(x_3 - x_2) \cdot \sqrt{|x_3 - x_2|}}{F} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$y_1 = x_1 \quad (3.6)$$

$$y_2 = x_2 \quad (3.7)$$

3.2. Linearisierung

Die Linearisierung wird um den Arbeitspunkt durchgeführt. Bei einem eingeschwingenen System sind die Systemgrößen stabil und es gibt keine Änderungen:²

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 = 0 &= \frac{q_1 - c_{13} \cdot \text{sign}(x_1 - x_3) \cdot \sqrt{|x_1 - x_3|}}{F} \\ \dot{x}_2 = 0 &= \frac{c_{32} \cdot \text{sign}(x_3 - x_2) \cdot \sqrt{|x_3 - x_2|} + q_2 - c_2 \cdot \sqrt{x_2}}{F} \\ \dot{x}_3 = 0 &= \frac{c_{13} \cdot \text{sign}(x_1 - x_3) \cdot \sqrt{|x_1 - x_3|} - c_{32} \cdot \text{sign}(x_3 - x_2) \cdot \sqrt{|x_3 - x_2|}}{F}\end{aligned}$$

Für diese Anlage wird der Arbeitspunkt in Tank1 auf 44 cm und Tank2 auf 22 cm gesetzt. Durch diese zwei Werte können die übrigen, nicht gemessenen Werte errechnet werden:

$$x_{10} = 44 \text{ cm} \quad x_{20} = 22 \text{ cm} \quad c_{13} = c_{32} = c_{2G} = 10.38937 \frac{\text{cm}^3}{\text{sec} \sqrt{\text{cm}}}$$

x_{30} :

$$\begin{aligned}0 &= c_{13} \sqrt{x_{10} - x_{30}} - c_{32} \sqrt{x_{30} - x_{20}} \\ c_{32} \sqrt{x_{30} - x_{20}} &= c_{13} \sqrt{x_{10} - x_{30}} \\ x_{30} &= \frac{c_{13}^2 \cdot x_{10} + c_{32}^2 \cdot x_{20}}{c_{13}^2 + c_{32}^2} = 33 \text{ cm}\end{aligned} \quad (3.8)$$

q_{10} :

$$\begin{aligned}q_{10} &= c_{13} \text{sign}(x_{10} - x_{30}) \sqrt{x_{10} - x_{30}} \\ q_{10} &\approx 34.46 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}\end{aligned} \quad (3.9)$$

q_{20} :

$$\begin{aligned}q_{20} &= c_{32} \cdot \text{sign}(x_{30} - x_{20}) \cdot \sqrt{x_{30} - x_{20}} + c_2 \cdot \sqrt{x_{20}} \\ q_{20} &\approx 109.92 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}\end{aligned} \quad (3.10)$$

Für die Systemlinearisierung werden die Zustandsgleichungen nach ihren Unbekannten abgeleitet. Dies wird mit Hilfe der Taylor-Reihe bewerkstelligt. Für die Zustandsmatrix werden

²vgl. Schmidt u. a. (2012)

die Zustandsgleichungen nach den Füllstandarbeitspunkten und die Steuermatrix nach den Zuflussarbeitspunkten abgeleitet. Für die Beobachtermatrix werden die Ausgangsgleichungen nach den Füllstandarbeitspunkten und die Durchschaltmatrix nach den Zuflussarbeitspunkten abgeleitet:³

$$\dot{x}(t) = 0 = f(x_0, u_0) \quad y_0 = g(x_0, u_0)$$

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x_0, u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}_{x=x_0, u=u_0}$$

$$B = \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)_{x_0, u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \end{bmatrix}_{x=x_0, u=u_0}$$

$$C = \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)_{x_0, u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} \end{bmatrix}_{x=x_0, u=u_0}$$

$$D = \left(\frac{\partial g}{\partial u} \right)_{x_0, u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \frac{\partial g_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial u_1} & \frac{\partial g_2}{\partial u_2} \end{bmatrix}_{x=x_0, u=u_0}$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{10}}{\Delta x_{10}} = \frac{1}{F} (q_1 - c_{13} \sqrt{x_{10} - x_{30}}) = -\frac{c_{13}}{2 \cdot F \sqrt{x_{10} - x_{30}}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{10}}{\Delta x_{20}} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{10}}{\Delta x_{30}} = \frac{c_{13}}{2 \cdot F \sqrt{x_{10} - x_{30}}} \quad (3.13)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{10}}{\Delta q_{10}} = \frac{1}{F} \quad (3.14)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{10}}{\Delta q_{20}} = 0 \quad (3.15)$$

³vgl. Claussen (2011b) und Schmidt u. a. (2012)

$$\frac{\Delta \dot{x}_{20}}{\Delta x_{10}} = \frac{1}{F} (c_{32} \sqrt{x_{30} - x_{20}} + q_2 - x_{2G} \sqrt{x_{20}}) = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{20}}{\Delta x_{20}} = \frac{c_{32}}{2 \cdot F \sqrt{x_{30} - x_{20}}} - \frac{c_2}{2 \cdot F \sqrt{x_{20}}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{20}}{\Delta x_{30}} = -\frac{c_{32}}{2 \cdot F \sqrt{x_{30} - x_{20}}} \quad (3.18)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{20}}{\Delta q_{10}} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{20}}{\Delta q_{20}} = \frac{1}{F} \quad (3.20)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{30}}{\Delta x_{10}} = \frac{1}{F} (c_{13} \sqrt{x_{10} - x_{30}} - c_{32} \sqrt{x_{30} - x_{20}}) = \frac{c_{32}}{2 \cdot \sqrt{x_{10} - x_{30}}} \quad (3.21)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{30}}{\Delta x_{20}} = -\frac{c_{32}}{2 \cdot F \sqrt{x_{30} - x_{20}}} \quad (3.22)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{30}}{\Delta x_{30}} = -\frac{c_{13}}{2 \cdot F \sqrt{x_{10} - x_{30}}} - \frac{c_{32}}{2 \cdot F \sqrt{x_{30} - x_{20}}} \quad (3.23)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{30}}{\Delta q_{10}} = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{\Delta \dot{x}_{30}}{\Delta q_{20}} = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{y_{10}}{x_{10}} = x_1 = 1 \quad (3.26)$$

$$\frac{y_{10}}{x_{20}} = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{y_{10}}{x_{30}} = 0 \quad (3.28)$$

$$\frac{y_{10}}{q_{10}} = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{y_{10}}{q_{20}} = 0 \quad (3.30)$$

$$(3.31)$$

$$\frac{y_{20}}{x_{10}} = x_2 = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{y_{20}}{x_{20}} = 1 \quad (3.33)$$

$$\frac{y_{20}}{x_{30}} = 0 \quad (3.34)$$

$$\frac{y_{20}}{q_{10}} = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{y_{20}}{q_{20}} = 0 \quad (3.36)$$

$$(3.37)$$

Auffällig ist die Wiederholung der Ergebnisse. Um das Verfahren zu vereinfachen, werden die Ergebnisse zusammengefasst:

$$K_1 = \frac{c_{13}}{2 \cdot F \sqrt{x_{10} - x_{30}}} \quad (3.38)$$

$$K_2 = \frac{c_{32}}{2 \cdot F \sqrt{x_{30} - x_{20}}} \quad (3.39)$$

$$K_3 = \frac{c_2}{2 \cdot F \sqrt{x_{30}}} \quad (3.40)$$

und in die Matrizen eingesetzt:

$$A = \begin{bmatrix} -K_1(3.11) & 0(3.12) & K_1(3.13) \\ 0(3.16) & -K_2 - K_3(3.17) & K_2(3.18) \\ K_1(3.21) & K_2(3.22) & -K_1 - K_2(3.23) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{F}(3.14) & 0(3.15) \\ 0(3.19) & \frac{1}{F}(3.20) \\ 0(3.24) & 0(3.25) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1(3.26) & 0(3.27) & 0(3.28) \\ 0(3.32) & 1(3.33) & 0(3.34) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0(3.29) & 0(3.30) \\ 0(3.35) & 0(3.36) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

3.3. Definitionen

In der Literatur werden viele Matrizen und Vektoren unterschiedlich benannt. Um hier bei einer einheitlichen Struktur zu bleiben, werden diese hier noch einmal benannt:

Die Form und Struktur wurden von dem Buch "Kleine Formelsammlung Regelungstechnik" übernommen und ergänzt ⁴:

Zustandsvektor $\vec{x}(t)$: (n,1)

$$\vec{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

Eingangsgrößenvektor $\vec{u}(t)$: (m,1)

$$\vec{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix}$$

Ausgangsgrößenvektor $\vec{y}(t)$: (r,1)

$$\vec{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_r(t) \end{bmatrix}$$

Störgrößenvektor $\vec{z}(t)$: (q,1)

$$\vec{z}(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \vdots \\ z_q(t) \end{bmatrix}$$

Systemmatrix A : (n,n)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Eingangsmatrix B : (n,m)
(Steuermatrix)

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix}$$

Ausgangsmatrix C : (r,n)
(Beobachtermatrix)

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{r1} & c_{r2} & \dots & c_{rn} \end{bmatrix}$$

Durchgangsmatrix D : (r,m)

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{r1} & d_{r2} & \dots & d_{rm} \end{bmatrix}$$

⁴vgl. Steffenhagen (2010)

Störmatrix \mathbf{G} : (n,q)

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1q} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nq} \end{bmatrix}$$

Anfangsbedingungsvektor \vec{x}_0 : (n,1)

$$\vec{x}(0) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Vorfiltermatrix \mathbf{V} : (m,m)
(Unterschied Zustandsregler \mathbf{V}_R)

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mm} \end{bmatrix}$$

(Zustands)Rückführmatrix \mathbf{R} : (m,n)
(Unterschied Integralregler \mathbf{R}_I)

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

Ausgangsrückführmatrix \mathbf{K}_I : (m,r)

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1r} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \dots & k_{mr} \end{bmatrix}$$

Beobachtermatrix \mathbf{L} : (n,r)
(Unterschied Störgrößenbeobachter \mathbf{L}_s)

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1r} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nr} \end{bmatrix}$$

Störgrößenbeobachtermatrix \mathbf{L}_z : (m,r)

$$\mathbf{L}_z = \begin{bmatrix} l_{z11} & l_{z12} & \dots & l_{z1r} \\ l_{z21} & l_{z22} & \dots & l_{z2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{zn1} & l_{zn2} & \dots & l_{znr} \end{bmatrix}$$

Zusätzlich werden alle Vektoren den Beobachtermodellen mit einem $\hat{\cdot}$ und alle Differenzgrößen mit einem $\tilde{\cdot}$ über dem Buchstaben ergänzt.

4. Störgrößenbeobachter

Der Störgrößenbeobachter ist eine Erweiterung des Beobachters im Zustandsraum. Neben der L-Matrix gibt es nun auch einen zweiten Zweig, der die Differenz der Ausgänge beider Systeme nutzt. Während das Beobachtersystem diese Differenz nutzt, um seine Zustände zu aktualisieren, auf Grund von unterschiedlichen Anfangszuständen oder zeitlich verschiedenem Verhalten zum realen System, hat der Störgrößenbeobachter weitere interessante Aspekte. So kann er bei Störungen im realen System und deren Auswirkungen auf die Ausgänge (die gemessenen Zustände), diese Dank eines Integrators im zweiten Zweig ausgleichen. Auch ist er genauer, da er bei richtiger Parametrierung die Zustände des Beobachtersystems den gemessenen Werten exakt angleicht. So gleicht er auch Ungenauigkeiten im Beobachtersystem aus, indem er die Eingangsgrößen verändert.

4.1. Unterschied Störgrößenbeobachter zu Luenberger Beobachter

Der Störgrößenbeobachter soll genauer sein, als der Beobachter. Für so etwas wird in der Regelungstechnik üblicherweise ein Integrator benutzt. Dies ist auch hier der Fall. Der Grundgedanke und die Grundstruktur bleibt dieselbe wie beim Beobachtersystem. Es existiert neben dem zu regelnden System noch eine Rechnersimulation, die mit den gleichen Führungsgrößen gesteuert oder geregelt wird. Die L-Matrix existiert weiterhin und gleicht die beiden Systeme einander an mit Hilfe der Ausgangsdifferenzen der beiden Ausgangsgrößen. Neu hinzu kommt der zweite Zweig, der, wie oben schon erwähnt, auch diese Differenz nutzt. Der zweite Zweig führt über eine neue Matrix 'Lz' und einem Integrator zu einer Additionsstelle zur Eingangsgröße 'u(t)'. Die Summe beider Größen wird dann in das Simulationssystem eingespeist. Dadurch entsteht eine neue Führungsgröße.

In der Regelungstechnik wird oft eine Störung als konstant angenommen, um leichter das Verhalten des Systems zu analysieren. Verschwindet die Ausgangsdifferenz, ist der Eingang des neuen Integrators null und der Ausgang liefert ein konstantes Signal. Dies soll die Störung simulieren, die auf das System einwirkt.

4.2. Beobachterentwurf

So wie der Vorfilter neu berechnet werden sollte, wenn das System einen Regler bekommt, so sollte auch die L-Matrix neu berechnet werden, um gute Ergebnisse zu erzielen. Doch wie kann dies bewerkstelligt werden?

Beim Beobachterentwurf wird in den Literaturen oft die Dualität zum Zustandsreglerentwurf erwähnt. Bei der Suche nach einem ähnlichen Reglersystem zum Störgrößenbeobachter fällt schnell der Integralregler auf. Beide besitzen einen weiteren Integrator und haben die Form des Zustandsreglers bzw. des Beobachters in ihrem Aufbau eingeschlossen.

Doch zuerst die Ansätze für den Beobachterentwurf:

Ansätze und Ergebnisse sind aus dem Skript von Prof. Dr.-Ing. Ulf Claussen "State-Space Control":¹

Zustandsreglerentwurf:

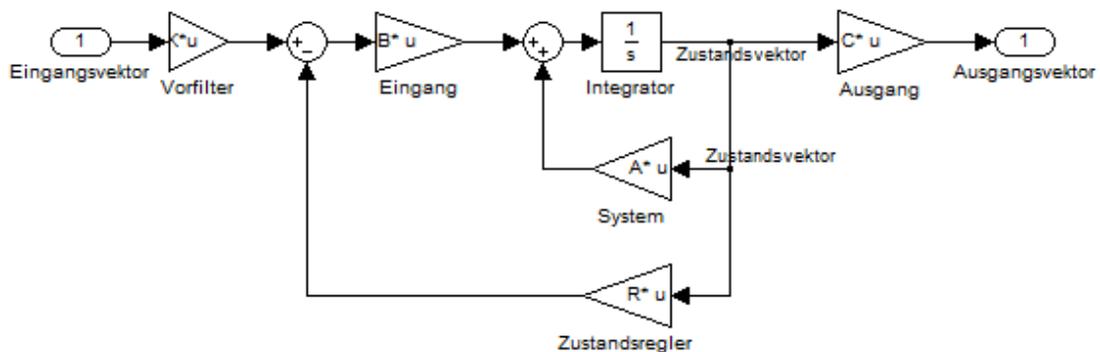


Abbildung 4.1.: Zustandsregler

Aus dem Aufbau werden die Zustandsgleichungen entnommen:

$$\dot{\vec{x}}(t) = (A - BK) \cdot \vec{x}(t) + NB \cdot \vec{u}(t) \quad (4.1)$$

$$\vec{y}(t) = C \cdot \vec{x}(t) + 0 \cdot \vec{u}(t) \quad (4.2)$$

Jeder Regler beeinflusst die Polstellen des Systems, um dieses stabil und schnell zu machen. Regelungstechnikern ist bekannt, dass in der Zustandsregelung die Determinante der

¹vgl. Claussen (2011b)

Zustandsmatrix der Nenner der Übertragungsfunktion ist. Der Nenner der Übertragungsfunktion beinhaltet die Polstellen.

Als Laplace-Transformierte

$$s\vec{X}(s) = (A - BK) \cdot \vec{X}(s) + NB \cdot \vec{U}(s) \quad (4.3)$$

$$\vec{Y}(s) = C \cdot \vec{X}(s) \quad (4.4)$$

Ausklammerung von $\vec{X}(s)$

$$(sI - (A - BK))\vec{X}(s) = NB \cdot \vec{U}(s)$$

$$(sI - A + BK)\vec{X}(s) = NB \cdot \vec{U}(s)$$

↓

$$\vec{X}(s) = (sI - A + BK)^{-1}NB \cdot \vec{U}(s) \quad (4.5)$$

Eingesetzt in $\vec{Y}(s)$

$$\vec{Y}(s) = C(sI - A + BK)^{-1}NB \cdot \vec{U}(s)$$

$$G(s) = \frac{\vec{Y}(s)}{\vec{U}(s)} = C(sI - A + BK)^{-1}NB \quad (4.6)$$

Die Inverse einer Matrix kann durch ihre Determinante und Adjunkte dargestellt werden:
 $A^{-1} = \frac{1}{\det(A)}adj(A)$

$$G(s) = C \left(\frac{1}{\det(sI - A + BK)} adj(sI - A + BK) \right) NB$$

Der Nenner kann, da die anderen Matrizen ihn nicht beeinflussen, nach vorne gestellt werden.

$$G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)} = \frac{1}{\det(sI - A + BK)} C adj(sI - A + BK) NB$$

$$Z(s) = C adj(sI - A + BK) NB \quad (4.7)$$

$$N(s) = \det(sI - A + BK) \quad (4.8)$$

Der Nenner kann nun den Bedürfnissen angepasst werden. Dies passiert über die K-Matrix, da alle anderen Matrizen feste Parameter des Systems sind. Üblich ist es, einen Vorfilter für das System zu schaffen, um die gewünschten Führungsgrößen direkt eingeben zu können. Zum Beispiel eine Füllstandserhöhung um zwei Zentimeter mit '2' in das System geben zu können. Durch diese Bedingung ist Eingangsgröße gleich Ausgangsgröße. Dies ist nur der

Fall wenn die Übertragungsfunktion den Wert 1 hat.

$$\begin{aligned} G(s) = 1 &= C(sI - A + BK)^{-1}NB \cdot V \\ (C(sI - A + BK)^{-1}NB)^{-1} \cdot 1 &= V \\ V &= (C(sI - A + BK)^{-1}NB)^{-1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Kurz zusammen gefasst ist der Vorfilter V die inverse Übertragungsfunktion. Der Quellcode für den Zustandsregler/Vorfilter ist im Anhang unter **B** Zustandsregler/Vorfilter zu finden.

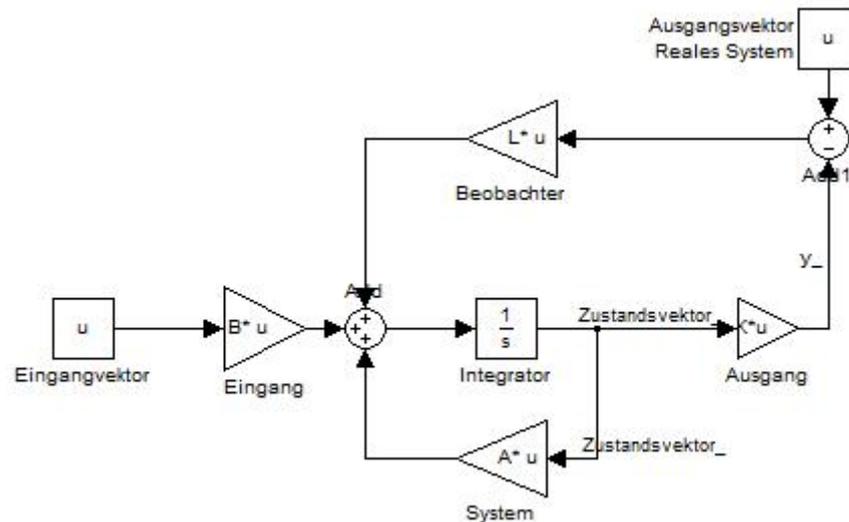
Beobachterentwurf:

Abbildung 4.2.: Beobachter

Ansätze und Ergebnisse sind aus dem Skript von Prof. Dr.-Ing. Ulf Claussen "State-Space Control".²

Aus dem Aufbau werden die Zustandsgleichungen entnommen:

$$\dot{\vec{\hat{x}}}(t) = (A - LC) \cdot \vec{\hat{x}}(t) + B \cdot \vec{u}(t) + L \cdot \vec{y}(t) \quad (4.10)$$

$$\vec{\hat{y}}(t) = C \cdot \vec{\hat{x}}(t) + 0 \cdot \vec{u}(t) \quad (4.11)$$

Aus dem zu beobachtenden System entstehen diese Formeln:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) + B \cdot \vec{u}(t) \quad (4.12)$$

$$\vec{y}(t) = C \cdot \vec{x}(t) + 0 \cdot \vec{u}(t) \quad (4.13)$$

Da die Beobachtermatrix nur bei einer Differenz von Nöten ist, wird ein "X-Differenz" eingeführt:

$$\vec{\tilde{x}}(t) = \vec{\hat{x}}(t) - \vec{x}(t) \quad (4.14)$$

$$\dot{\vec{\tilde{x}}}(t) = (A - LC) \cdot \vec{\tilde{x}}(t) + B \cdot \vec{u}(t) + L \cdot \vec{y}(t) - (A \cdot \vec{x}(t) + B \cdot \vec{u}(t)) \quad (4.15)$$

$$\vec{\hat{y}}(t) = C \cdot \vec{\tilde{x}}(t)$$

$$\vec{y}(t) = C \cdot \vec{x}(t)$$

²vgl. Claussen (2011b)

Einsetzen von $\vec{y}(t)$:

$$\begin{aligned}
 \dot{\vec{x}}(t) &= (A - LC) \cdot \vec{x}(t) + B \cdot \vec{u}(t) + LC \cdot \vec{x}(t) - A \cdot \vec{x}(t) - B \cdot \vec{u}(t) \\
 \dot{\vec{x}}(t) &= (A - LC) \cdot \vec{x}(t) + LC \cdot \vec{x}(t) - A \cdot \vec{x}(t) \\
 \dot{\vec{x}}(t) &= (A - LC) \cdot \vec{x}(t) + (LC - A) \cdot \vec{x}(t) \\
 \dot{\vec{x}}(t) &= (A - LC) \cdot \vec{x}(t) - (A - LC) \cdot \vec{x}(t) \\
 \dot{\vec{x}}(t) &= (A - LC) \cdot (\vec{x}(t) - \vec{x}(t)) \\
 \dot{\vec{x}}(t) &= (A - LC) \cdot \vec{x}(t)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Laplace-Transformierte:

$$s\vec{X}(s) = (A - LC) \cdot \vec{X}(s) \tag{4.17}$$

Dies ist ein System ohne Eingangssignale, welches unabhängig von den Anfangsbedingungen seine Zustände zu Null werden lässt. Dies gilt, wenn die Polstellen des Systems einen negativen Realanteil haben.

Hierbei ist gut zu erkennen, dass bei einem Beobachtersystem nur Differenzen als Zustandsgrößen interessieren. Der Regelvorgang kann als Differenzenausregelung bezeichnet werden und ist bei jedem Beobachtersystem vorhanden.

Beim Zustandsreglerentwurf wird nur die 'Reglerzustandsmatrix' benutzt, um die Polstellen zu bestimmen:

aus (4.3):

$$s\vec{X}(s) = (A - BK) \cdot \vec{X}(s) + NB \cdot \vec{U}(s) \hat{=} A_{ZR} \cdot \vec{X}(s) + B_{ZR} \cdot \vec{U}(s) \tag{4.18}$$

$$s\vec{X}(s) = (A - LC) \cdot \vec{X}(s) \hat{=} A_L \cdot \vec{X}(s) \tag{4.19}$$

$$A_{ZR} = A - BK \tag{4.20}$$

$$A_L = A - LC \tag{4.21}$$

Wie gut zu sehen ist, haben beide Systeme ähnliche Zustandsgleichungen. Das ermöglicht eine Polstellenbestimmung wie unter (4.8):

$$\begin{aligned}
 N_{ZR}(s) &= \det(sI - A_{ZR}) \\
 N_L(s) &= \det(sI - A_L) = \det(sI - A + LC)
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Die Polstellen können durch die L-Matrix beliebig verändert werden. Jede andere Matrize ist, wie beim Zustandsregler, durch das System schon festgelegt.

Leicht zu erkennen ist, dass die Bestimmung der Nennerpolynome beim Zustandsregler und beim Beobachter nach diesem Prinzip gleich ablaufen. Der einzige Unterschied ist die Addition mit BK oder LC. Um die Bestimmung von L und K identisch ablaufen zu lassen, muss das L in A_L von rechts an das C multipliziert werden. Dies wird erreicht, indem die Transponierte von A_L benutzt wird. Ausgehend von (4.21):

$$\begin{aligned} A_L^T &= (A - LC)^T \\ A_L^T &= A^T - C^T L^T \end{aligned} \quad (4.23)$$

Im Vergleich von (4.20) und (4.23) stehen alle bekannten und zu bestimmenden Matrizen an der gleichen Stelle. Die Dualität des Beobachters und Zustandsreglers wird in dem Skript von Prof. Dr.-Ing. Ch. Ament zu Systemtheorie als Tabelle nebeneinander aufgezeigt. Ein Ausschnitt der Skriptes, der die hierfür relevanten Teile der Tabelle enthält, ist auf der nächsten Seite abgebildet.

Der Quellcode für den Beobachter ist im Anhang unter **B** Beobachter zu finden.

Dualität von Regler- und Beobachterentwurf

	Regler	Beobachter
Dualität	In den Gleichungen kann formal ausgetauscht werden: $\underline{A} \leftrightarrow \underline{A}^T, \underline{B} \leftrightarrow \underline{C}^T, \underline{K} \leftrightarrow \underline{H}^T$	
Voraus.	Das System muss steuerbar sein.	
Entwurf durch Eigenwertvorgabe	Bestimmung der Zustandsrückführung \underline{K} : $\det(s \underline{I} - \underline{A} + \underline{B} \underline{K}) = (s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot \dots \cdot (s - s_n)$ Entwurfsparameter sind die Eigenwerte s_1, \dots, s_n : <ul style="list-style-type: none"> • s_j in der linken komplexen Ebene (Stabilität) • s_j nach links schieben: System schneller • s_j zu weit links: Stellgrößen werden größer und sind nicht mehr realisierbar K=pPlace(A, B, [s1 s2 ...])	Das System muss beobachtbar sein. Bestimmung der Beobachtermatrix \underline{H} : $\det(s \underline{I} - \underline{A} + \underline{H} \underline{C}) = (s - s_{b1}) \cdot (s - s_{b2}) \cdot \dots \cdot (s - s_{bn})$ Entwurfsparameter sind die Eigenwerte s_{b1}, \dots, s_{bn} : <ul style="list-style-type: none"> • s_{bj} in der linken komplexen Ebene (Stabilität) • s_{bj} links der Eigenwerte des geregelten Systems, damit der Beobachter schneller ist als die Regelung • s_{bj} nicht zu weit links, sonst reagiert Beobachter „nervös“ auf Störungen H=(place(A', C', [sb1 sb2 ...]))'
Matlab		
Vorfilter	Vorfiltermatrix: $\underline{S} = -[\underline{C}(\underline{A} - \underline{B} \underline{K})^{-1} \underline{B}]^{-1}$	

Abbildung 4.3.: BeobachterZustandsreglervergleich^a

^aaus Ament (2012)

4.3. Integralreglerentwurf

Um konkrete Werte für den Störgrößenbeobachter zu bekommen, wird hier eine Parametrierungsart wie beim Beobachterentwurf vorgestellt. Wie dort bereits erwähnt, wird ein Vergleich mit dem Integralregler hergestellt.

Ansätze und Ergebnisse sind aus dem Skript von Prof. Dr.-Ing. Ulf Claussen "State-Space Control"³.

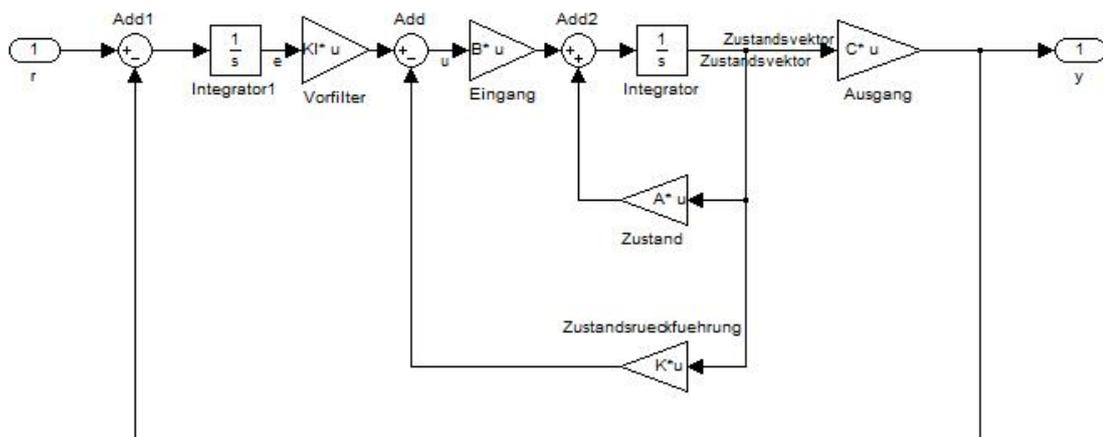


Abbildung 4.4.: Integralregler

Aus dem Aufbau werden die Zustands- und Eingangsgleichungen entnommen:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) + B \cdot \vec{u}(t) \quad (4.24)$$

$$\dot{e}(t) = -C \cdot \vec{x}(t) + 1 \cdot \vec{r}(t) \quad (4.25)$$

$$\vec{y}(t) = C \cdot \vec{x}(t) + 0 \cdot \vec{u}(t) \quad (4.26)$$

$$\vec{u}(t) = -K \cdot \vec{x}(t) + KI \cdot \vec{e}(t) \quad (4.27)$$

Um die Zustandsgleichung (4.24) zu erweitern, wird die Eingangsgleichung (4.27) eingesetzt:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) + B \cdot (-K \cdot \vec{x}(t) + KI \cdot \vec{e}(t))$$

$$\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) - BK \cdot \vec{x}(t) + BKI \cdot \vec{e}(t)$$

$$\dot{\vec{x}}(t) = (A - BK) \cdot \vec{x}(t) + BKI \cdot \vec{e}(t) \quad (4.28)$$

³vgl. Claussen (2011b)

Um die Parametrierung später zu vereinfachen, wird ein neuer Zustandsvektor erstellt:

$$\vec{x}_e(t) = \begin{bmatrix} \vec{x}(t) \\ \vec{e}(t) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Dies verändert natürlich auch die Zustandsgleichungen:

(4.24) und (4.25):

$$\begin{aligned} \dot{\vec{x}}_e(t) &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \vec{x}_e(t) + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \vec{u}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \vec{r}(t) \\ \dot{\vec{x}}_e(t) &= A_e \vec{x}_e(t) + B_e \vec{u}(t) + F_e \vec{r}(t) \end{aligned} \quad (4.30)$$

(4.26):

$$\begin{aligned} \vec{y}(t) &= \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{x}_e(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{u}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{r}(t) \\ \vec{y}(t) &= C_e \cdot \vec{x}_e(t) \end{aligned} \quad (4.31)$$

(4.27):

$$\begin{aligned} \vec{u}(t) &= \begin{bmatrix} -K & KI \end{bmatrix} \cdot \vec{x}_e(t) \\ \vec{u}(t) &= -K_e \cdot \vec{x}_e(t) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Aus der Laplace-Transformierten lässt sich nun wie beim Zustandsregler die Übertragungsfunktion bilden:

Laplace-Transformierte:

$$s\vec{X}_e(s) = A_e \cdot \vec{X}_e(s) + B_e \cdot \vec{U}(s) + F_e \cdot \vec{R}(s) \quad (4.33)$$

$$\vec{Y}(s) = C_e \cdot \vec{X}_e(s) \quad (4.34)$$

$$\vec{U}(s) = -K_e \cdot \vec{X}_e(s) \quad (4.35)$$

(4.35) in (4.33) eingesetzt:

$$\begin{aligned} s\vec{X}_e(s) &= A_e \cdot \vec{X}_e(s) - B_e K_e \cdot \vec{X}_e(s) + F_e \cdot \vec{R}(s) \\ s\vec{X}_e(s) &= (A_e - B_e K_e) \cdot \vec{X}_e(s) + F_e \cdot \vec{R}(s) \quad (4.36) \\ s\vec{X}_e(s) - (A_e - B_e K_e) \cdot \vec{X}_e(s) &= F_e \cdot \vec{R}(s) \\ (sI - (A_e - B_e K_e))\vec{X}_e(s) &= F_e \cdot \vec{R}(s) \end{aligned}$$

$$\vec{X}_e(s) = (sI - A_e + B_e K_e)^{-1} F_e \cdot \vec{R}(s) \quad (4.37)$$

$$(C_e)^{-1} \vec{Y}(s) = \vec{X}_e(s) \quad (4.38)$$

(4.38) in (4.37) eingesetzt:

$$\begin{aligned} (C_e)^{-1} \vec{Y}(s) &= (sI - A_e + B_e K_e)^{-1} F_e \cdot \vec{R}(s) \\ G_e(s) = \frac{\vec{Y}(s)}{\vec{R}(s)} &= C_e (sI - A_e + B_e K_e)^{-1} F_e \cdot \vec{R}(s) \quad (4.39) \end{aligned}$$

Bilden von Zähler und Nenner:

$$\begin{aligned} G_e(s) &= \frac{Z(s)}{N(s)} = \frac{1}{\det(sI - A_e + B_e K_e)} C_e \text{adj}(sI - A_e + B_e K_e) B_e \\ Z(s) &= C_e \text{adj}(sI - A_e + B_e K_e) B_e \\ N(s) &= \det(sI - A_e + B_e K_e) \\ N(s) &= \det \left(sI - \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & -KI \end{bmatrix} \right) \quad (4.40) \end{aligned}$$

Der Quellcode für den Integralregler ist im Anhang unter **B** Integralregler zu finden.

4.4. Störgrößenbeobachterentwurf

Bei einem Strukturvergleich können leicht viele Gemeinsamkeiten entdeckt werden. Die Grundstruktur von Beobachter oder Zustandsregler ist bei beiden Systemen gegeben. Deswegen Dualität wurde im vorigen Teil schon bewiesen. Ergänzend kommt bei beiden Systemen eine Ausgangsrückführung auf einen Integrator hinzu, die beide neuen Einfluss auf die Führungsgrößen folgenden Systems nehmen. Aufgrund der Grundstruktur und der ähnlichen ergänzenden Struktur sollte eine Dualität des Integralregler und des Störgrößenbeobachters möglich sein:

Ansätze und Ergebnisse sind aus dem Skript von Prof. Dr.-Ing. Ulf Claussen "State-Space Control".⁴

Störgrößenbeobachterentwurf:

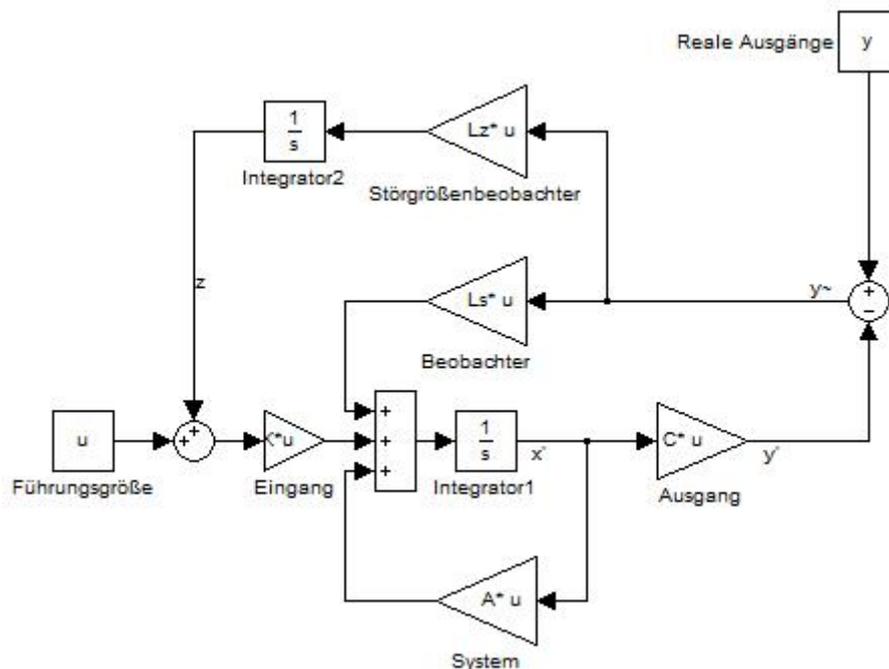


Abbildung 4.5.: Störgrößenbeobachter

⁴vgl. Claussen (2011b)

Aus dem Aufbau werden die Zustands- und Eingangsgleichungen entnommen:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) + B \cdot \vec{u}(t) + B \cdot \vec{z}(t) + L_s \cdot \vec{y}(t) - L_s \cdot \vec{\hat{y}}(t) \quad (4.41)$$

$$\dot{\vec{z}}(t) = L_z \cdot \vec{y}(t) - L_z \cdot \vec{\hat{y}}(t) \quad (4.42)$$

$$\vec{y}(t) = C \cdot \vec{x}(t) + 0 \cdot \vec{u}(t) \quad (4.43)$$

$$\vec{\hat{y}}(t) = C \cdot \vec{x}(t) \quad (4.44)$$

Wie beim Integralregler wird ein neuer Zustandsvektor erstellt:

$$\vec{x}_z(t) = \begin{bmatrix} \vec{x}(t) \\ \vec{z}(t) \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

$$\vec{\hat{x}}_z(t) = \begin{bmatrix} \vec{\hat{x}}(t) \\ \vec{\hat{z}}(t) \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Dies bringt neue Zustandsgleichungen:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{x}}_z(t) &= \begin{bmatrix} \dot{\vec{x}}(t) \\ \dot{\vec{z}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{x}(t) \\ \vec{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \vec{u}(t) \\ \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\hat{x}}}_z(t) &= \begin{bmatrix} \dot{\vec{\hat{x}}}(t) \\ \dot{\vec{\hat{z}}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\hat{x}}(t) \\ \vec{\hat{z}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \vec{u}(t) + \begin{bmatrix} L_s \\ L_z \end{bmatrix} \vec{y}(t) - \begin{bmatrix} L_s \\ L_z \end{bmatrix} \vec{\hat{y}}(t) \\ \dot{\vec{\hat{x}}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{\hat{x}}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z \cdot \vec{y}(t) - L_z \vec{\hat{y}}(t) \end{aligned} \quad (4.48)$$

und Ausgangsgleichungen:

$$\vec{\hat{y}}(t) = [C \ 0] \vec{\hat{x}}_z(t)$$

$$\vec{\hat{y}}(t) = C_z \cdot \vec{\hat{x}}_z(t)$$

$$\vec{y}(t) = [C \ 0] \vec{x}_z(t)$$

$$\vec{y}(t) = C_z \cdot \vec{x}_z(t)$$

Ziel des Beobachterssystems ist es, keine Differenz der Zustands- und Ausgangsgrößen vom realen System und Beobachtersystem zu haben.

$$\vec{\tilde{x}}_z(t) = \vec{x}_z(t) - \vec{\hat{x}}_z(t) \quad (4.49)$$

$$\vec{\tilde{y}}(t) = \vec{y}(t) - \vec{\hat{y}}(t) = C_z(\vec{x}_z(t) - \vec{\hat{x}}_z(t)) \quad (4.50)$$

4.50 wird in 4.48 eingesetzt

$$\begin{aligned}
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z \cdot \vec{y}(t) - L_z \vec{y}(t) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z(\vec{y}(t) - \vec{y}(t)) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z \cdot \vec{y}(t) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z C_z(\vec{x}_z(t) - \vec{x}_z(t)) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z - L_z C_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z C_z \cdot \vec{x}_z(t)
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

In die Differenzgleichung 4.49 wird 4.47 und 4.51 eingesetzt:

$$\begin{aligned}
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= \dot{\vec{x}}_z(t) - \dot{\vec{x}}_z(t) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) - ((A_z - L_z C_z) \cdot \vec{x}_z(t) + B_z \cdot \vec{u}(t) + L_z C_z \cdot \vec{x}_z(t)) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= A_z \cdot \vec{x}_z(t) - L_z C_z \cdot \vec{x}_z(t) - (A_z - L_z C_z) \cdot \vec{x}_z(t) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= (A_z - L_z C_z) \cdot \vec{x}_z(t) - (A_z - L_z C_z) \cdot \vec{x}_z(t) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= (A_z - L_z C_z)(\vec{x}_z(t) - \vec{x}_z(t)) \\
 \dot{\vec{x}}_z(t) &= (A_z - L_z C_z) \cdot \vec{x}_z(t)
 \end{aligned} \tag{4.52}$$

Laplace-Transformierte:

$$s \vec{X}_z(s) = (A_z - L_z C_z) \vec{X}_z(s) \tag{4.53}$$

Dieses System besitzt keine Eingangssignale und die Zustandsgrößen werden, wenn die Polstellen in der linken Halbebene liegen, zu Null tendieren.

Ein Vergleich zum Integralreglerentwurf ist jetzt schnell festzustellen:

aus 4.36:

$$\begin{aligned}
 s \vec{X}_e(s) &= (A_e - B_e K_e) \cdot \vec{X}_e(s) + F_e \cdot R(s) \\
 s \vec{X}_e(s) &\hat{=} A_{IR} \cdot \vec{X}_e(s) + F_e \cdot R(s)
 \end{aligned} \tag{4.54}$$

aus 4.53:

$$\begin{aligned}
 s \vec{X}_z(s) &= (A_z - L_z C_z) \vec{X}_z(s) \\
 s \vec{X}_z(s) &\hat{=} A_{L_s} \cdot \vec{X}_z(s)
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

$$A_{IR} = A_e - B_e K_e \tag{4.56}$$

$$A_{L_s} = A_z - L_z C_z \tag{4.57}$$

Die ähnlichen Zustandsgleichungen ermöglichen eine Polstellenbestimmung wie unter (4.40):

$$\begin{aligned}
 N_{IR}(s) &= \det(sI - A_{IR}) \\
 N_{L_s}(s) &= \det(sI - A_{L_s}) = \det(sI - A_z + L_z C_z) \\
 N_{L_s}(s) &= \det \left(sI - \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s \\ L_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (4.58)
 \end{aligned}$$

Wie beim Integralregler ist nur die L-Matrix noch frei veränderbar. Da die anderen Matrizen fest durch das System festgelegt sind, muss die L-Matrix dem gewünschten Verhalten angepasst werden. Aus ihr können wieder die Beobachtermatrix und die Störgrößenbeobachtermatrix entnommen werden.

Wie beim Zustandsregler/Beobachtervergleich müssen die Matrizen transponiert werden, um bekannte und unbekannte Matrizen an gleicher Stelle der Zustandsgleichung zu bekommen. Ausgehend von (4.57):

$$\begin{aligned}
 A_{L_s}^T &= A_z - L_z C_z^T \\
 A_{L_s}^T &= A_z^T - C_z^T L_z^T \quad (4.59)
 \end{aligned}$$

Im Vergleich von (4.56) und (4.59) stehen alle bekannten und zu bestimmenden Matrizen an der gleichen Stelle.

$$\begin{aligned}
 A_e = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} & \Leftrightarrow A_z^T = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B & 0 \end{bmatrix} \\
 B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} & \Leftrightarrow C_z^T = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix} \\
 K_e = \begin{bmatrix} K & -KI \end{bmatrix} & \Leftrightarrow L_z^T = \begin{bmatrix} L_s & L_z \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dies bringt auch den Vorteil, dass die Funktionen in Matlab für die Zustandsreglerparametrierung auch hier wieder angewandt werden können.

Der Quellcode für den Störgrößenbeobachter ist im Anhang unter **B** Störgrößenbeobachter zu finden.

5. Prototyp

Als Vergleichsobjekt wird ein neuer nichtlinearer Beobachter erstellt. Er hat die Grundstruktur des Störgrößenbeobachters, wird jedoch um die Störgrößensimulation erweitert. Dieser Beobachter ist ein Modell fünfter Ordnung wie der Störgrößenbeobachter, der in dieser Bachelorarbeit auch genutzt wird. Die Ausgänge der Beobachterintegratoren werden genutzt, um die Störung zu simulieren. Anstelle einer neuen Führungsgröße (die Summe der normalen Führungsgröße $\vec{u}(t)$ und der Störgröße $\vec{z}(t)$) in Form eines Volumenstromes, werden die hierfür bekannten Störgrößen benutzt. Sind diese Störgrößen unbekannt, muss auf dieses Modell verzichtet werden. In diesem Fall wurden für das vorher hergestellte Nichtlinearsimulationsmodell bereits alle benötigten Größen der Anlage ausgemessen und zusammengefügt. Die Störgrößensimulation wurde aus diesem Modell extrahiert und in das lineare Störgrößenbeobachtermodell eingefügt. Dies macht es zu einem nichtlinearen Modell, welches meist schwerer zu verstehen und zu regeln ist.

Es bringt jedoch den Vorteil, dass die Störungen genauer nachgebildet werden, da sie auch den Füllstand mit berücksichtigen. Mit einer inversen Eingangsmatrix kann die Störgröße in der Form eines Volumenstromes angezeigt werden.

Die Gesamtform ist einfach gehalten und leicht in eine bildliche Form zu übermitteln. Der Integratorausgang stellt den Öffnungsgrad des Störventils nach. Ist der Ausgang Null, ist das Ventil geschlossen und keine Störung vorhanden. Bei einer Ausgangsgröße von Eins ist das Ventil zu '100%' geöffnet. Die Ventilöffnung ist linear zur Ausgangsgröße des Ventils zu sehen. Außerdem ist es nicht begrenzt, um auch größere Volumenströme generieren zu können. Dies dient dem Zweck, auch bei einer Verzögerung der Messdaten schnell auf die tatsächliche Störgröße zu kommen. Der Störsprung wird dadurch häufig überschwingen im nachsimulierten Störsprung erzeugen.

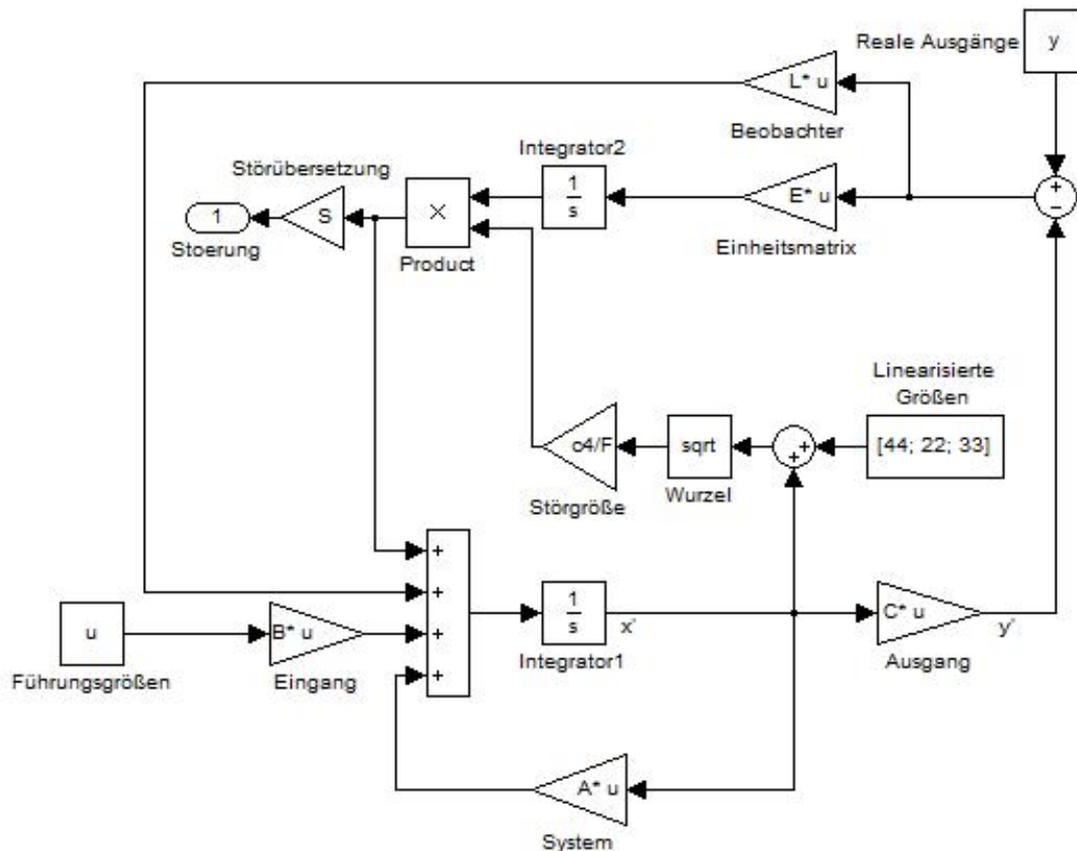


Abbildung 5.1.: Prototyp

Dieses simulierte Ventil wird mit Hilfe eines Multiplikationsgliedes der simulierten Störung zusammenmultipliziert und auf die Zustandsgrößenänderung addiert, welches wiederum den Wirkkreis schließt. Um noch praxisnähere Ergebnisse zu erhalten, ist die simulierte Störung nun abhängig von der Füllhöhe. Ist der Tank voller, wird durch den Wasserdruck mehr Wasser durch das Ventil fließen; ist der Tank leerer, dementsprechend weniger.

Für die Störgrößenanalyse wurde ein Störgrößenumrechner (S) eingeführt. Dieser Faktor ist der inverse Wert der Differenz von der Eingangsmatrix und der Einheitsmatrix. Durch diese Rechnung ist die Störgröße im Volumenstrom angegeben und kann wieder einfach verglichen werden.

Einen extra Quellcode gibt es für diesen Beobachter nicht. Er nutzt die L-Matrix des Luenberger Beobachters mit und eine Einheitsmatrix, die die Differenz der Ausgänge mit den drei Störgrößen über den Integrator verbindet. Die Störübersetzung ist ein einfacher Wert, mit dem alle drei Störwerte jeweils multipliziert werden.

In der weiteren Bachelorarbeit wird dieser Beobachter Prototyp genannt.

6. Versuche

Der benötigte Quellcode für folgenden Versuche ist im Anhang unter [B "Quellcode"](#) zu finden.

6.1. Ohne Regler

Das Dreitankmodell ist ein schwer zu steuerndes System. Durch die drei Integrierten im System verändern sich bei einer Eingangsänderung die Zustandswerte sehr schnell. Im Lauf dieser Bachelorarbeit war die Arbeitspunkteinstellung ohne Regler nicht zufriedenstellend möglich. Die Ergebnisse können jedoch benutzt werden, um die Aktualisierung der Beobachtersysteme bei immer weiter abweichenden Werten zu analysieren:

Auf die Simulation wird in diesem Fall verzichtet, da dies ein ganz anderes Verhalten zeigen würde und somit kein Vergleich gezogen werden könnte. In der Matlabsimulation werden die Pumpen und Sensoren als ideal angesehen, doch sind sie es am realen Modell nicht. Durch die physikalischen Gegebenheiten der Bauteile ist dies nicht anders möglich. Bei den späteren Messungen ist eine konstante Schwingung um den Endwert zu sehen. Dies ist kein Messrauschen, sondern liegt an den Pumpen und ist mit dem Auge in den Tanks nicht zu erkennen. Dies liegt im Toleranzbereich und ändert nichts an den Ergebnissen.

Diese Schwingung kann ohne Rückführung nicht stattfinden. Daher sind sie ohne Regler nicht vorhanden.

	Angleichdauer[sec]	Enddifferenz[cm]
RealBeobachter	1000	0,2
RealSGB	500	0
RealProtobeo.	400	0

Tabelle 6.1.: Führungssprungwerte für Aussteuerung Beobachtersysteme: 5x

Die Tabelle ist aus den Messungen im Anhang entstanden. (C.1 bis C.6)

Durch den Integrator nach dem Vergleichsglied können schneller und ohne Enddifferenz die Systeme einander angeglichen werden.

Auf eine Störgrößenanalyse wurde verzichtet, da keine Störgröße anlag. Die Graphen wurden trotzdem im Anhang mit eingefügt. (C.7 und C.8)

6.2. Zustandsregler

Ein Beobachter wurde nicht nur, weil die internen Daten interessant sind, entwickelt, sondern auch, weil dies einen erheblichen Vorteil bringt, die Anlage zu regeln. Der Zustandsregler benötigt hierbei alle Zustandsgrößen für eine Zustandsrückführung. Er verschiebt die Polstellen des Systems, um die Anlage schneller und trotzdem stabil ihren Endwert erreichen zu lassen.

In dieser Arbeit werden die Polstellen der Anlage mit einem Faktor multipliziert, so dass sicher gestellt ist, dass die Anlage sich nicht anders verhält und immer noch stabil bleibt. Alles weitere wäre experimentell und würde eine größere Analyse zur Folge haben.

In den folgenden Versuchen werden die drei Beobachtersysteme mit einem Zustandsregler ergänzt. Zuerst wird das Führungssprungverhalten analysiert und anschließend das Störsprungverhalten. Da die Beobachtersysteme für die Angleichung der Zustandsgrößen der Systeme erstellt wurden, werden auch die Differenzen in einem Graphen dargestellt. Die Störgrößen können beim Beobachtersystem nicht analysiert werden, weshalb bei diesem System auf den Graphen der Störanalyse verzichtet wird.

Erwartungshaltung vor den Versuchen:

Die erste Erwartungshaltung waren keine großen Differenzen bei den Führungssprüngen, da die Systeme gleiches Verhalten mit identischen Eingangsgroßen durchführen werden.

Bei den Störgrößensprüngen sollte beim Beobachtersystem eine bleibende Differenz entstehen durch den fehlenden Integrator. Das Störgrößenbeobachtersystem und das Prototypbeobachtersystem sollten die Differenz zum realen System ausgleichen. Da das Prototypmodell das reale System besser nachbildet, sollte dieses schneller die Störgröße nachgebildet haben und auch genauere Störgrößen liefern können.

Desweiteren wird der Zustandsregler die Störgröße nicht kompensieren können. Dies sollte bei schneller werdenden Beobachtersystemen eine bessere Störgrößenanalyse bringen.

Um ähnliche Einschwingungszeiten zu erhalten, werden die Beobachter und der Zustandsregler zu Beginn mit den gleichen Polstellen parametrisiert.

Die Graphen zu den Versuchen sind im Anhang zu finden unter [D](#) "Messungen Zustandsregler"

	Dauer[sec]	Max. Differenz[cm]	Tank1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	Tank2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	333	$\sim 4 \cdot 10^{-3}$		
SimSGB	301	$2 \cdot 10^{-3}$	0,034	-0,014
SimPrototypbeo.	200	$11 \cdot 10^{-4}$	0,035	-0,014
RealBeobachter	360	0,3		
RealSGB	142	0,3	0,5	0,2
RealProtobeo.	83	0,2	~ 0	~ 0

Tabelle 6.2.: Führungssprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x

6.2:

Bei einer Parametrierung des Zustandsreglers und der Beobachter mit fünffachem Wert zum normalen System ist bei einem Führungssprung bei allen Systemen keine stationäre Genauigkeit erreicht worden. Bei der Simulation sind die Werte, wie meistens, besser als im realen System. Der Luenberger-Beobachter liefert hier die schlechtesten Ergebnisse. Diese weichen nicht weit ab vom Störgrößenbeobachter. Am besten arbeitet der Prototypbeobachter. Allerdings ist dieser immer am schwingen, weshalb der Wert gemittelt werden muss. Durch die Parameterabweichungen entstehen kleine Störungen beim Störgrößenbeobachter und Prototypen. Wegen der geringen Abweichung der Systeme sind hierraus keine guten Ergebnisse zu gewinnen.

	Dauer[sec]	Dif. Dauer[sec]	Max. Dif.[cm]	T1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	T2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	727	833	4,4		
SimSGB	642	750	0,66	0	-17,5
SimPrototypbeo.	576	456	0,3	0	-17,5
RealBeobachter	585	420	5,5		
RealSGB	600	530	0,75	-1	-22
RealProtobeo.	558	-	0,38	0	-20

Tabelle 6.3.: Störungssprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x

6.3:

Beim Störsprung im Tank2 bleibt, wie vermutet, beim Luenberger-Beobachter eine Differenz vorhanden. Bei den beiden anderen Beobachtern besteht stationäre Genauigkeit. Die maximale Differenz ist beim Störgrößenbeobachter größer.

	Dauer[sec]	Max. Differenz[cm]	Tank1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	Tank2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	200	$1,2 \cdot 10^{-3}$		
SimSGB	142	$1 \cdot 10^{-3}$	0,034	-0,014
SimPrototypbeo.	145	10^{-3}	0,034	-0,012
RealBeobachter	180	0,2		
RealSGB	166	0,2	1,2	-1,6
RealProtobeo.	200	0,18	~ 0	~ 0

Tabelle 6.4.: Führungssprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x

6.4:

Bei einer Parametrierung des Zustandsreglers mit fünffachem und der Beobachter mit zehnfachem Wert zum normalen System ist bei einem Führungssprung bei allen Systemen keine stationäre Genauigkeit erreicht worden. Bei der Simulation sind die Werte besser als im realen System. Qualitativ liefern alle fast identische Werte, wenn vom Schwingverhalten des Prototyps abgesehen wird. Der Störgrößenbeobachter konnte hier jedoch mit seiner Geschwindigkeit überzeugen.

	Dauer[sec]	Dif. Dauer[sec]	Max. Dif.[cm]	T1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	T2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	700	321	0,42		
SimSGB	411	285	0,3	0	-18,125
SimPrototypbeo.	420	308	0,21	0	-18
RealBeobachter	450	325	0,5		
RealSGB	400	257	0,35	1	-19
RealProtobeo.	400	10	0,25	~ 0	~ -20

Tabelle 6.5.: Störsprungwerte für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x

6.5:

Beim Störsprung im Tank2 bleibt, wie vermutet, beim Luenberger-Beobachter eine Differenz vorhanden. Sie ist geringer als bei 6.3. Bei den beiden anderen Beobachtern besteht stationäre Genauigkeit. Die maximale Differenz ist beim Prototyp geringer. Die Störgröße des Störgrößenbeobachters ist hat im Vergleich zum Prototyp einen Offset von $1 \frac{cm^3}{sec}$.

	Dauer[sec]	Dif. Dauer[sec]	Max. Dif.[cm]	T1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	T2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimSGB	428	571	8,2	-9,8	-14
RealSGB	650	712	7,73	-15,6	-18,8

Tabelle 6.6.: Störsprungwerte Tank 3 für Zustandsregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x

6.6:

Bei einem Störsprung im mittleren Tank (Tank3) ist das erste Mal die Differenzanpassung langsamer als der Störsprung selber. Der Störsprung kann nicht richtig erfasst werden, weil dieses Szenario nicht analysiert wird. Es fehlt der dritte Sensor im mittleren Tank für diese Analyse. Die Störung von Simulation und Realität weichen hier bereits stärker von einander ab.

6.2.1. Störgrößenanalyse

Bei den ersten Messungen wurde die Störgröße immer beim letzten Tank ausgelöst. Dank der theoretischen Formeln 2.3,2.4 und 2.5 können dadurch die tatsächlichen Störungen ermittelt werden:

$$x_{2End} = -3,2 cm$$

$$Z_{Tank2} = c_4 \sqrt{x_{2End} + 22 cm}$$

$$Z_{Tank2} = 4,08 \frac{cm^3}{sec \sqrt{cm}} \sqrt{-3,2 cm + 22 cm}$$

$$Z_{Tank2} = 17,69 \frac{cm^3}{sec}$$

Nach diesem Prinzip werden alle Störgrößen in der Tabelle 6.15 ermittelt.

	Sim.			Real		
	gemessen	errechnet	Dif.	gemessen	errechnet	Dif.
SGB55	-17,5	-17,69	0,19	-22	-17,55	4,45
Pro55	-17,5	-17,69	0,19	-20	-17,55	2,45
SGB510	-18,125	-18,15	0,025	-19	-17,55	1,45
Pro510	-18	-18,15	0,15	-20	-17,55	2,45

Tabelle 6.7.: Störgrößenanalyse Tank2 in $\frac{cm^3}{sec}$

6.15:

In der Simulation sind beide Beobachtermodelle nahe an der Störgröße. Mit einer Abweichung von höchstens 1% ist dies ein gutes Ergebnis. Beim realen Modell sieht das ein wenig anders aus. Hier hat der Störgrößenbeobachter eine Abweichung von 25% und der Prototypbeobachter eine konstante Abweichung von 14%. Wird der Störgrößenbeobachter mit größeren Polstellen versehen, nimmt die Differenz ab (8%). Dennoch ist es nur eine Annäherung. Dieser Fehler ist wahrscheinlich auf Messfehler bei Vermessung des Ventils zurückzuführen.

	Sim.			Real		
	gemessen	errechnet	Dif.	gemessen	errechnet	Dif.
SGB	-14 und -9,8	-23,99	0,19	-18,8 und -15,6	-23,48	10,92

Tabelle 6.8.: Zustand Störgrößenanalyse Tank3 in $\frac{cm^3}{sec}$

6.8:

Die Störung des dritten Tanks wird im Beobachtersystem auf die beiden anderen Tanks verteilt. Die Gesamtstörgröße kann immer noch ermittelt werden, doch kann nicht mehr entschieden werden, wo der Fehler entsteht. Das System bietet keine Möglichkeit, weitere Fehler anzuzeigen. Sollte jeder Fehler abgefangen werden können, müsste für jeden Fehlertyp ein Sensor an dieser Stelle angebracht werden und dies wieder ins Beobachtersystem überführt werden. Dies wäre ein enormer Aufwand und nicht beachtete Fehlerquellen könnten immer noch auftreten.

Um einen Vergleich zu starten, ob der Fehler hätte mit einem weiteren Sensor erkannt werden können, wird ein weiterer Versuch gestartet: Das MIMO-System, welches für die Zustandsregler immer die gleiche Anzahl an Eingängen und Ausgängen besitzen muss, wird um einen Ausgang erweitert und um einen Eingang im Beobachtersystem ergänzt. Für den Zustandsregler ändert sich nichts, da der Störgrößenbeobachter seine eigene Eingangsmatrix bekommt, die eine weitere Pumpe darstellen soll. Diese Pumpe3 wird nur negativ wirken, was es eher zu einem Ablassventil macht. Da vom ganzen System jedoch nur Pumpen als Eingänge zum System genutzt werden, sollte es hierbei zum Verständnis dabei bleiben. Die Eingangsmatrix besitzt einen Umrechnungsfaktor vom Volumenstrom in Füllstandshöhe, so dass positive und negative Einflüsse möglich sind.

	Sim.			Real		
	gemessen	errechnet	Dif.	gemessen	Sensor	Dif.
SGB	-1,6/1,6/-21,8	-22,44	0,64	-2,3/-9/-18,3	-17,47	0,83
Pro	-1,4/1,4/-21,7	-22,44	0,74	-2/-10/-17,8	-17,47	0,33

Tabelle 6.9.: Zustand Störgrößenanalyse Tank3 mit 3 Sensoren in $\frac{cm^3}{sec}$

6.9:

Dank des weiteren Sensors kann die Störung besser eingeschätzt werden. Die Störung im dritten Tank wird erkannt, jedoch hat sie auch Einfluss auf die anderen Tanks im Beobachtersystem. Es simuliert einen weiteren kleinen Abfluss im ersten Tank und einen stärkeren Zufluss im zweiten Tank. Dies geschieht auf Grund der Auswirkungen einer einzelnen Störgröße. Da der Tank3 einen geringeren Füllstand hat, ist der Zufluss zu Tank2 geringer und der Abfluss von Tank1 größer. Diese Auswirkungen müssen bei einer Störanalyse mit berücksichtigt werden.

Der Störgrößenbeobachter und der Prototyp haben in der Simulation einen Fehler von ungefähr 3%. Sollten mehrere Störungen anliegen, muss eine Abweichung von weiteren 6% bei jeder einzelnen Störung einkalkuliert werden, da diese sich gegenseitigen Einfluss aufeinander hätten.

Bei der Messung am realen Modell fällt die Störung ein wenig anders aus. Die Einflüsse der Störung auf die äußeren Tanks ist größer ausgefallen. Dazu kommen die Abweichungen der Systemgrößen vom Beobachter- und realen Modell. Dennoch sind mit einer Störgrößenabweichung von maximal 5% die Ergebnisse zufriedenstellend.

6.2.2. Zustandsreglerzwischenfazit

Ein Führungssprung mit Zustandsregler ist bei jedem Beobachtersystem ohne große Abweichungen möglich. Interessant wird es bei den Störungssprüngen. Da der Zustandsregler nur die Zustandsrückführung zum Reglen benutzt und dafür die Zustandswerte des Beobachtersystems benutzt, wird bei einem langsameren Beobachtersystem der Störsprung länger ausfallen. Logischerweise brauchen die Beobachtersysteme bei kleineren Polstellen auch länger, um ihr System dem zu beobachteten System anzugleichen. Der Luenberger-Beobachter kann hierbei die Stördifferenz nicht kompensieren, da ihm der Integrator im Regelkreis fehlt. Der Störgrößenbeobachter und der Prototypbeobachter schaffen dabei stationäre Genauigkeit. Zu beachten ist, dass der Prototypbeobachter leichter zu schwingen beginnt und auch bei diesen Messungen oft eine Grundschiwingung um den Endwert besitzt, der für bessere Ergebnisse gemittelt werden müsste.

Im Vergleich vom Störgrößenbeobachter und Prototypbeobachter weichen beide Systeme maximal ähnlich viel bei einem Differenzsprung von dem zu beobachteten System ab. Der Prototyp ist jedoch um einiges schneller. Dennoch ist seine Qualität durch die schnelle Schwingung und einer Grundschiwingung nicht die beste. Bei einer Polstellenerhöhung verbessert sich die Qualität des Störgrößenbeobachters mehr als die des Prototypen.

Die Störgröße kann besser als erwartet rekonstruiert und somit auch gemessen werden. Mit Abweichung von 5% ist dies eine bessere Messmethode als mit einige Sensoren.

Warum wurden nur Messungen beim Beobachtersystem mit fünffachen und zehnfachen Polstellen durchgeführt?

Bei einer Messung unterhalb des fünffachen Werts der Polstellen des Systems wurden die Messungen zu langsam. Eine Messung konnte sich nach 6000 Sekunden nicht einschwingen. Daher wurde auf Messungen unter den Wert der Polstellen des Zustandsregler (fünffache Polstellen des Systems) verzichtet. Bei einer Simulation mit fünfzigfachen Wert haben überraschenderweise die numerischen Probleme begonnen. Bei einer Regelung sind die Stellgrößen meist das Problem, warum die Polstellen nicht erhöht werden. Da es diese beim Beobachtersystem nicht gab wurde hierrauf nicht geachtet. Doch was bei einem Regelkreis die Stellgröße, ist beim Störgrößenbeobachtersystem der Integrator. Durch die viel zu großen Eingangsgrößen für den Integrator wurde dieser über den Zahlenbereich des Rechners hinaus integriert und Matlab bracht den Versuch mit einer Fehlermeldung auf Grund von 'Inf' (Wuchs ins Unendliche) ab. Um sichere Ergebnisse zu erzielen, wurde daher die Versuchsreihe auf den fünffachen und den zehnfachen Polstellenwert des zu beobachteten Systems begrenzt.

6.3. Integralregler

Auch der Integralregler nutzt die Zustandsgrößen des Systems. Zusätzlich kann dieser Störungen ausgleichen, ohne diese zu kennen. Weshalb sollte also ein Störgrößenbeobachter hier nützlich sein? Der Integralregler kann nicht unterscheiden zwischen Führungs- oder Störungssprung. Das Einzige, was dieser erkennt, ist die Differenz zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße und regelt dementsprechend gegen. Dadurch wird immer stationäre Genauigkeit erreicht. Die Eingangsgröße, die dieser Regler der Regelstrecke liefert, kann nur untersucht werden, indem eine Untersuchung der Eingangsgröße ohne Störung und mit Störung durchgeführt werden. Dies muss bei unterschiedlichen Führungsgröße untersucht werden und sollte eine gleiche Führungsgrößendifferenz zeigen. Dieses Verfahren ist eher schwerer zu automatisieren, da ein externer Eingriff von Nöten ist, um die Anlage darauf einzustellen. In dieser Bachelorarbeit geht es jedoch um den Störgrößenbeobachter, der schon beim Zustandsregler Störgrößen liefern konnte. Werden diese beiden Systeme zusammengeschaltet, findet die Gegenregelung des Integralreglers und die Störgrößennachsimulation des Störgrößenbeobachters gleichzeitig statt. Wie diese sich zueinander verhalten, sollen die nächsten Versuche zeigen.

Die ersten Erwartungshaltungen waren stationär genaue Führungs- und Störungssprünge. Das Luenberger-Beobachtermodell sollte die Störung selber nicht erkennen und durch die neue, viel zu große Führungsgröße zu große Zustandgrößen bekommen, die durch die L-Matrix nicht ausgeglichen werden können. Der Störgrößenbeobachter sollte genauere Störungsgrößen liefern, da die Zustandsrückführung einen geringeren Stellwert bekommt und nicht mehr so stark gegenregelt. Sollten der Integralregler zu schnell sein mit der Ausgleichung des Störsprunges, müsste die Störgrößenbildung im Störgrößenbeobachter verzögert werden, da die Differenz der Ausgänge nicht zu stark ausfallen wird. Die Zustände beider Systeme sollten gegeneinander konvergieren. Das Prototypmodell sollte ähnliche bis bessere Ergebnisse wie der Störgrößenbeobachter liefern.

Die Graphen zu den Versuchen sind im Anhang zu finden unter [E "Messungen Integralregler"](#)

	Dauer[sec]	Max. Differenz[cm]	Tank1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	Tank2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	277	$3,8 \cdot 10^{-3}$		
SimSGB	208	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,034	-0,014
SimPrototypbeo.	209	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,035	-0,015
RealBeobachter	71	0,4		
RealSGB	80	0,4	0,6	0,1
RealProtobeo.	64	0,18	~ 0	~ 0

Tabelle 6.10.: Führungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x

6.10:

Bei der Parametrierung des Integralreglers und der Beobachtersysteme mit dem fünffachen Wert des normalen Systems wird stationäre Genauigkeit erreicht. Abzusehen ist vom mittleren/dritten Tank, da dieser nicht geregelt ist. Er ist das Produkt der Wechselwirkungen der beiden anderen Tanks und immer noch eine Zustandsgröße, doch kann, da der Sensor des dritten Tanks hier nur zur späteren Analyse genutzt wird, kein Abgleich des Beobachtersystems mit dem realen System stattfinden. Der Führungssprung ist, wie zuvor beim Zustandsregler, auch beim Integralregler nicht sehr aussagekräftig für die Beobachtersysteme. Erstaunt haben hierbei jedoch die Messungen am realen Modell. Sie waren schneller als die Simulationen, was nicht zu vermuten war. Die Parameterabweichstörungen sind ähnlich hoch wie bei den Messungen vom Zustandsregler.

	Dauer[sec]	Dif. Dauer[sec]	Max. Dif.[cm]	T1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	T2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	681	536	4,75		
SimSGB	550	700	0,68	0	-18
SimPrototypbeo.	200	100	0,3	0	-19
RealBeobachter	550	550	7,8		
RealSGB	650	550	0,9	0	-27
RealProtobeo.	250	6	0,35	0	-27

Tabelle 6.11.: Störungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x

6.11:

Wie vermutet, konnte der Luenberger-Beobachter die Störung nicht ausgleichen und es blieb eine große Differenz bei den Systemen. Die anderen Modelle konnten stationäre Genauigkeit erreichen. Die Störungsanalyse/-nachbildung zeigt diesmal größere Werte als beim Zustandsregler. Auf diese wird später noch eingegangen. Der Störgrößenbeobachter hatte zeitweise eine größere Abweichung als der Prototyp.

	Dauer[sec]	Max. Differenz[cm]	Tank1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	Tank2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	214	$1,15 \cdot 10^{-3}$		
SimSGB	214	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,034	-0,014
SimPrototypbeo.	215	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,034	-0,014
RealBeobachter	47	0,2		
RealSGB	80	0,21	0,6	0
RealProtobeo.	100	0,05	~ 0	~ 0

Tabelle 6.12.: Führungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x

6.12:

Bei einer Parametrierung des Integralreglers mit fünffachem und der Beobachtersysteme mit zehnfachem Wert zum unregelten System sind die Ergebnisse beim Führungssprung fast identisch geblieben. Nennenswerte Unterschiede zu Tabelle 6.10 sind nicht vorhanden.

	Dauer[sec]	Dif. Dauer[sec]	Max. Dif.[cm]	T1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	T2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimBeobachter	150	100	0,44		
SimSGB	200	250	0,31	0	-19,1
SimPrototypbeo.	200	100	0,21	0	-19
RealBeobachter	114	114	0,6		
RealSGB	120	120	0,4	0	-26,4
RealProtobeo.	200	10	0,25	~ 1	~ -26,5

Tabelle 6.13.: Störungssprungwerte für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 10x

6.13:

Auch hier ist beim Luenberger-Beobachter keine, beim Störgrößenbeobachter und Prototypen eine stationäre Genauigkeit vorhanden. Bei der Störanalyse gibt es zur Tabelle 6.11 keine große Differenz. Nennenswert ist im Vergleich der Differenzsprung. Seine Amplitude ist geringer und die Differenzzeit ist auch kleiner geworden. Mit Ausnahme des Prototypen, wo die Differenzdauer ungefähr gleich geblieben ist.

	Dauer[sec]	Dif. Dauer[sec]	Max. Dif.[cm]	T1Z[$\frac{cm^3}{sec}$]	T2Z[$\frac{cm^3}{sec}$]
SimSGB	290	250	8,8	-10,1	-14,6
RealSGB	572	572	6	-13,65	-14,62

Tabelle 6.14.: Störsprungwerte Tank 3 für Integralregler: 5x; Beobachtersysteme: 5x

6.14:

Der Störsprung ist auch hier nicht im Beobachtersystem vorgesehen. Daher teilt er sich auf beide Störsimulationen auf. Die Störgröße des zweiten Tanks sind nahezu identisch bei Simulation und Realität. Die Störgröße des ersten Tanks unterscheidet sich jedoch mehr.

6.3.1. Störgrößenanalyse

Bei dieser Störanalyse wird wieder mit einer Störung im letzten Tank (Tank2) begonnen. Die Störgröße wird, wie unter 6.2.1 beschrieben, berechnet.

	Sim.			Real		
	gemessen	errechnet	Dif.	gemessen	errechnet	Dif.
SGB55	-18	-19,14	1,14	-27	-19,14	7,86
Pro55	-19	-19,14	0,14	-27	-19,14	7,86
SGB510	-19,1	-19,14	0,04	-26,4	-19,14	7,26
Pro510	-19	-19,14	0,14	-26,5	-19,4	7,36

Tabelle 6.15.: Störgrößenanalyse Tank2 in $\frac{cm^3}{sec}$

6.15:

In der Simulation gibt Abweichungen der Störgröße von maximal 6%. Bei den realen Messungen ist die größte Abweichung 41%. Dies liegt, wie schon beim Zustandsregler vermutet, wahrscheinlich an den falschen Ventilparametern. Die gemessenen Störgrößen sind konstant bei $-26,7 \frac{cm^3}{sec}$ (Ableseungenauigkeit des Störgrößensprungs von $\pm 0,5$).

	Sim.			Real		
	gemessen	errechnet	Dif.	gemessen	errechnet	Dif.
SGB	-10,1 und -14,6	-23,99	0,71	-13,65 und -14,62	-25,91	-2,36

Tabelle 6.16.: Integral Störgrößenanalyse Tank3 in $\frac{cm^3}{sec}$

6.16:

Bei einer Störung im mittleren Tank (Tank3) können die Beobachtermodelle wieder nicht die Störgrößenquelle genau analysieren und teilen sie auf die zwei bekannten Störungsquellen auf. Werden beide Störgrößen zusammenaddiert, entsteht annähernd die Gesamtstörung.

Um die Störgröße genauer zu analysieren, wurde auch der Integralregler mit den Beobachtermodellen erweitert mit einem weiteren Sensor im Tank3. Für die Beobachtersysteme ist das System nun ein MIMO-System mit drei Eingängen und drei Ausgängen, wie beim Zustandsregler im Kapitel 6.2.1.

	Sim.			Real		
	gemessen	errechnet	Dif.	gemessen	Sensor	Dif.
SGB	1,5/-2,96/-22,96	-24,76	-1,8	-7,8/-9,4/-18,4	-20,7	-2,3
Pro	1,36/-3,18/-23,18	-24,78	-1,6	-7/-11/-19	-20,7	1,7

Tabelle 6.17.: Integral Störgrößenanalyse Tank3 mit 3 Sensoren in $\frac{cm^3}{sec}$

6.17:

Die Störgröße im Tank3 kann hier auch im Beobachtermodell realisiert werden. Auch hier hat sie Einfluss auf die beiden anderen Tanks.

Mit einer Abweichung von maximal 8% in der Simulation fällt die Störungsanalyse hier schlechter aus als beim Zustandsregler. Sollten mehrere Störungen anliegen, muss eine jeweils von einer Abweichung von 13% bei jeder einzelnen Störung einkalkuliert werden.

Die reale Messung unterstützt die Simulation mit einer Abweichung von 11% und Einfluss auf die anderen Tanks mit einer parallelen Störgröße von um die 50% beim zweiten Tank.

6.3.2. Integralreglerzwischenfazit

Ein Führungssprung ist beim Integralregler ohne große Abweichung mit jedem benutzten Beobachtersystem möglich. Beim Störungssprung gibt es Probleme mit dem Luenberger-Beobachter. Dieser besitzt, da er keinen Integrator besitzt, eine bleibende Zustandsdifferenz. Diese nimmt mit größer werdenden Polstellen ab, werden jedoch nie völlig verschwinden. Störgrößenbeobachter und Prototypbeobachter haben hier stationäre Genauigkeit. Wie beim Zustandsregler ist der Prototypbeobachter noch mit einer Grundschiwingung behaftet. Bei größeren Polstellen ist auch der Störsprung schneller, da auch der Integralregler mit einer Zustandsrückführung von den Beobachtersystemzuständen arbeitet.

Der Störgrößenbeobachter und Prototypbeobachter haben nur eine kleine maximale Differenzabweichung. Wie bei den Messungen mit dem Zustandsregler verbessert der Störgrößenbeobachter sich mehr bei Erhöhung der Polstellen. Der Prototypbeobachter ist sehr schnell beim Störgrößen ausgleich, jedoch müssen alle Ergebnisse gemittelt werden. Dies ist für eine Weiterverarbeitung nicht vorteilhaft.

Da der Integralregler die Störgröße für die Regelung ausgleicht in Form einer Führungsgrößenenerhöhung, wurde vor der Messung erwartet, dass diese Differenz leicht beim Beobachtersystem nachgebildet werden kann. Dies ist nicht der Fall. Der automatische Störungsausgleich behindert die Störgrößennachbildung und liefert mit einer Störgrößenabweichung von 11% ein schlechteres Ergebnis als der Zustandsregler.

Teil III.

Schluss

7. Schluss

7.1. Fazit

Die Aufgabenteile der Aufgabenstellung wurden alle erfolgreich umgesetzt. Die Anlage wurde analysiert, beschrieben und in den Zustandsraum überführt. Mathematisch wurde eine Modellrückführung des Störgrößenbeobachters zum Integralregler bewiesen, die mit diesem Ansatz auch andere Parametrierungsmethoden, als die in dieser Bachelorarbeit verwendet wurden, zulassen sollte.

Es wurde ein weiterer nichtlinearer Störgrößenbeobachter (Prototyp) erstellt, der die analysierte Störgröße in seine Struktur eingebunden hat und je nach Bedarf diese wie ein Ventil ein-, ausschalten, drosseln und sogar übersteuern kann. Er weicht von der Aufgabenbeschreibung ab, da es ein Störgrößenmodell sechster Ordnung ist, um das Modell schnell erweitern zu können. Die drei weiteren Integratoren stellten jeweils für jeden der drei Tanks eine Störgröße da, die auch später bei der Störgrößenanalyse genutzt wurden.

In den Versuchen zeigten die Beobachtermodelle ihre Stärken und Schwächen. Der Luenberger-Beobachter konnte wegen großen Abweichungen bei Störsprüngen nicht überzeugen. Der Störgrößenbeobachter glich sogar Fehler in den Systemparametern aus, doch lag dessen Stärke mehr bei einem Störsprung, den er je nach eigener Parametrierung schneller oder langsamer doch immer sehr genau nachbilden konnte. Seine Ergebnisse waren gut zu analysieren und es war ein leichtes, eine Störanalyse durchzuführen. Der nichtlineare Störgrößenbeobachter glich ebenso die Fehler bei den Systemparametern aus und konnte sogar schneller als der Störgrößenbeobachter die Störung nachbilden. Dadurch, dass dieser jedoch so schnell reagierte, besaß er eine Grundschiwingung. Seine Ergebnisse mussten immer gemittelt werden, damit mit seinen Ergebnissen weiter gearbeitet werden konnte.

Bei den Versuchen stellte sich heraus, dass beim Zustandsregler eine bessere Störgrößenanalyse möglich war als beim Integralregler. Um die Störungsgröße selbst messen zu können, musste ein Sensor beim zu beobachteten System vorhanden sein, der direkt an der Störquelle sitzt. So konnte bei einer Störung am mittleren Tank und nur Sensorik an den äußeren Tanks nicht festgestellt werden, ob die Störung vom mittleren Tank kommt oder zwei

kleine Störungen an den äußeren Tanks anliegen. Mit Sensorik an allen drei Tanks war dies möglich.

Der nichtlineare Störgrößenbeobachter stellte gute Ergebnisse dar und könnte mit Hilfe eines Tiefpasses weiter benutzt werden. Es würde sich lohnen, dort weiterführende Versuche durchzuführen.

Festgestellt wurde auch, dass die Beobachterdimensionierung begrenzt war. Wie eine normale Regelung begrenzt ist von Stabilität und Stellgrößen, ist die Differenzreglerung ebenfalls von Stabilität und von numerischen Zahlengrößen des Rechners begrenzt. Es wurde hier auf eine Analyse verzichtet, die die Grenzen des Differenzsprungs mit den numerischen Grenzen des Rechners mit jeweiligen Polstellen aufzeigt.

In dieser Bachelorarbeit wurde nur der Zustandsregler und der Integralregler mit den drei Beobachtermodellen verwendet. Weitere Reglermodelle könnten weitere Erkenntnisse erzielen.

Literaturverzeichnis

- [Ament 2012] AMENT, Prof. Dr.-Ing. C.: *Vorlesung Systemtheorie II*. 2012. – URL http://www.imtek.de/systemtheorie/content/upload/vorlesung/2005/systemtheorie2-ws2005-02_1.pdf
- [Claussen 2011a] CLAUSSEN, Prof. Dr.-Ing. U.: *Praktikum Angewandte Regelungstechnik*. 2011
- [Claussen 2011b] CLAUSSEN, Prof. Dr.-Ing. U.: *State-Space Control*. 2011
- [Geist 2010] GEIST, Stephanie: *Zustandsruckführung in linearen Mehrgroßenregelkreisen*. 2010. – URL http://www.control.tu-berlin.de/images/a/ac/PR_RTII_dreitank_versuchsvorbereitung.pdf
- [Große und Schorn 2006] GROSSE, Norbert ; SCHORN, Wolfgang: *Taschenbuch der praktischen Regelungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 3-446-40302-7
- [Holzhüten 2009] HOLZHÜTEN, Prof. Dr. T.: *Zustandsregelung*. 2009. – URL <http://users.etch.haw-hamburg.de/users/holzhuet/zureg.pdf>
- [Schmidt u. a. 2012] SCHMIDT, Michael ; BERND, Sascha ; RATER, Florian: *Praktikum Angewandte Regelungstechnik*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Praktikumsbericht, 2012
- [Steffenhagen 2010] STEFFENHAGEN, Birgit: *Kleine Formelsammlung Regelungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010. – ISBN 978-3446-41467-9
- [Svaricek 2012a] SVARICEK, Prof. Dr.-Ing. F.: *Moderne Methoden der Regelungstechnik*. 2012. – URL https://www.unibw.de/lrt15/Institut/lehre/unterlagen/MMR/pdf/mmr_v9.pdf
- [Svaricek 2012b] SVARICEK, Prof. Dr.-Ing. F.: *Regelungstechnik*. 2012. – URL <http://www.unibw.de/lrt15/Institut/lehre/unterlagen/srtII/RTv9.pdf>
- [Zacher und Reuter 2011] ZACHER, Serge ; REUTER, Manfred: *Regelungstechnik für Ingenieure, 13. Auflage*. Vieweg+Teubner, 2011. – ISBN 978-3-8348-0900-1

Teil IV.
Anhang

A. CD

B. Quellcode

Parametercode:

```
1  %Parameter für die Modelsim-Programme
2  addpath('Parameterdateien')

4  %Parameter für das Dreitankmodell
5  ParameterSystem

7  %Zustandsraumüberführung
8  Zustandsraumueberfuehrung

11 %Vorfilter ohne Regler
12 V = Vorfilter(A, B, C, D, zeros(2,3));

15 %Regler(Einsystementwurf)
16 [R, VR]= Zustandsregler(A, B, C, D, 5);

18 %Integralregler
19 [RI, KI] = Integralregler(A, B, C, D, 5);

22 %Beobachter
23 L = Beobachter(A, B, C, D, 5);

25 %Störgrößenbeobachter
26 [Ls, Lz] = Stoergroessenbeobachter(A, B, C, D, 5);

28 %Störumrechnung
29 S = 1/B(1,1);

31 %Einheitsmatrix für Prototyp
32 E = [1 0; 0 1; 0 0];
```

Vorfiltercode:

```
1  function [V] = Vorfilter(A, B, C, D, R)
2  %Vorfilterentwurf
3  System = ss(A,B,C,D);
4  rank(observ(System));
5  rank(ctrb(System)); %Prüfung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

7  V = (C*((B*R-A)^(-1))*B)^(-1);
8  end
```

Zustandsreglercode:

```
1 function [R, VR] = Zustandsregler(A, B, C, D, Verstaerkung )
2 %Zustandsreglerentwurf
3 System = ss(A,B,C,D);
4 rank(observ(System));
5 rank(ctrb(System)); %Prüfung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

7 Eig = Verstaerkung * eig(A); %Berechnung der Eigenwerte

9 R = place(A,B,Eig); %Entwurf der Reglermatrix R

11 VR = Vorfilter(A, B, C, D, R);

13 end
```

Integralreglercode:

```
1 function [RI, KI] = Integralregler(A, B, C, D, Verstaerkung )

3 %Integralreglerentwurf
4 System = ss(A,B,C,D);
5 rank(observ(System));
6 rank(ctrb(System)); %Prüfung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

8 Ai = [A zeros(3,2); -C D];
9 Bi = [B; D'];

11 Eig = Verstaerkung * eig(A); %Berechnung der Eigenwerte

13 Pol = [Eig; 1.01 * Eig(1,1); 0.99 * Eig(1,1)];

15 I = place(Ai,Bi, Pol);

17 RI = [I(1,1:3); I(2,1:3)];

19 KI = (-1) * [I(1,4:5); I(2,4:5)];

21 end
```

Beobachtercode:

```
1 function [L] = Beobachter(A, B, C, D, Verstaerkung )
3 %Beobachterentwurf
4 System = ss(A,B,C,D);
5 rank(observ(System));
6 rank(ctrb(System)); %Prüfung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

8 Eig = Verstaerkung * eig(A); %Berechnung der Eigenwerte
9 sigma = (Eig); %Festlegung der Beobachtereigenwerte

11 L = place(A',C',sigma)'; %Entwurf der Rückführmatrix L

13 end
```

Störgrößenbeobachtercode:

```
1 function [Ls, Lz] = Stoergroessenbeobachter(A, B, C, D, Verstaerkung )
3 %Störgrößenbeobachterentwurf
4 System = ss(A,B,C,D);
5 rank(observ(System));
6 rank(ctrb(System)); %Prüfung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

8 Ae = [A B; zeros(2,5)];
9 Ce = [C D'];

11 Eig = Verstaerkung * eig(Ae);
12 Eig(4,1) = 1.01 * Eig(1,1);
13 Eig(5,1) = 0.99 * Eig(1,1);
14 sigma = (Eig);

16 Lte = place(Ae', Ce', sigma);
17 Le = Lte';

19 Ls = [Le(1,1) Le(1,2);
20       Le(2,1) Le(2,2);
21       Le(3,1) Le(3,2)];

23 Lz = [Le(4,1) Le(4,2);
24       Le(5,1) Le(5,2)];

26 end
```

C. Messungen ohne Regler

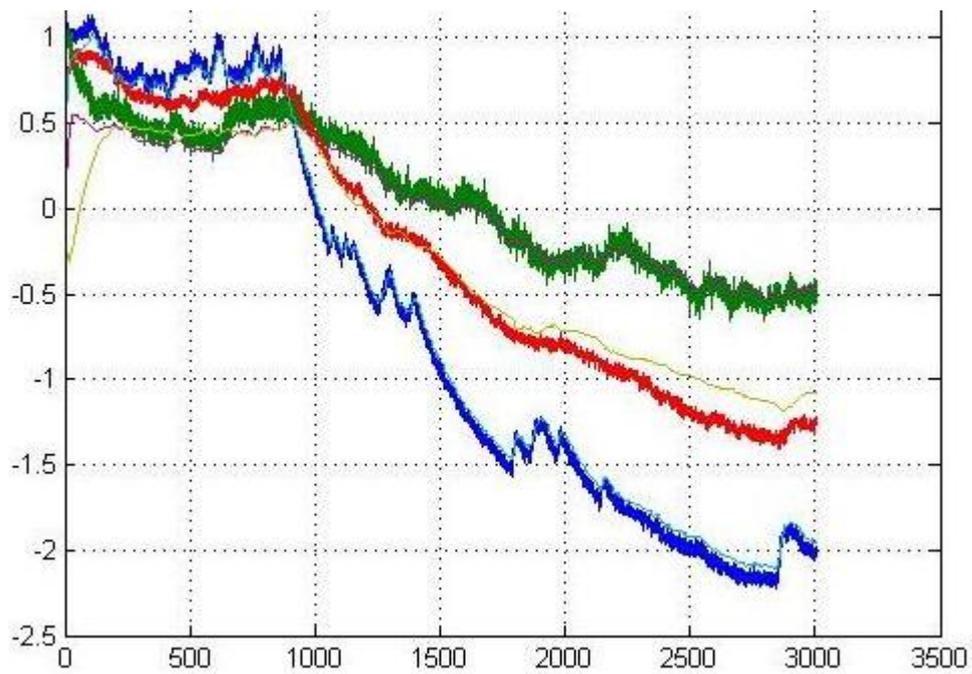


Abbildung C.1.: Aussteuerung ohne Reglersystem mit Beobachter

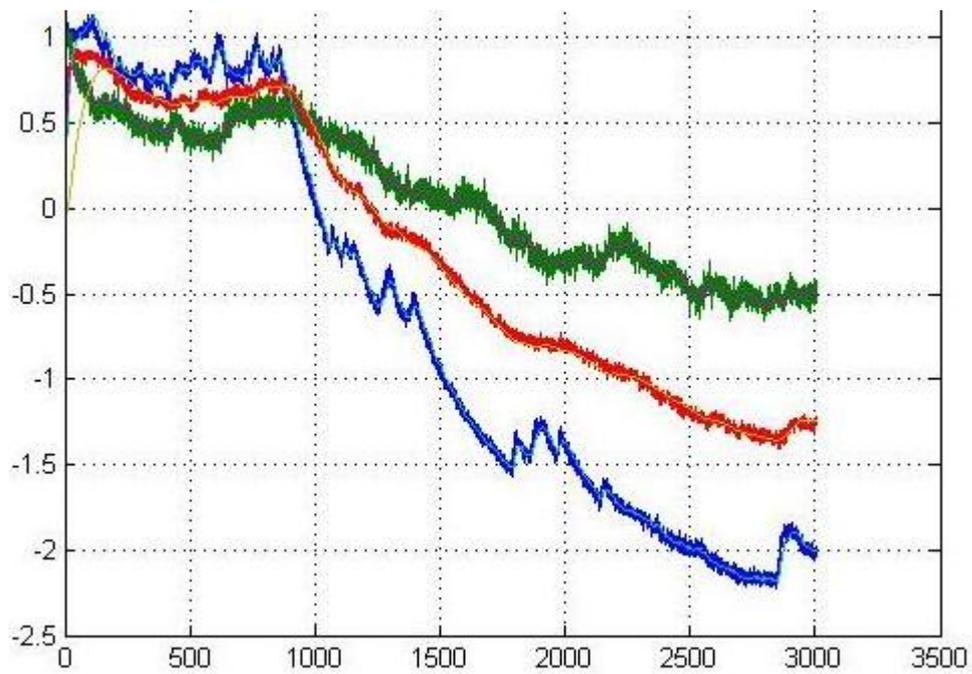


Abbildung C.2.: Aussteuerung ohne Reglersystem mit Störgrößenbeobachter

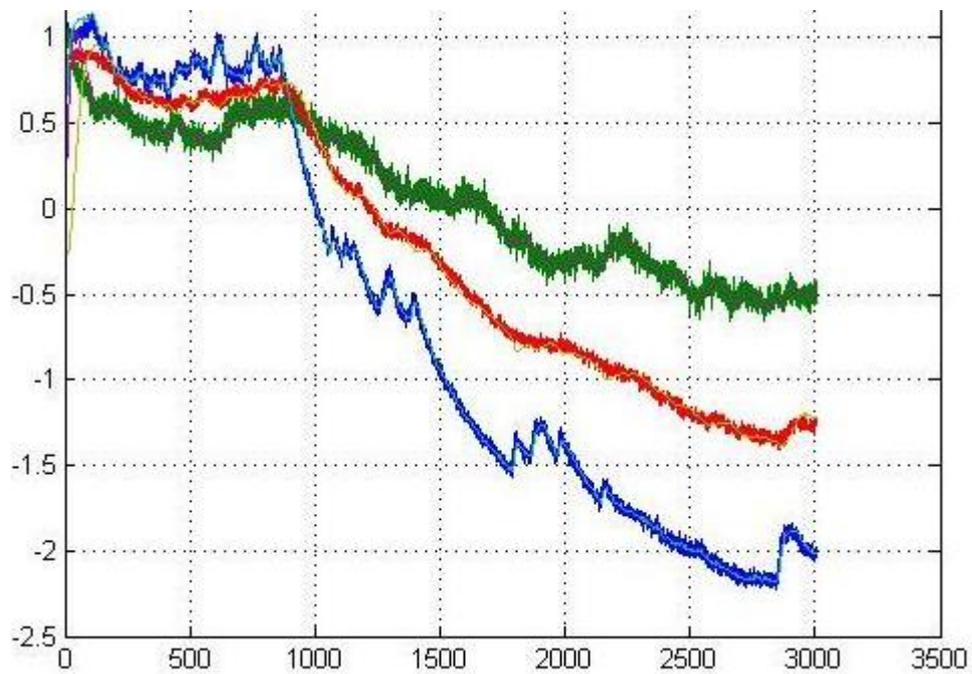


Abbildung C.3.: Aussteuerung ohne Reglersystem mit Prototyp

Die Beobachtersysteme haben logischer Weise keinen Einfluss auf die Aussteuerung. Das

Beobachtersystem versucht auf Grund der Ausgangsdifferenzen sich dem realen System anzugleichen.

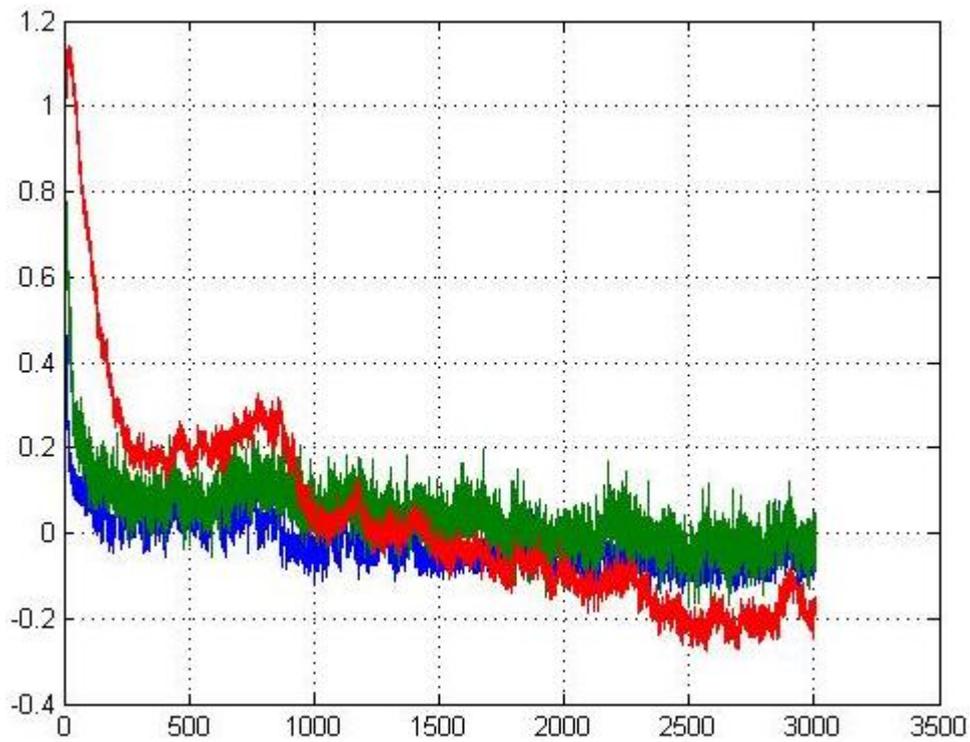


Abbildung C.4.: Differenz ohne Reglersystem mit Beobachter

Differenzangleichzeit 1000 sek

Enddifferenz 0,2

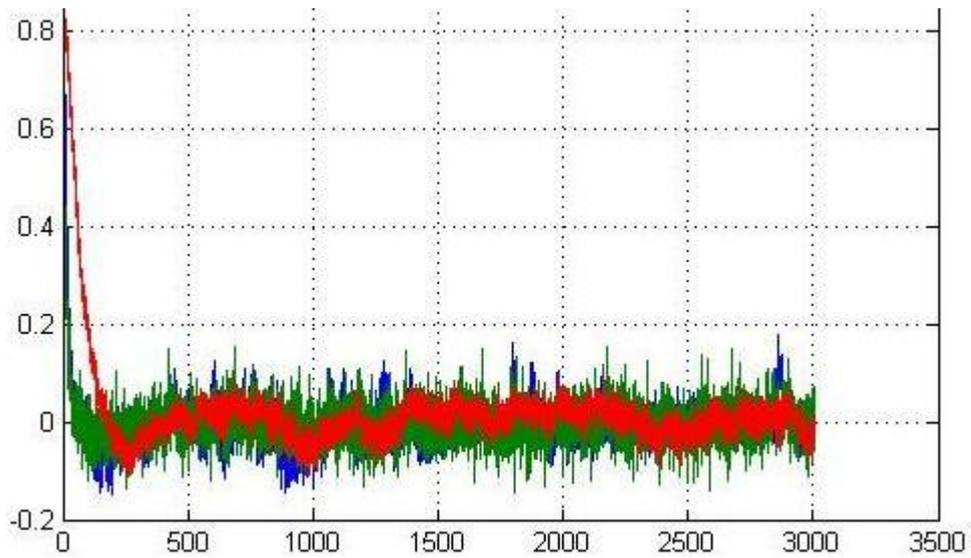


Abbildung C.5.: Differenz ohne Reglersystem mit Störgrößenbeobachter
Differenzangleichzeit 500 sek
Enddifferenz 0

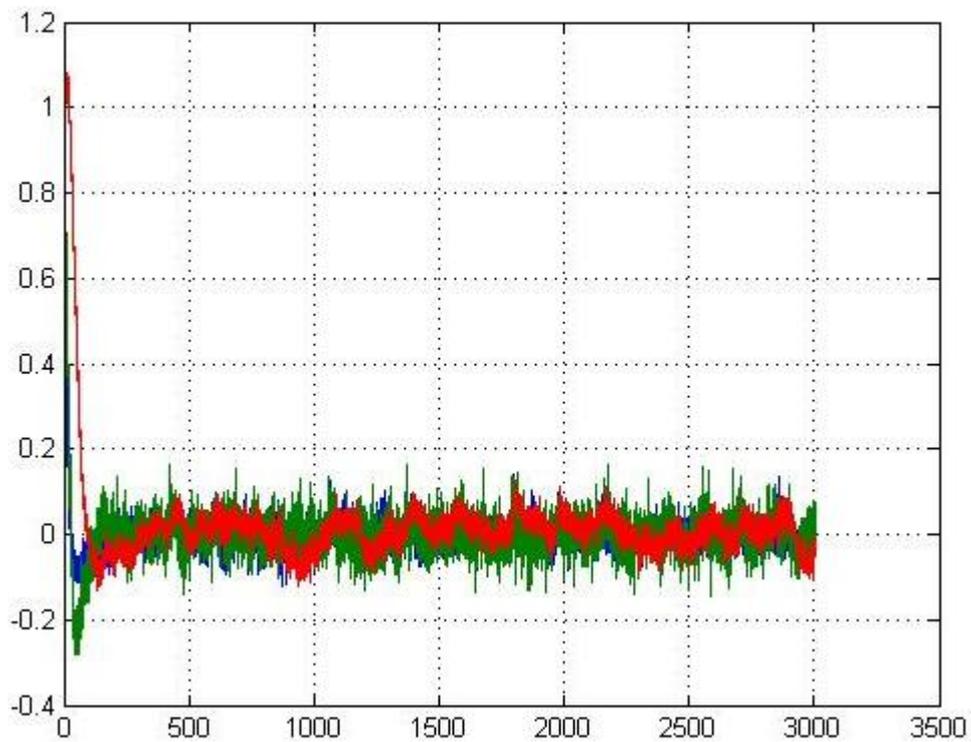


Abbildung C.6.: Differenz ohne Reglersystem mit Prototyp

Differenzangleichzeit 400 sek Enddifferenz $\pm 0,1 \sim 0$

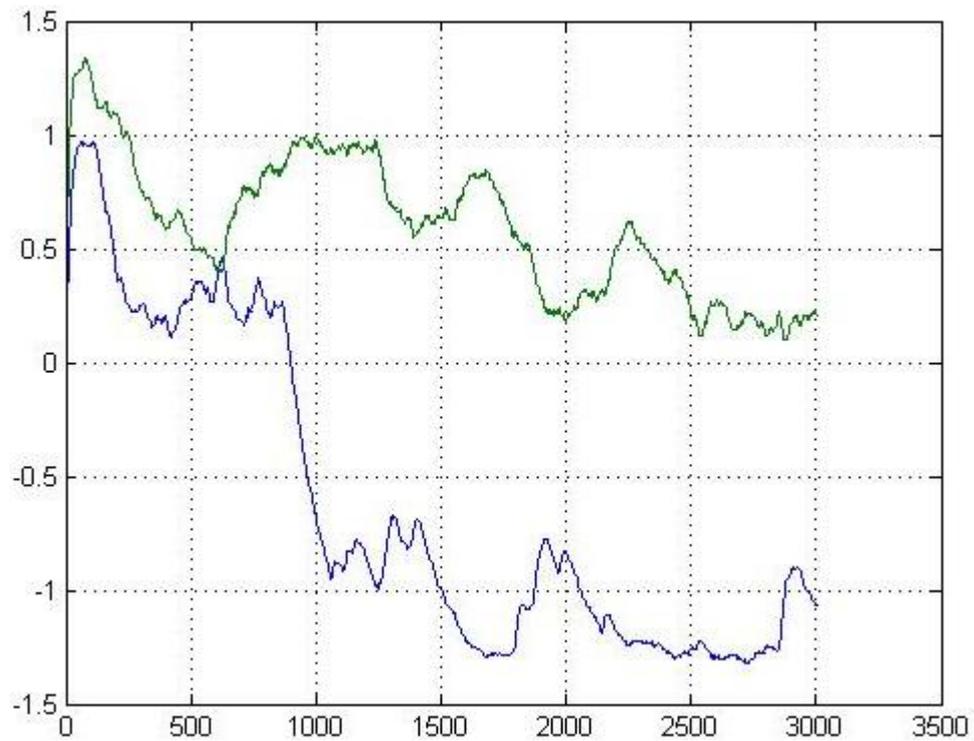


Abbildung C.7.: Störung ohne Reglersystem mit Störgrößenbeobachter

Störgröße Tank1: -1,1

Störgröße Tank2: 0,25

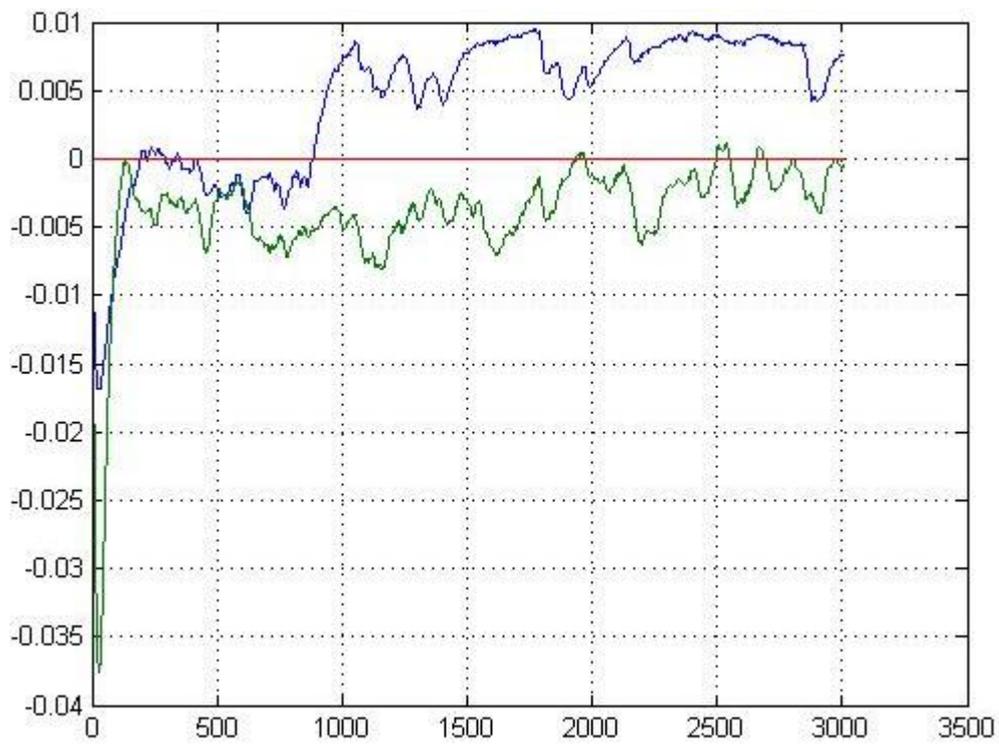


Abbildung C.8.: Störung ohne Reglersystem mit Prototyp

Störgröße Tank1: $0,0075 \approx 0$

Störgröße Tank2: $-0,001 \approx 0$

D. Messungen Zustandsregler

Wegen unterschiedlichen Startbedingungen werden die Führungs- und Störsprünge nicht immer an dem gleichen Zeitpunkt durchgeführt. Der aktuelle Zeitpunkt wird daher immer dazu geschrieben.

Die folgenden Graphen sind mit ein Zustandsregler und Beobachtersysteme, die die Polstellen des Systems auf den fünffachen Wert bringen, durchgeführt worden:

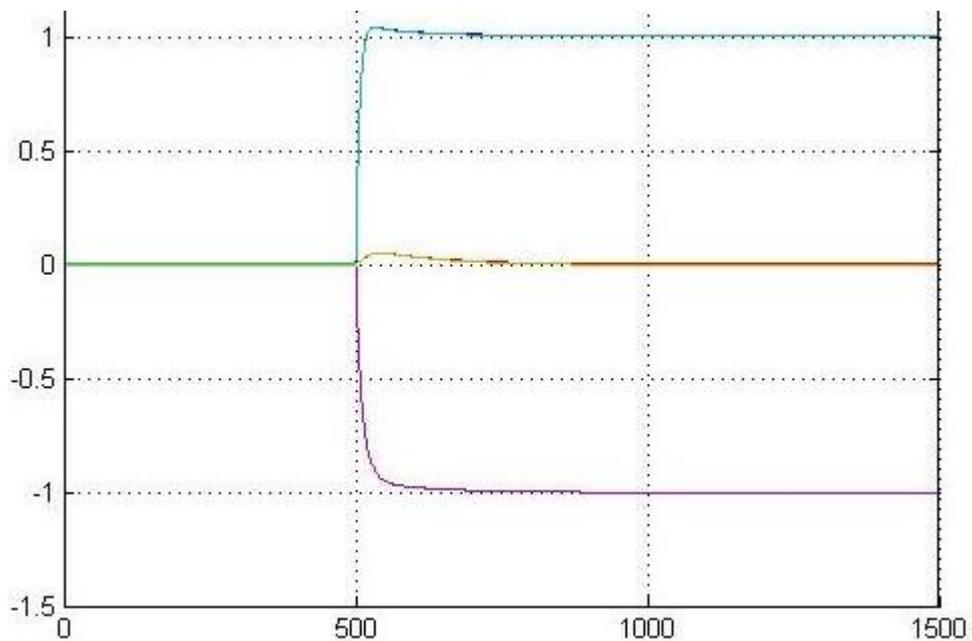


Abbildung D.1.: Simulation Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung

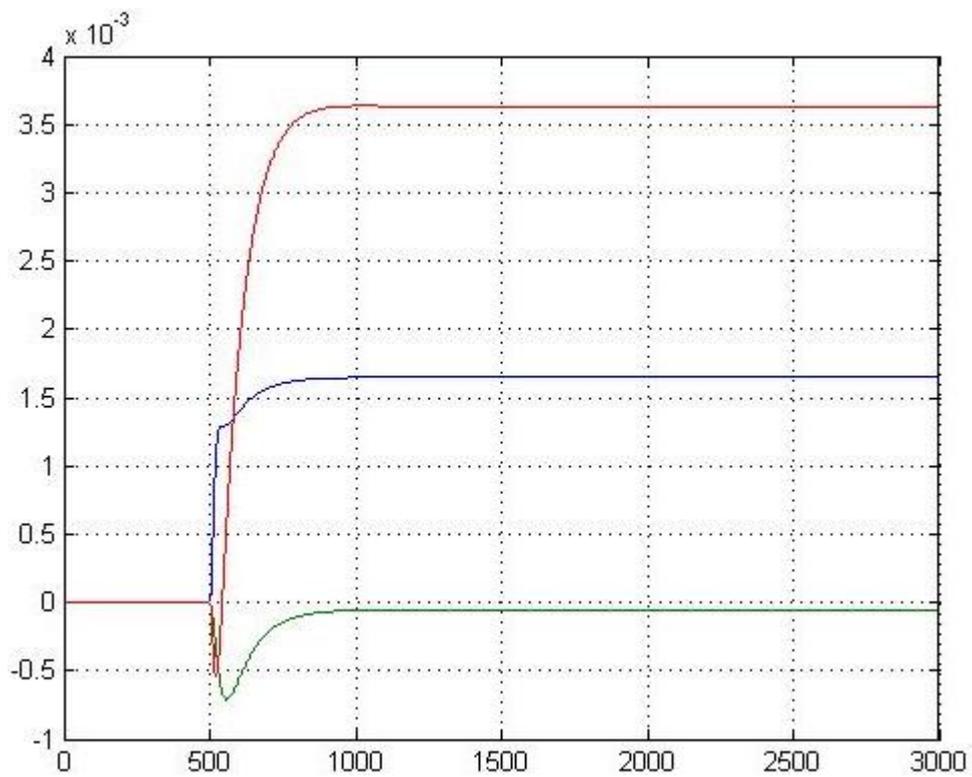


Abbildung D.2.: Simulation Differenz Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung

(Abb. D.1 und D.2):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 833sek

Maximale Differenz: $\sim 4 \cdot 10^{-3}$

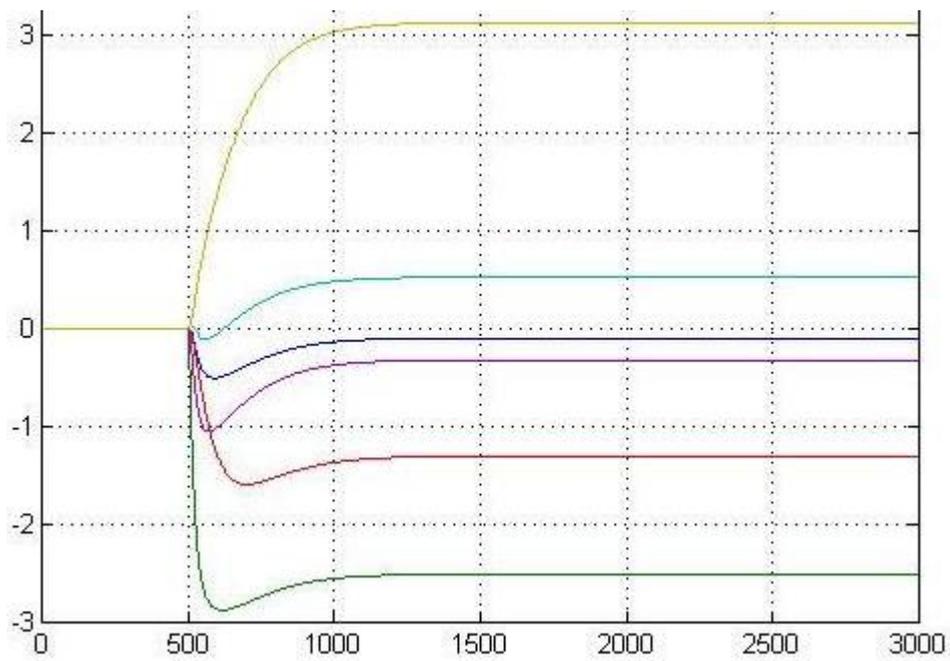


Abbildung D.3.: Simulation Zustandsregler mit Beobachter Störsprung

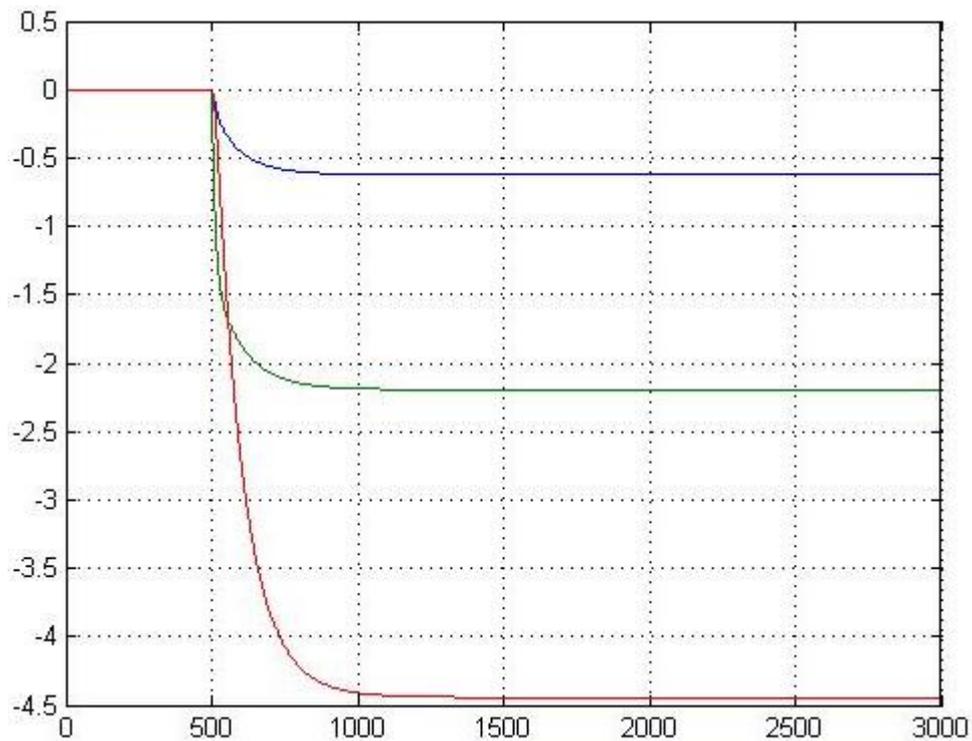


Abbildung D.4.: Simulation Differenz Zustandsregler mit Beobachter Störsprung

(Abb. D.3 und D.4):

Störungssprungbeginn: 500sek

Störungssprungende: 1227sek

Differenzsprungbeginn: 500sek

Differenzsprungende: 1333sek

Maximale Differenz: 4,4 cm

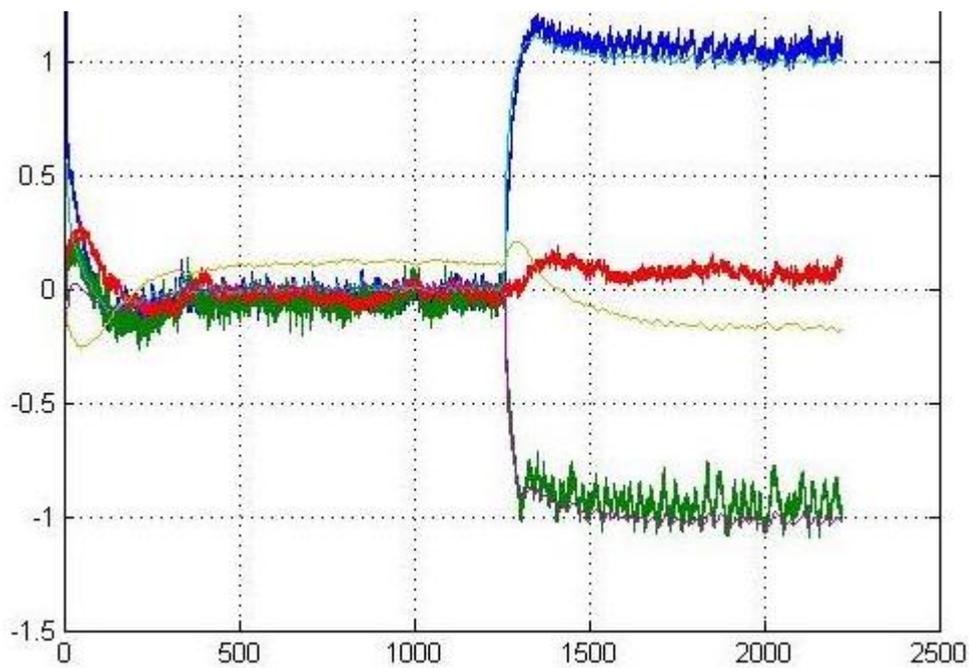


Abbildung D.5.: Real Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung

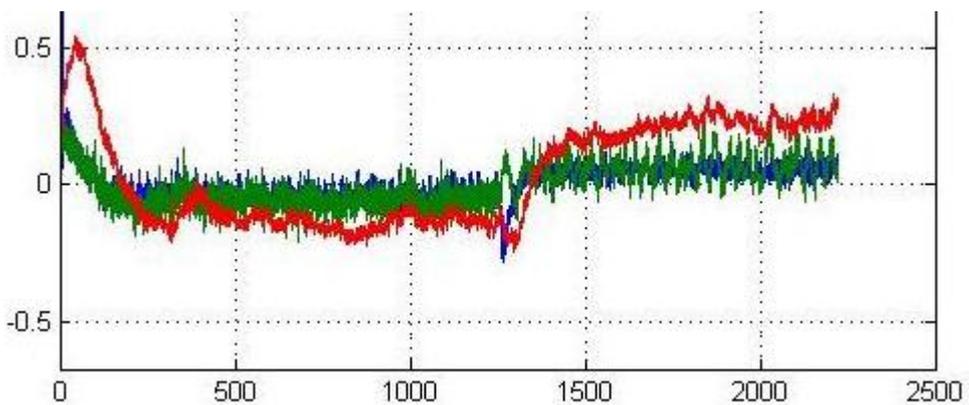


Abbildung D.6.: Real Differenz Zustandsregler mit Beobachter Führungssprung

(Abb. D.5 und D.6):

Führungssprungbeginn: 1250sek

Führungssprungende: 1610sek

Maximale Differenz: 0,3 cm

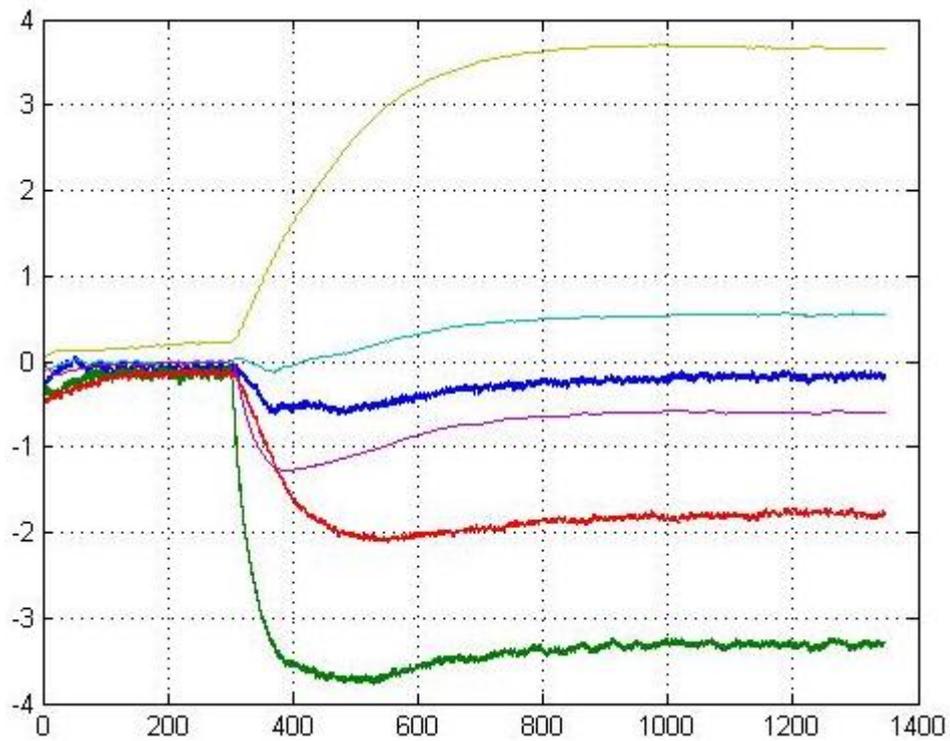


Abbildung D.7.: Real Zustandsregler mit Beobachter Störsprung

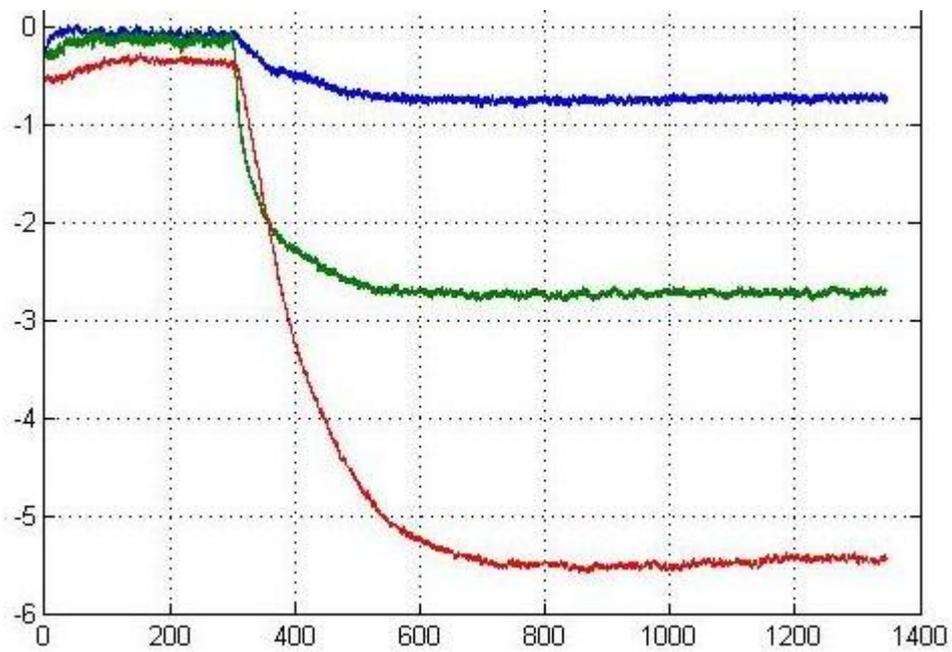


Abbildung D.8.: Real Differenz Zustandsregler mit Beobachter Störsprung

(Abb. D.7 und D.8):

Störungssprungbeginn: 300sek

Störungssprungende: 885sek

Differenzsprungbeginn: 300sek

Differenzsprungende: 720sek

Maximale Differenz: 5,5cm

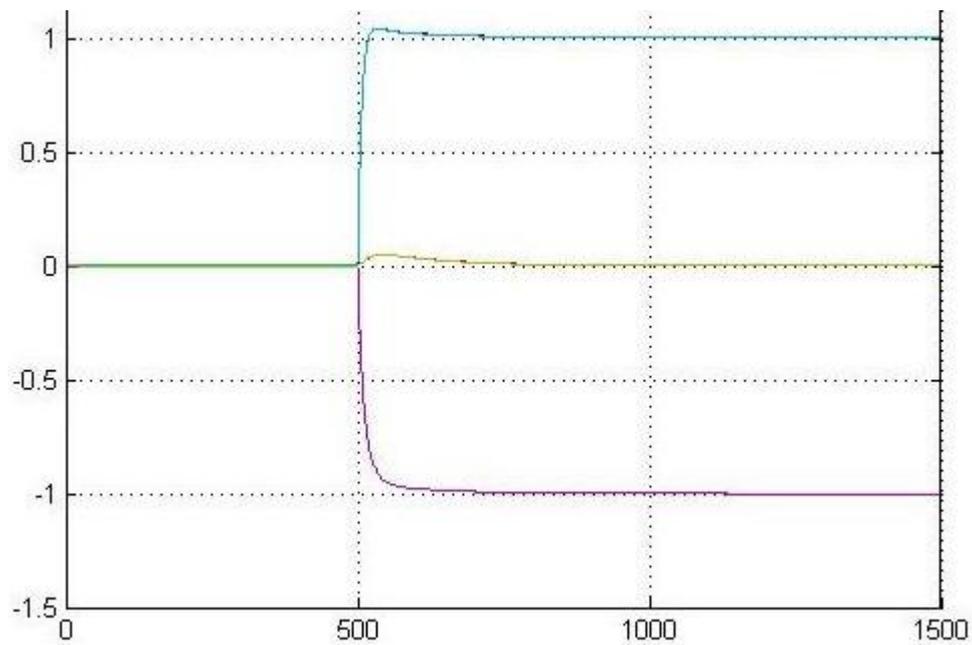


Abbildung D.9.: Simulation Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung

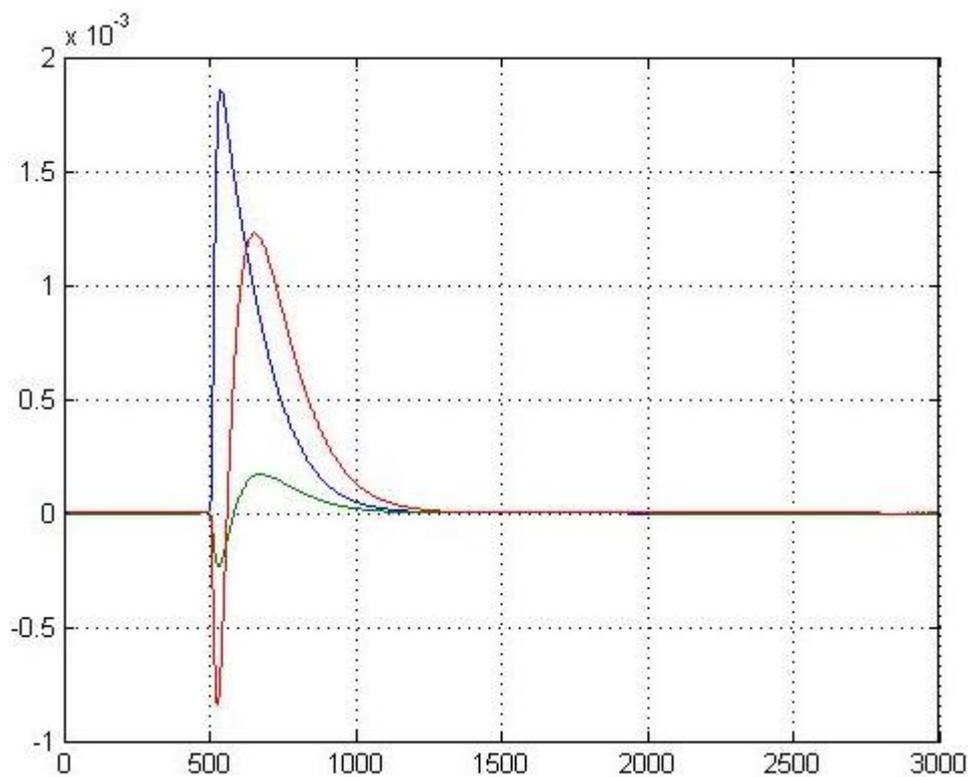


Abbildung D.10.: Simul. Differenz Zustandsregler Störgrößenbeobachter Führungssprung

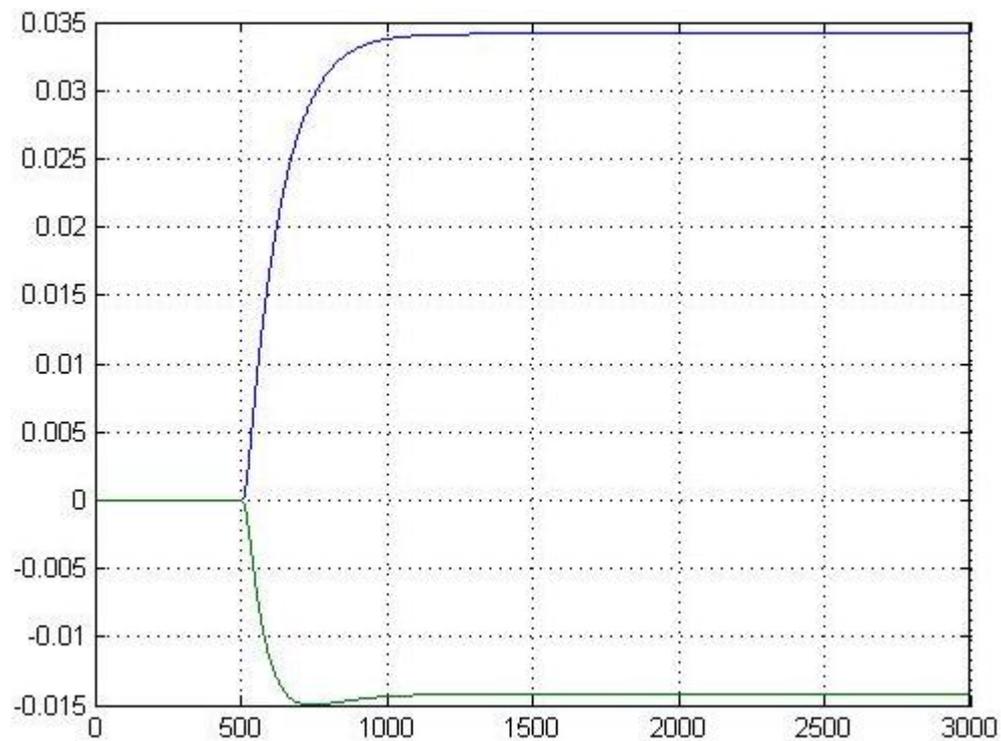


Abbildung D.11.: Simulation St. Zustandsregler Störgrößenbeobachter Führungssprung
(Abb. D.9, D.10 und D.11):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 801sek

Maximale Differenz: $2 \cdot 10^{-3}$

Störung nach Sprung: 0,034 und -0,014

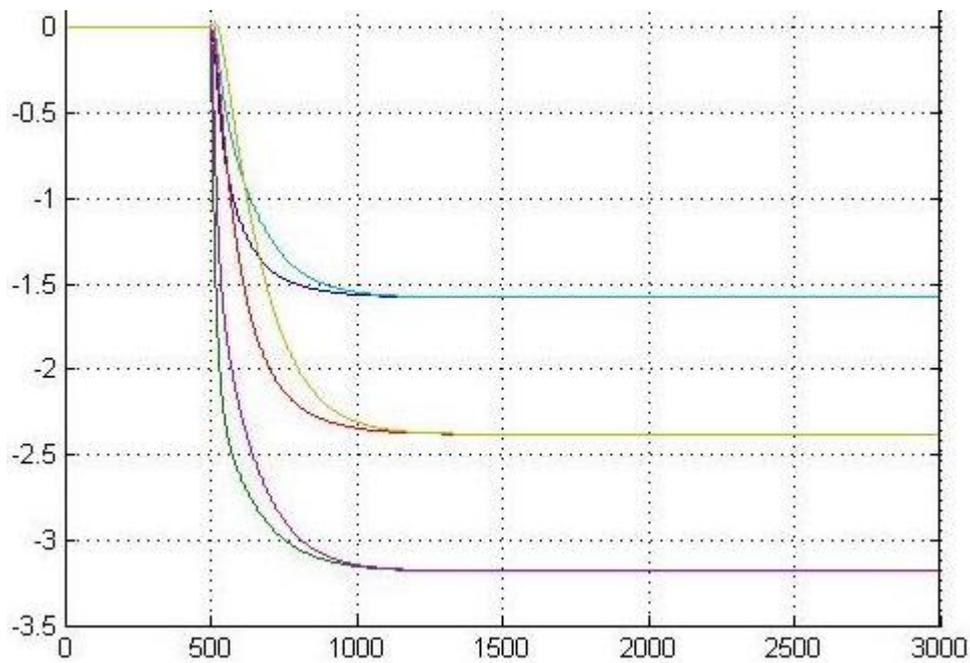


Abbildung D.12.: Simulation Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

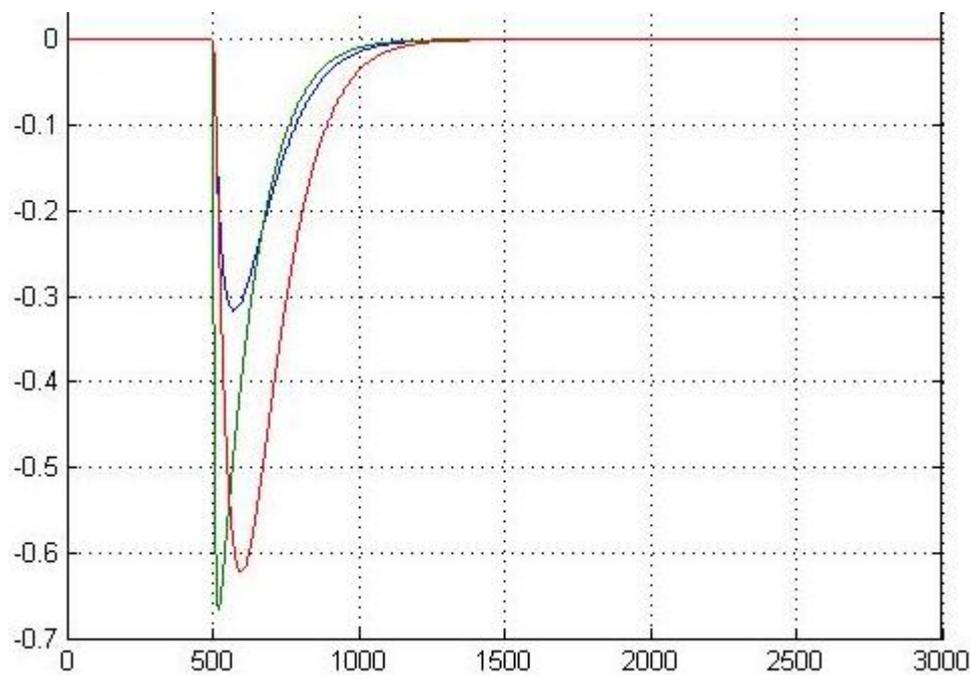


Abbildung D.13.: Simulation Dif. Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

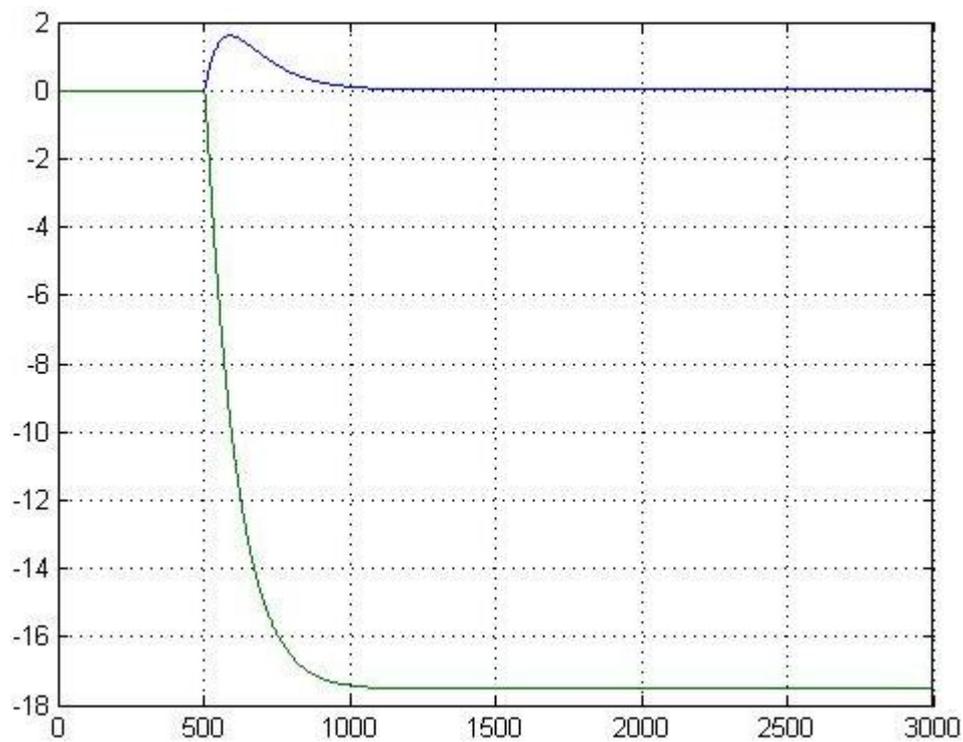


Abbildung D.14.: Simulation Störung Zustandsregler Störgrößenbeobachter Störsprung
(Abb. D.12, D.13 und D.14):

Störungssprungbeginn: 500sek

Störungssprungende: 1142sek

Differenzsprungbeginn: 500sek

Differenzsprungende: 1250sek

Maximale Differenz: 0,66

Störung nach Sprung: 0 und -17,5

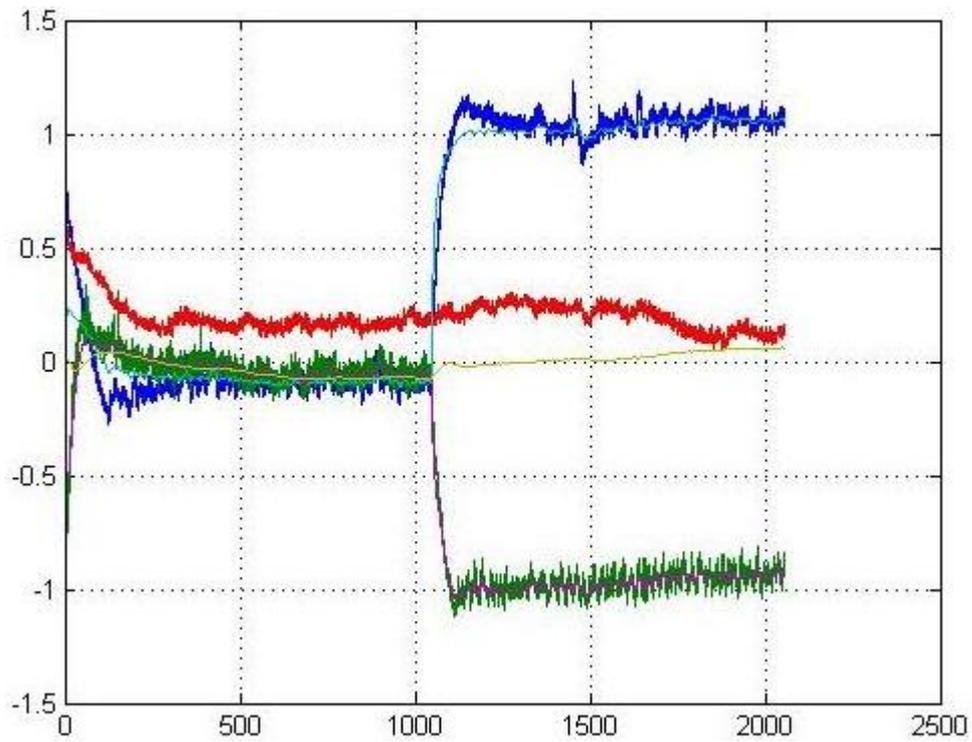


Abbildung D.15.: Real Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung

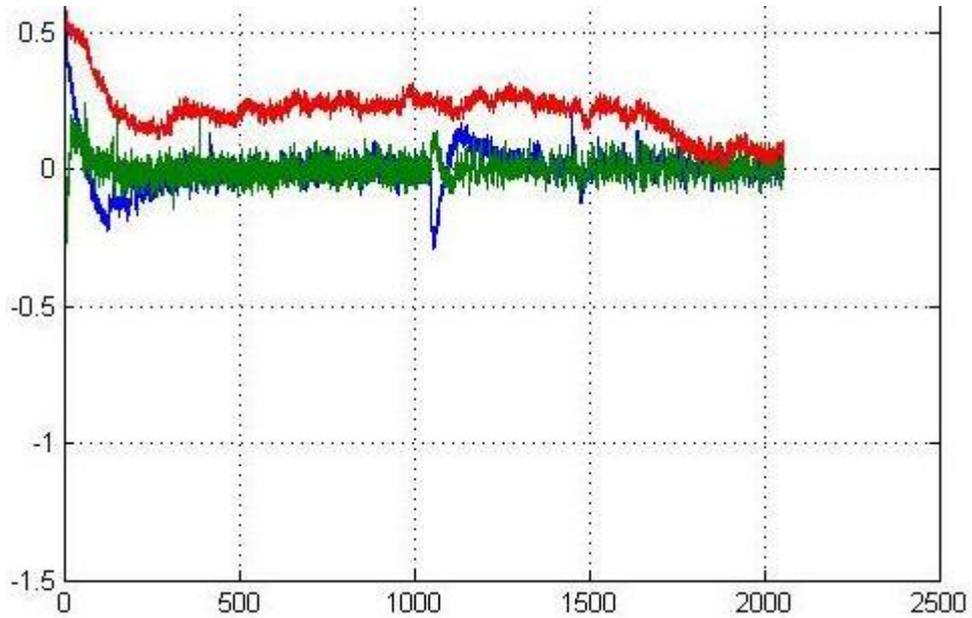


Abbildung D.16.: Real Dif. Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung

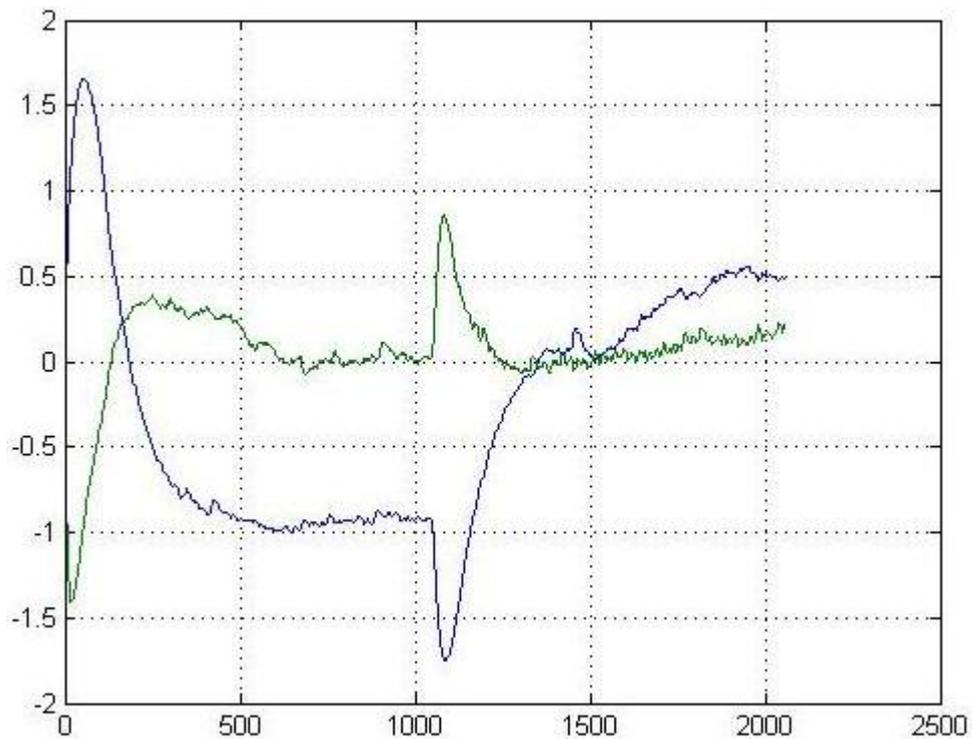


Abbildung D.17.: Real St. Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung
(Abb. D.15, D.16 und D.17):

Führungssprungbeginn: 1050sek

Führungssprungende: 1192sek

Maximale Differenz: 0,3

Störung nach Sprung: 0,5 und 0,2

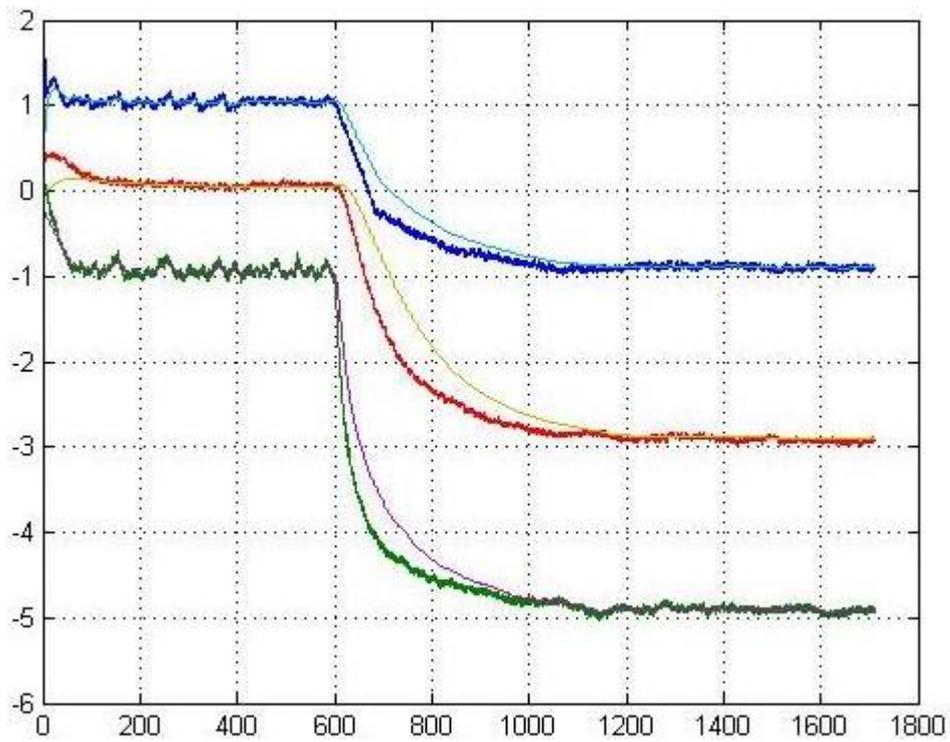


Abbildung D.18.: Real Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

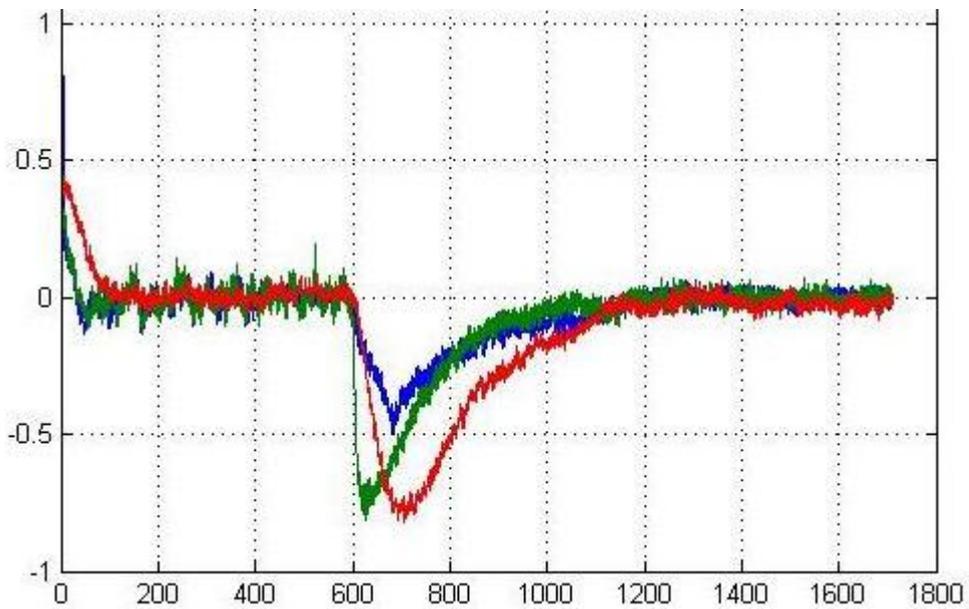


Abbildung D.19.: Real Differenz Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

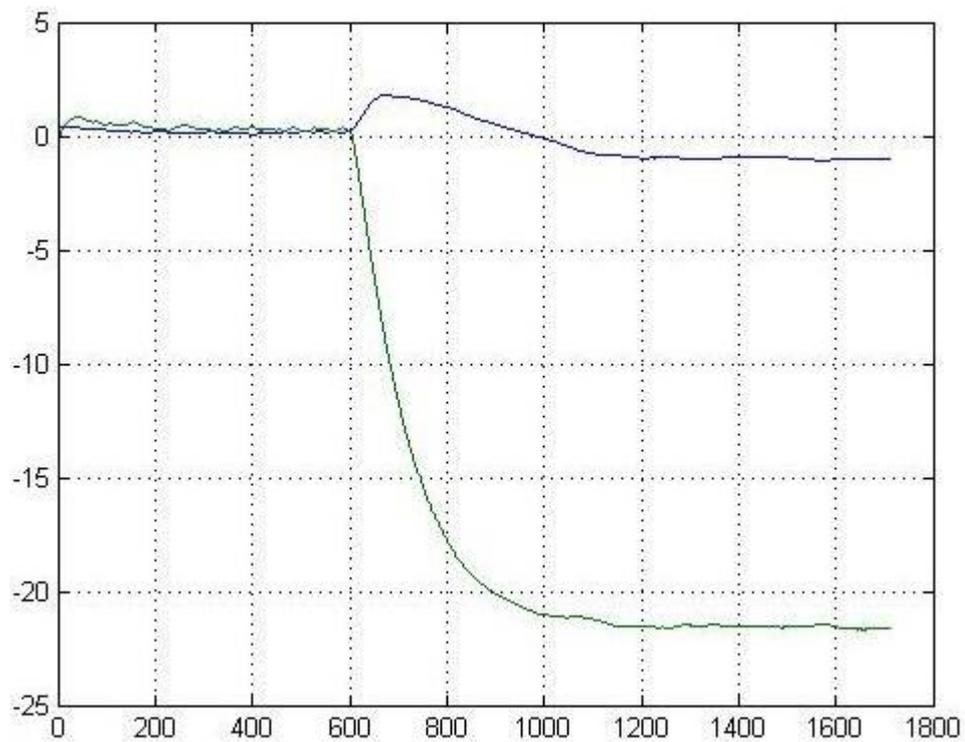


Abbildung D.20.: Real Störung Zustandsregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung
(Abb. D.18, D.19 und D.20):

Störungssprungbeginn: 600sek

Störungssprungende: 1200sek

Differenzsprungbeginn: 600sek

Differenzsprungende: 1130sek

Maximale Differenz: 0,75

Störung nach Sprung: -1 und -22

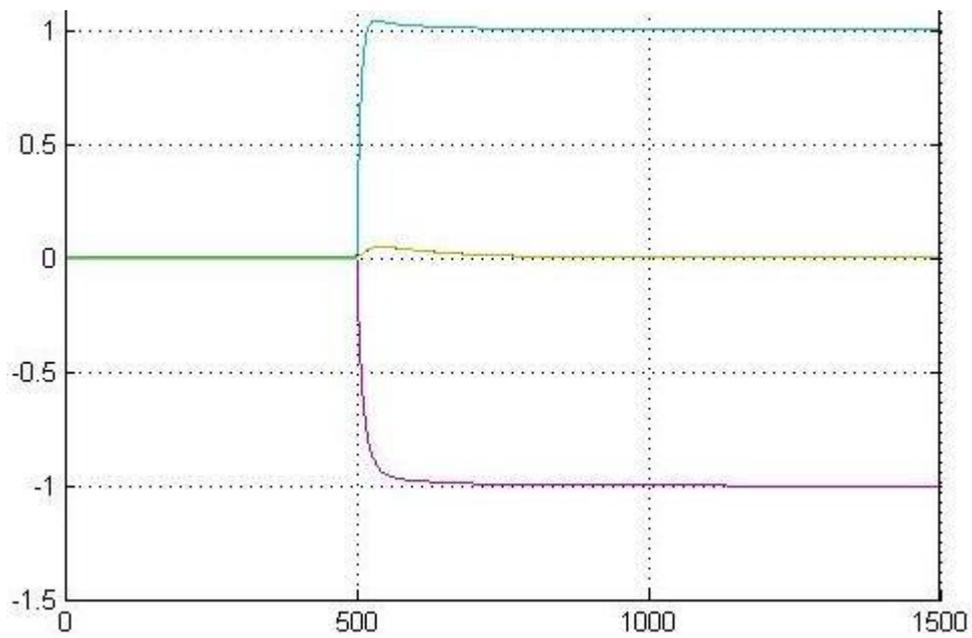


Abbildung D.21.: Simulation Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung

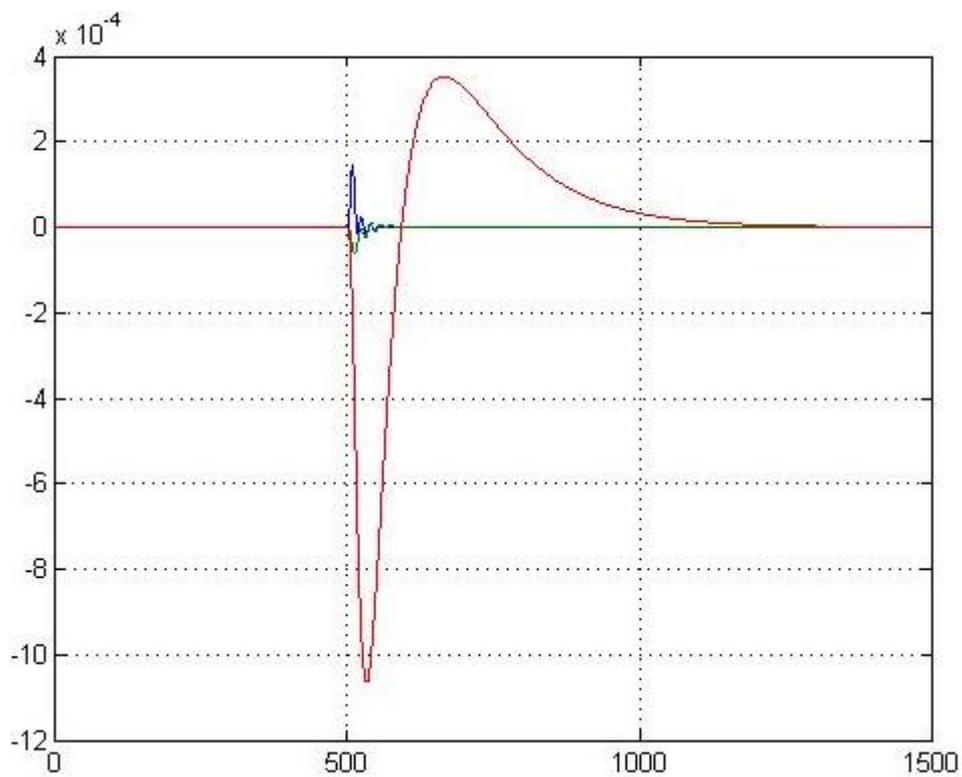


Abbildung D.22.: Simulation Differenz Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung

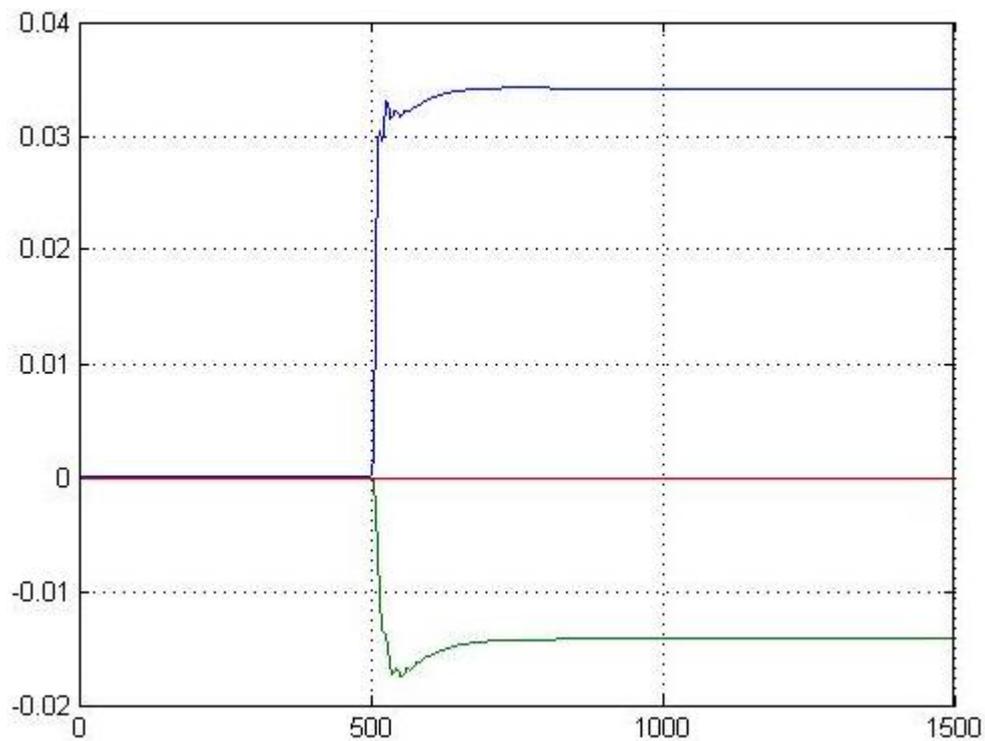


Abbildung D.23.: Simulation Störung Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung

(Abb. D.21, D.22 und D.23):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 700sek

Maximale Differenz: $11 \cdot 10^{-4}$

Störung nach Sprung: 0,035 und -0,014

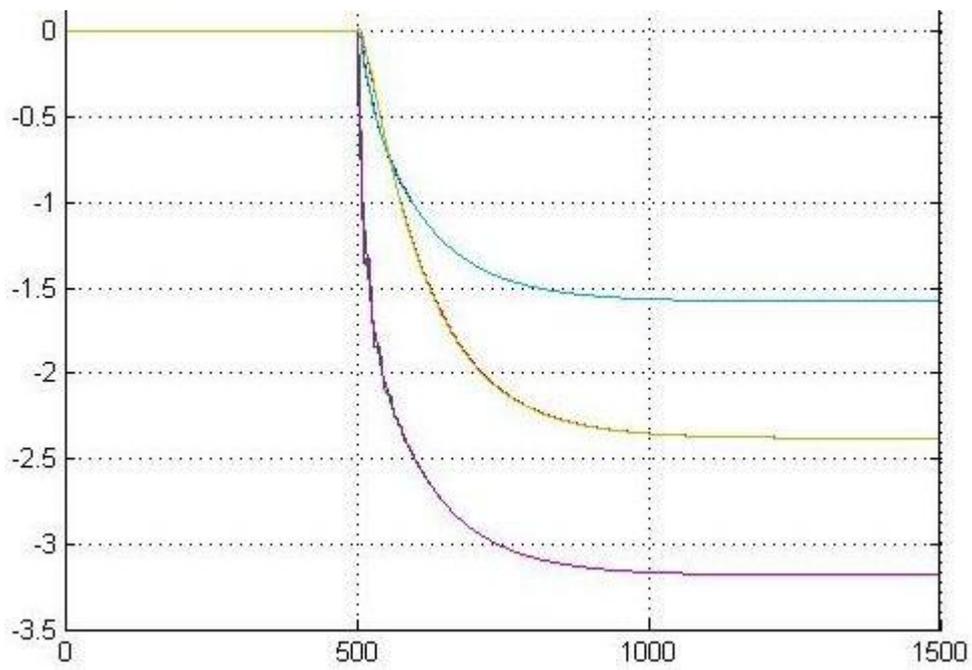


Abbildung D.24.: Simulation Zustandsregler mit Prototyp Störsprung

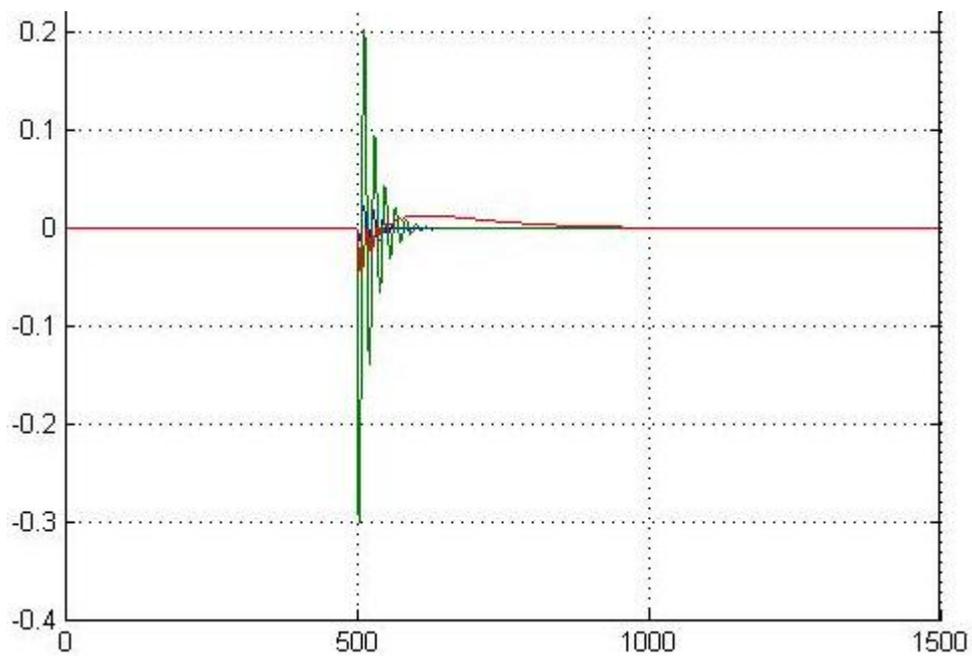


Abbildung D.25.: Simulation Differenz Zustandsregler mit Prototyp Störsprung

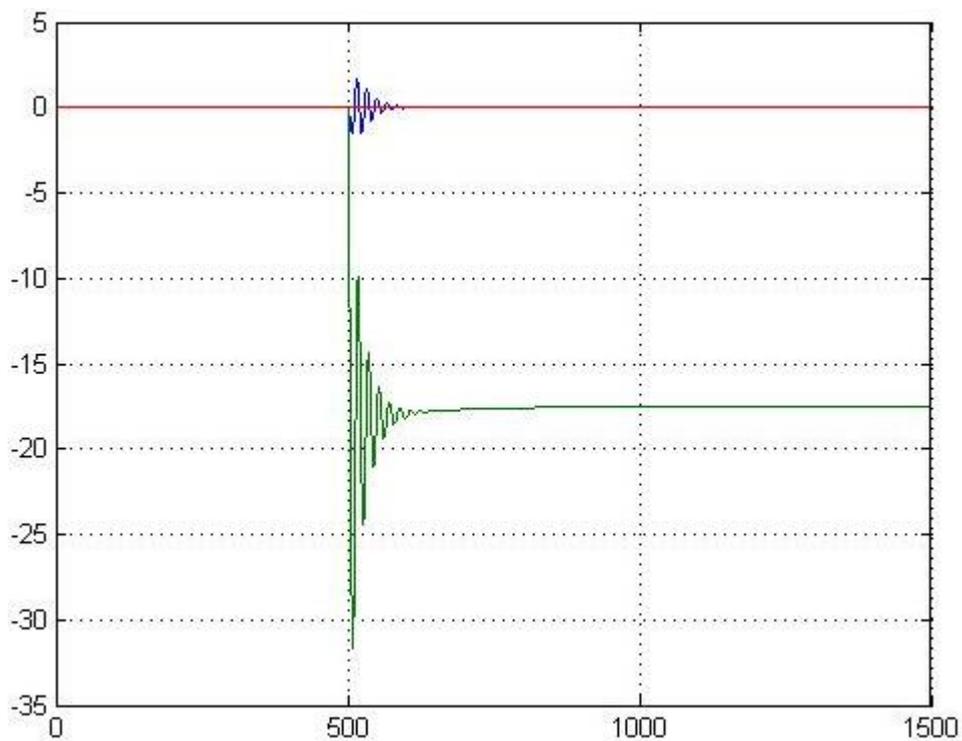


Abbildung D.26.: Simulation Störung Zustandsregler mit Prototyp Störsprung

(Abb. D.24, D.25 und D.26):

Störungssprungbeginn: 500sek

Störungssprungende: 1076sek

Differenzsprungbeginn: 500sek

Differenzsprungende: 956sek

Maximale Differenz: 0,3

Störung nach Sprung: 0 und -17,5

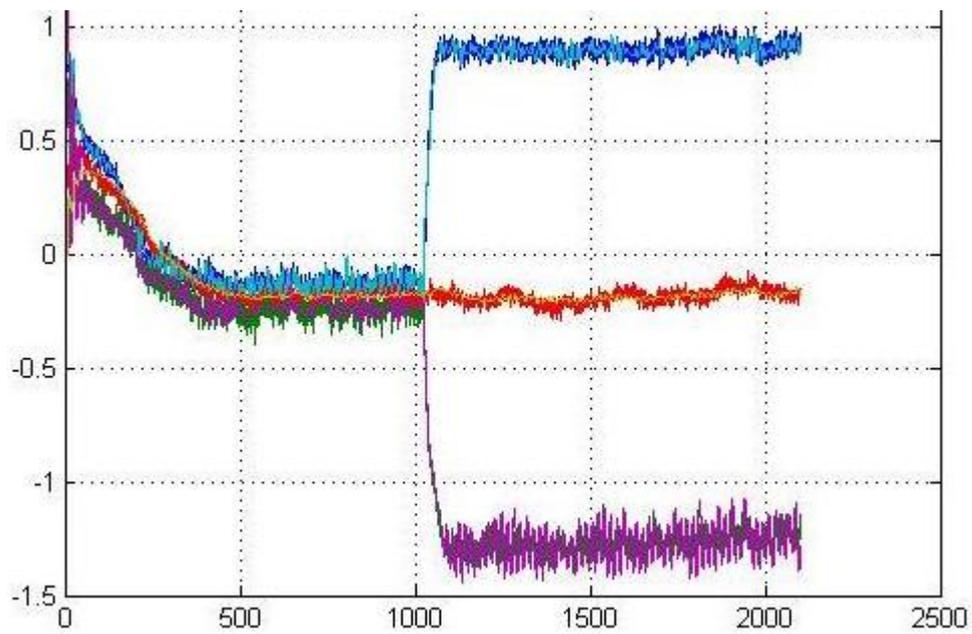


Abbildung D.27.: Real Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung

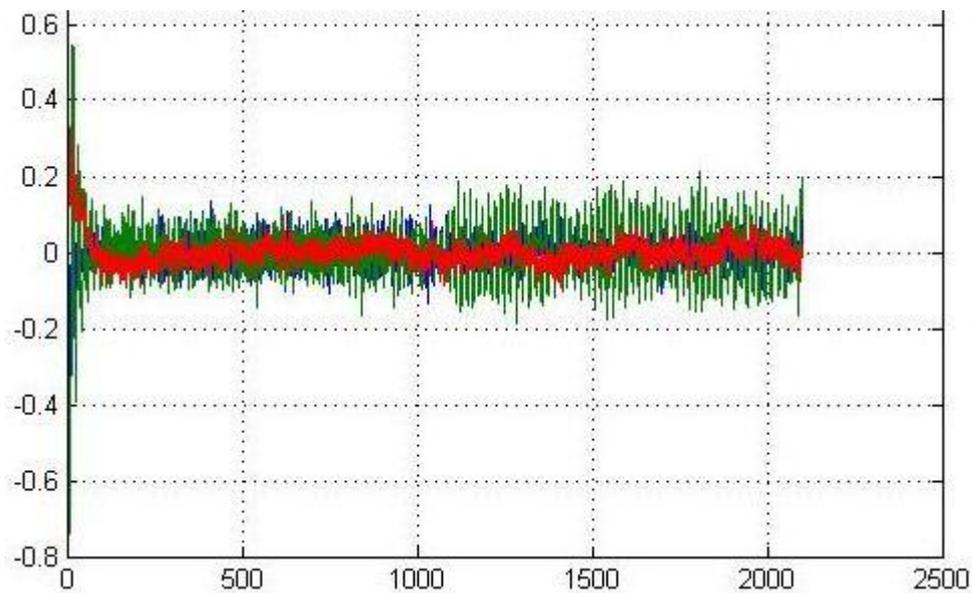


Abbildung D.28.: Real Differenz Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung

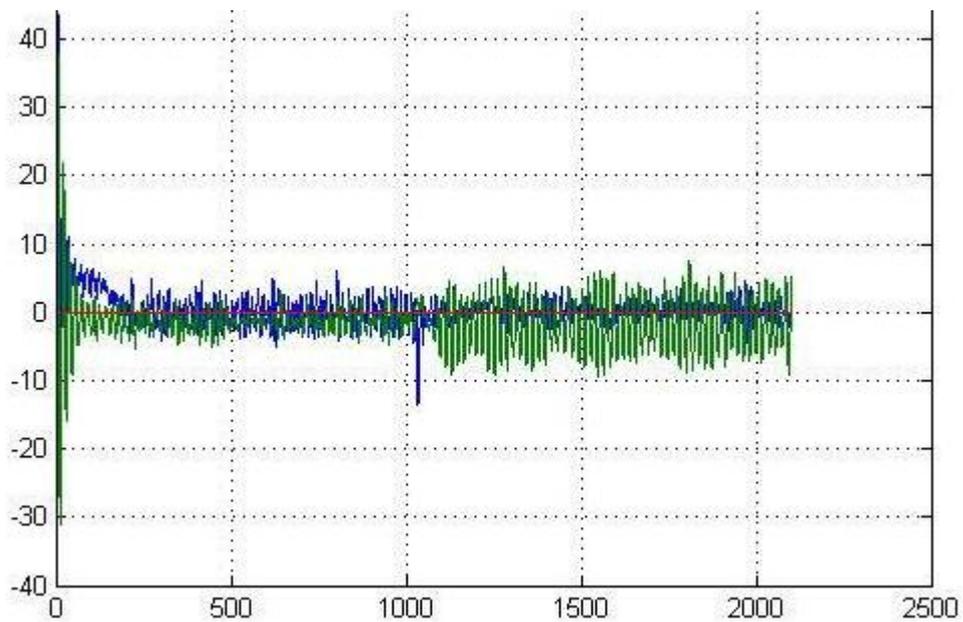


Abbildung D.29.: Real Störung Zustandsregler mit Prototyp Führungssprung

(Abb. [D.27](#), [D.28](#) und [D.29](#)):

Führungssprungbeginn: 1000sek

Führungssprungende: 1083sek

Maximale Differenz: 0,2

Störung nach Sprung: gemittelt 0 und 0

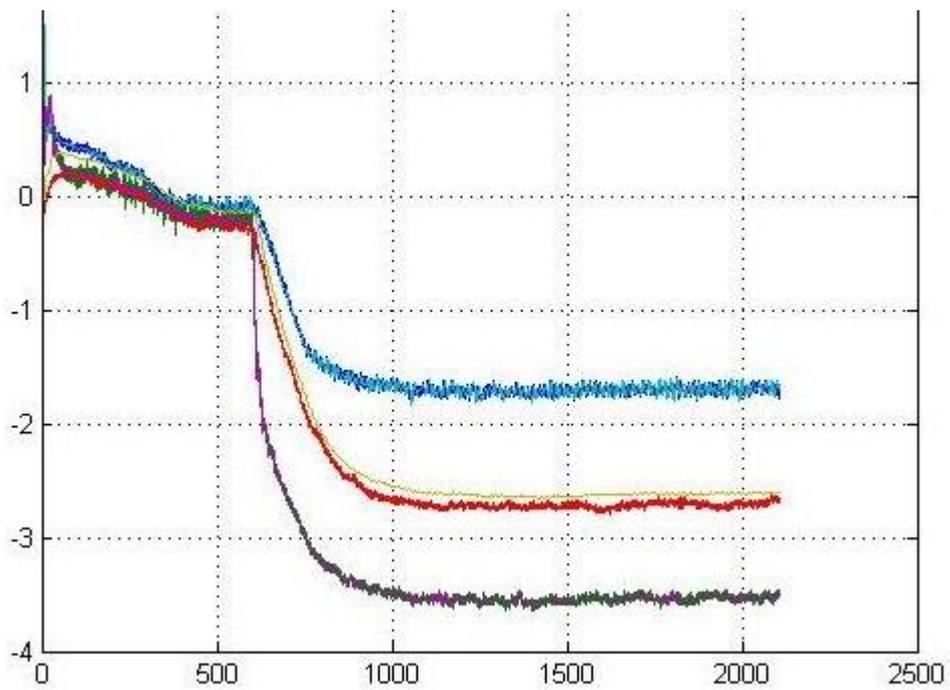


Abbildung D.30.: Real Zustandsregler mit Prototyp Störsprung

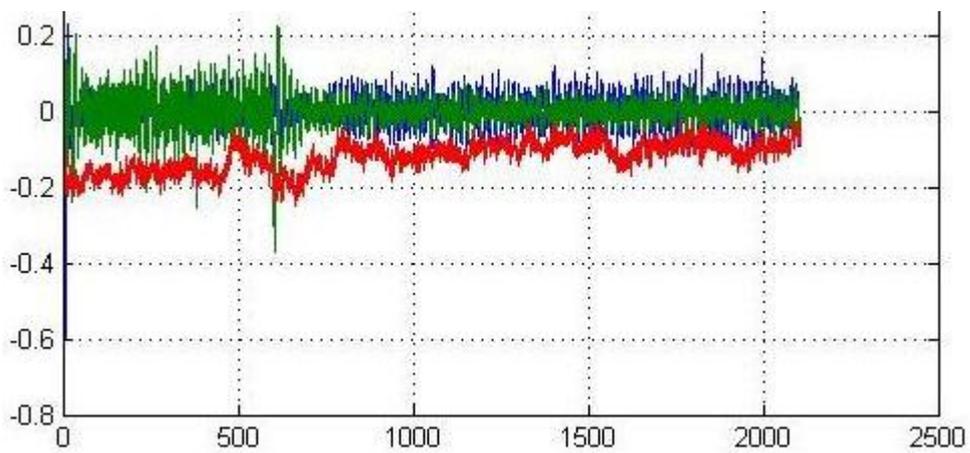


Abbildung D.31.: Real Differenz Zustandsregler mit Prototyp Störsprung

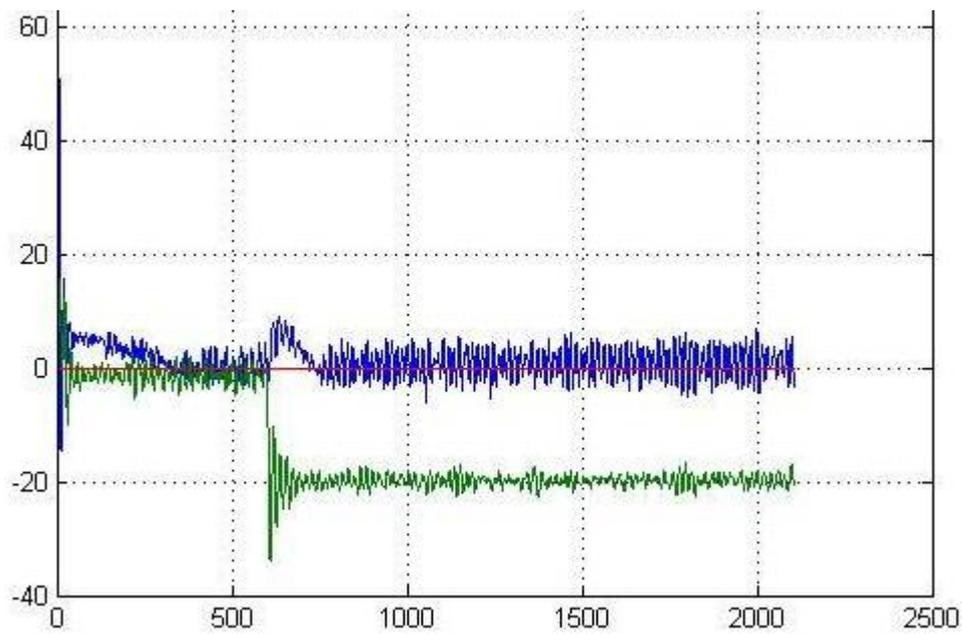


Abbildung D.32.: Real Störung Zustandsregler mit Prototyp Störsprung

(Abb. [D.30](#), [D.31](#) und [D.32](#)):

Störungssprungbeginn: 600sek

Störungssprungende: 1158sek

Differenzsprungbeginn: -

Differenzsprungende: -

Maximale Differenz: 0,38

Störung nach Sprung: gemittelt 0 und -20

D.1. Messungen Zustandsregler510

Die folgenden Graphen sind mit ein Zustandsregler, der die Polstellen des Systems auf den fünffachen Wert bringt, und den Beobachtersystemen, die die Polstellen des Systems auf den zehnfachen Wert bringen, durchgeführt worden:

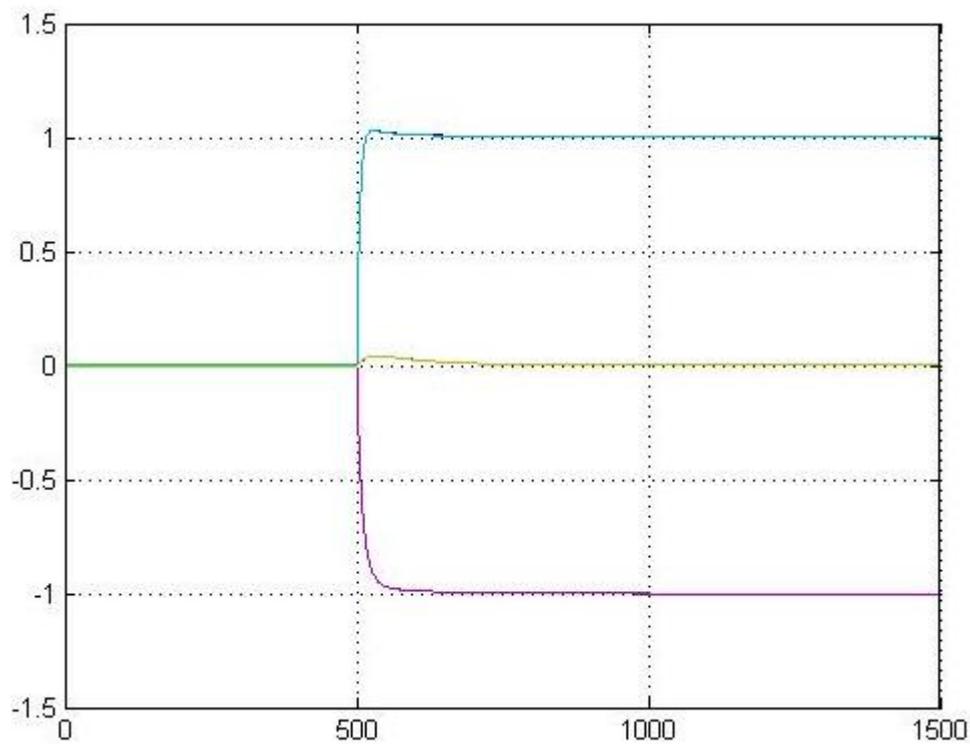


Abbildung D.33.: Sim. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

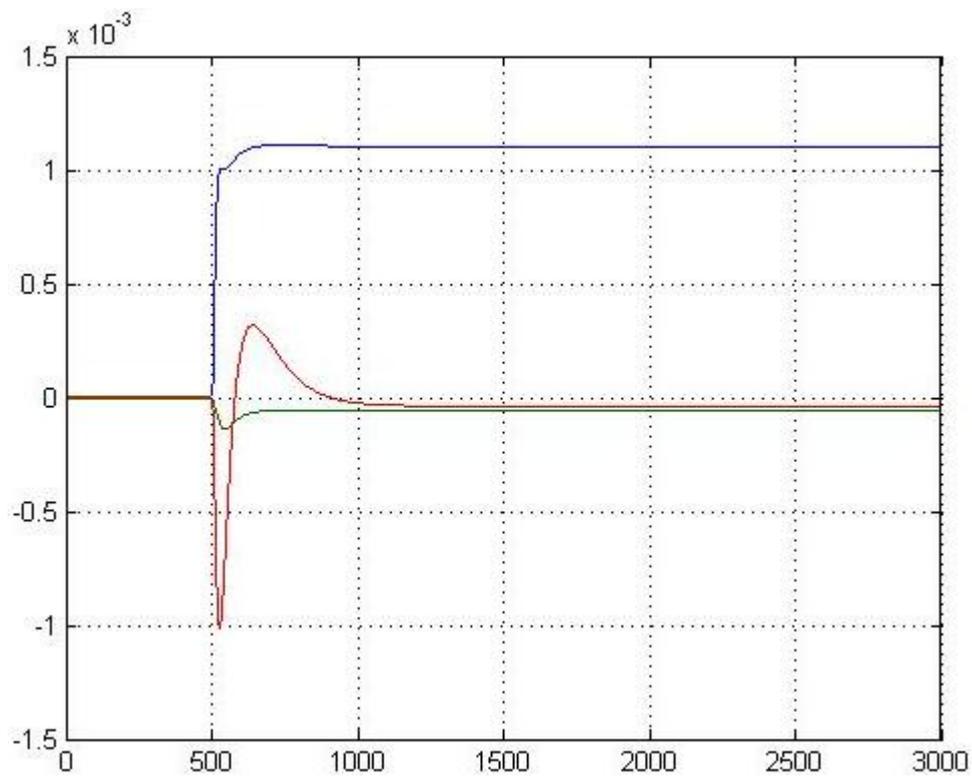


Abbildung D.34.: Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

(Abb. D.33 und D.34):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 700sek

Maximale Differenz: $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$

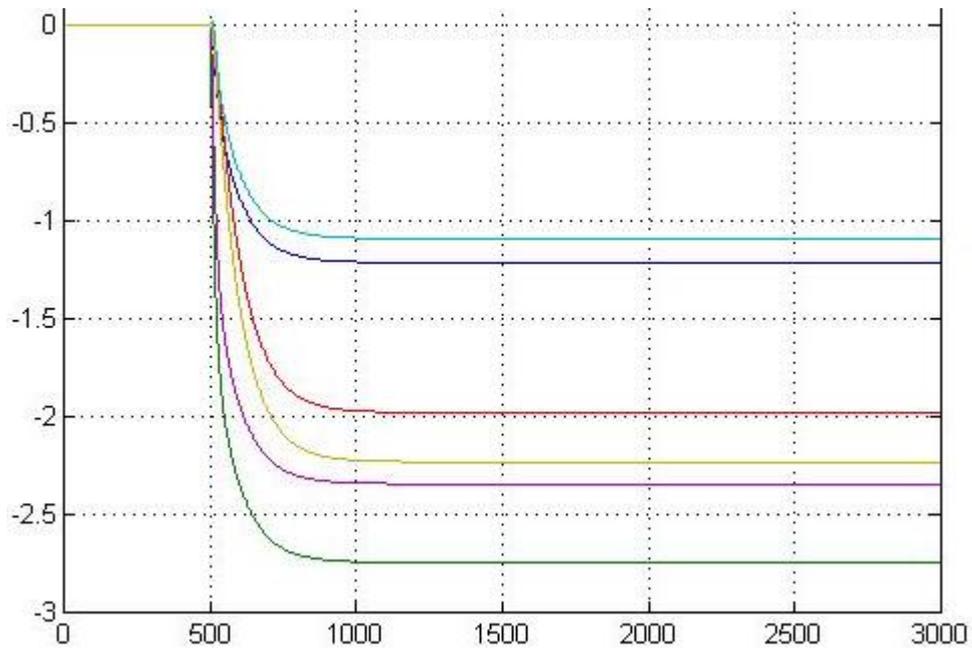


Abbildung D.35.: Sim. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung

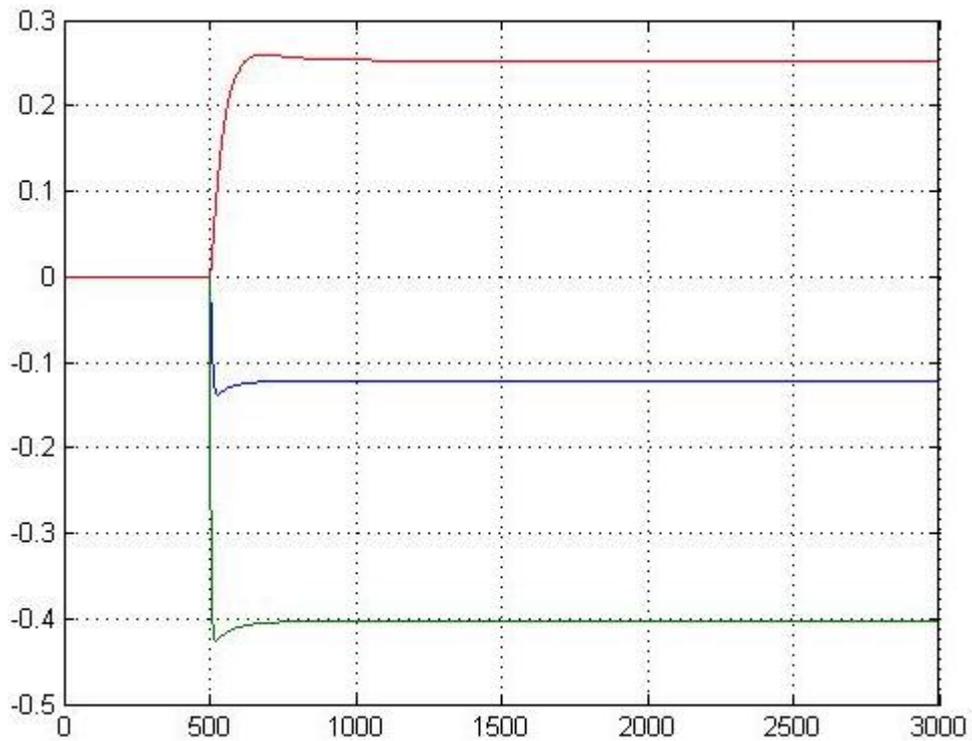


Abbildung D.36.: Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung

(Abb. D.35 und D.36):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 1200 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 821 sek

Maximale Differenz: 0,42 cm

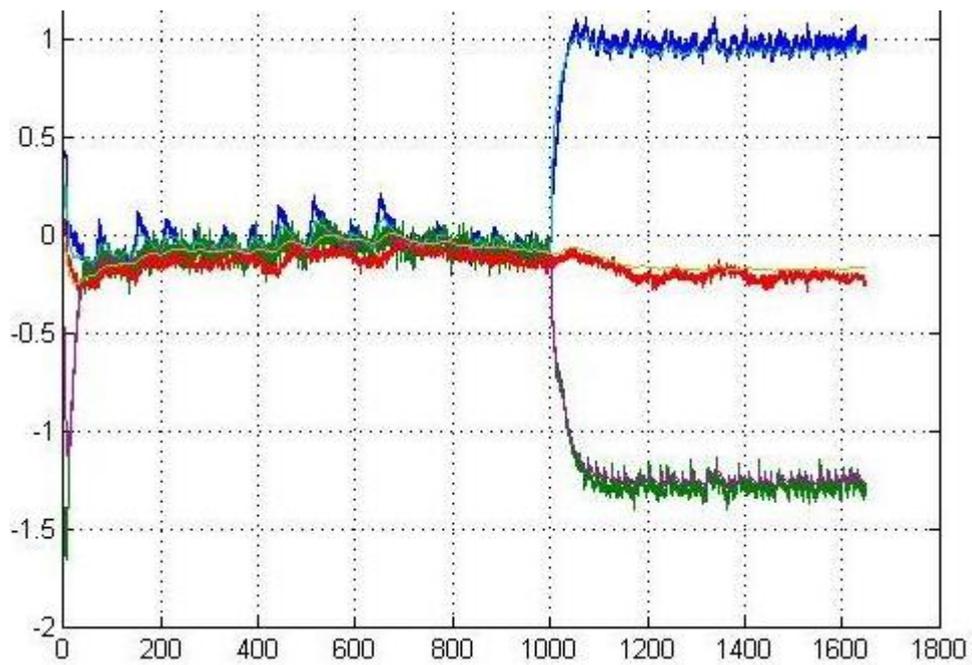


Abbildung D.37.: Real Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

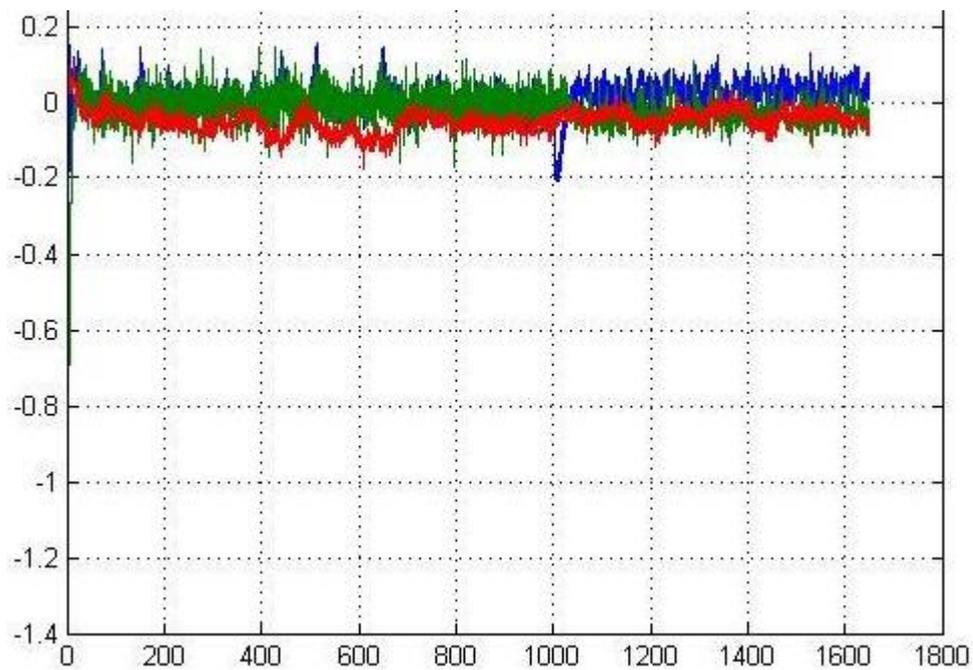


Abbildung D.38.: Real Differenz Zustandsregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

(Abb. D.37 und D.38):

Führungssprungbeginn: 1000 sek

Führungssprungende: 1180 sek

Maximale Differenz: 0,2 cm

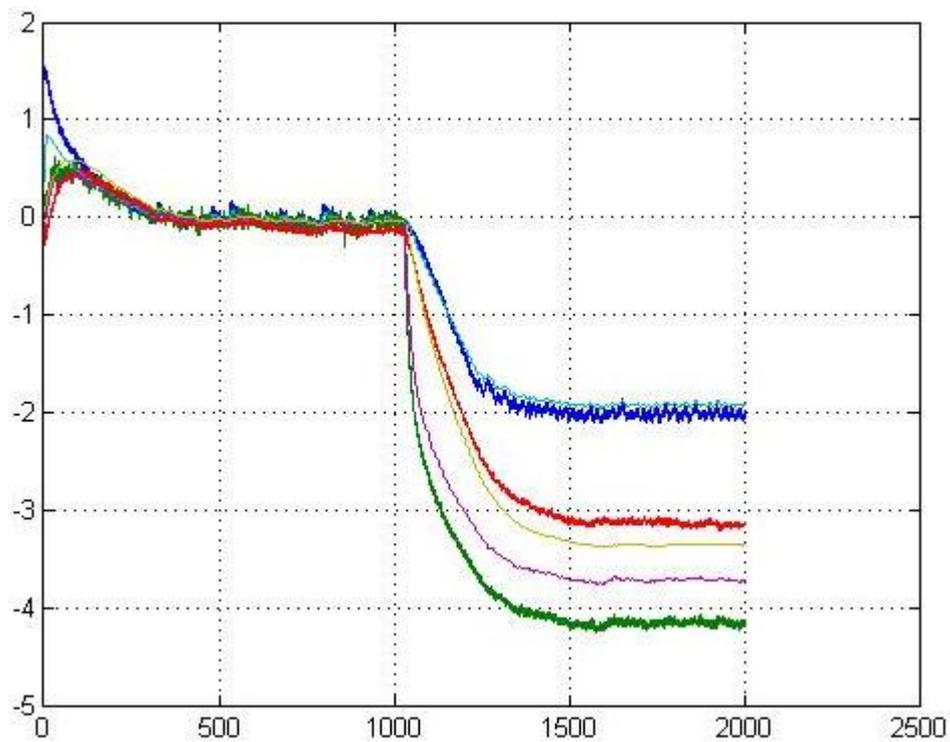


Abbildung D.39.: Real Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung

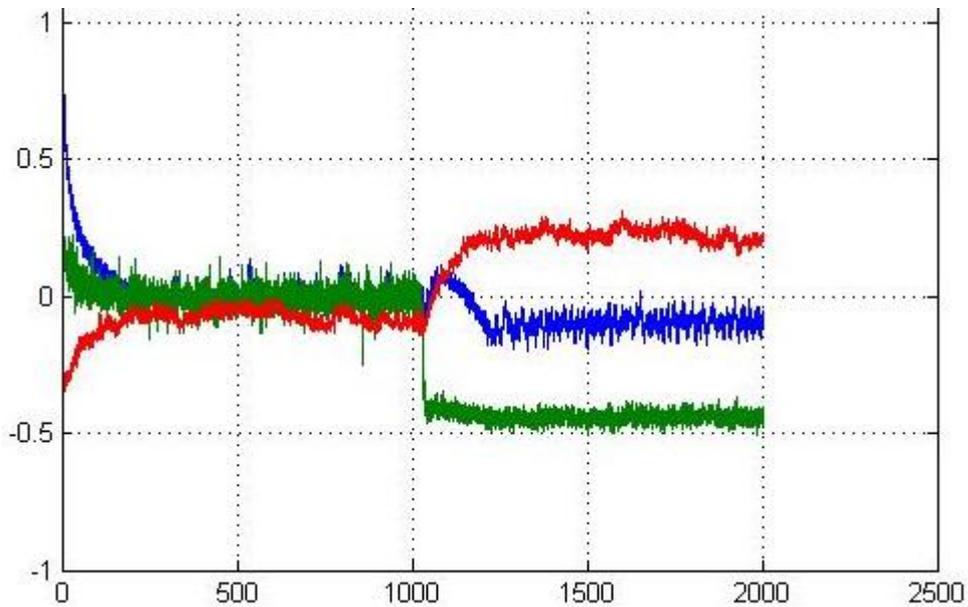


Abbildung D.40.: Real Dif. Zustandsregler5 mit Beobachter10 Störsprung

(Abb. [D.39](#) und [D.40](#)):

Störungssprungbeginn: 1050 sek

Störungssprungende: 1500 sek

Differenzsprungbeginn: 1050 sek

Differenzsprungende: 1375 sek

Maximale Differenz: 0,5 cm

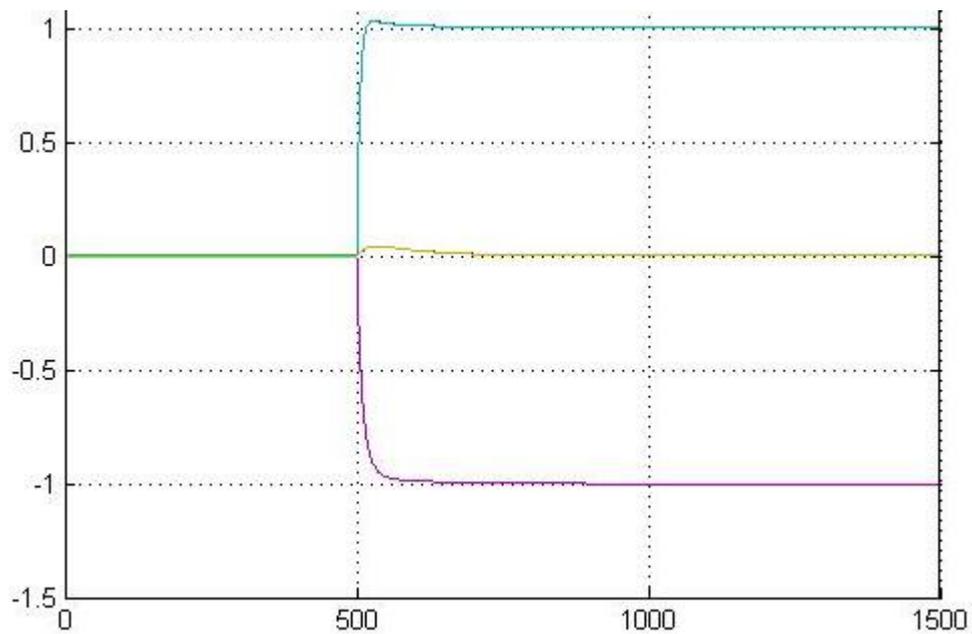


Abbildung D.41.: Sim. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

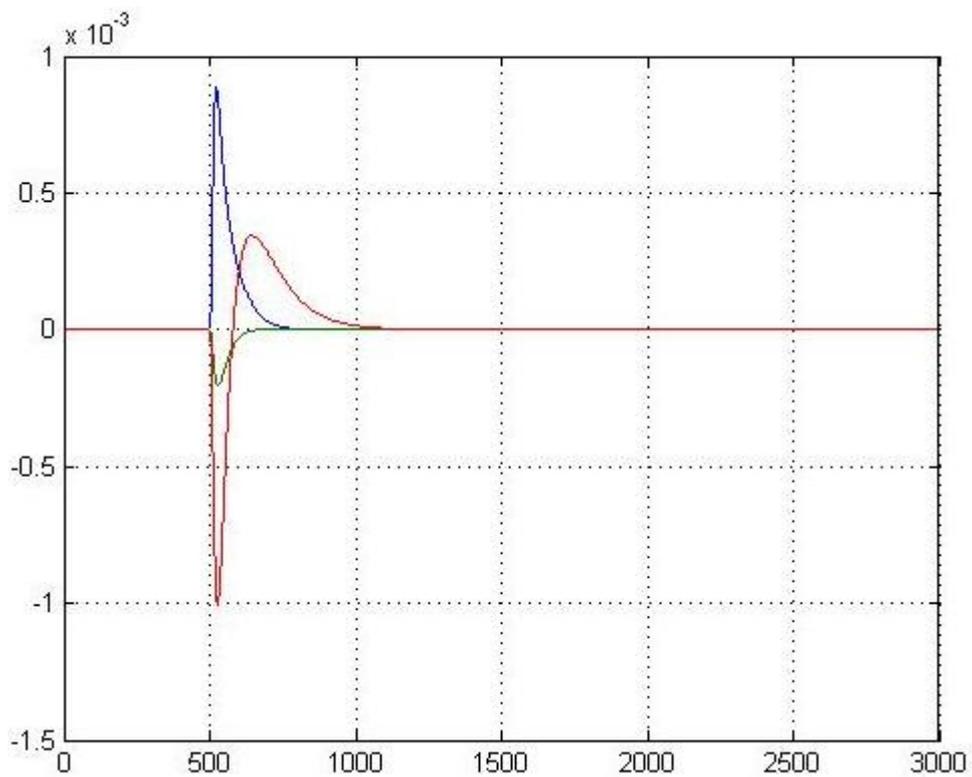


Abbildung D.42.: Simul. Dif. Zustandsregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

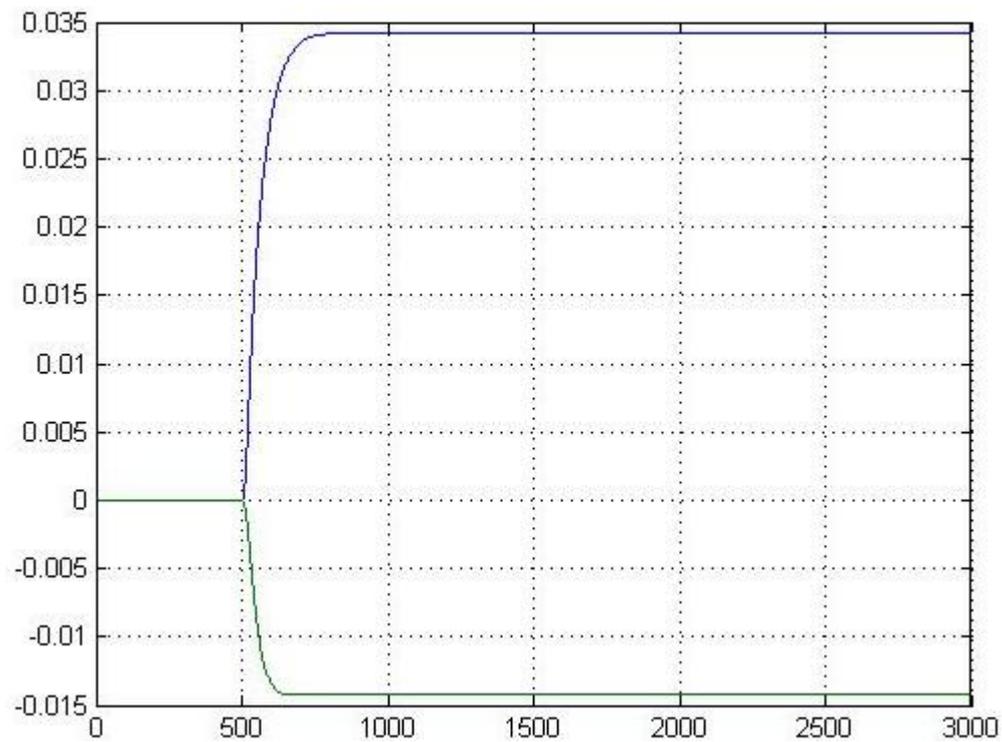


Abbildung D.43.: Sim. St. Zustandsregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung
(Abb. D.41, D.42 und D.43):

Führungssprungbeginn: 500 sek

Führungssprungende: 642 sek

Maximale Differenz: $1 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$

Störung nach Sprung: 0,034 und -0,014

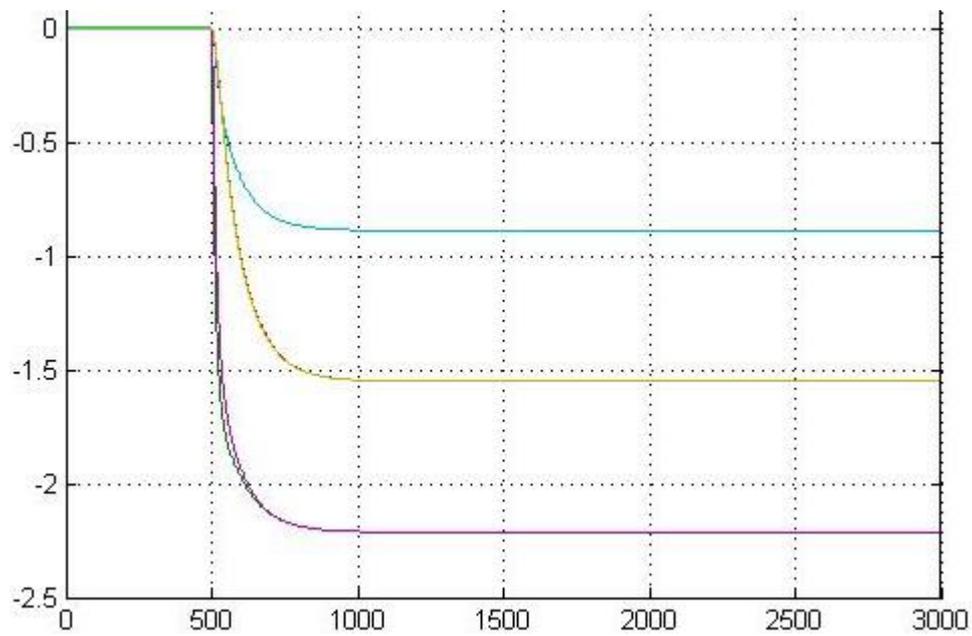


Abbildung D.44.: Sim. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

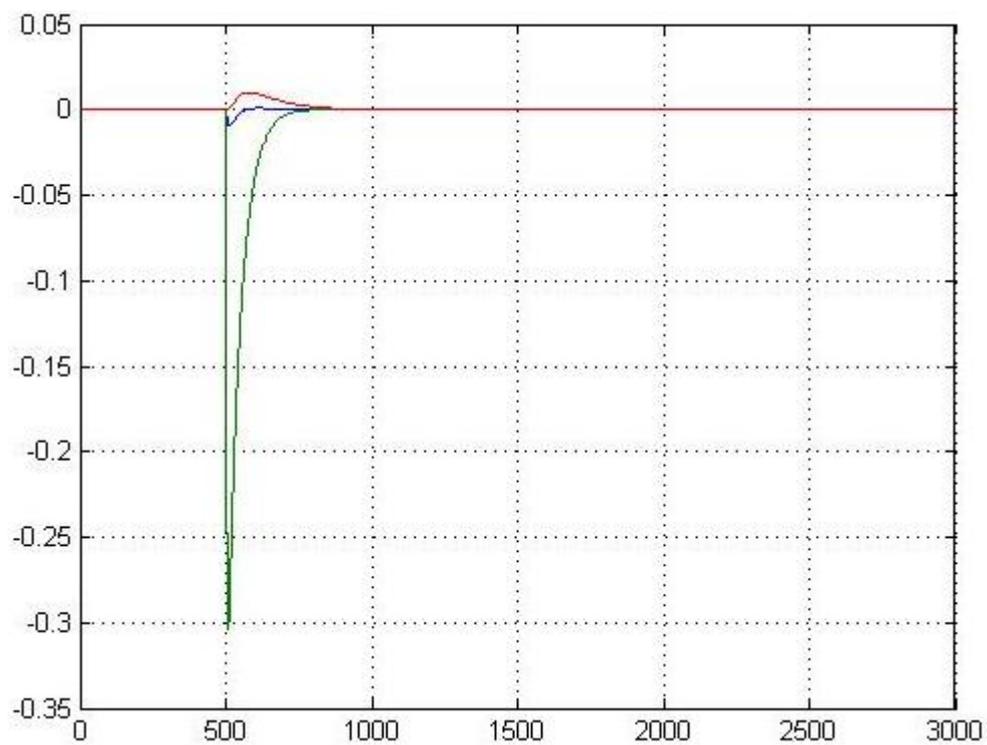


Abbildung D.45.: Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

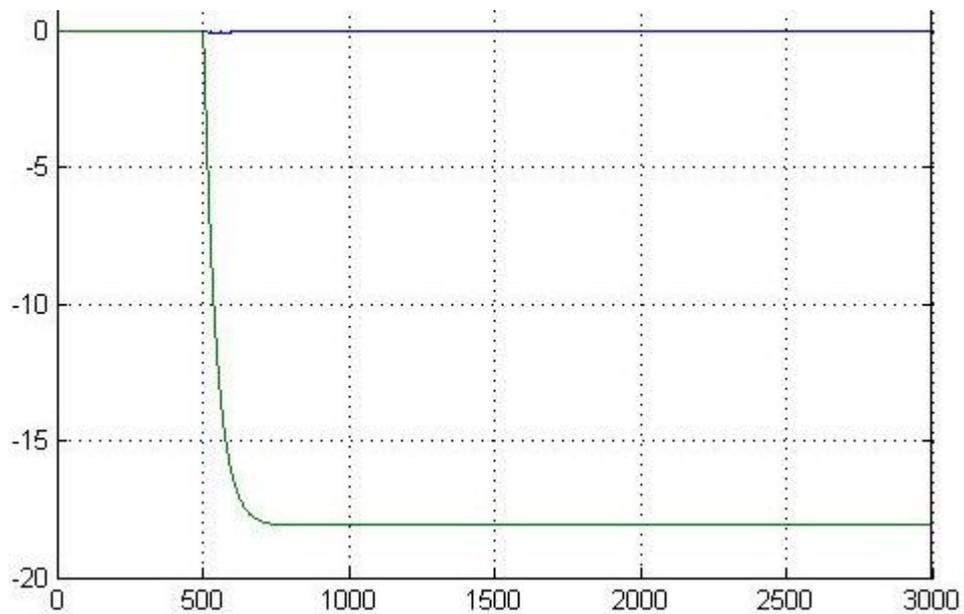


Abbildung D.46.: Sim. Störung Zustandsregler5 Störgrößenbeobachter10 Störsprung
(Abb. D.44, D.45 und D.46):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 911 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 785 sek

Maximale Differenz: 0,3 cm

Störung nach Sprung: 0 und -18,125

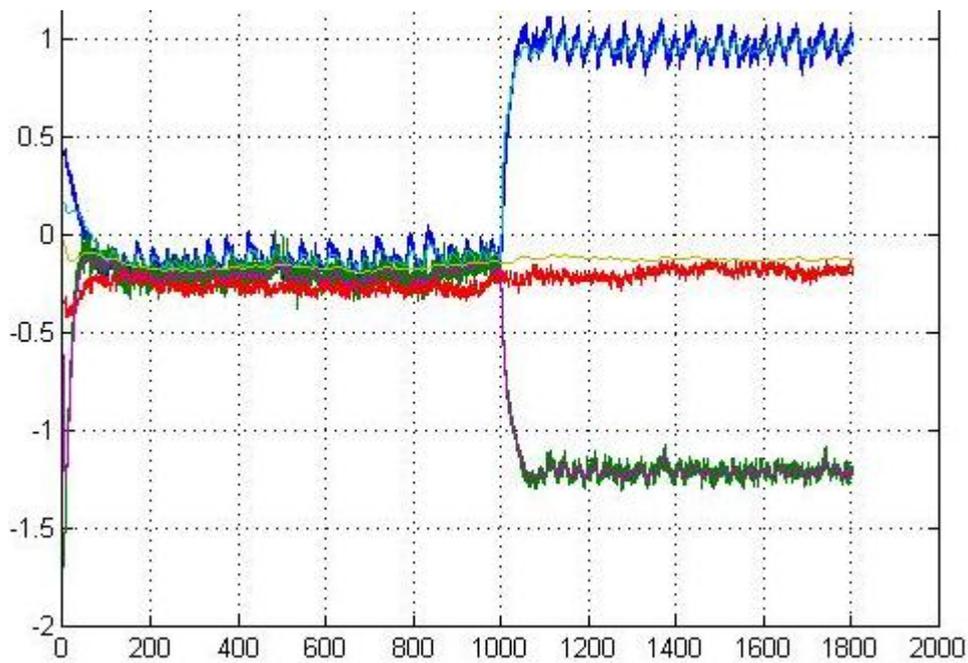


Abbildung D.47.: Real Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

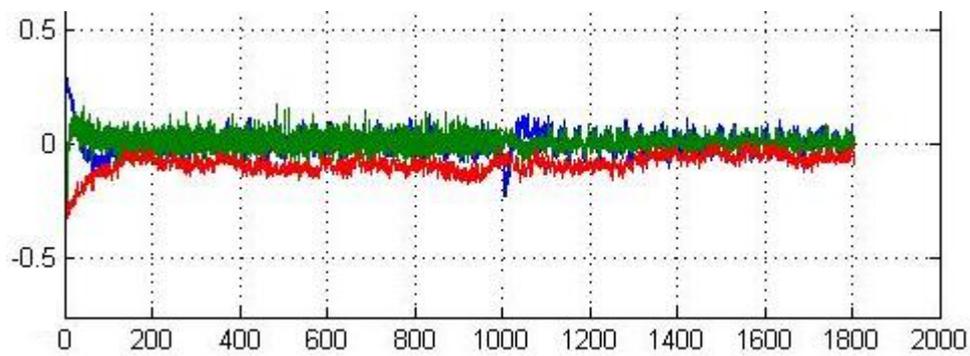


Abbildung D.48.: Real Dif. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

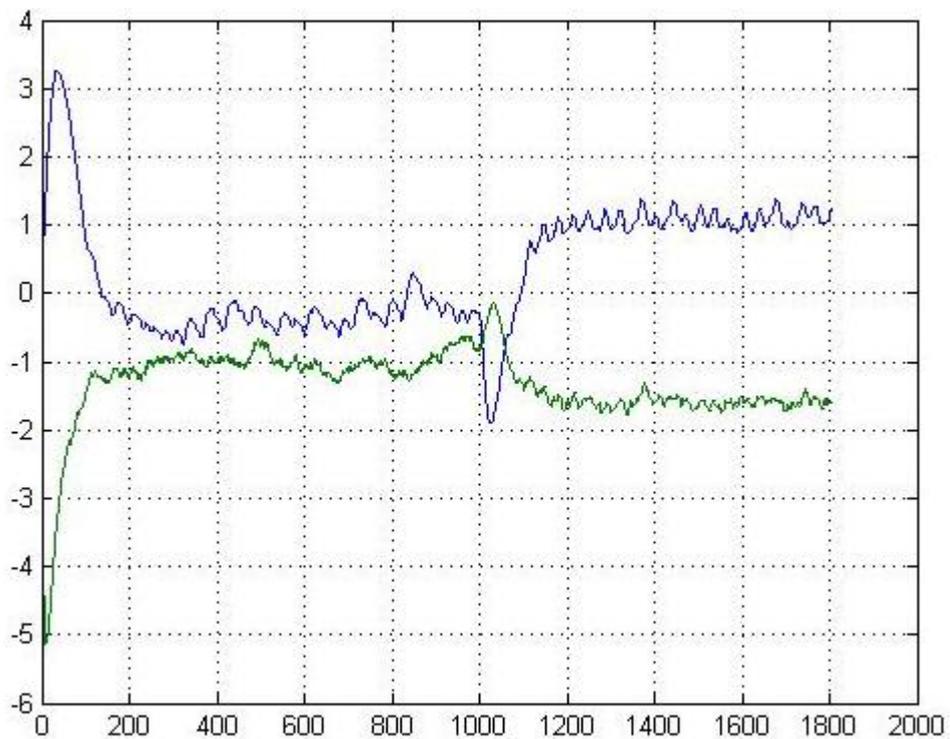


Abbildung D.49.: Real St. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung
(Abb. D.47, D.48 und D.49):

Führungssprungbeginn: 1000 sek

Führungssprungende: 1166 sek

Maximale Differenz: 0,2 cm

Störung nach Sprung: 1,2 und -1,6

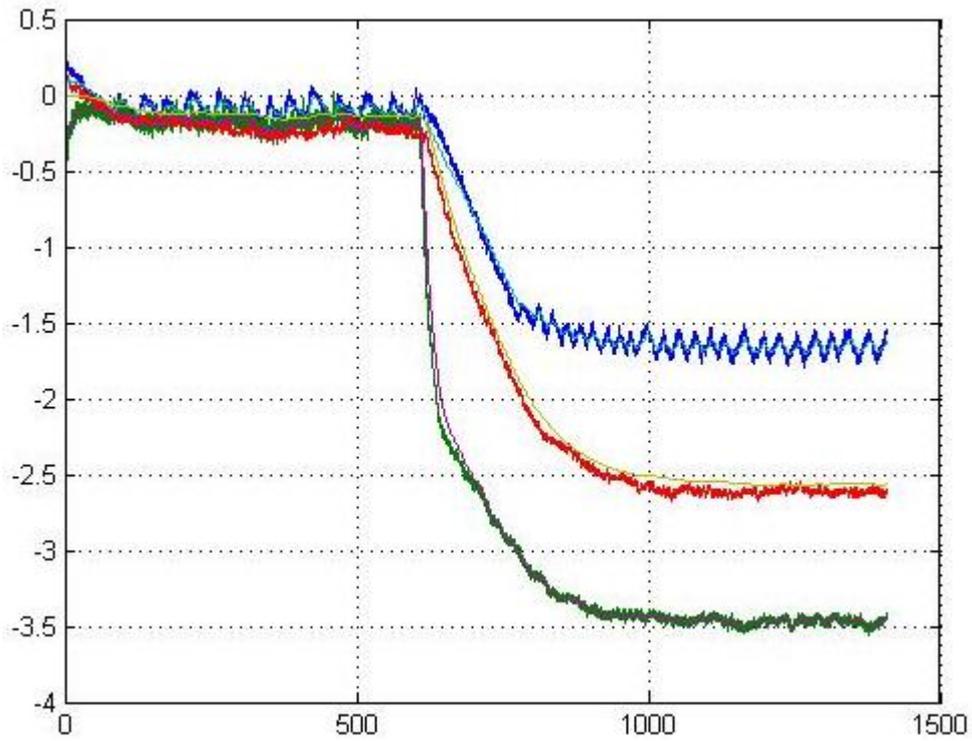


Abbildung D.50.: Real Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

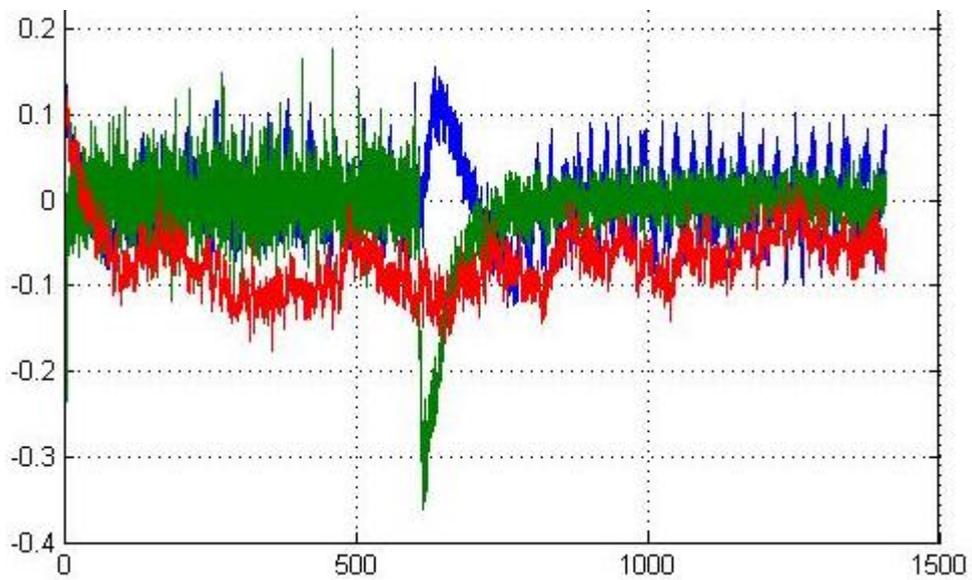


Abbildung D.51.: Real Dif. Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

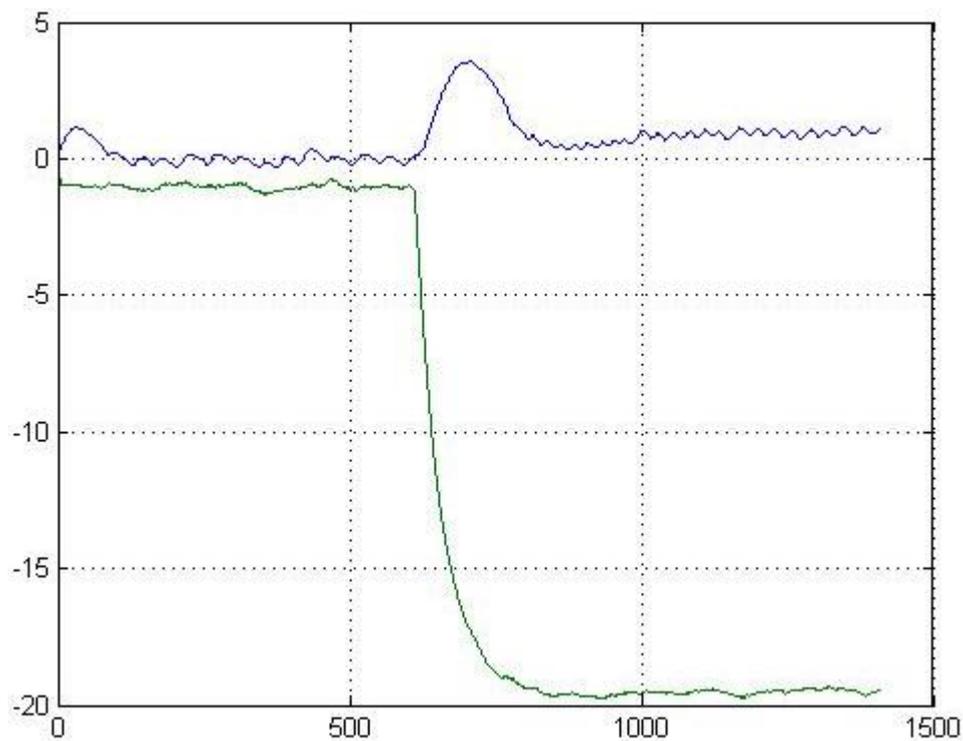


Abbildung D.52.: Real Störung Zustandsregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung
(Abb. D.50, D.51 und D.52):

Störungssprungbeginn: 600 sek

Störungssprungende: 1000 sek

Differenzsprungbeginn: 600 sek

Differenzsprungende: 857sek

Maximale Differenz: 0,35 cm

Störung nach Sprung: 1 und -19

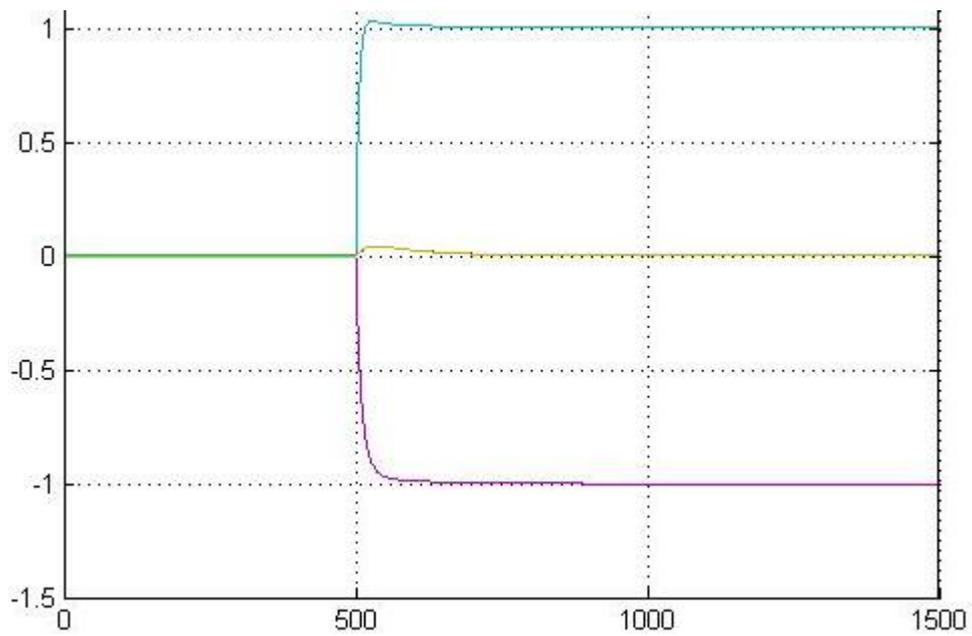


Abbildung D.53.: Sim. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

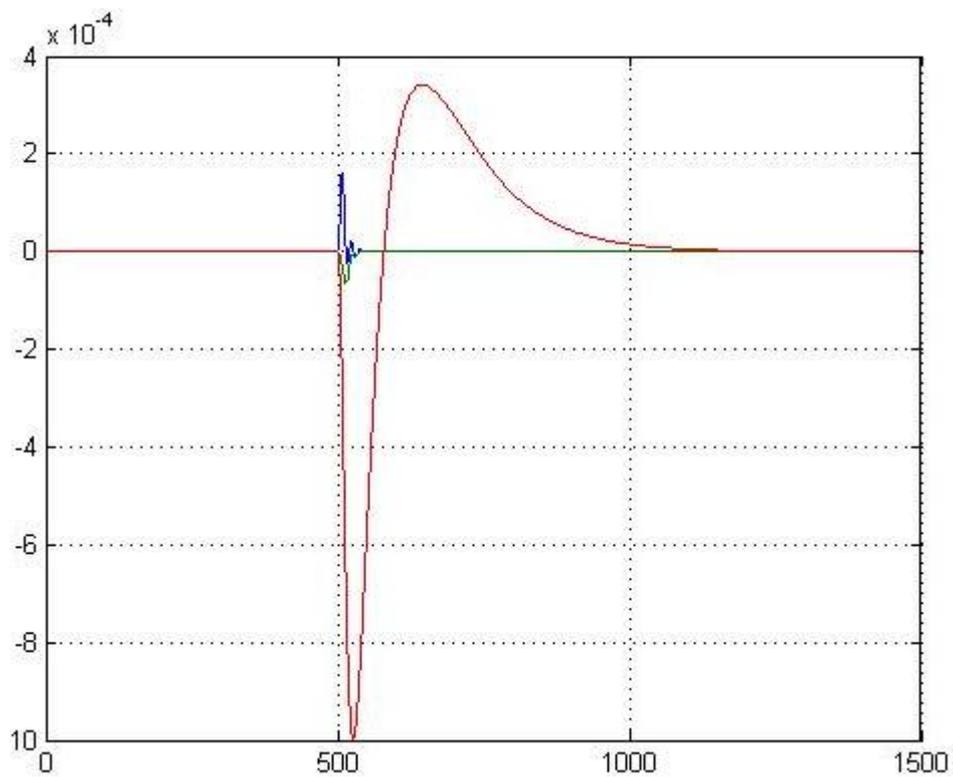


Abbildung D.54.: Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

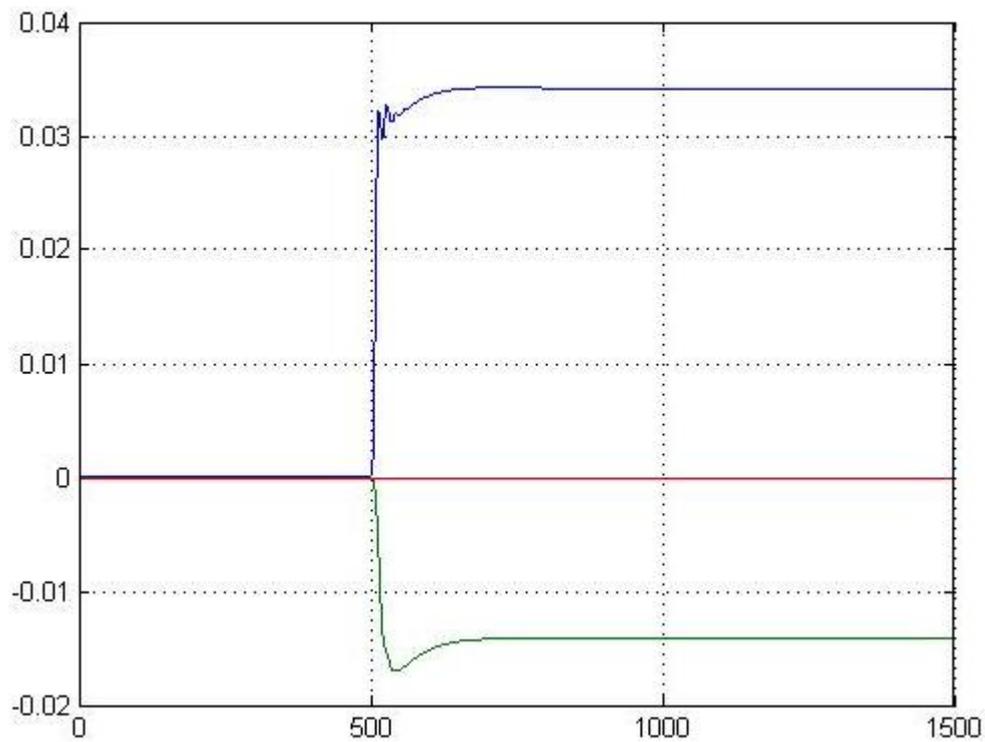


Abbildung D.55.: Sim. Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

(Abb. D.53, D.54 und D.55):

Führungssprungbeginn: 500 sek

Führungssprungende: 645 sek

Maximale Differenz: 10^{-3} cm

Störung nach Sprung: 0,034 und -0,012

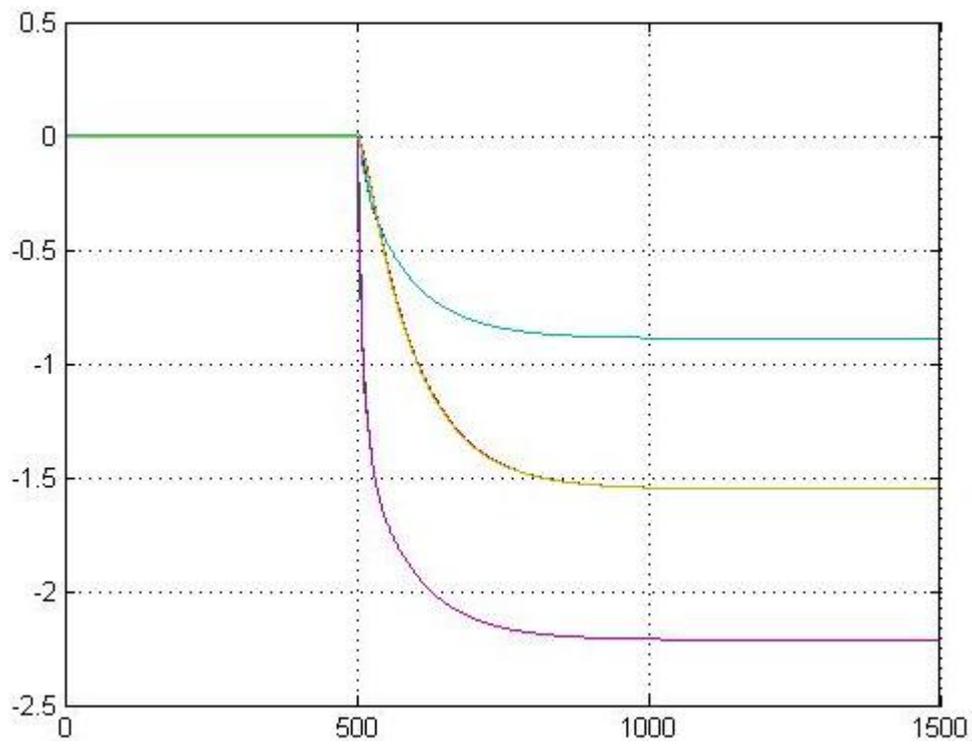


Abbildung D.56.: Sim. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung

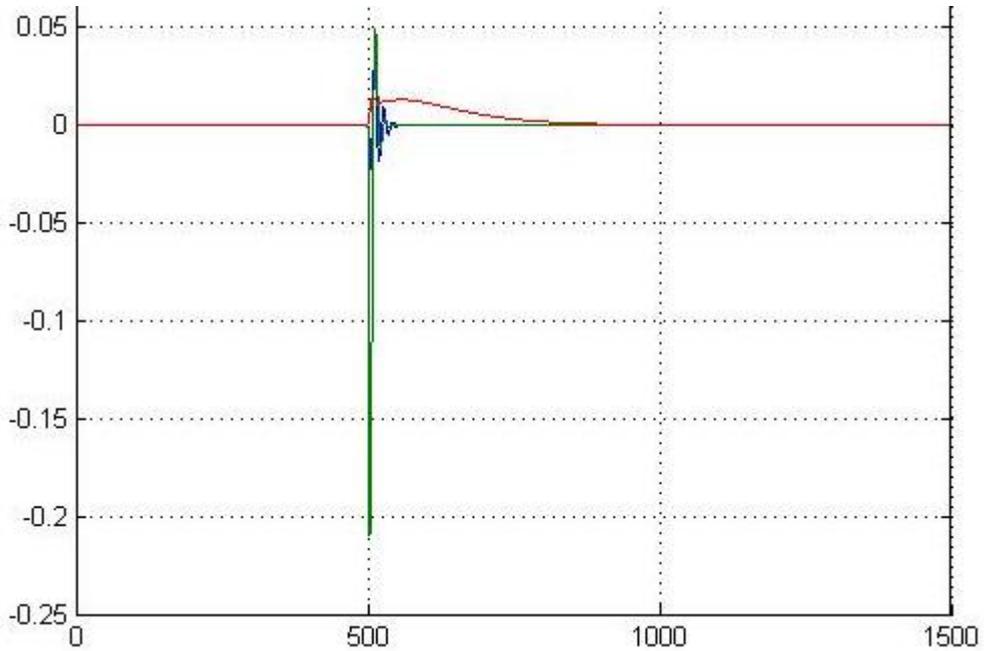


Abbildung D.57.: Sim. Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung

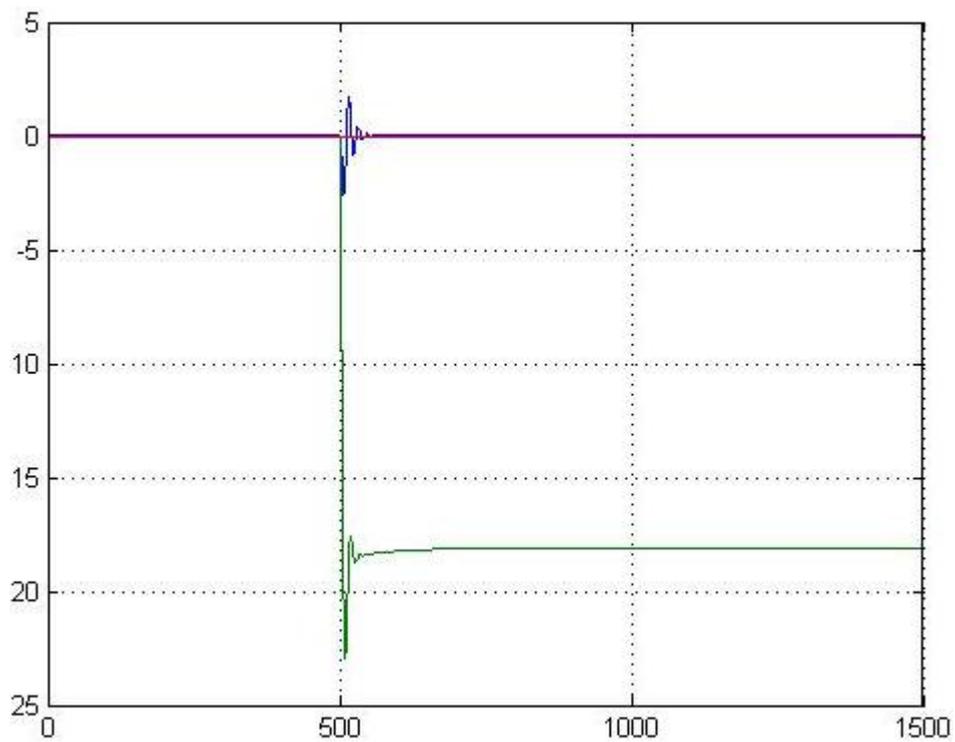


Abbildung D.58.: Sim. Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung

(Abb. [D.56](#), [D.57](#) und [D.58](#)):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 920 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 808 sek

Maximale Differenz: 0,21 cm

Störung nach Sprung: 0 und -18

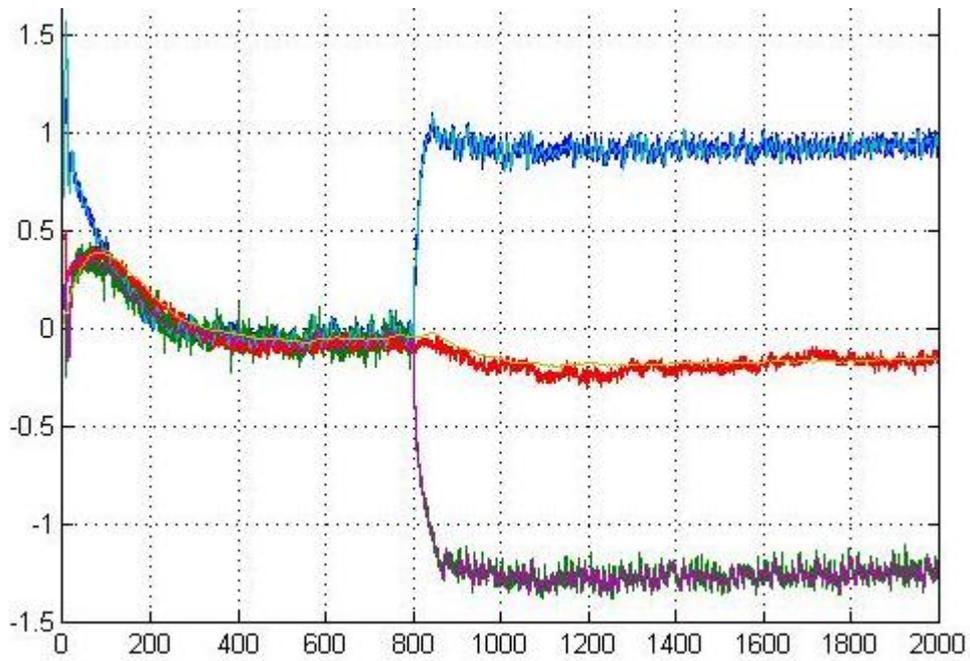


Abbildung D.59.: Real Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

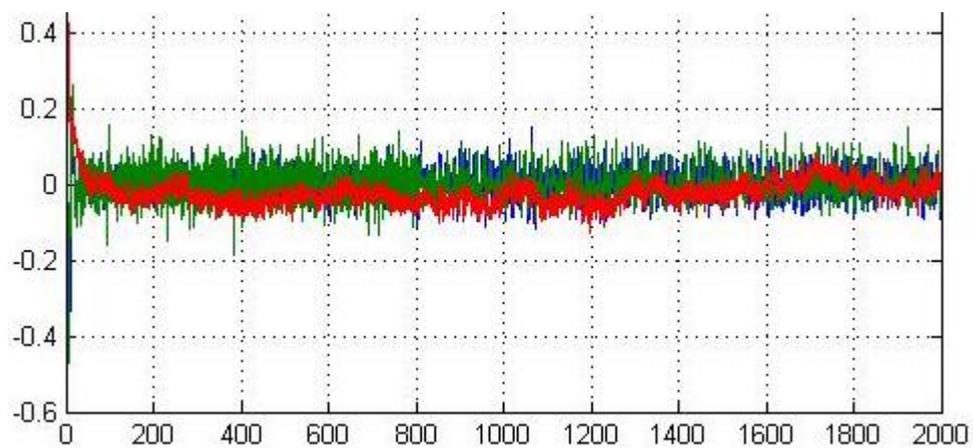


Abbildung D.60.: Real Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

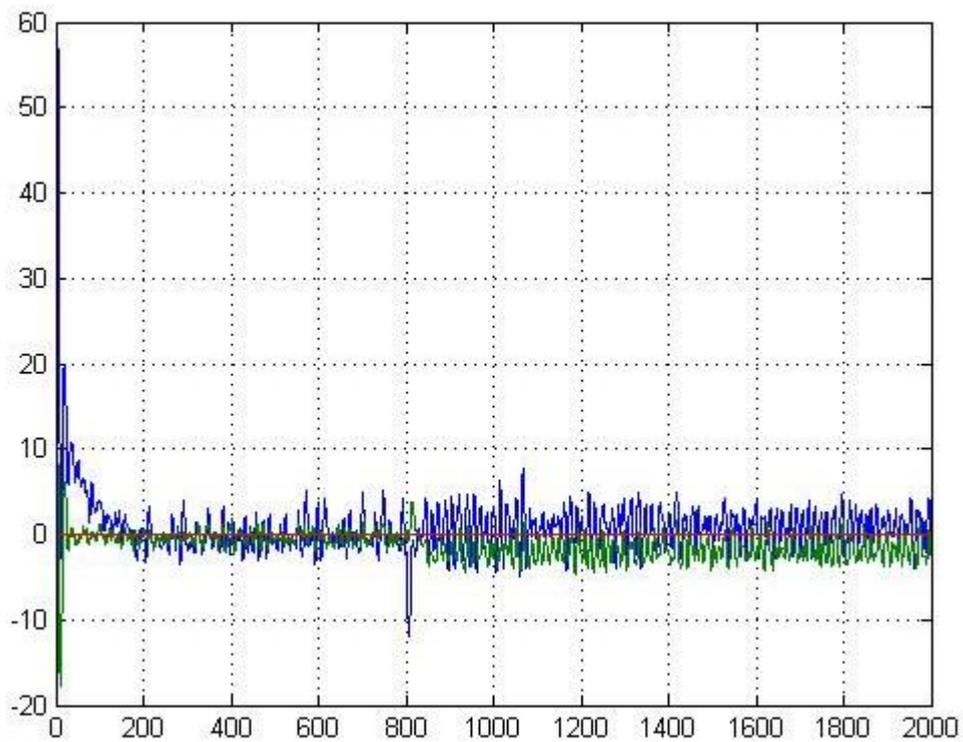


Abbildung D.61.: Real Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

(Abb. D.59, D.60 und D.61):

Führungssprungbeginn: 800 sek

Führungssprungende: 1000 sek

Maximale Differenz: 0,18 cm

Störung nach Sprung: gemittelt 0 und 0

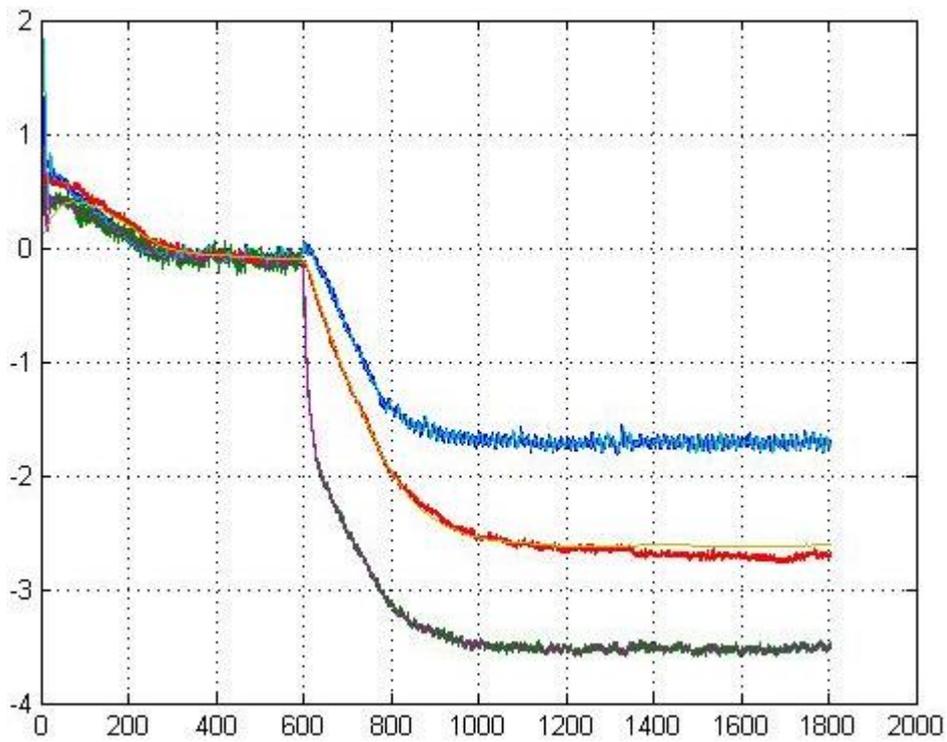


Abbildung D.62.: Real Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung

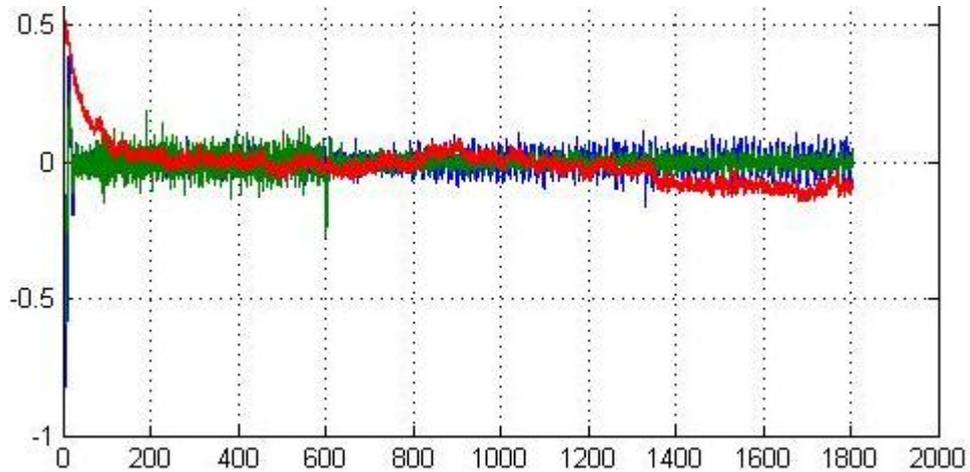


Abbildung D.63.: Real Dif. Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung

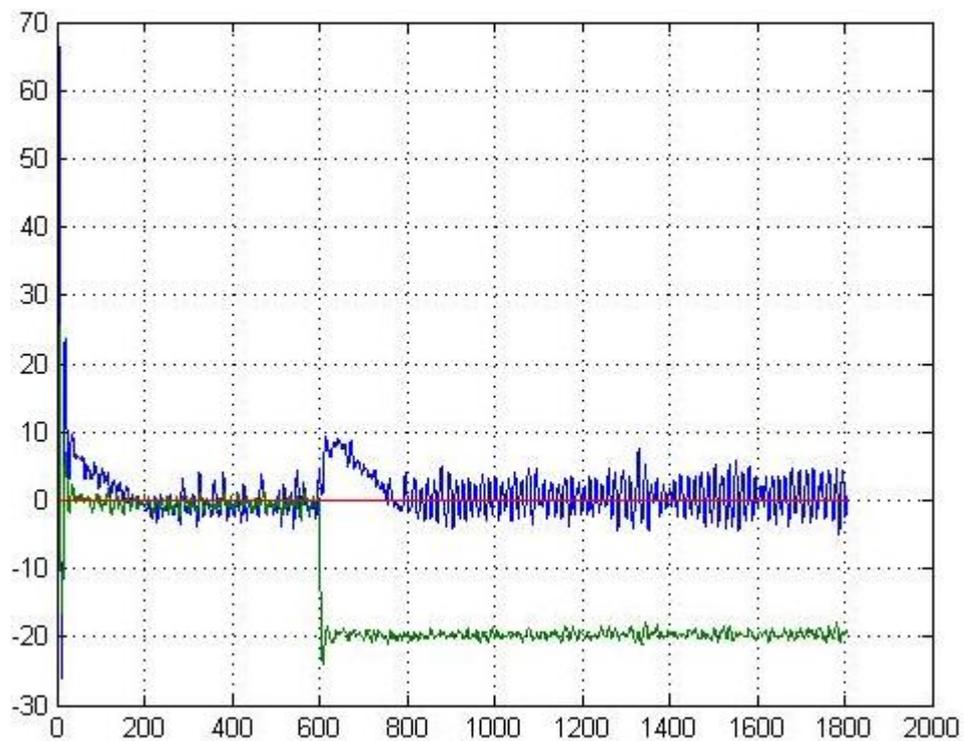


Abbildung D.64.: Real Störung Zustandsregler5 mit Prototyp10 Störsprung

(Abb. D.62, D.63 und D.64):

Störungssprungbeginn: 600 sek

Störungssprungende: 1000 sek

Differenzsprungbeginn: 600 sek

Differenzsprungende: 610 sek

Maximale Differenz: 0,25 cm

Störung nach Sprung: gemittelt 0 und -20

D.2. Messungen Zustandsregler55Z3

Die Störgröße wurde geändert. Das Ablassventil des mittlere/dritte Tank dient nun als Störgröße. Die folgenden Graphen sind mit ein Zustandsregler und den Beobachtersystemen, die die Polstellen des Systems auf den fünffachen Wert bringen, durchgeführt worden:

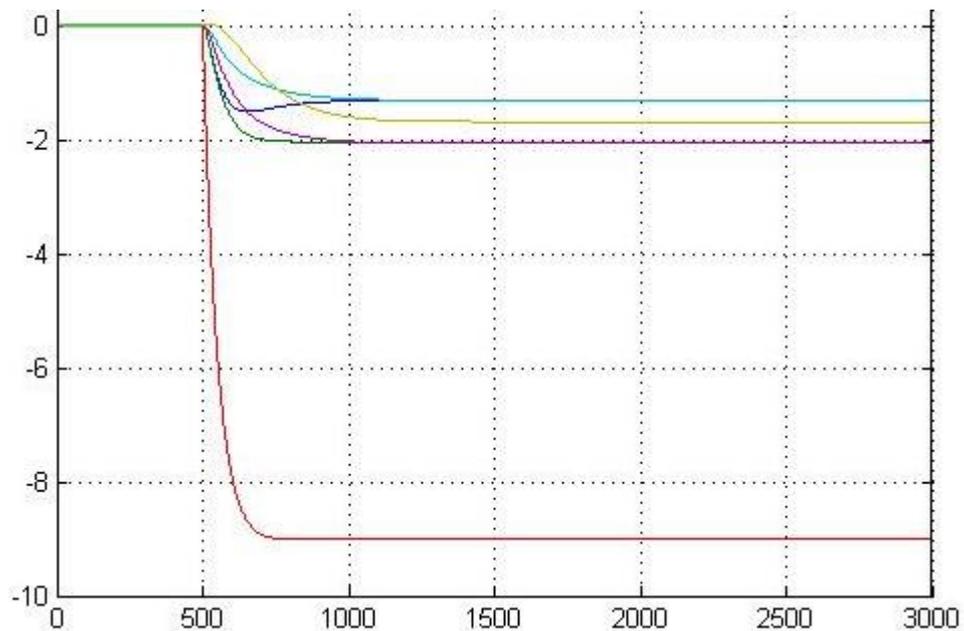


Abbildung D.65.: Sim. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

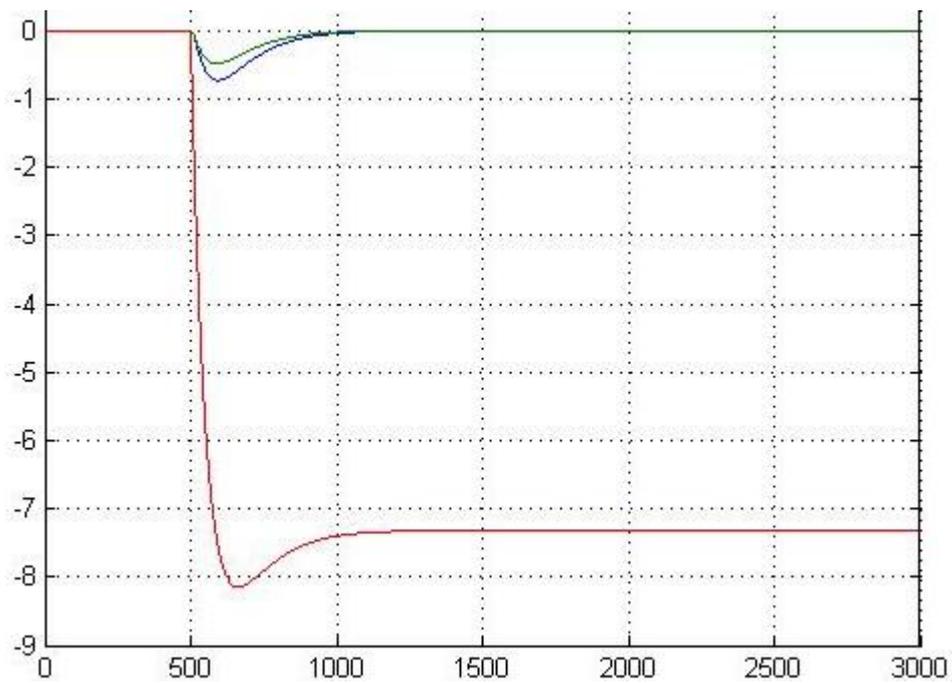


Abbildung D.66.: Sim. Dif. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

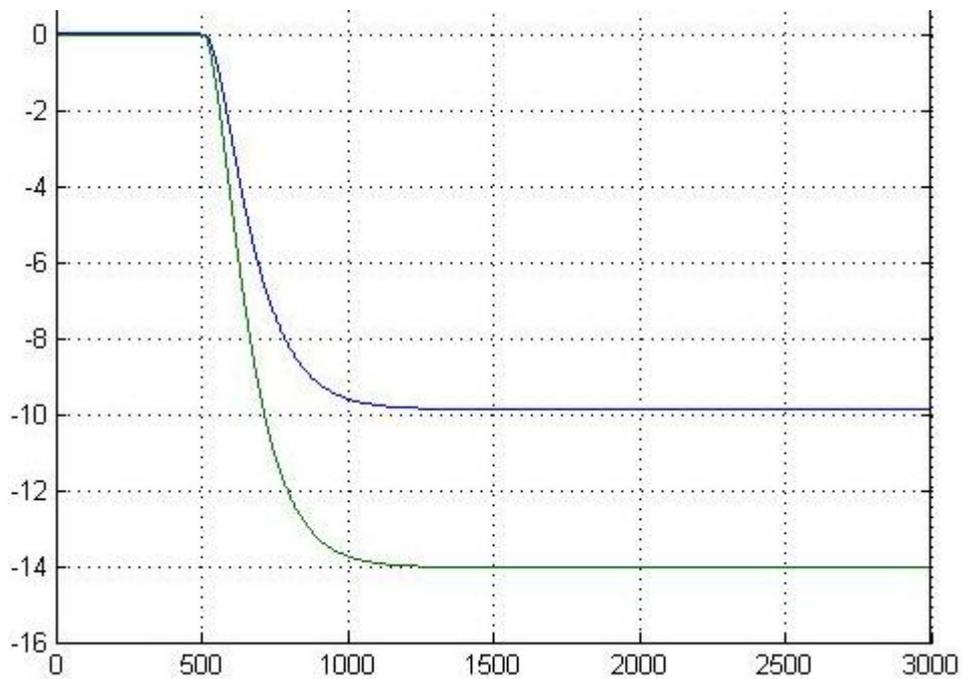


Abbildung D.67.: Sim. Störung Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

(Abb. [D.65](#), [D.66](#) und [D.67](#)):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 928 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 1071 sek

Maximale Differenz: 8,2 cm

Störung nach Sprung: -9,8 und -14

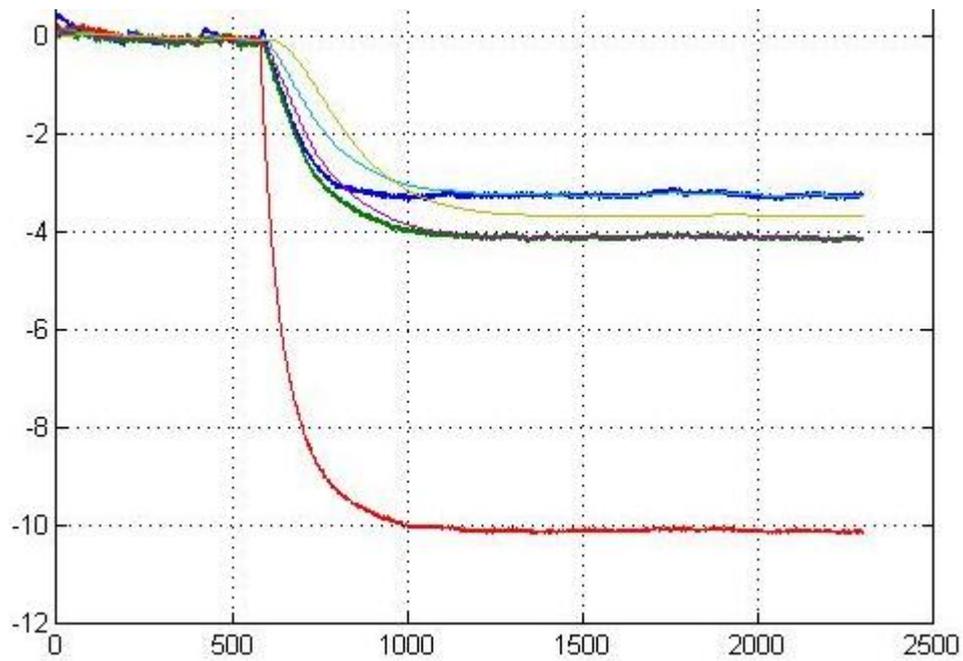


Abbildung D.68.: Real Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

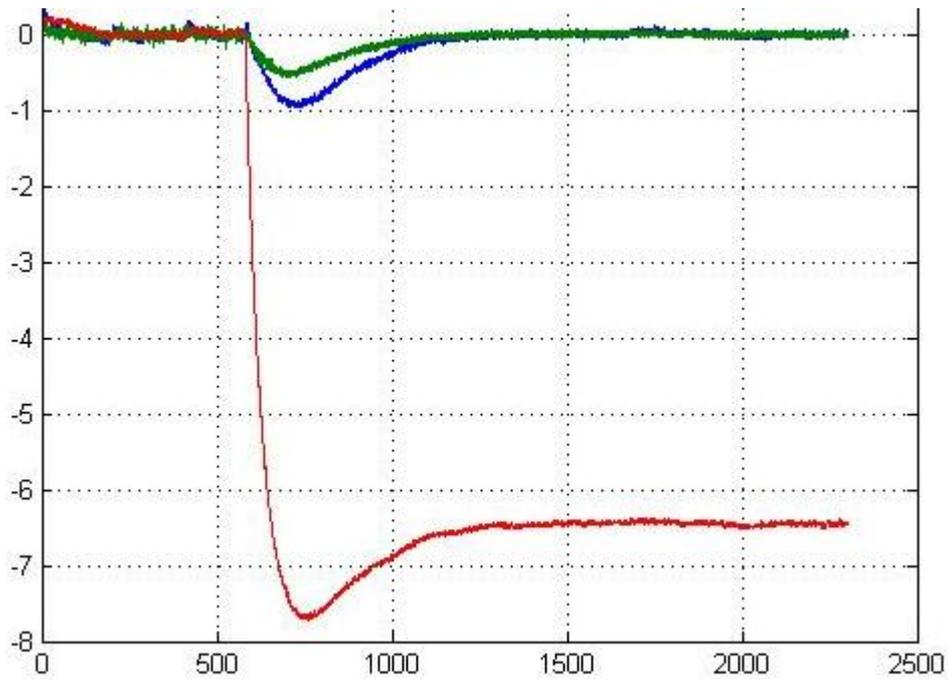


Abbildung D.69.: Real Dif. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

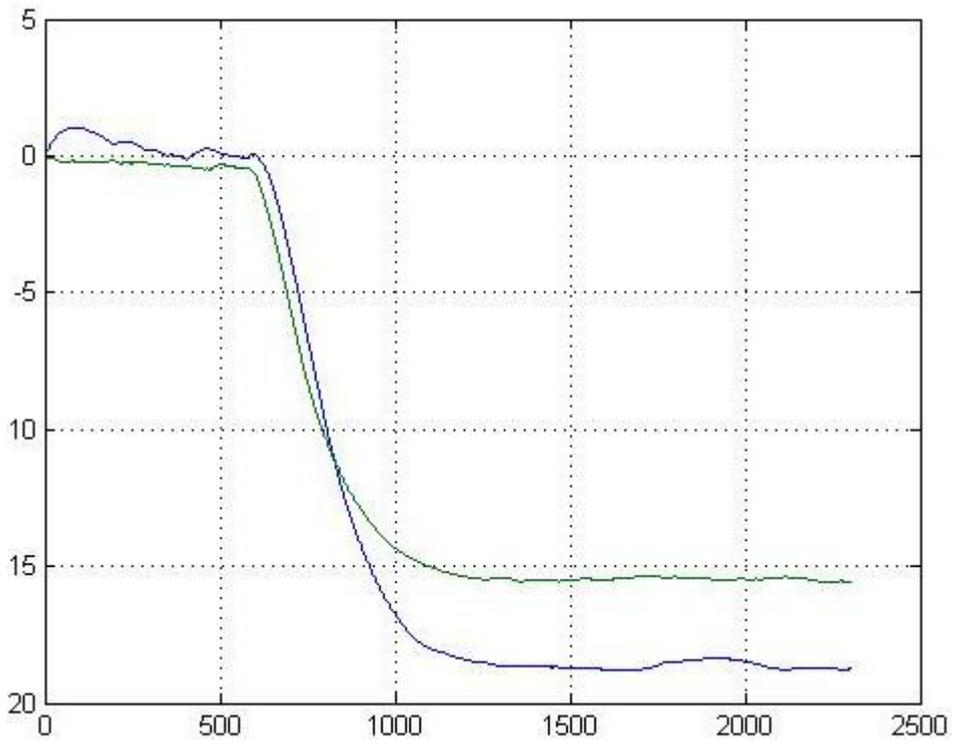


Abbildung D.70.: Real Störung Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

(Abb. D.68, D.69 und D.70):

Störungssprungbeginn: 600 sek

Störungssprungende: 1250 sek

Differenzsprungbeginn: 600 sek

Differenzsprungende: 1312 sek

Maximale Differenz: 7,73 cm

Störung nach Sprung: -15,6 und -18,8

D.3. Messungen Zustandsregler55Z3 drei Sensoren

Das Modell wurde um einen Sensor erweitert und das Beobachtersystem kann nun alle Zustandsgrößen mit denen vom realen Modell vergleichen. Die folgenden Graphen sind mit ein Zustandsregler und den Beobachtersystemen, die die Polstellen des Systems auf den fünffachen Wert bringen, durchgeführt worden:

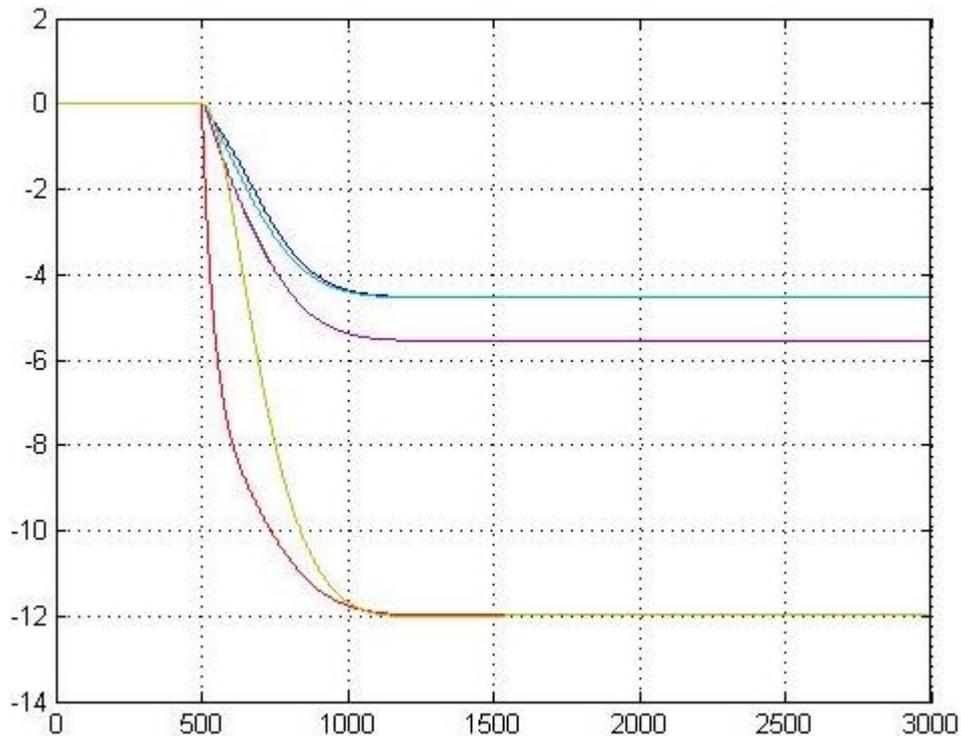


Abbildung D.71.: Sim. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren

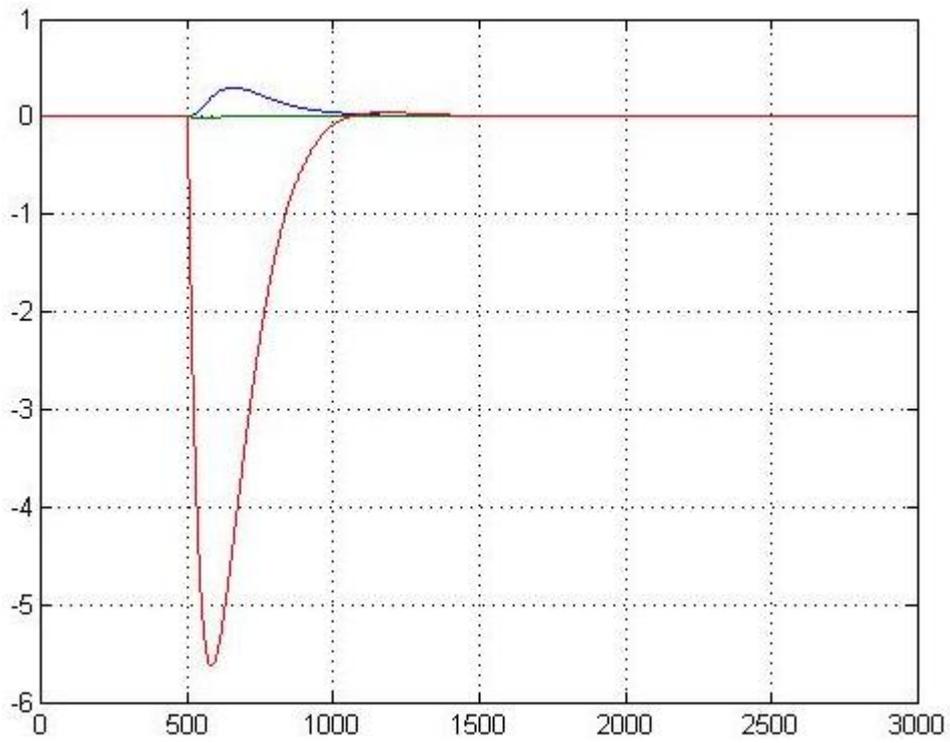


Abbildung D.72.: Sim. Dif. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren

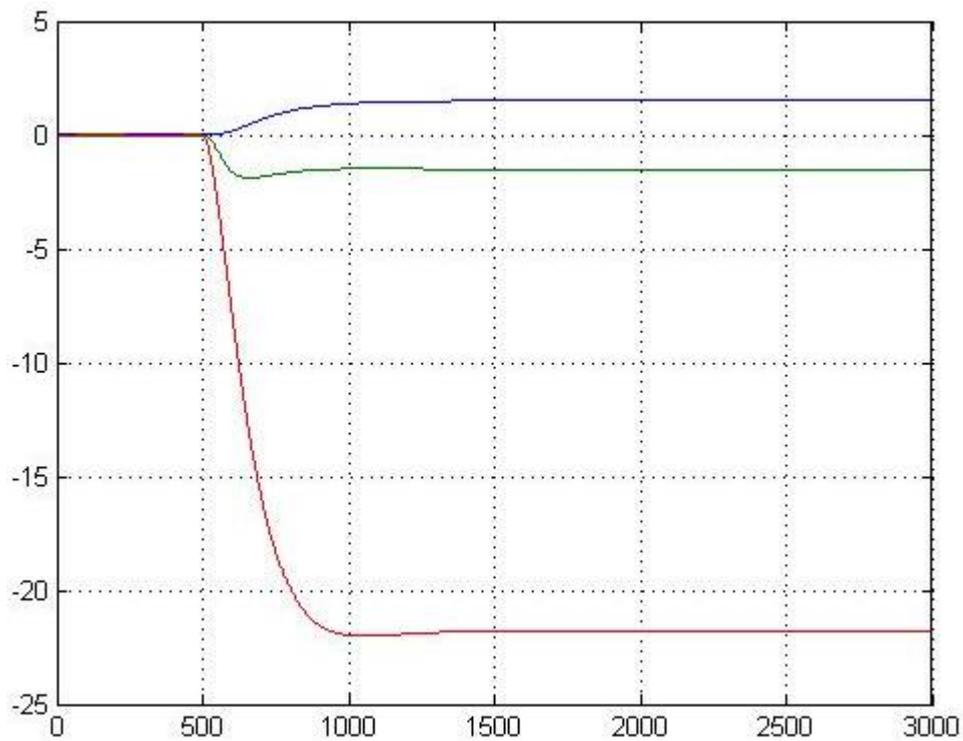


Abbildung D.73.: Sim. Störung ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren
(Abb. [D.71](#), [D.72](#) und [D.73](#)):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 1117 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 1028 sek

Maximale Differenz: 5,6 cm

Störung nach Sprung: 1,6 , -1,6 und -21,8

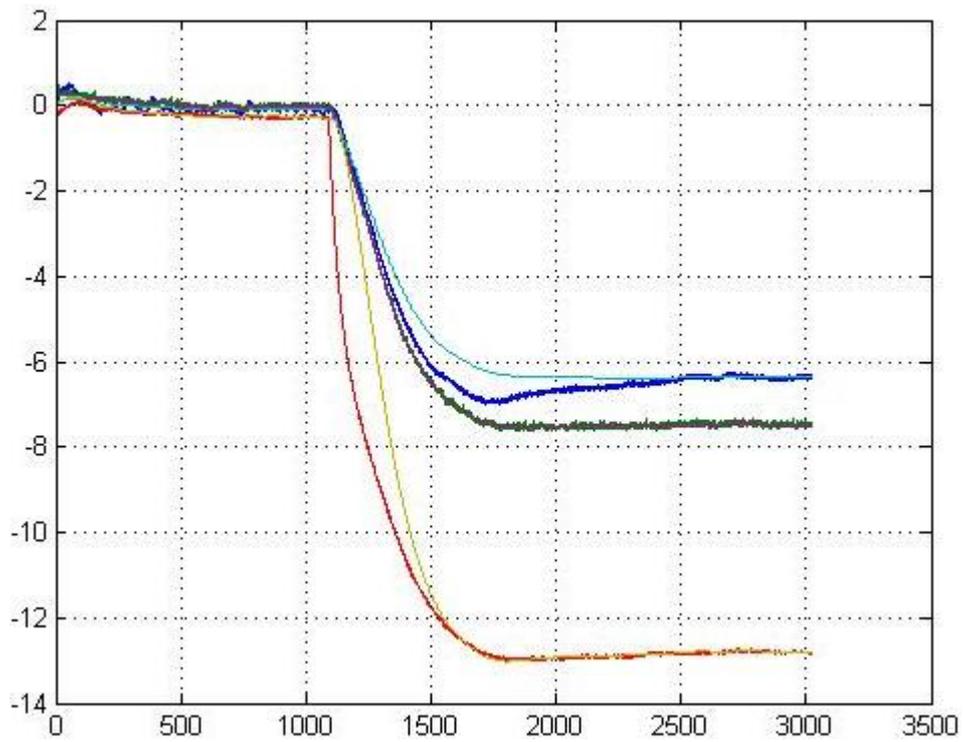


Abbildung D.74.: Real Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

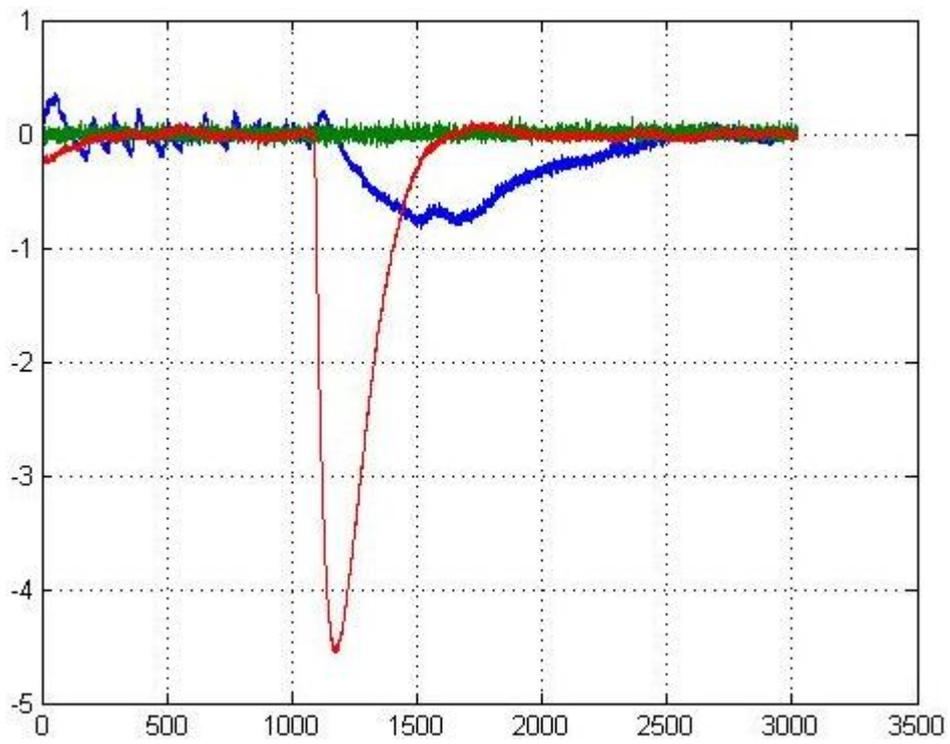


Abbildung D.75.: Real Dif. Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

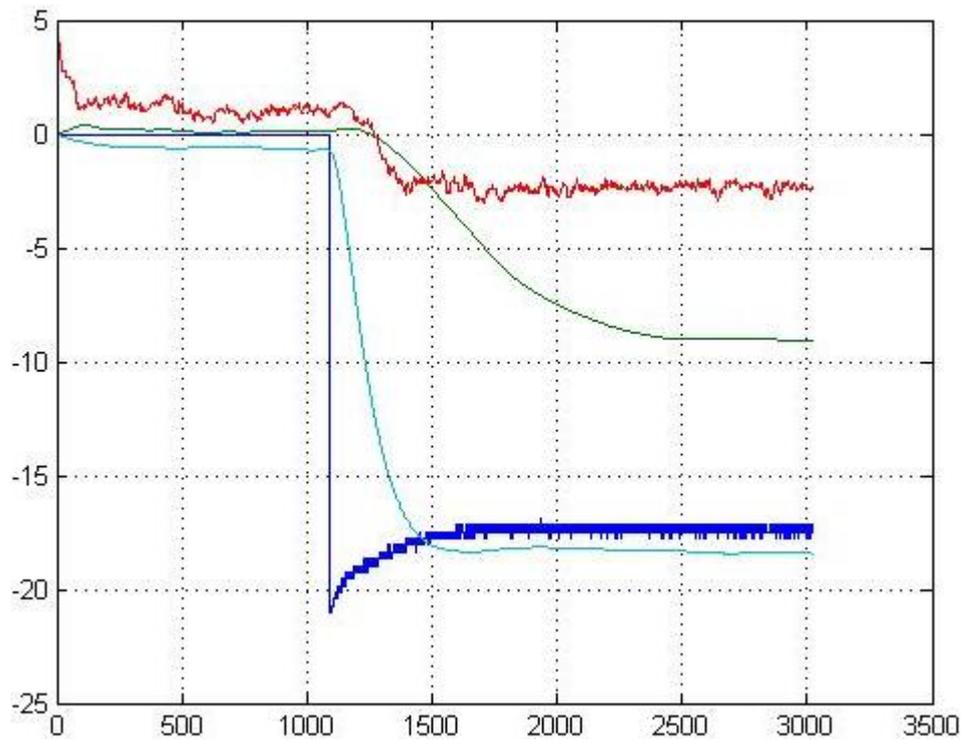


Abbildung D.76.: Real Störung Zustandsregler mit SGB5 Störsprung Tank3

(Abb. D.74, D.75 und D.76):

Störungssprungbeginn: 1100 sek

Störungssprungende: 2500 sek

Differenzsprungbeginn: 1100 sek

Differenzsprungende: 2500 sek

Maximale Differenz: 4,5 cm

Störung nach Sprung: -2,3, -9, und -18,3

Störung gemessen Sensor: -17,5

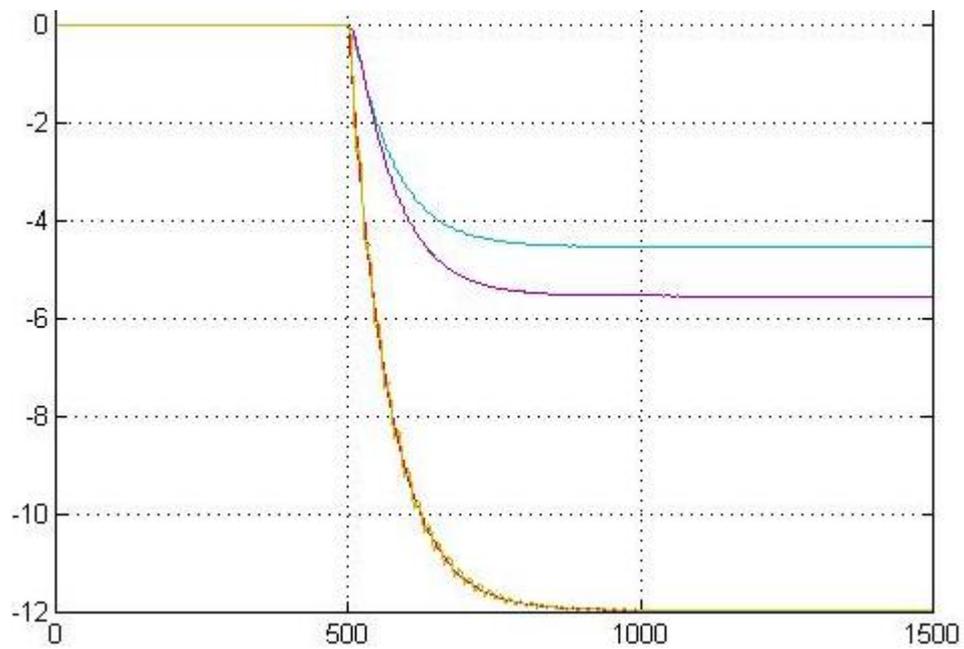


Abbildung D.77.: Sim. ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

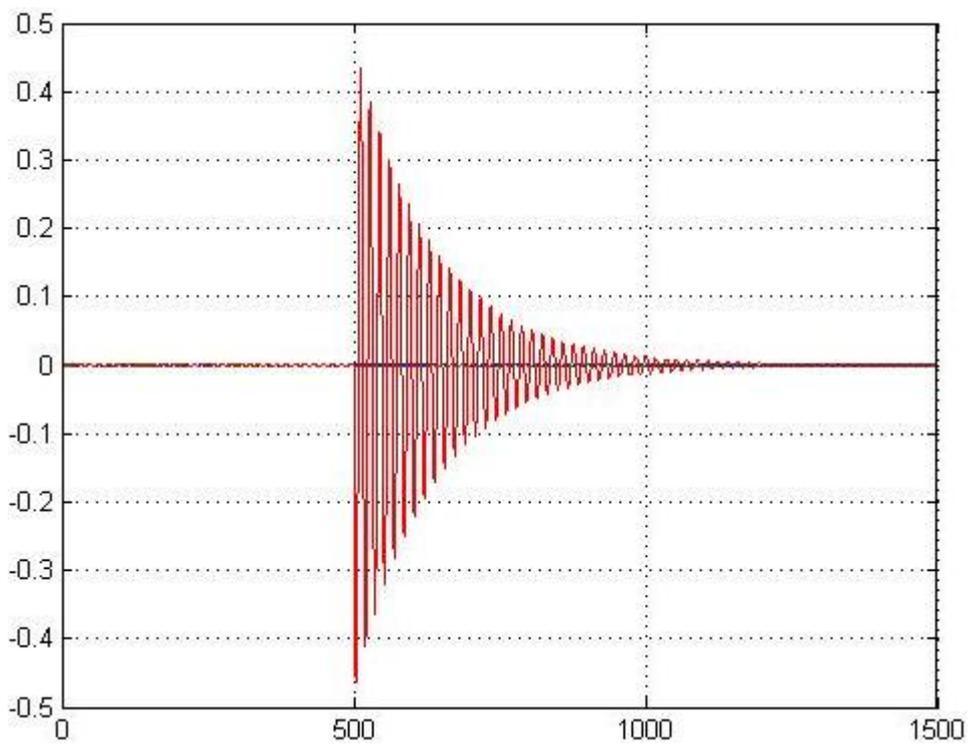


Abbildung D.78.: Sim. Dif. ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

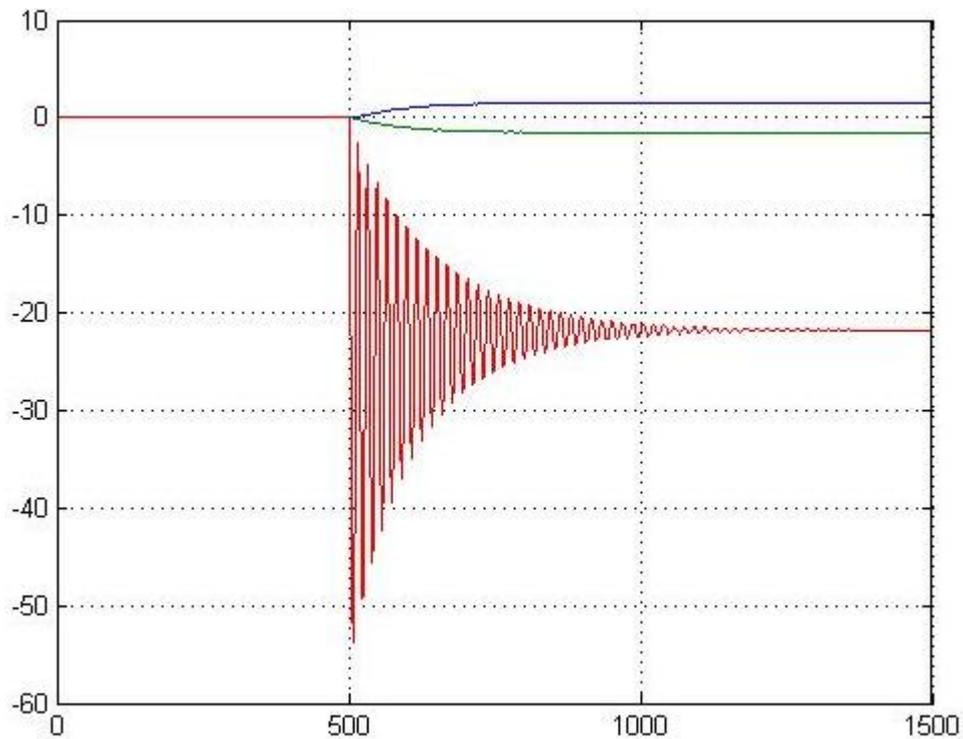


Abbildung D.79.: Sim. Störung ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

(Abb. [D.77](#), [D.78](#) und [D.79](#)):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 678 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 1142 sek

Maximale Differenz: 0,45 cm

Störung nach Sprung: 1,4 , -1,4 und -21,7

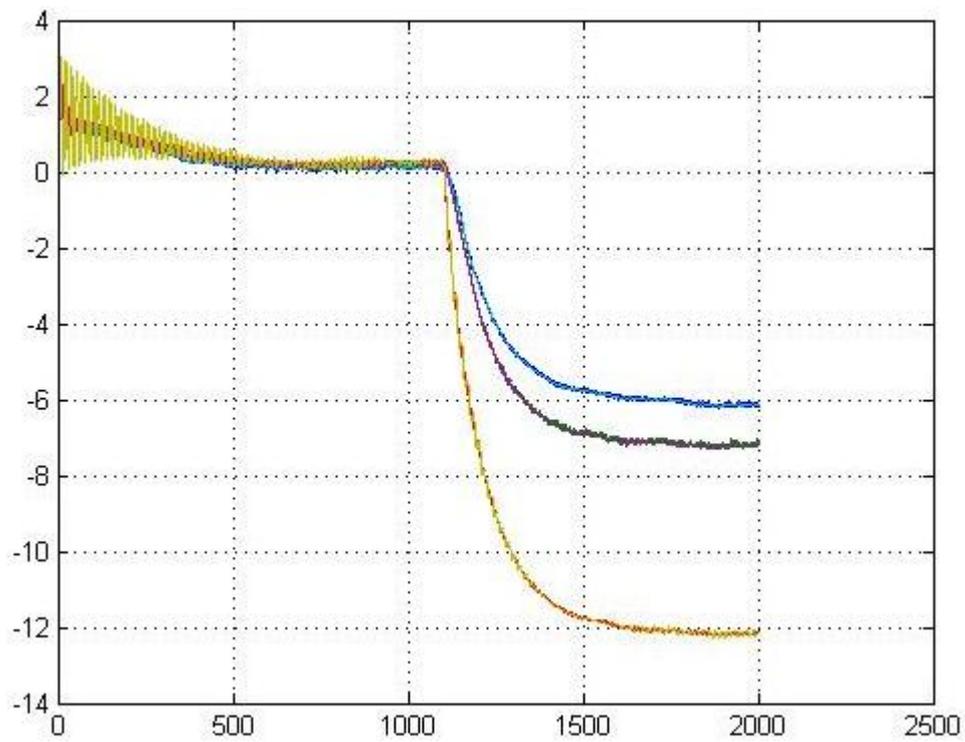


Abbildung D.80.: Real ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

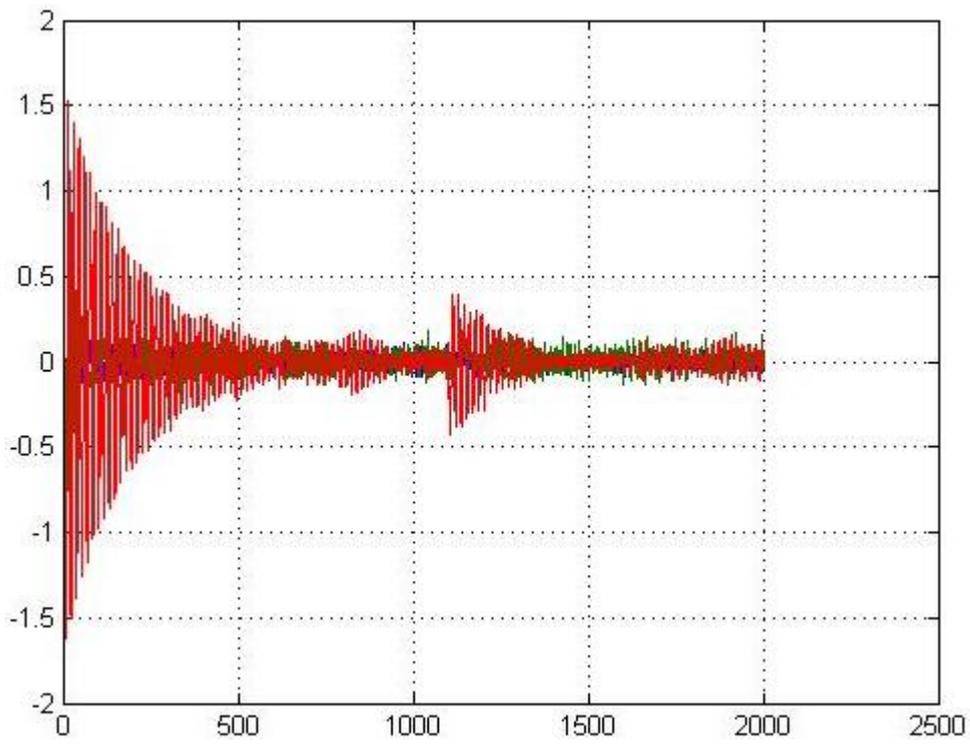


Abbildung D.81.: Real Dif. ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

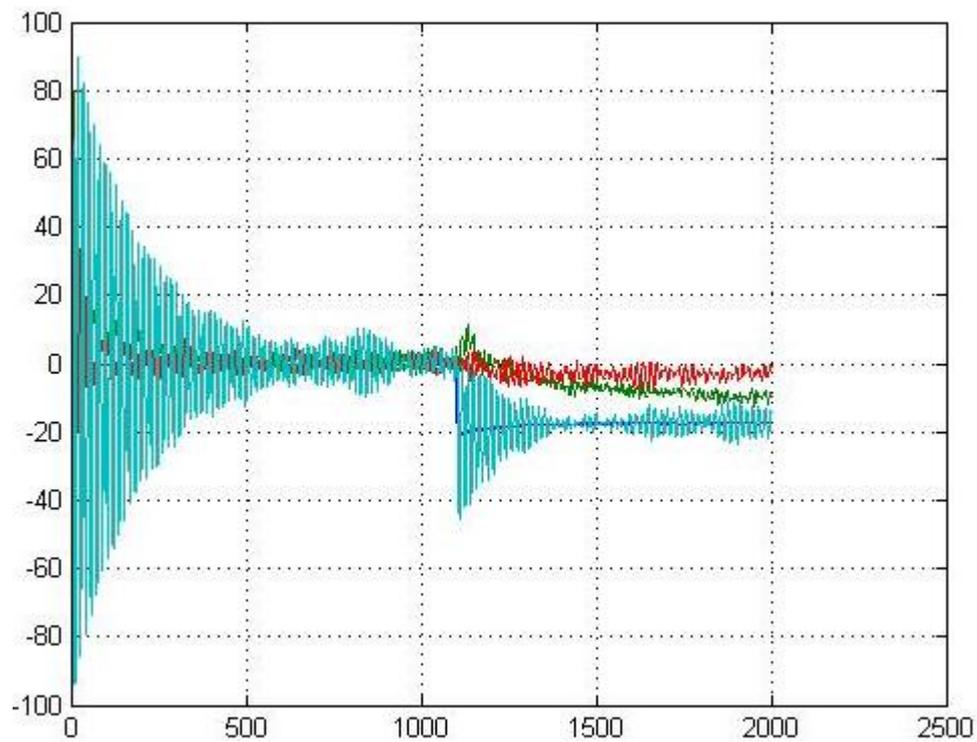


Abbildung D.82.: Real Störung ZR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

(Abb. [D.80](#), [D.81](#) und [D.82](#)):

Störungssprungbeginn: 1100 sek

Störungssprungende: 1800 sek

Differenzsprungbeginn: 1100 sek

Differenzsprungende: 1375 sek

Maximale Differenz: 0,4 cm

Störung nach Sprung: gemittelt -2,2 , -10 und -17,8

E. Messungen Integralregler

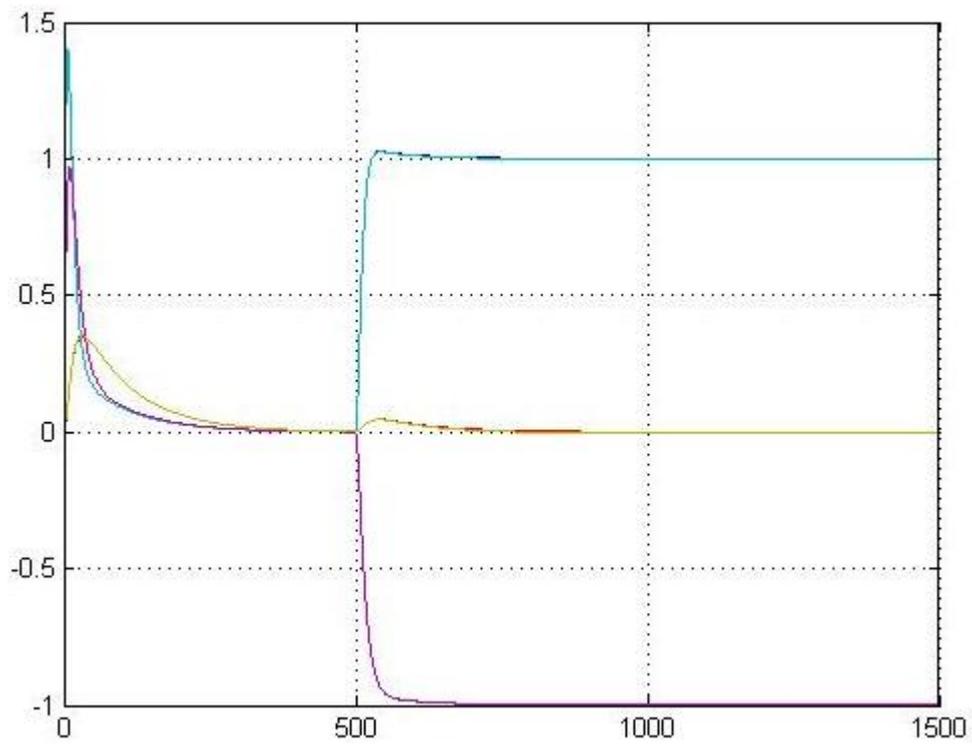


Abbildung E.1.: Simulation Integralregler mit Beobachter Führungssprung

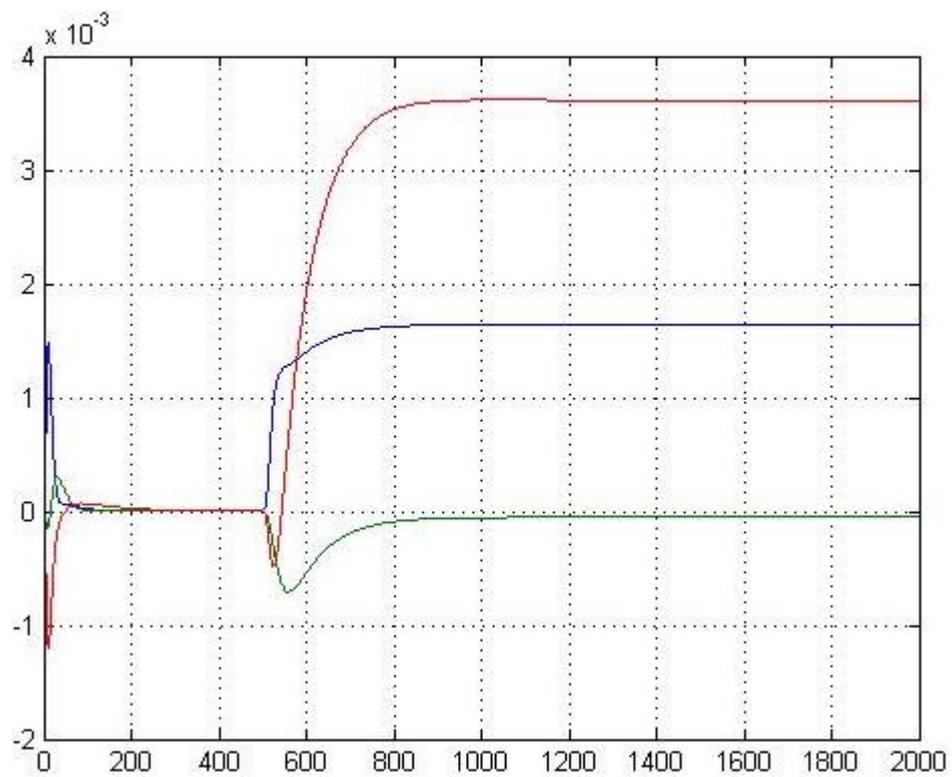


Abbildung E.2.: Simulation Differenz Integralregler mit Beobachter Führungssprung

(Abb. E.1 und E.2):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 777sek

Maximale Differenz: $3,8 \cdot 10^{-3}$

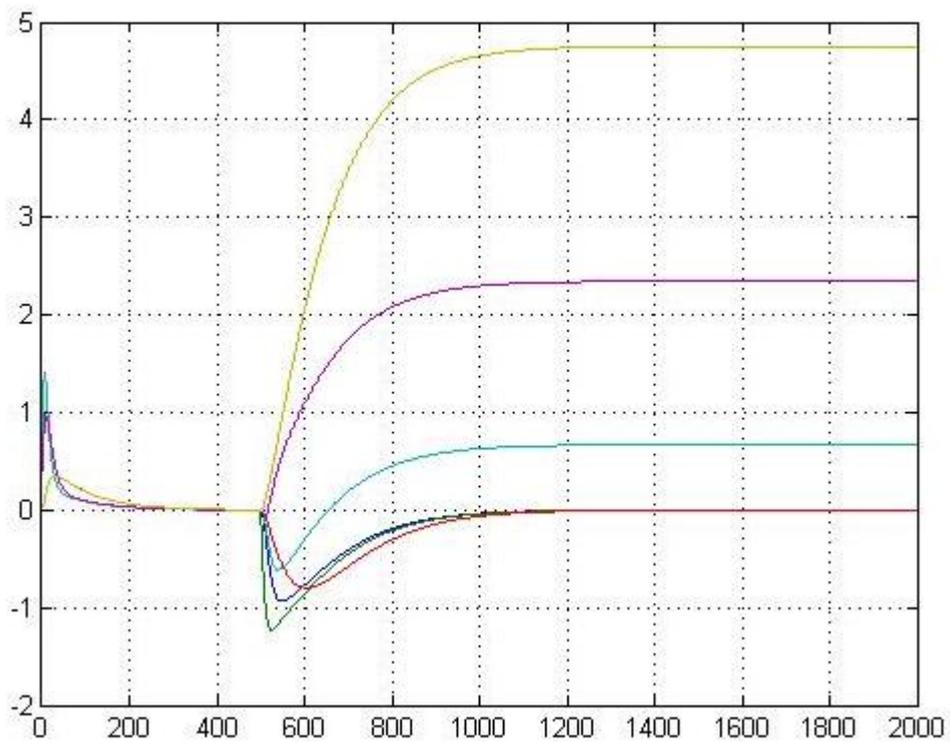


Abbildung E.3.: Simulation Integralregler mit Beobachter Störsprung

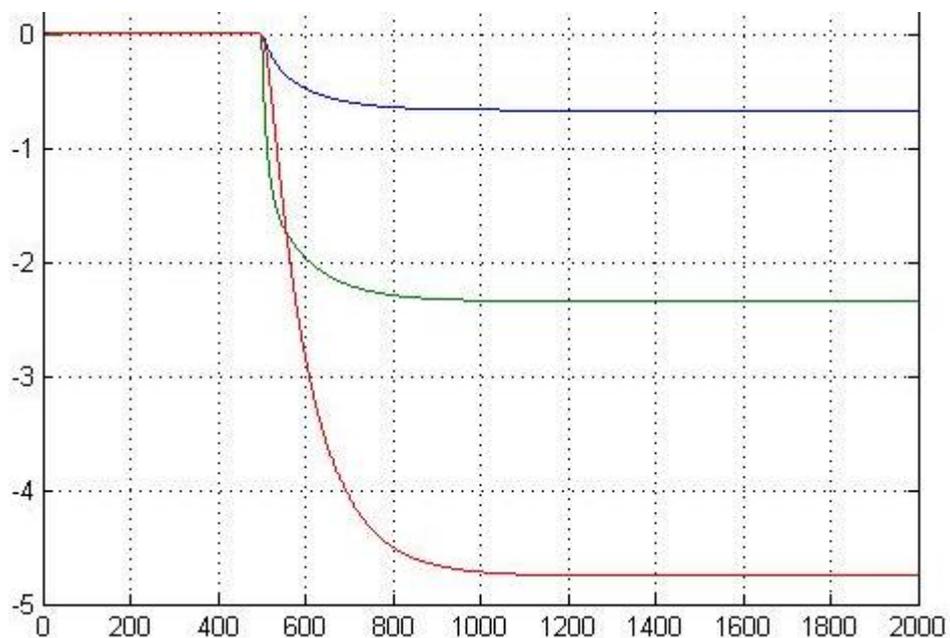


Abbildung E.4.: Simulation Differenz Integralregler mit Beobachter Störsprung

(Abb. [E.3](#) und [E.4](#)):

Störungssprungbeginn: 500sek

Störungssprungende: 1181sek

Differenzsprungbeginn: 500sek

Differenzsprungende: 1036sek

Maximale Differenz: 4,75

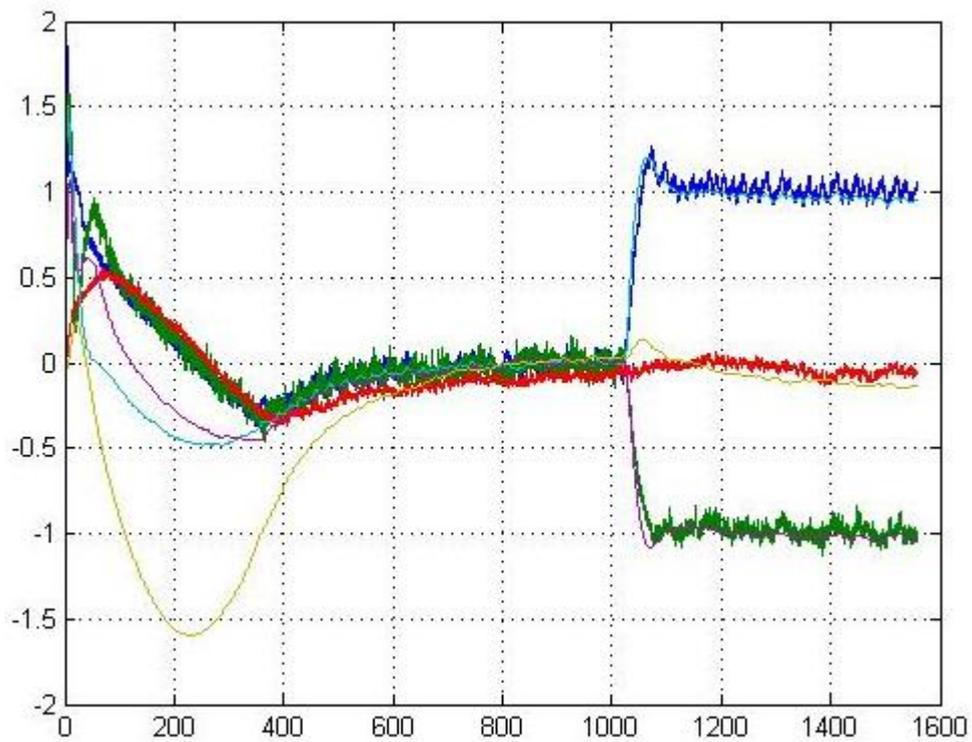


Abbildung E.5.: Real Integralregler mit Beobachter Führungssprung

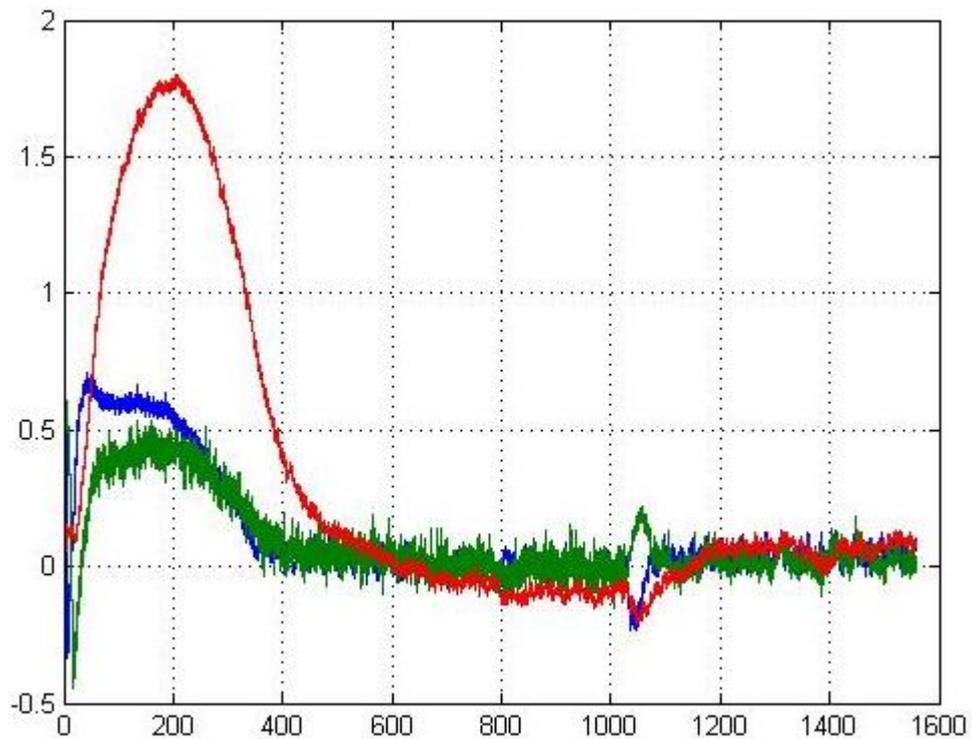


Abbildung E.6.: Real Differenz Integralregler mit Beobachter Führungssprung

(Abb. E.5 und E.6):

Führungssprungbeginn: 1000sek

Führungssprungende: 1071sek

Maximale Differenz: 0,4

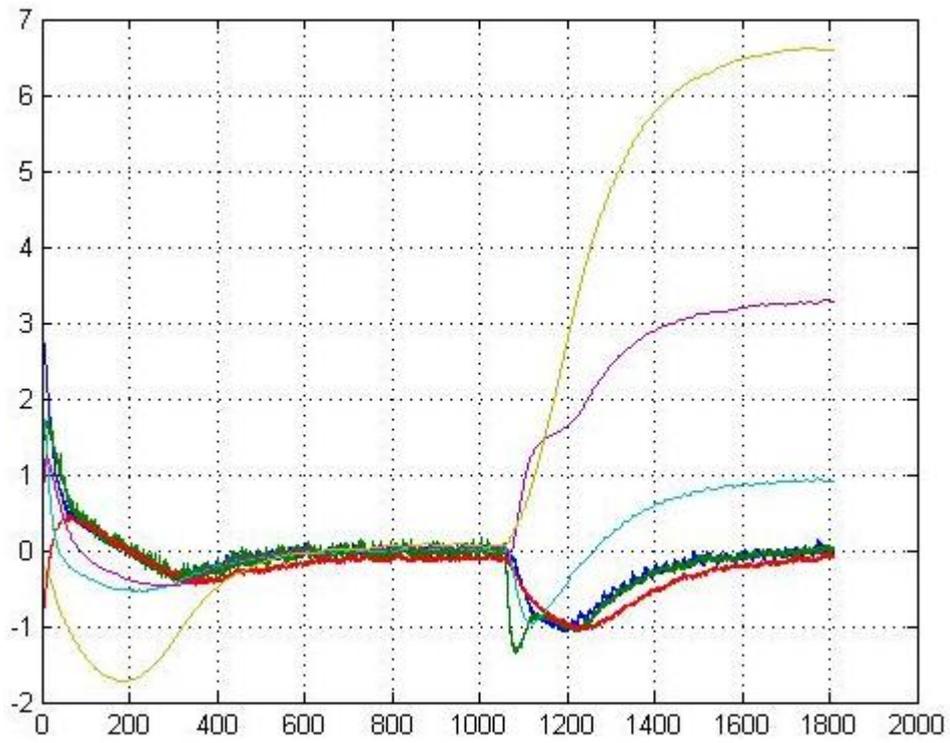


Abbildung E.7.: Real Integralregler mit Beobachter Störsprung

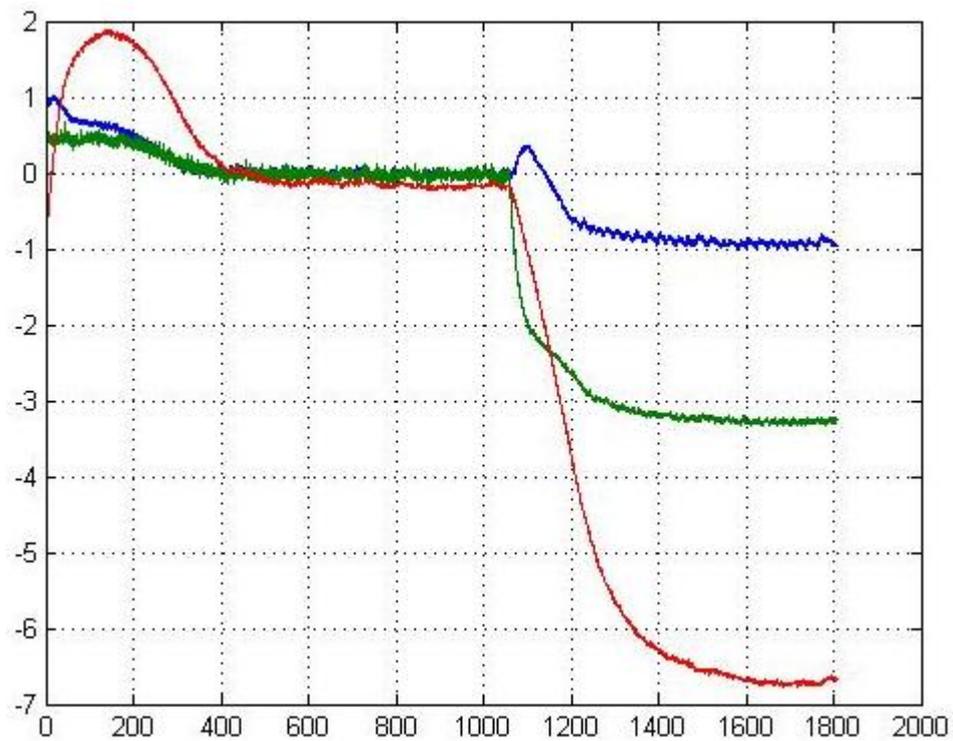


Abbildung E.8.: Real Differenz Integralregler mit Beobachter Störsprung

(Abb. E.7 und E.8):

Störungssprungbeginn: 1050sek

Störungssprungende: 1600sek

Differenzsprungbeginn: 1050sek

Differenzsprungende: 1600sek

Maximale Differenz: 7, 8

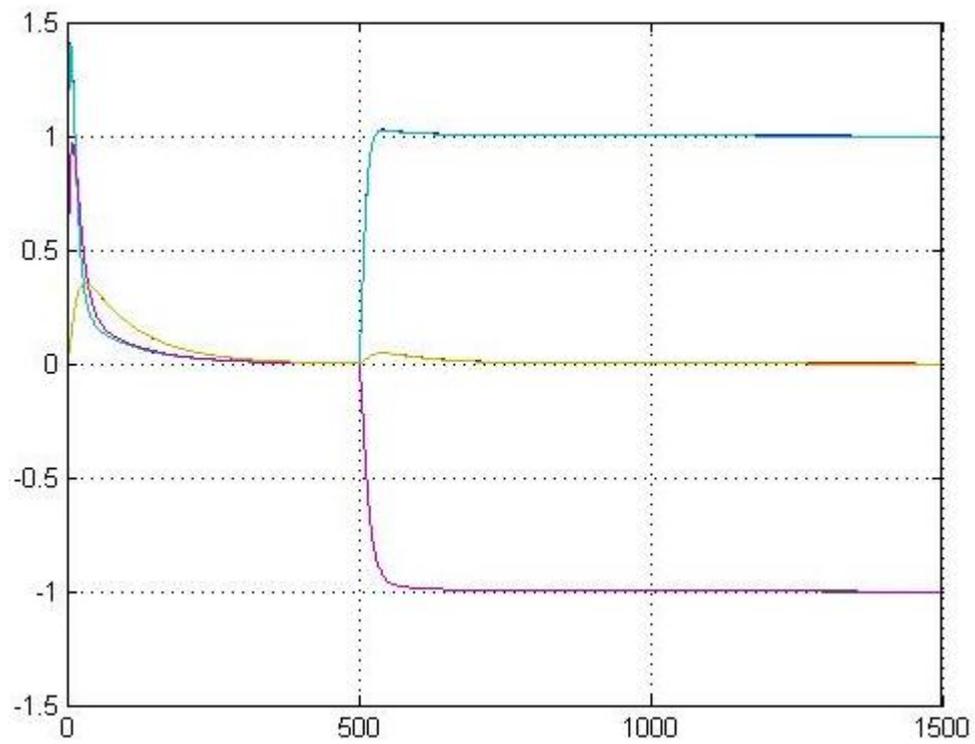


Abbildung E.9.: Simulation Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung

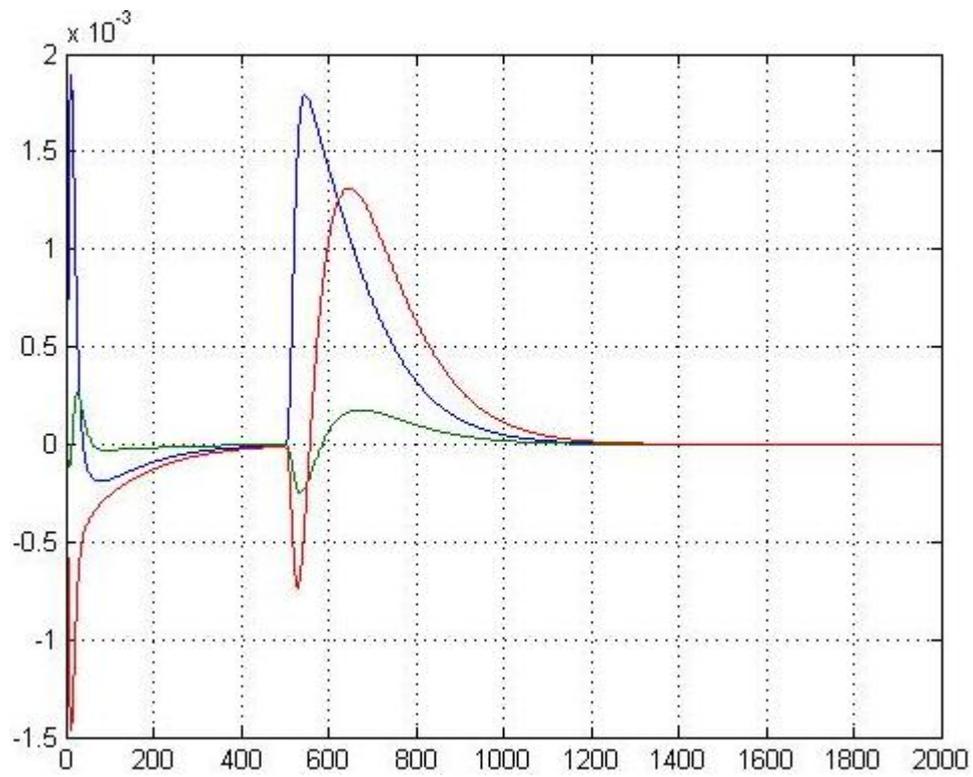


Abbildung E.10.: Sim. Dif. Integralregler Störgrößenbeobachter Führungssprung

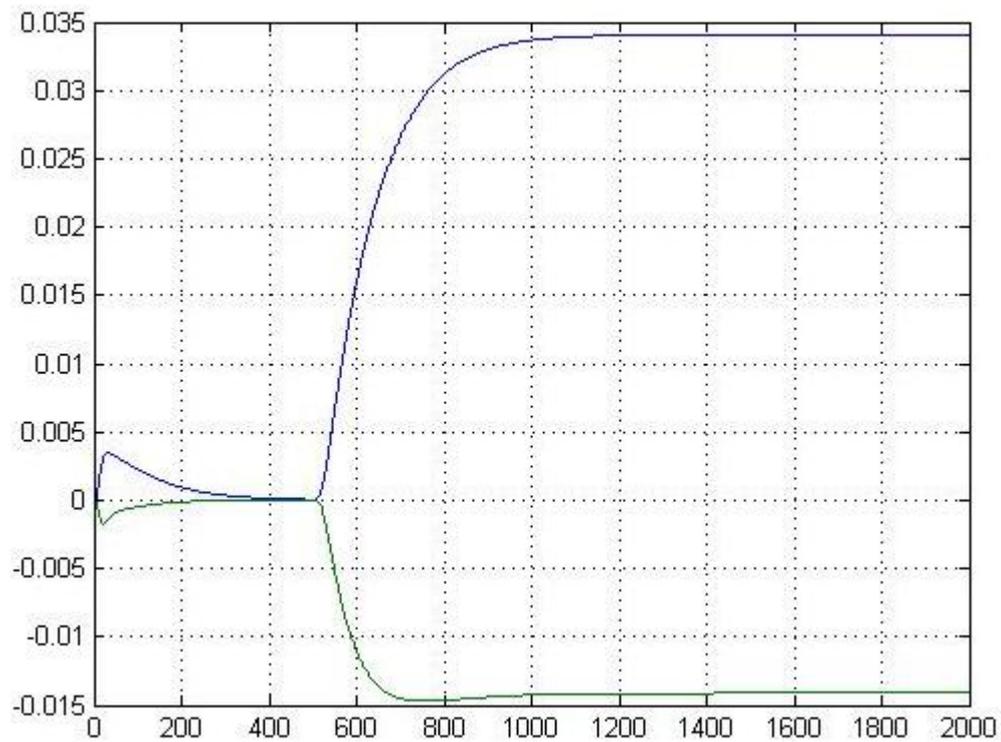


Abbildung E.11.: Sim. Störung Integralregler Störgrößenbeobachter Führungssprung
(Abb. E.9, E.10 und E.11):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 708sek

Maximale Differenz: $1,8 \cdot 10^{-3}$

Störung nach Sprung: 0,0034 und -0,014

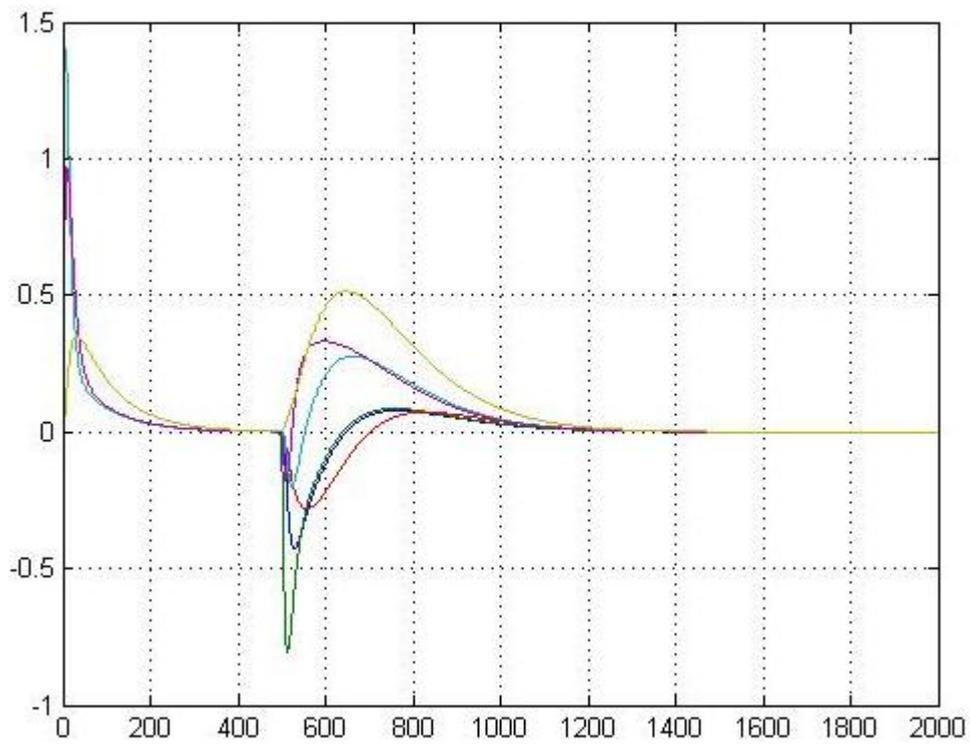


Abbildung E.12.: Simulation Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

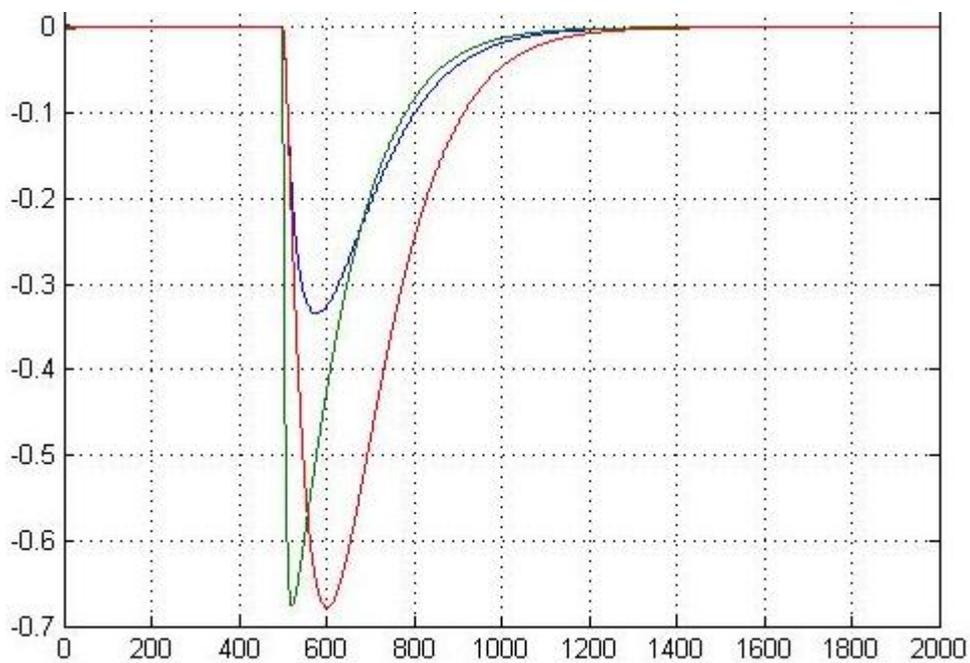


Abbildung E.13.: Simulation Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

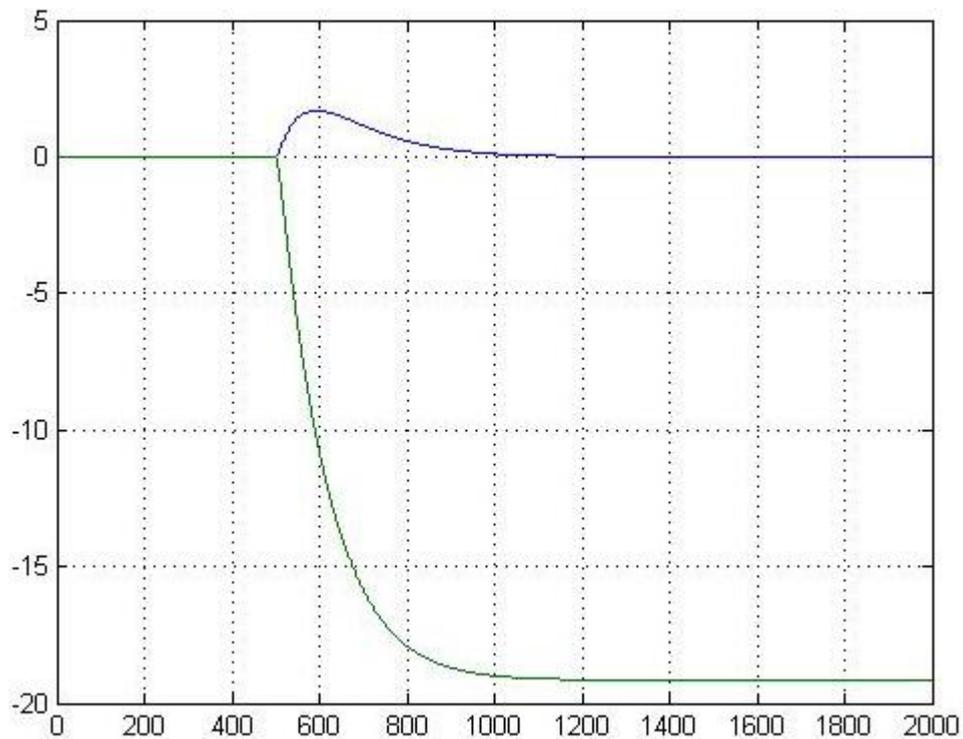


Abbildung E.14.: Simulation Störung Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung
(Abb. E.12, E.13 und E.14):

Störungssprungbeginn: 500sek

Störungssprungende: 1150sek

Differenzsprungbeginn: 500sek

Differenzsprungende: 1200sek

Maximale Differenz: 0,68

Störung nach Sprung: 0 und -18

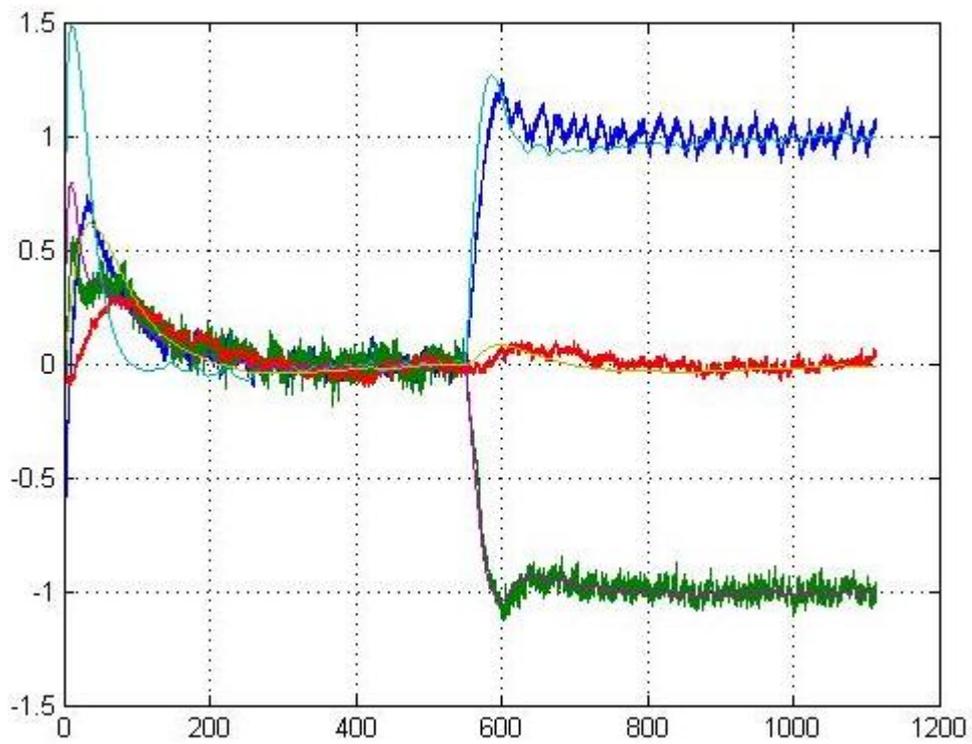


Abbildung E.15.: Real Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung

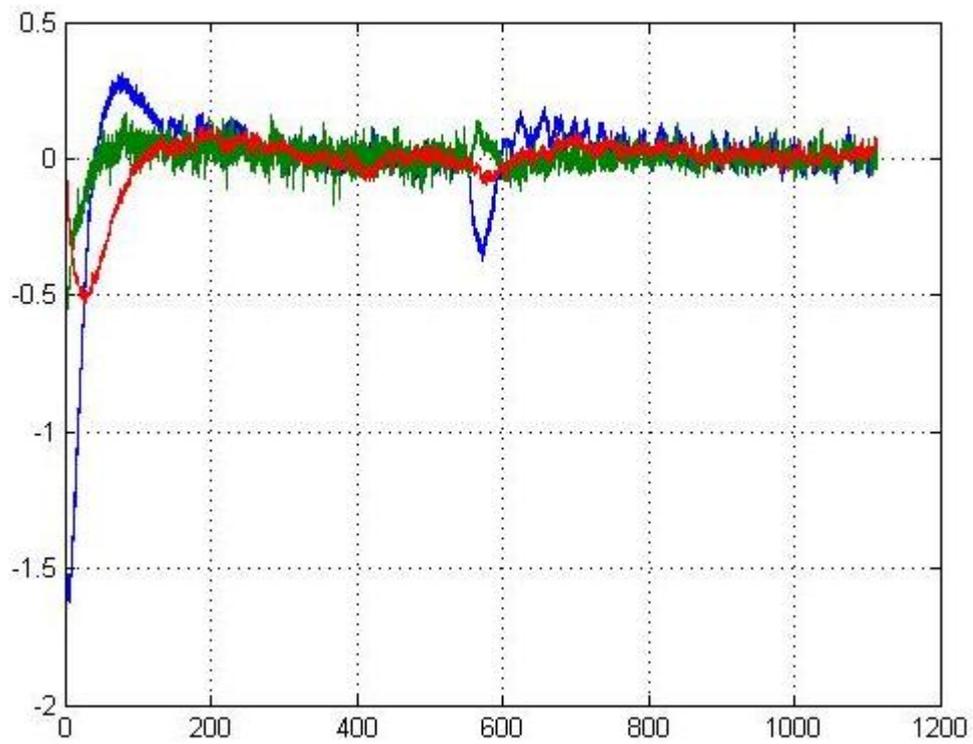


Abbildung E.16.: Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung

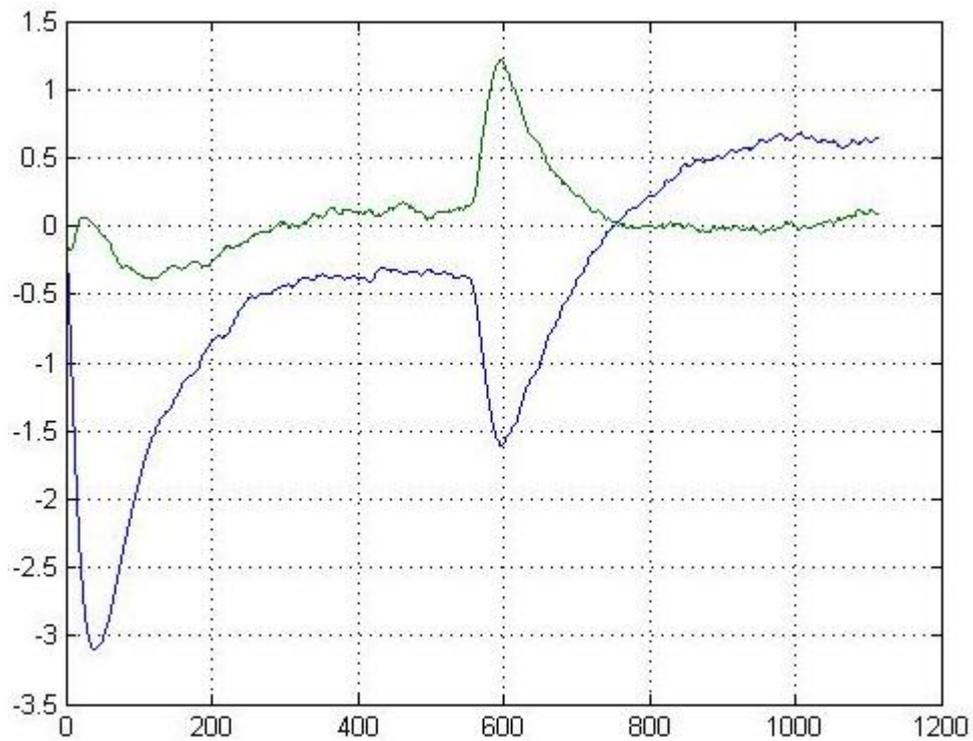


Abbildung E.17.: Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Führungssprung (Abb. E.15, E.16 und E.17):

Führungssprungbeginn: 550sek

Führungssprungende: 630sek

Maximale Differenz: 0,4

Störung nach Sprung: 0,6 und 0,1

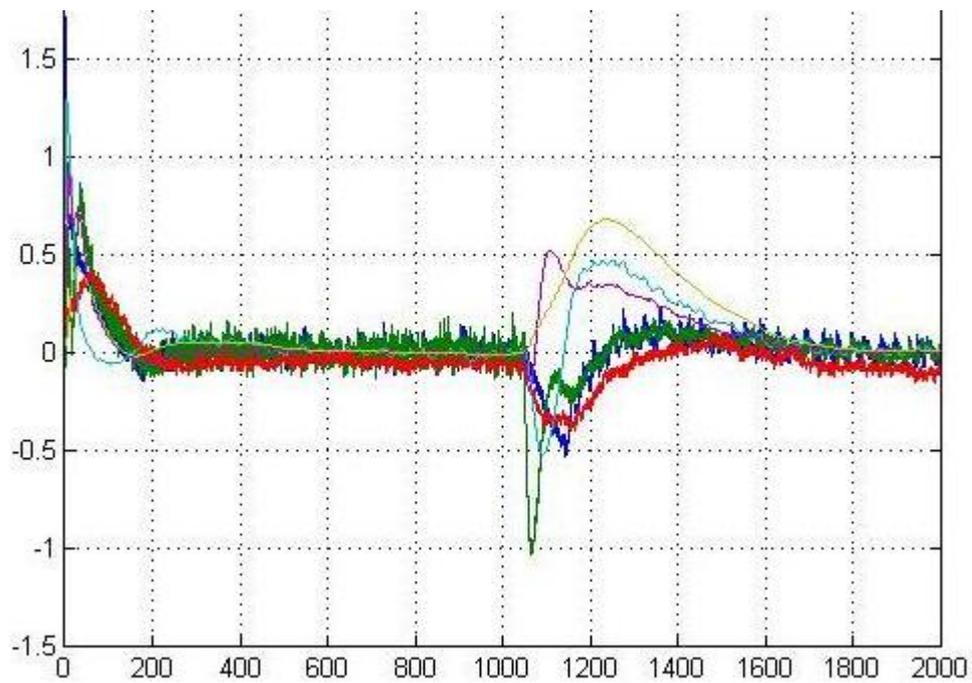


Abbildung E.18.: Real Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

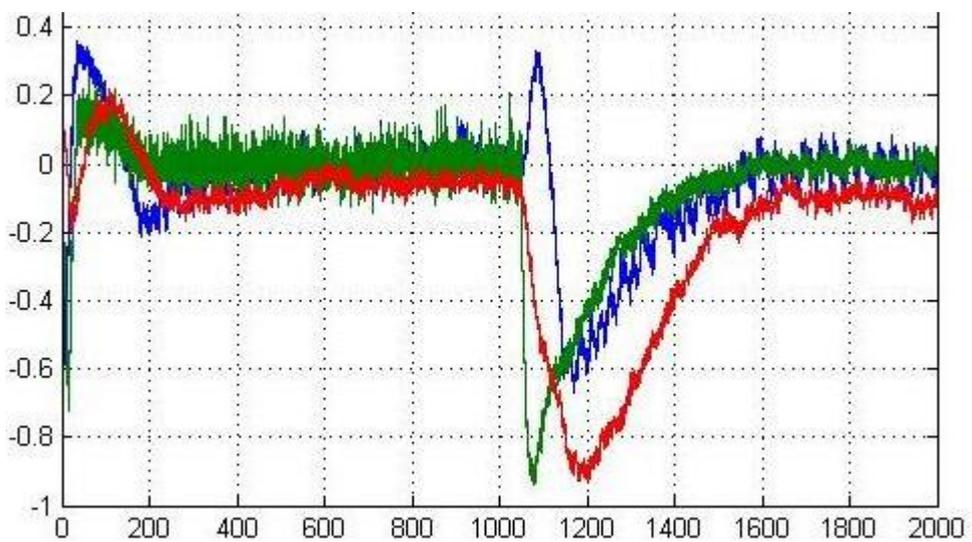


Abbildung E.19.: Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

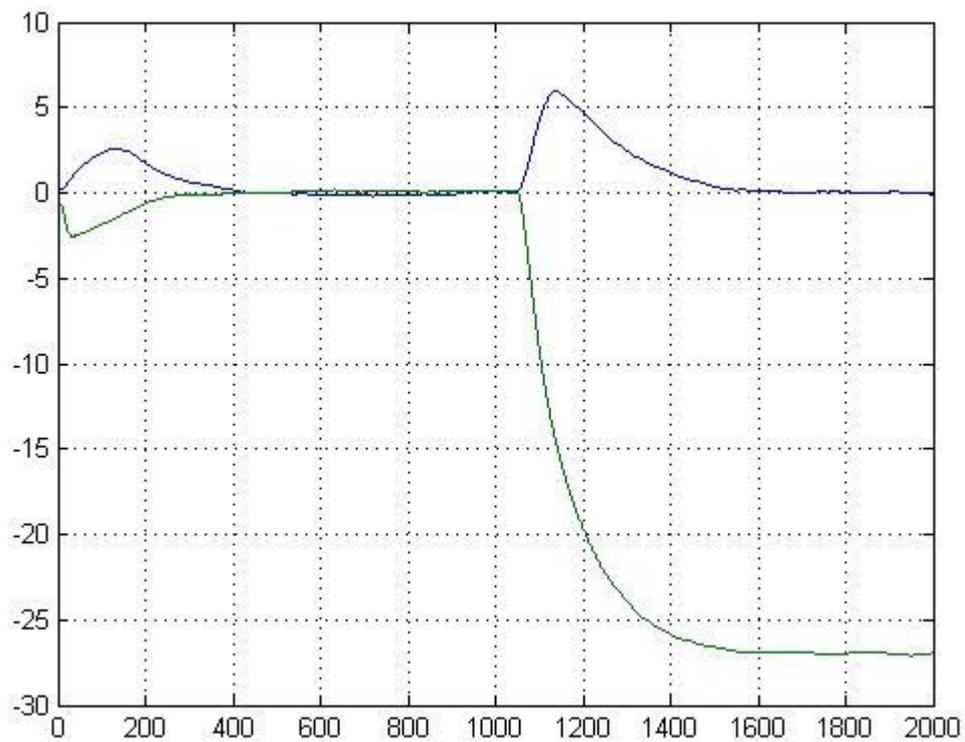


Abbildung E.20.: Real Differenz Integralregler mit Störgrößenbeobachter Störsprung

(Abb. E.18, E.19 und E.20):

Störungssprungbeginn: 1050sek

Störungssprungende: 1700sek

Differenzsprungbeginn: 1050sek

Differenzsprungende: 1600sek

Maximale Differenz: 0,9

Störung nach Sprung: 0 und -27

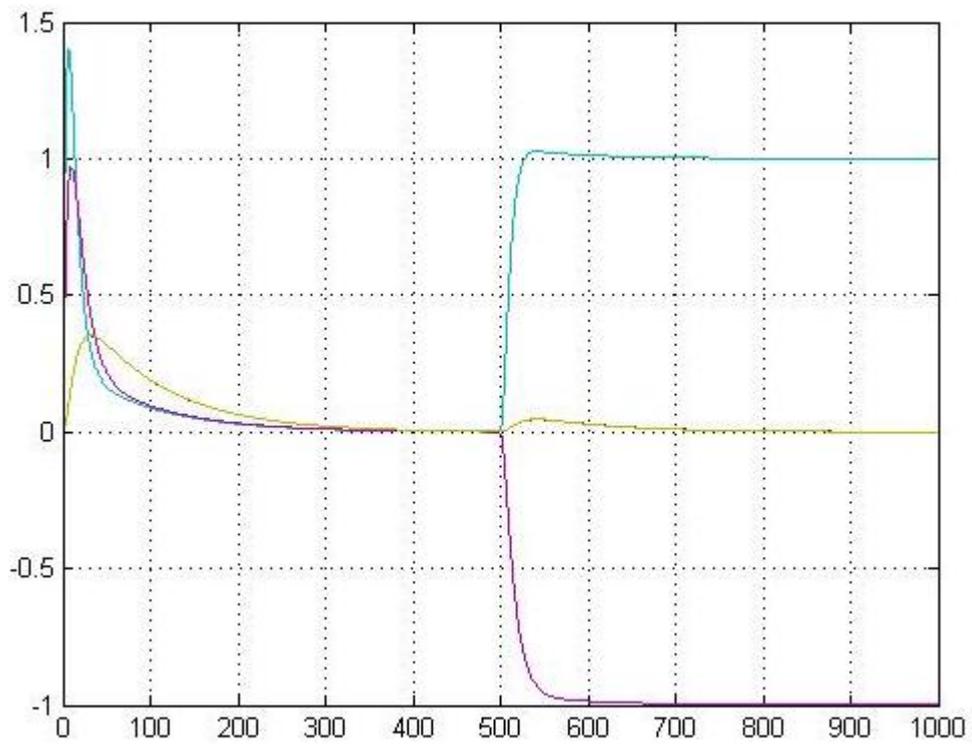


Abbildung E.21.: Simulation Integralregler mit Prototyp Führungssprung

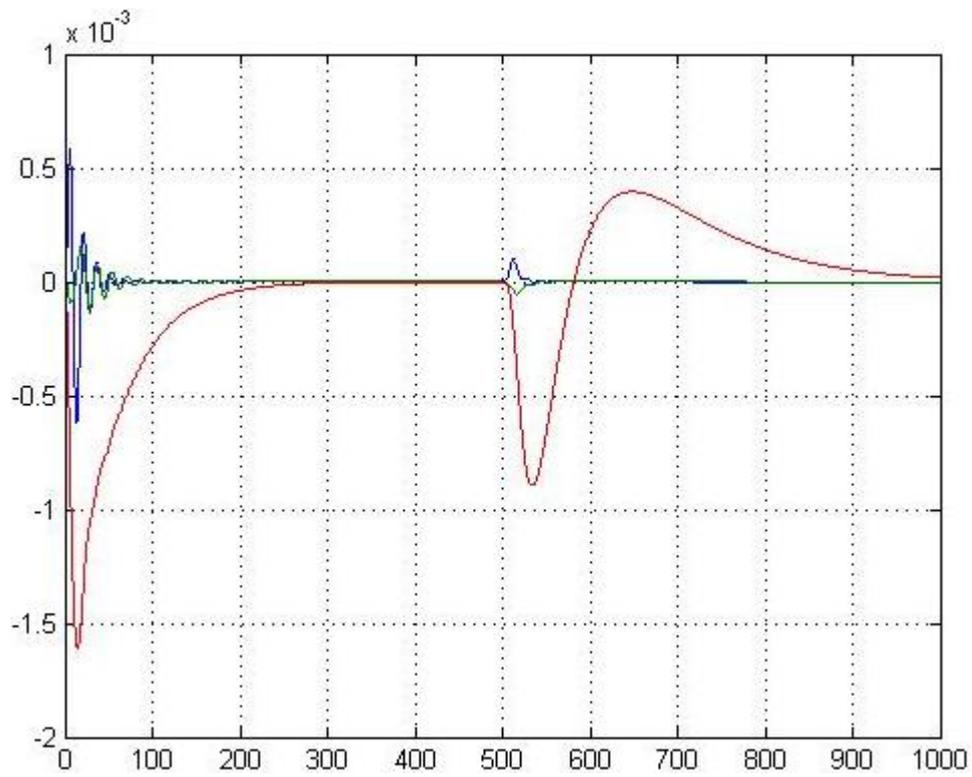


Abbildung E.22.: Simulation Differenz Integralregler mit Prototyp Führungssprung

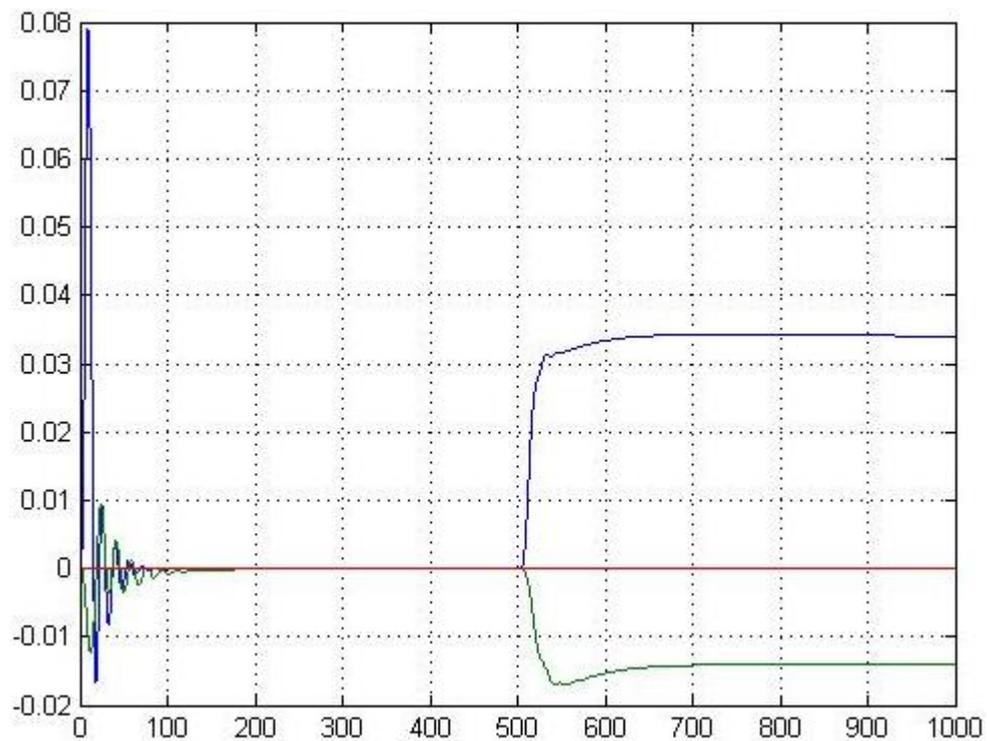


Abbildung E.23.: Simulation Störung Integralregler mit Prototyp Führungssprung

(Abb. E.21, E.22 und E.23):

Führungssprungbeginn: 500sek

Führungssprungende: 709sek

Maximale Differenz: $0,9 \cdot 10^{-3}$

Störung nach Sprung: 0,035 und -0,015

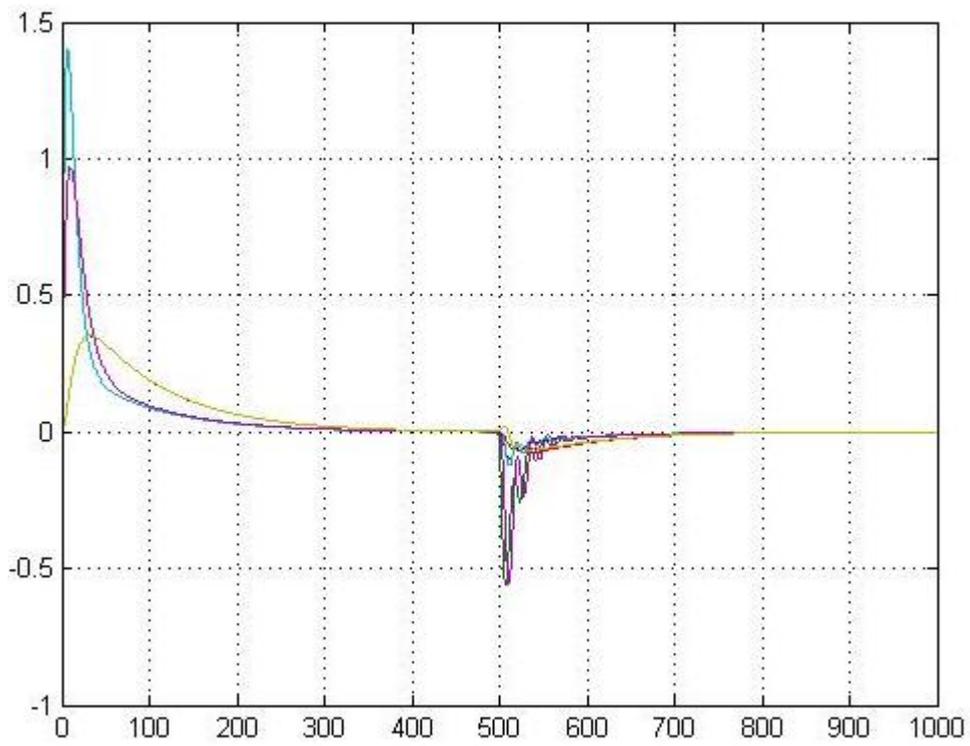


Abbildung E.24.: Simulation Integralregler mit Prototyp Störsprung

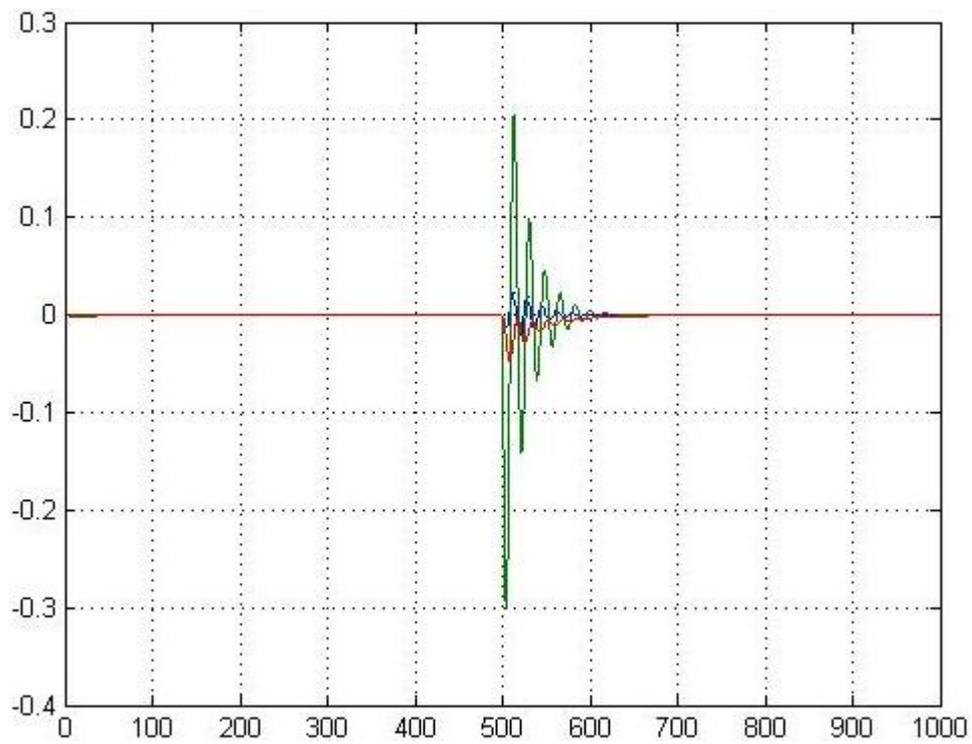


Abbildung E.25.: Simulation Differenz Integralregler mit Prototyp Störsprung

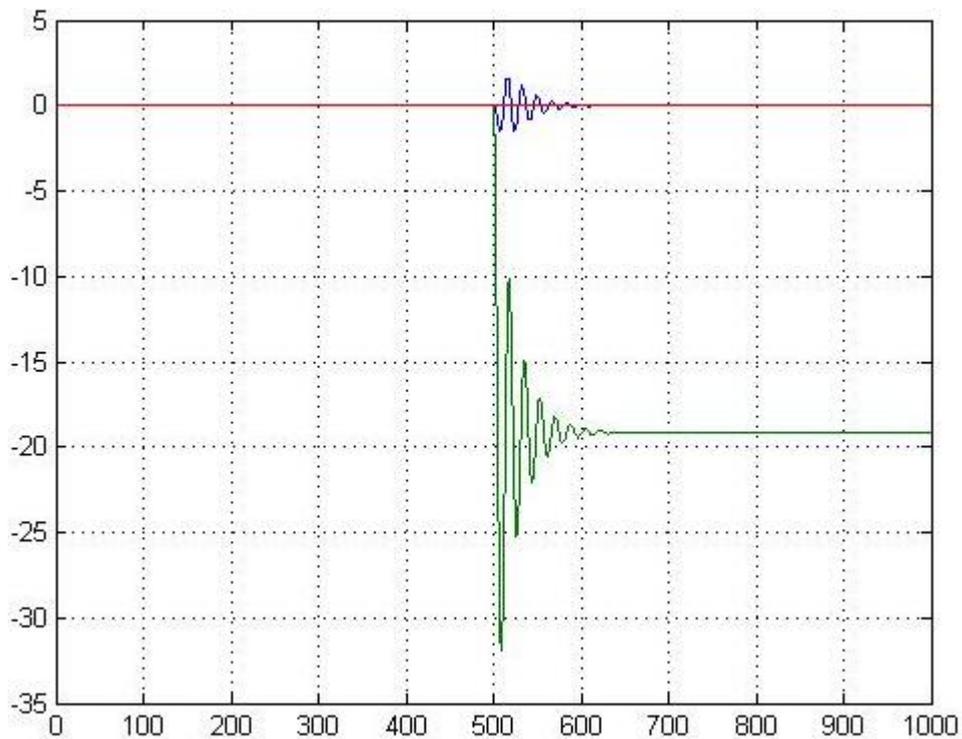


Abbildung E.26.: Simulation Störung Integralregler mit Prototyp Störsprung

(Abb. E.24, E.25 und E.26):

Störungssprungbeginn: 500sek

Störungssprungende: 700sek

Differenzsprungbeginn: 500sek

Differenzsprungende: 600sek

Maximale Differenz: 0,3

Störung nach Sprung: 0 und -19

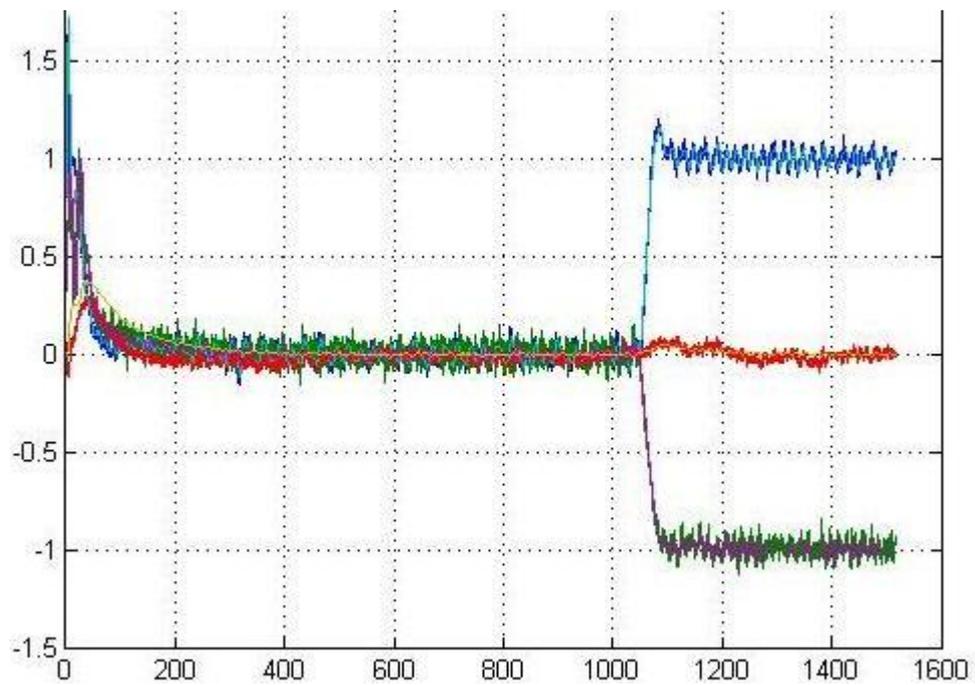


Abbildung E.27.: Real Integralregler mit Prototyp Führungssprung

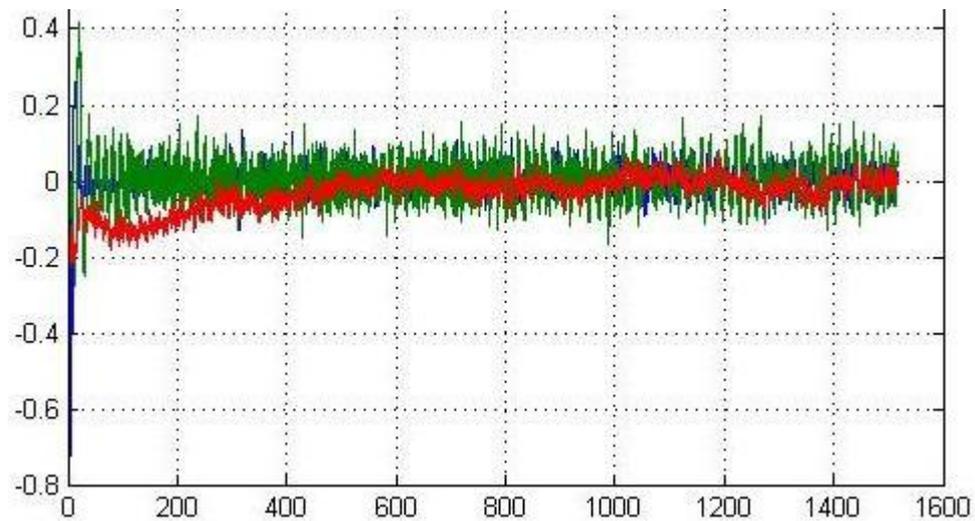


Abbildung E.28.: Real Differenz Integralregler mit Prototyp Führungssprung

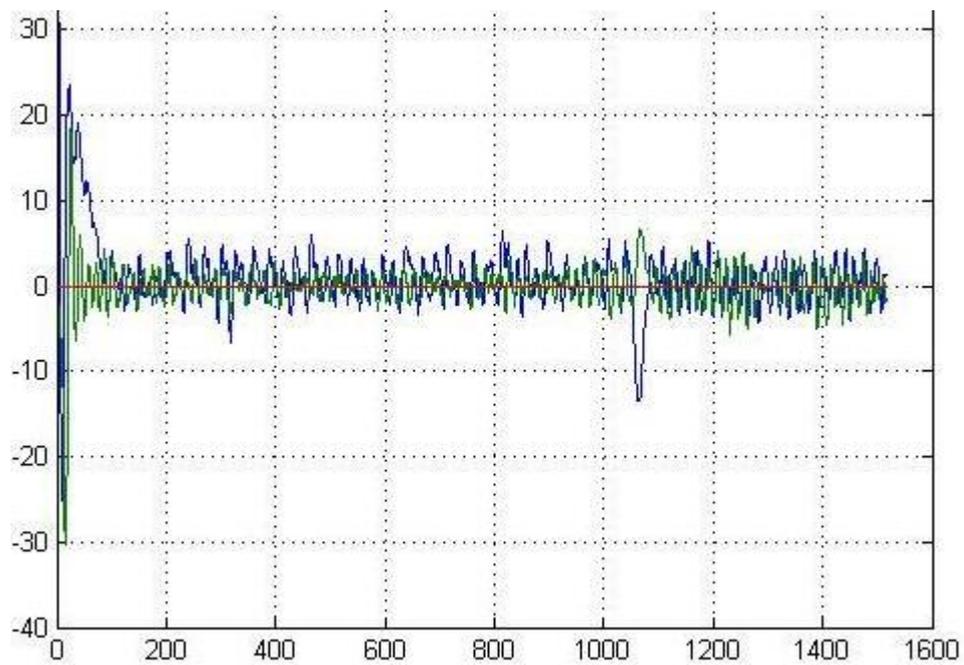


Abbildung E.29.: Real Störung Integralregler mit Prototyp Führungssprung

(Abb. [E.27](#), [E.28](#) und [E.29](#)):

Führungssprungbeginn: 1050sek

Führungssprungende: 1114sek

Maximale Differenz: -0,18

Störung nach Sprung: gemittelt beide 0

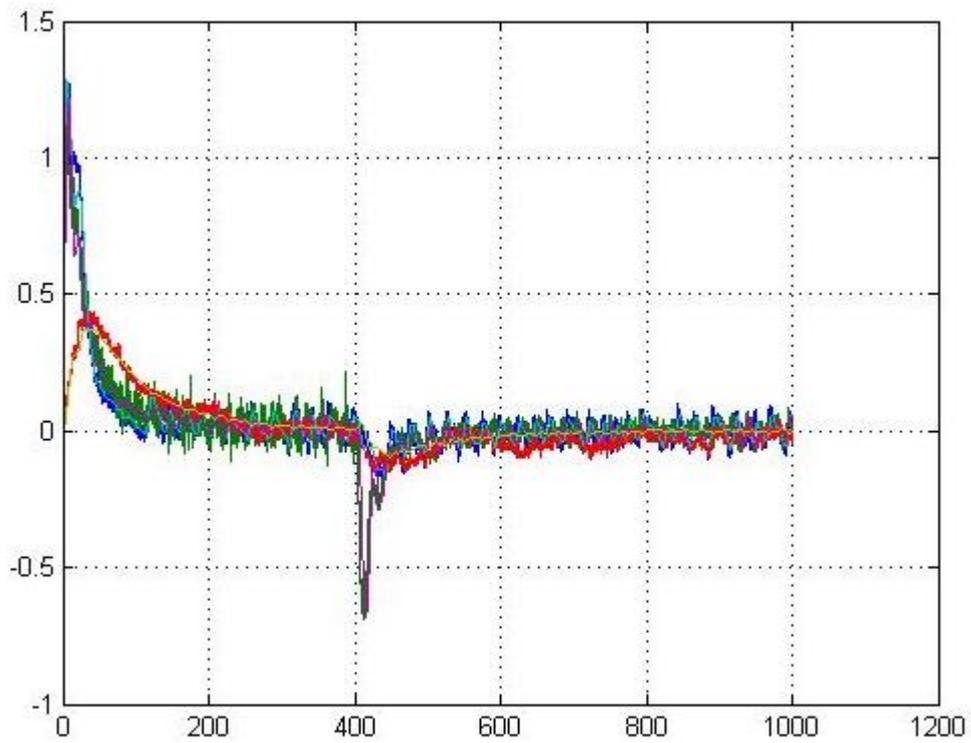


Abbildung E.30.: Real Integralregler mit Prototyp Störsprung

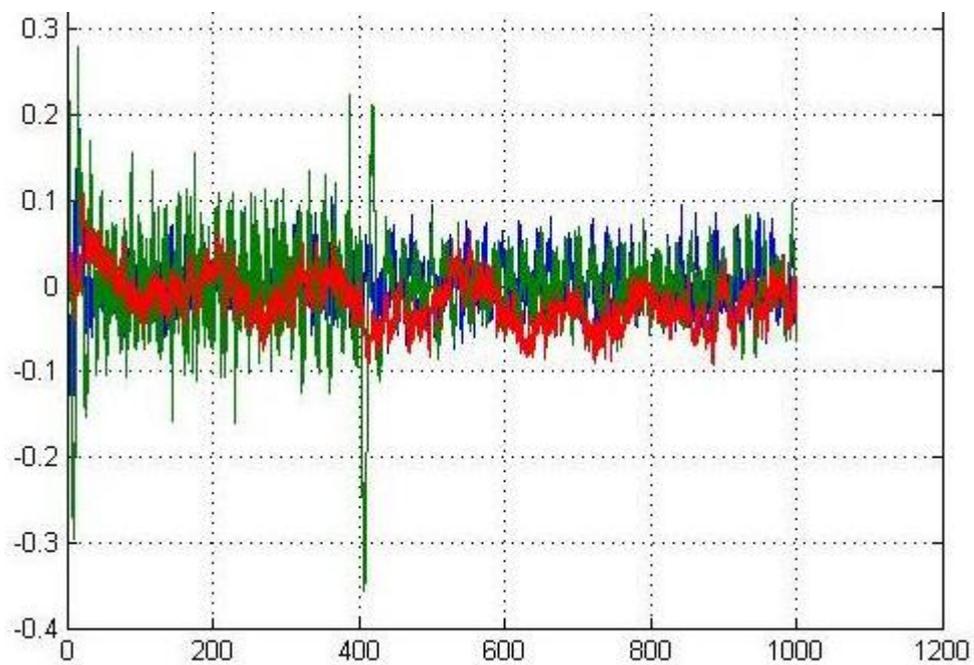


Abbildung E.31.: Real Differenz Integralregler mit Prototyp Störsprung

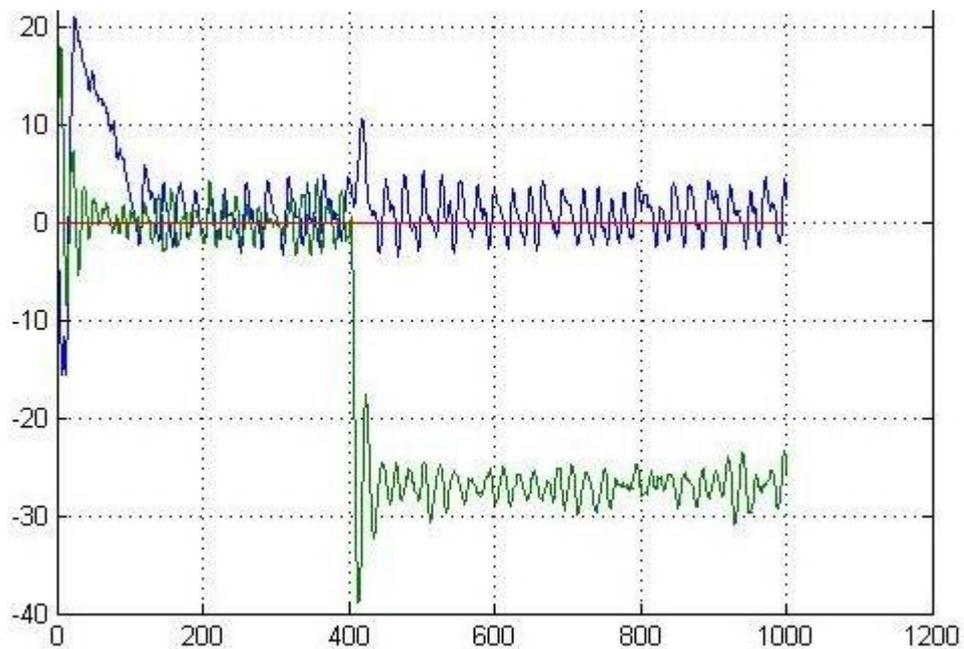


Abbildung E.32.: Real Störung Integralregler mit Prototyp Störsprung

(Abb. E.30, E.31 und E.32):

Störungssprungbeginn: 400sek

Störungssprungende: 650sek

Differenzsprungbeginn: 400sek

Differenzsprungbeginn: 406sek

Maximale Differenz: 0,35

Störung nach Sprung: gemittelt 0 und -27

E.1. Messungen Integralregler510

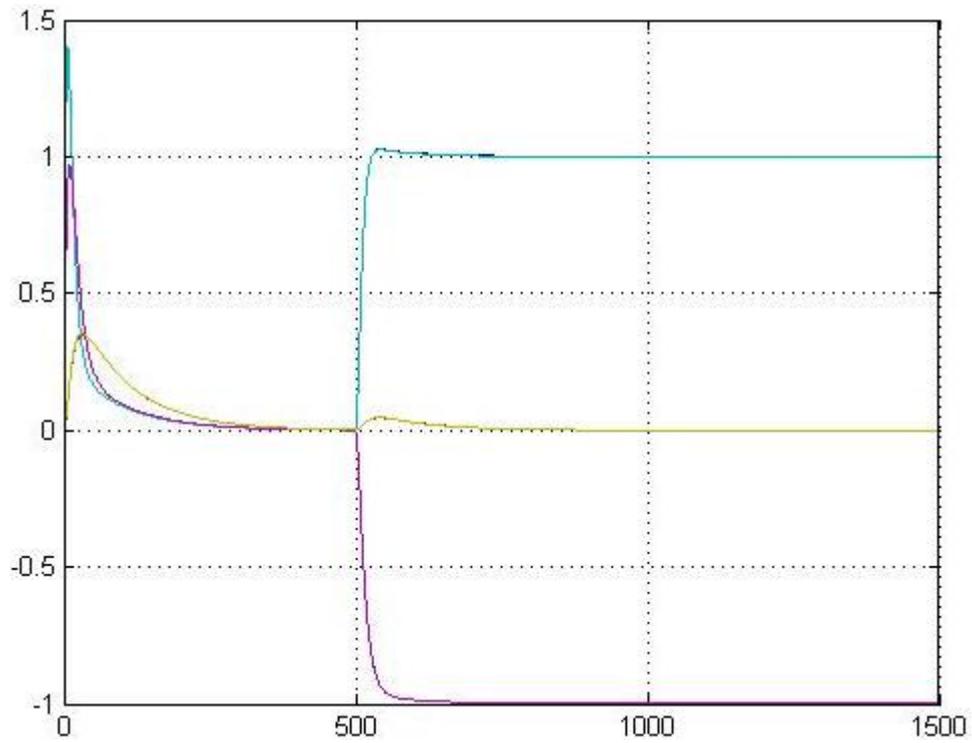


Abbildung E.33.: Sim. Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

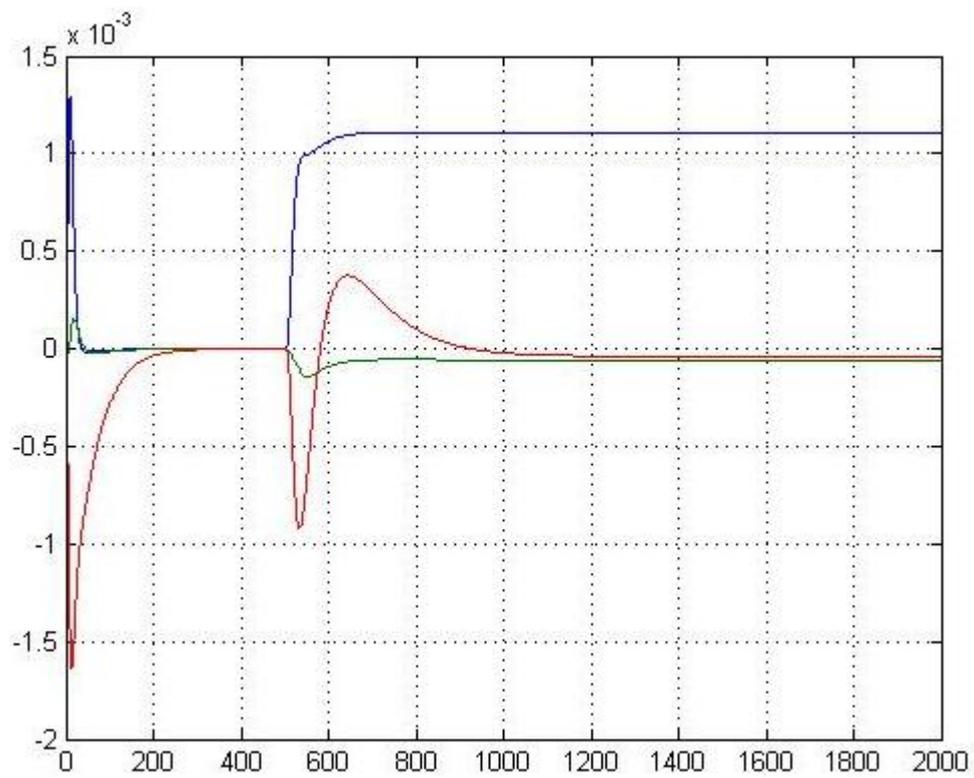


Abbildung E.34.: Sim. Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung
(Abb. E.33 und E.34):

Führungssprungbeginn: 500 sek

Führungssprungende: 714 sek

Maximale Differenz: $1,15 \cdot 10^{-3}$ cm

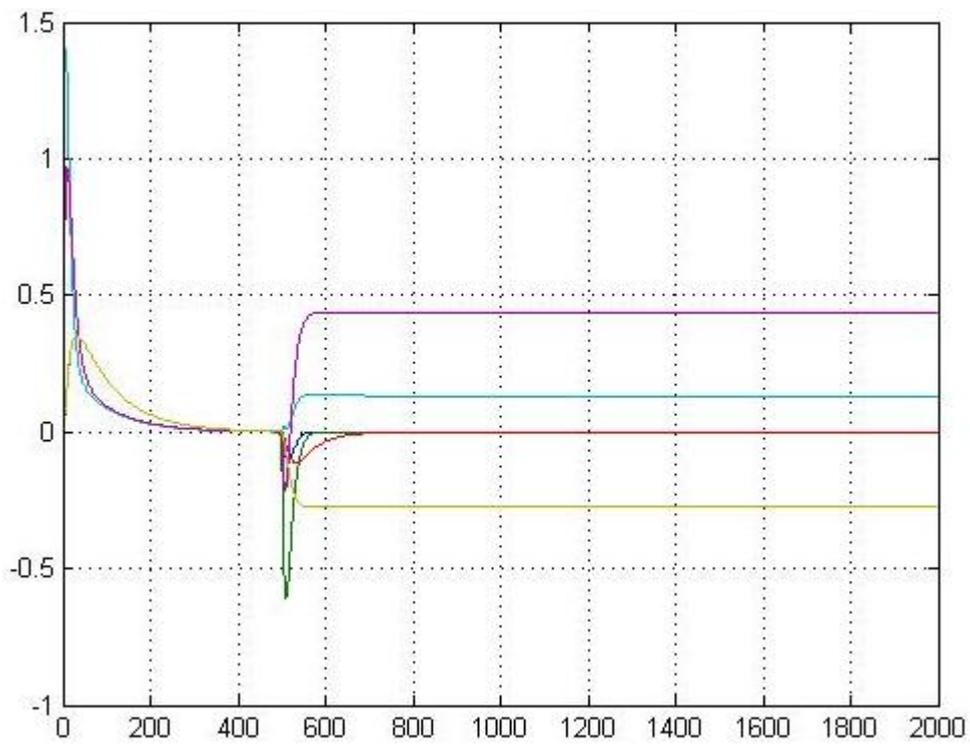


Abbildung E.35.: Sim. Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung

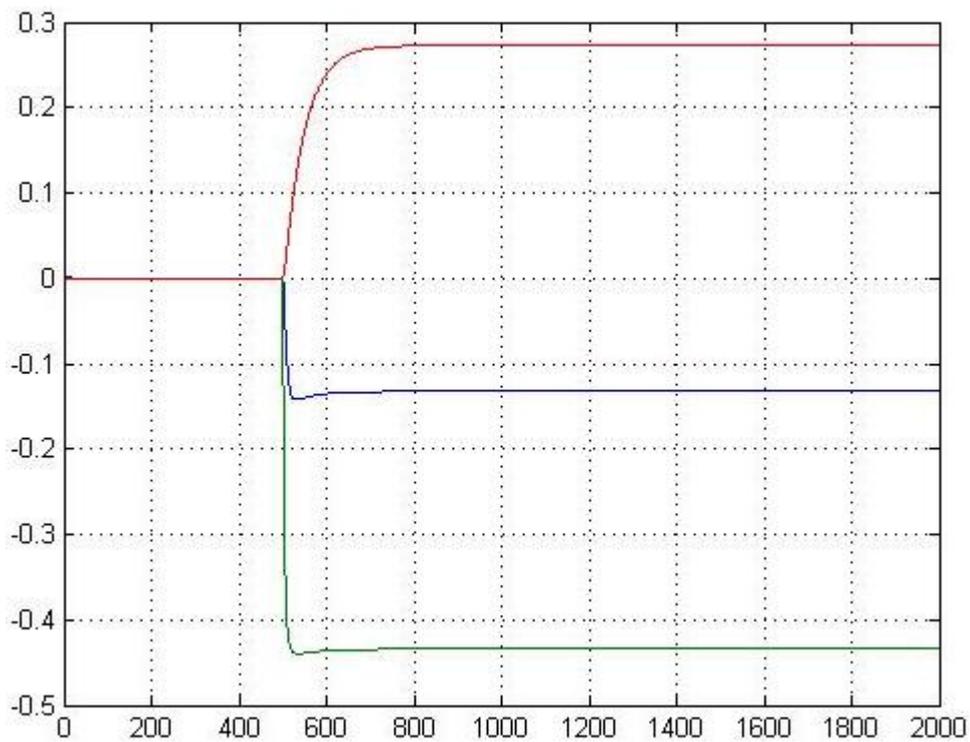


Abbildung E.36.: Sim. Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung

(Abb. E.35 und E.36):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 650 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 600 sek

Maximale Differenz: 0,44 cm

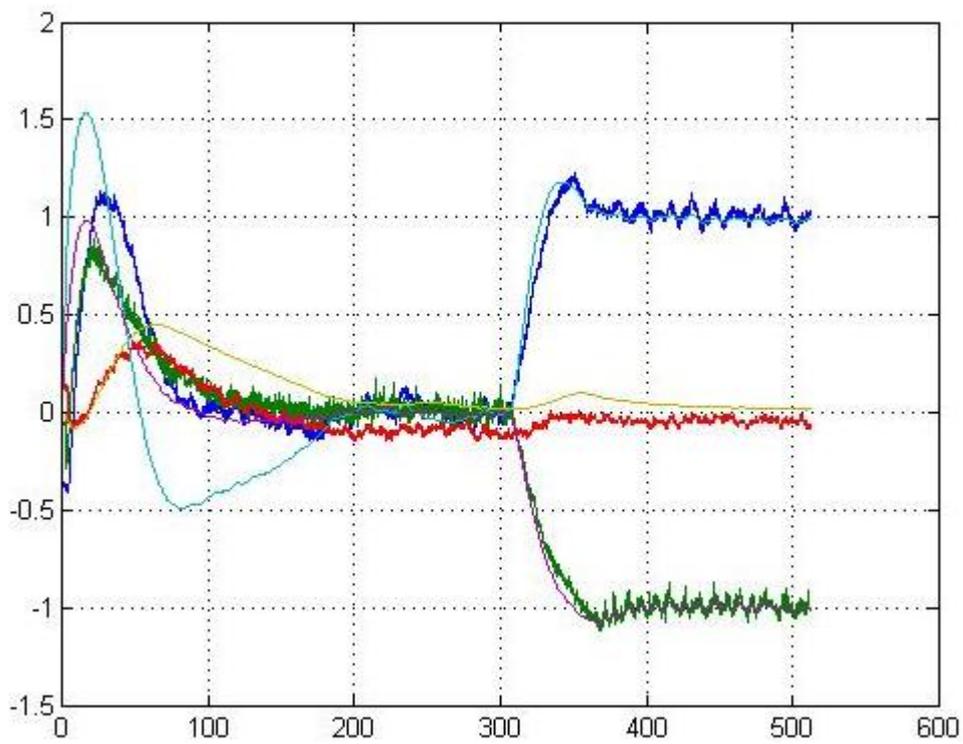


Abbildung E.37.: Real Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

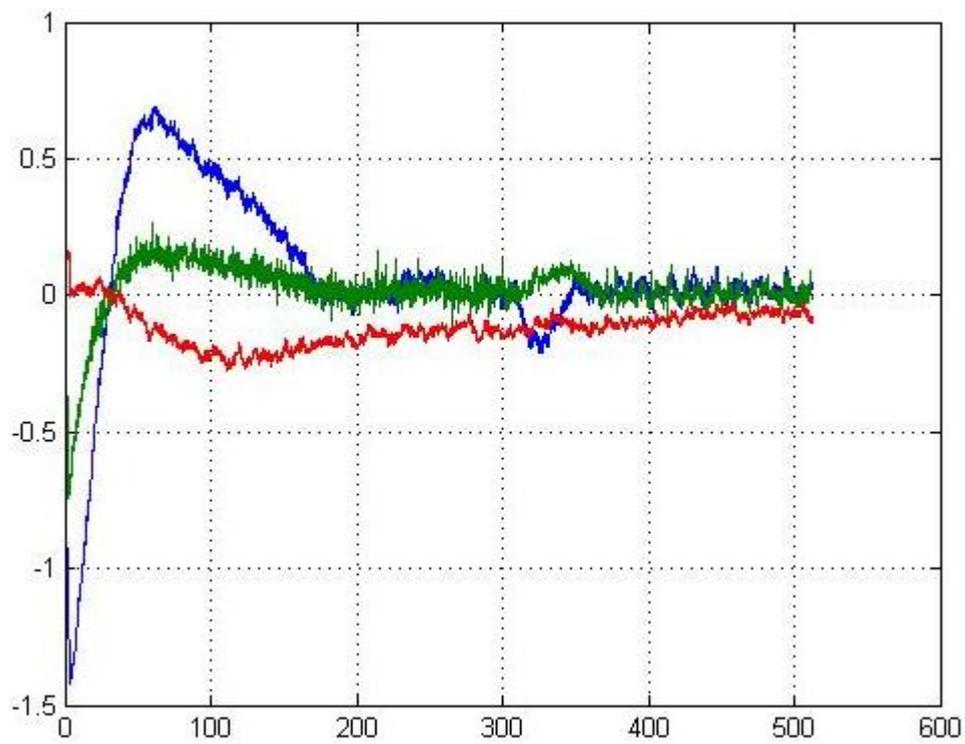


Abbildung E.38.: Real Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Führungssprung

(Abb. E.37 und E.38):

Führungssprungbeginn: 310 sek

Führungssprungende: 357 sek

Maximale Differenz: 0,2 cm

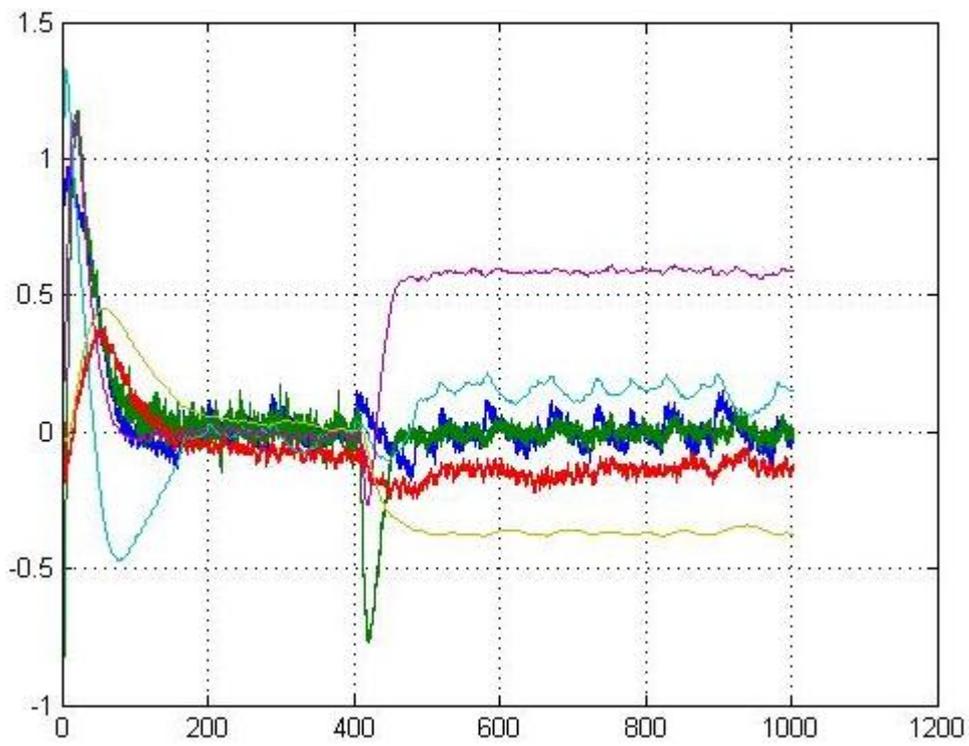


Abbildung E.39.: Real Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung

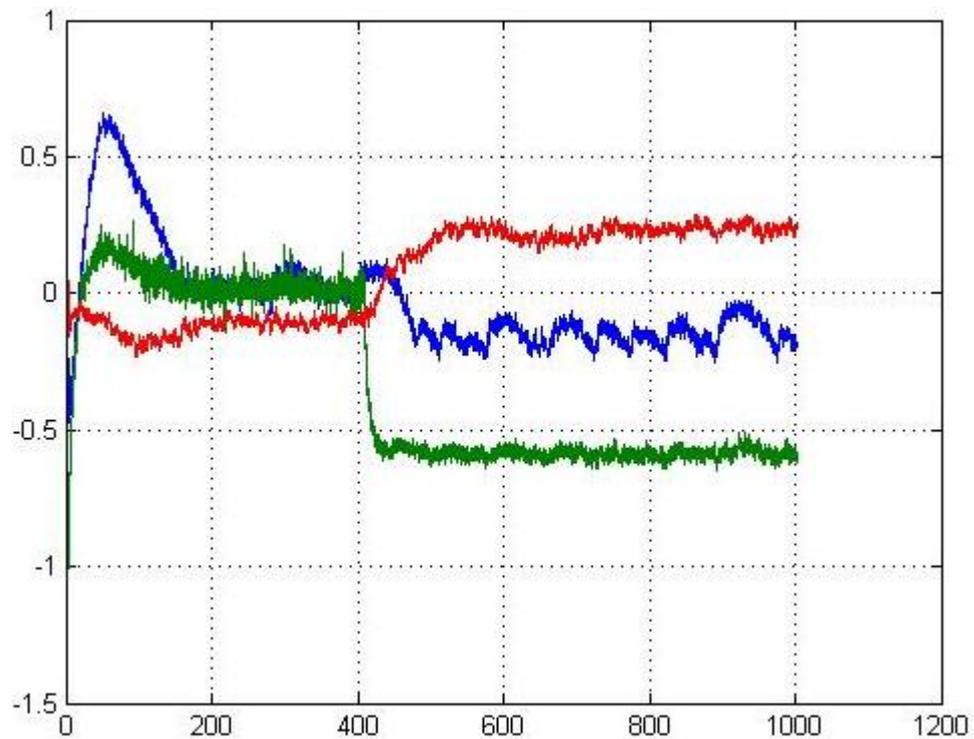


Abbildung E.40.: Real Dif. Integralregler5 mit Beobachter10 Störsprung

(Abb. E.39 und E.40):

Störungssprungbeginn: 400 sek

Störungssprungende: 514 sek

Differenzsprungbeginn: 400 sek

Differenzsprungende: 514 sek

Maximale Differenz: 0,6 cm

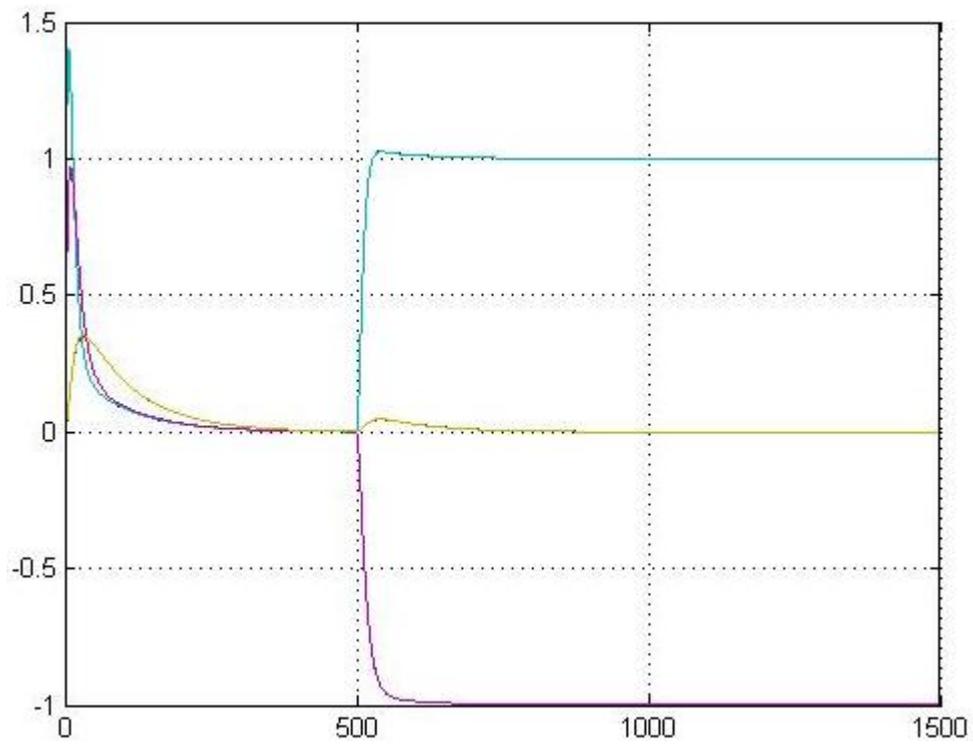


Abbildung E.41.: Sim. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

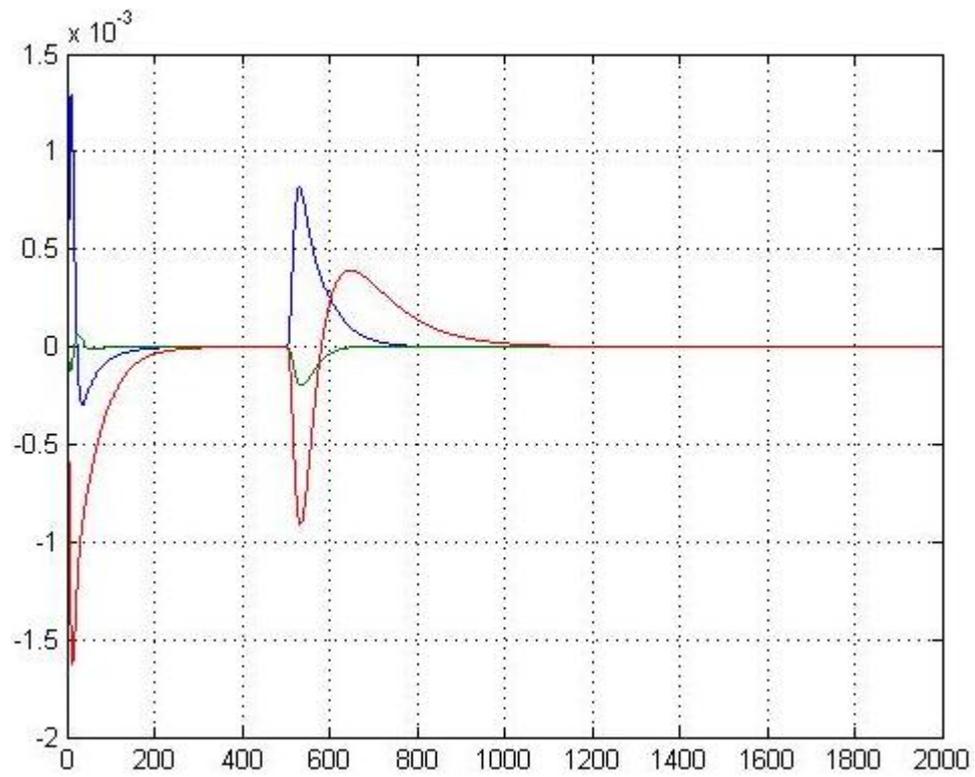


Abbildung E.42.: Sim. Dif. Integralregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

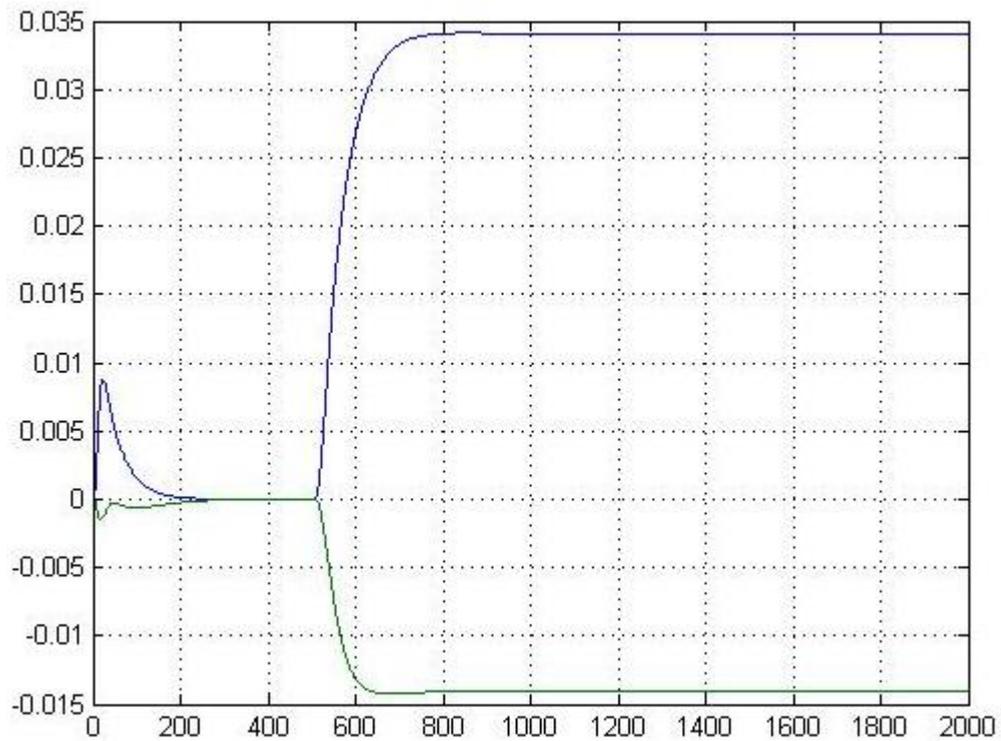


Abbildung E.43.: Sim. Störung Integralregler5 Störgrößenbeobachter10 Führungssprung
(Abb. E.41, E.42 und E.43):

Führungssprungbeginn: 500 sek

Führungssprungende: 714 sek

Maximale Differenz: $0,8 \cdot 10^{-3}$ cm

Störung nach Sprung: 0,034 und -0,014

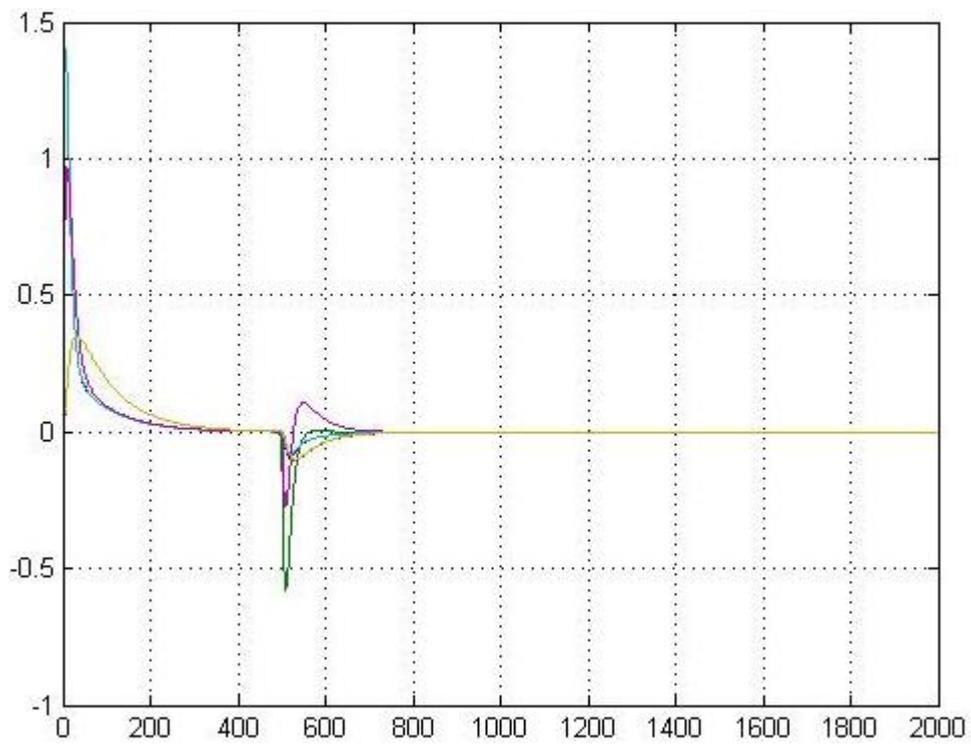


Abbildung E.44.: Sim. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

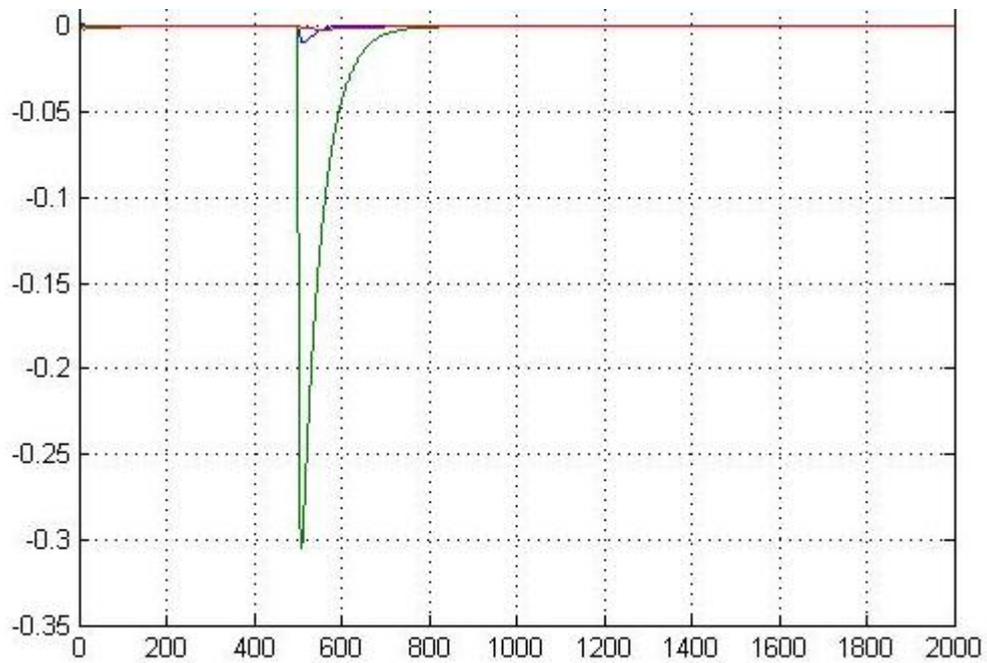


Abbildung E.45.: Sim. Dif. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

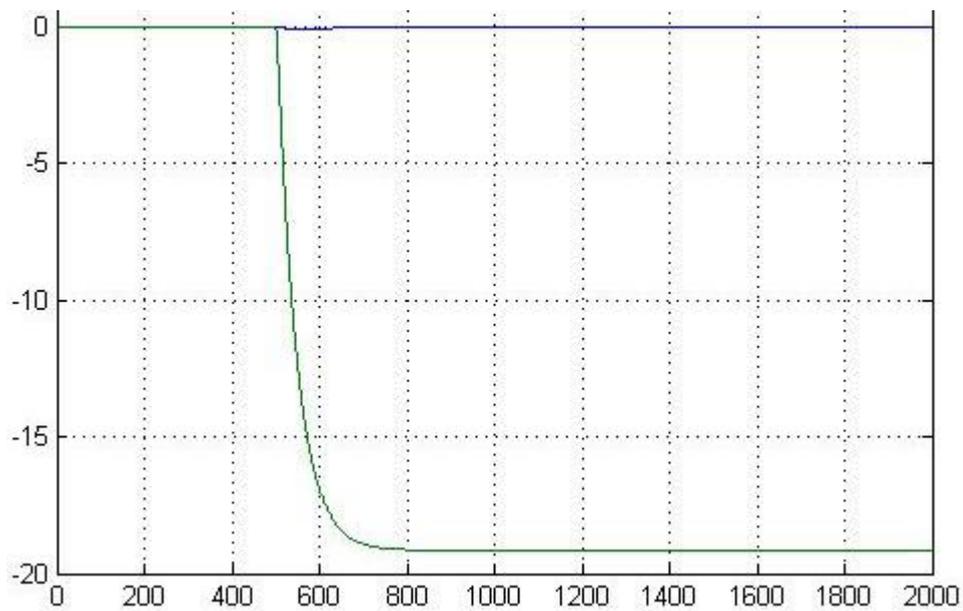


Abbildung E.46.: Sim. Störung Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung
(Abb. E.44, E.45 und E.46):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 700 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 750 sek

Maximale Differenz: 0,31 cm

Störung nach Sprung: 0 und -19,1

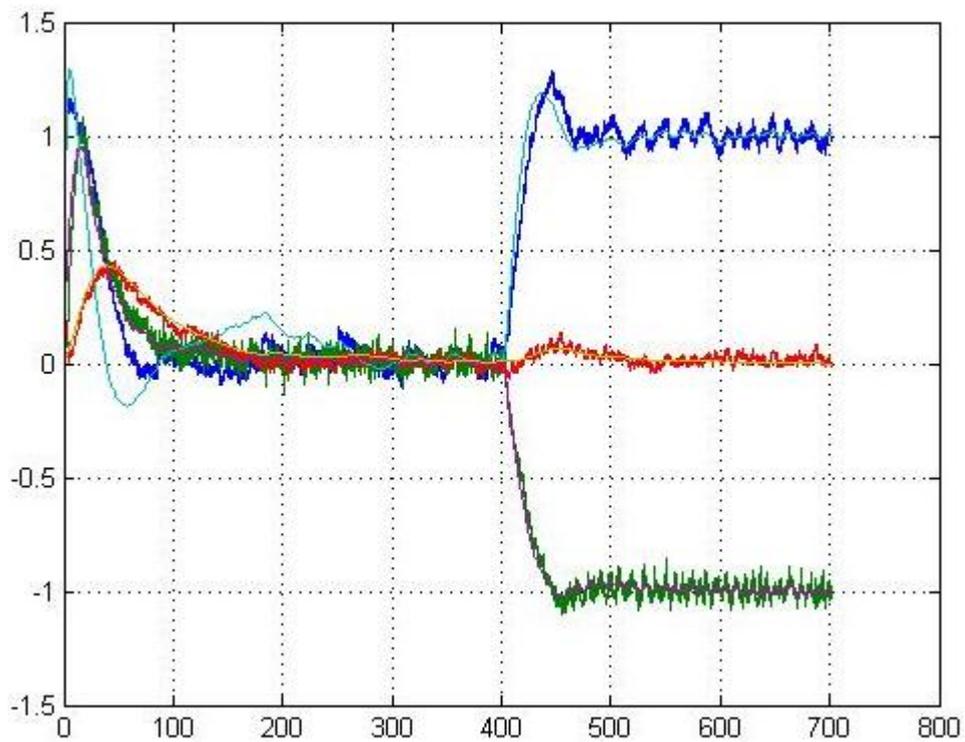


Abbildung E.47.: Real Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

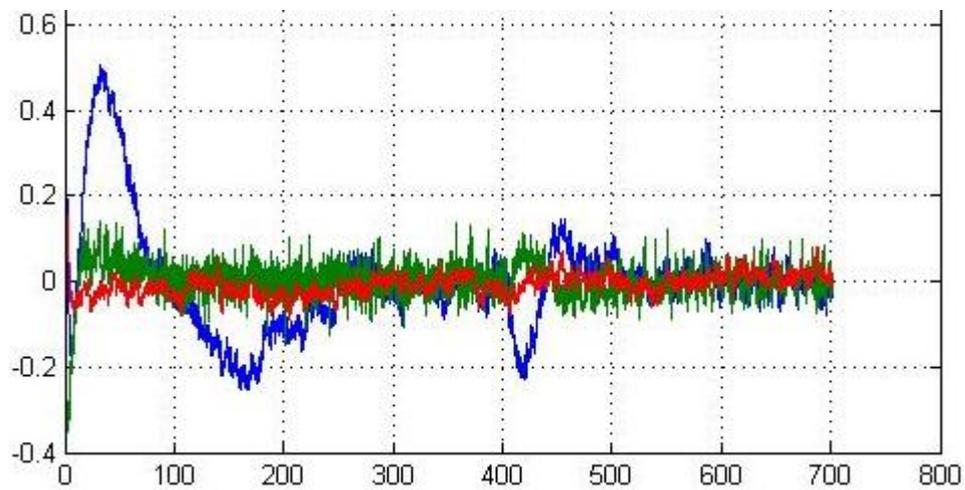


Abbildung E.48.: Real Dif. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Führungssprung

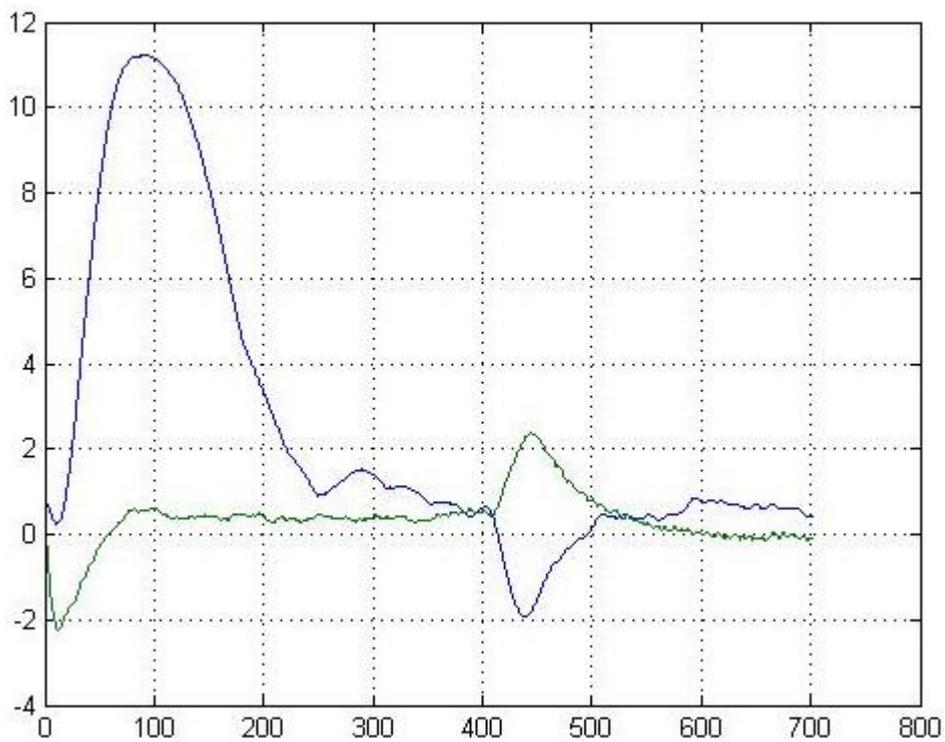


Abbildung E.49.: Real St. Integralregler⁵ mit Störgrößenbeobachter¹⁰ Führungssprung
(Abb. E.47, E.48 und E.49):

Führungssprungbeginn: 400 sek

Führungssprungende: 480 sek

Maximale Differenz: 0,21 cm

Störung nach Sprung: 0,6 und 0

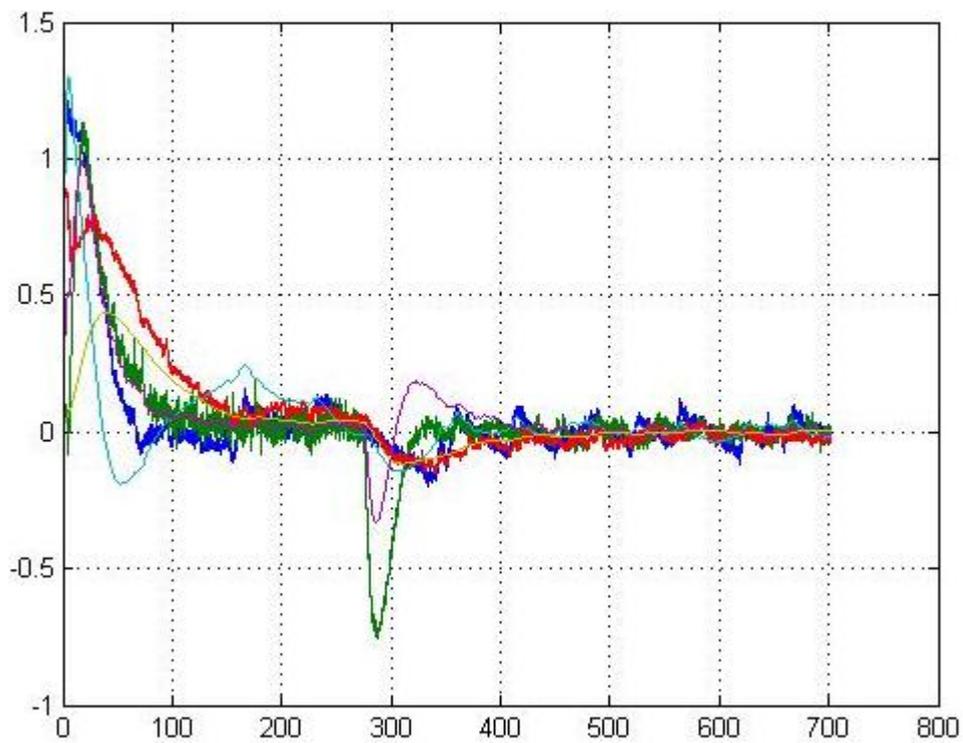


Abbildung E.50.: Real Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

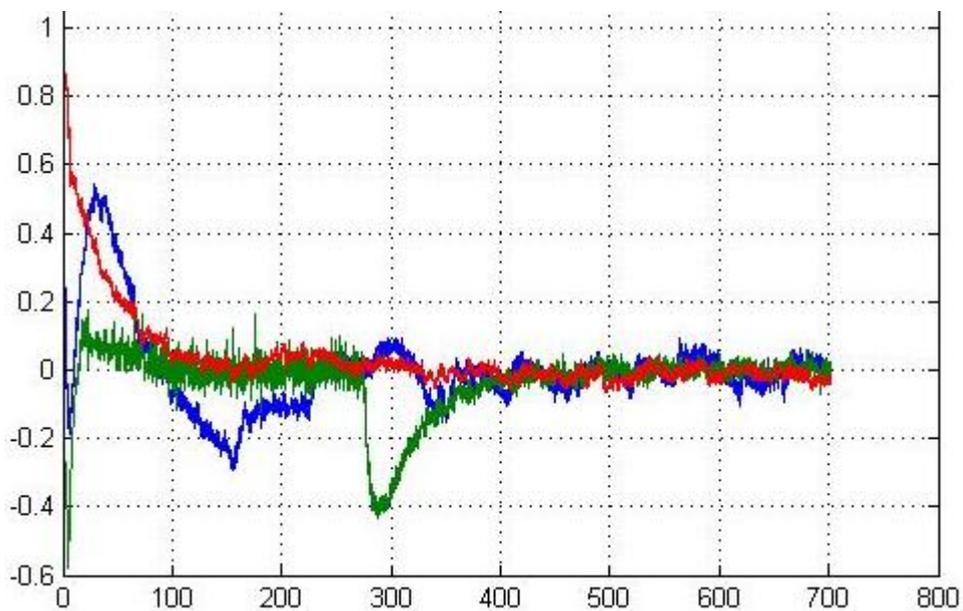


Abbildung E.51.: Real Dif. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

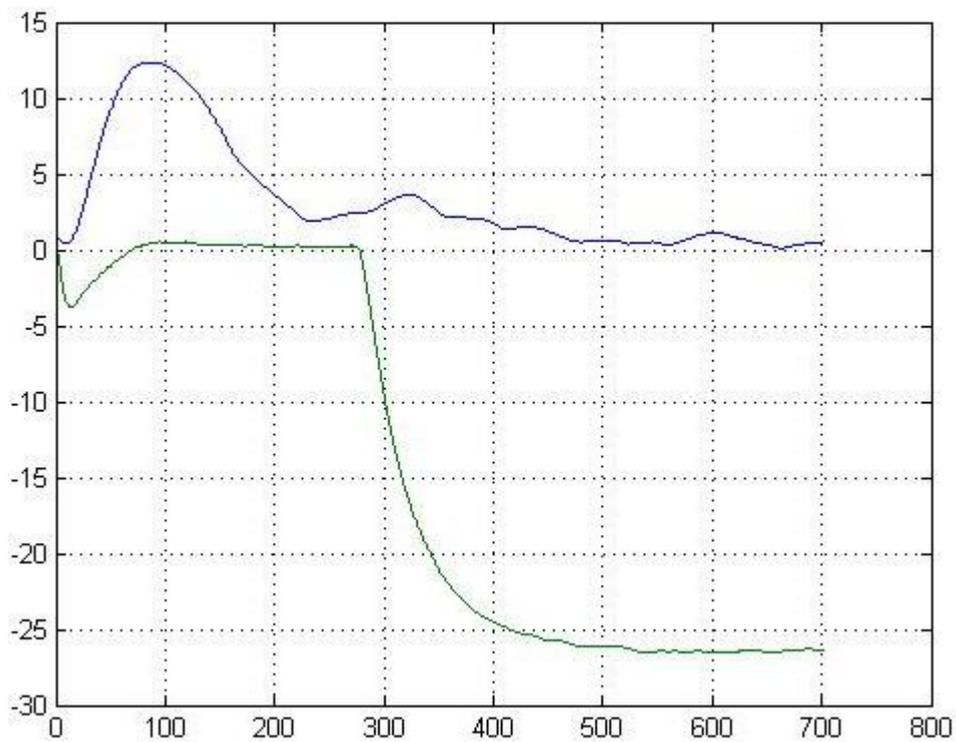


Abbildung E.52.: Real St. Integralregler5 mit Störgrößenbeobachter10 Störsprung

(Abb. E.50, E.51 und E.52):

Störungssprungbeginn: 280 sek

Störungssprungende: 400 sek

Differenzsprungbeginn: 280 sek

Differenzsprungende: 400 sek

Maximale Differenz: 0,4 cm

Störung nach Sprung: 0 und -26,4

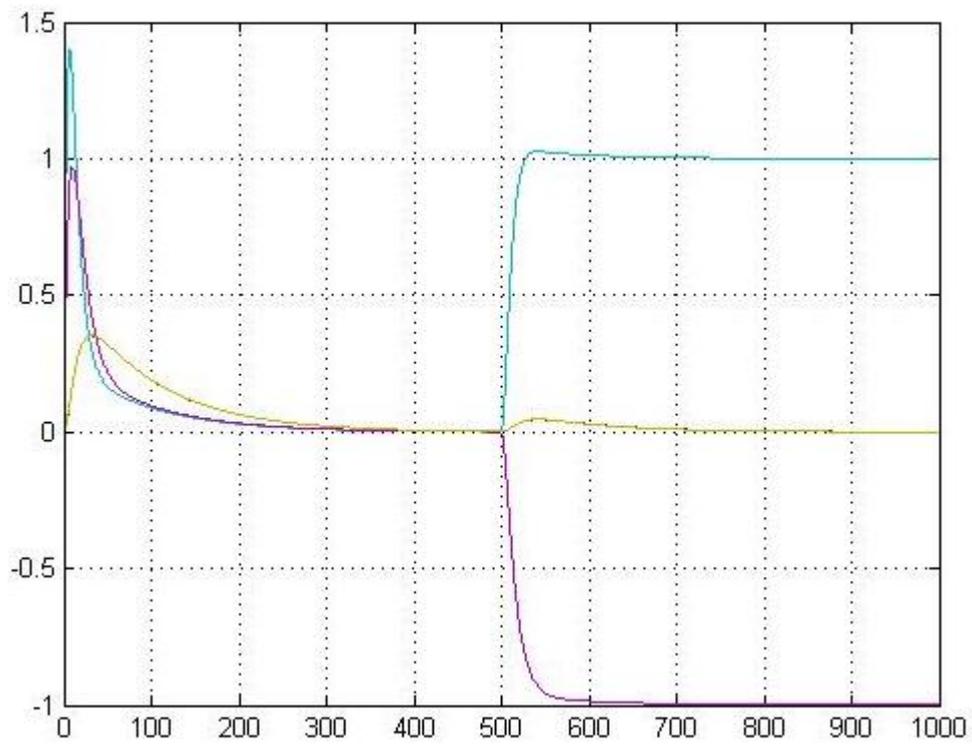


Abbildung E.53.: Sim. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

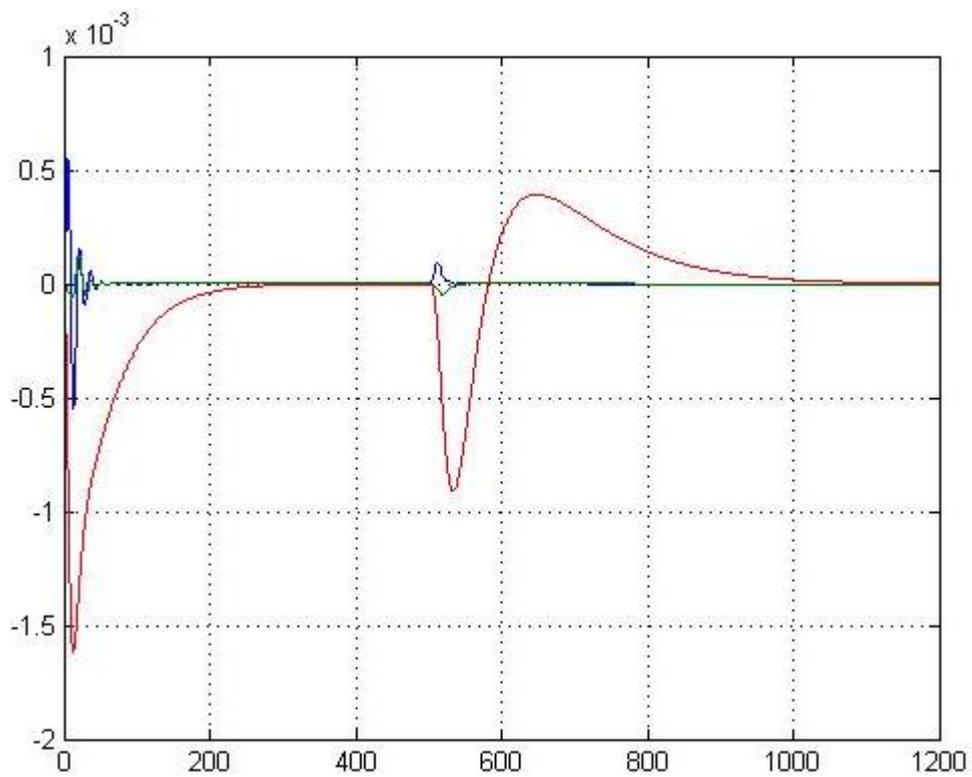


Abbildung E.54.: Sim. Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

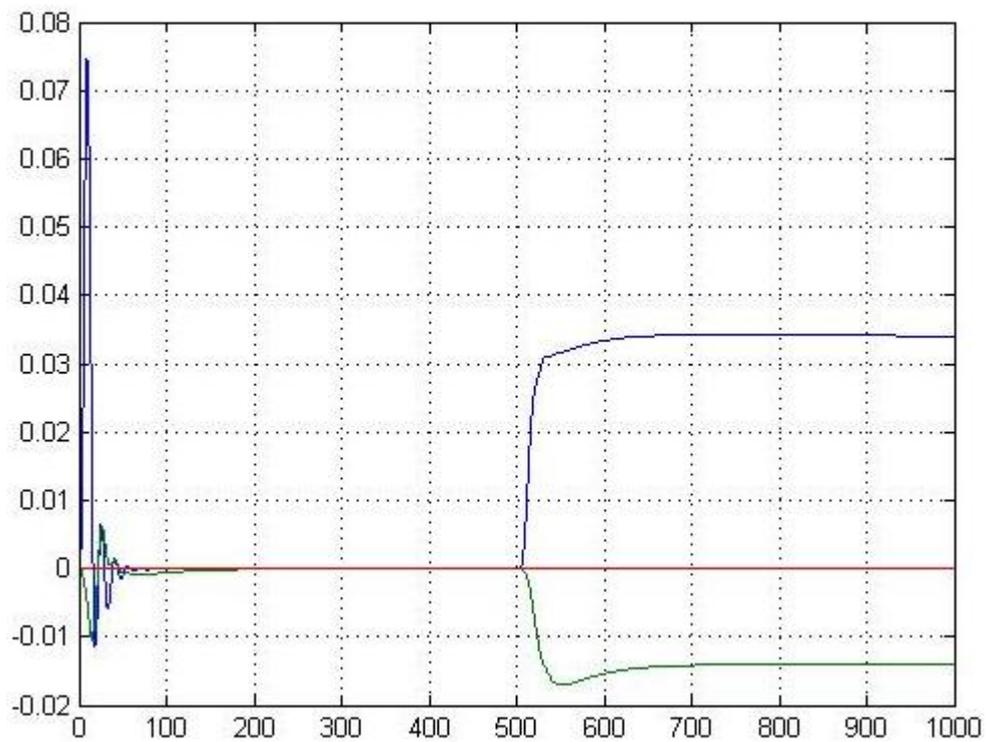


Abbildung E.55.: Sim. St. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

(Abb. E.53, E.54 und E.55):

Führungssprungbeginn: 500 sek

Führungssprungende: 715 sek

Maximale Differenz: $0,8 \cdot 10^{-3}$ cm

Störung nach Sprung: 0,034 und -0,014

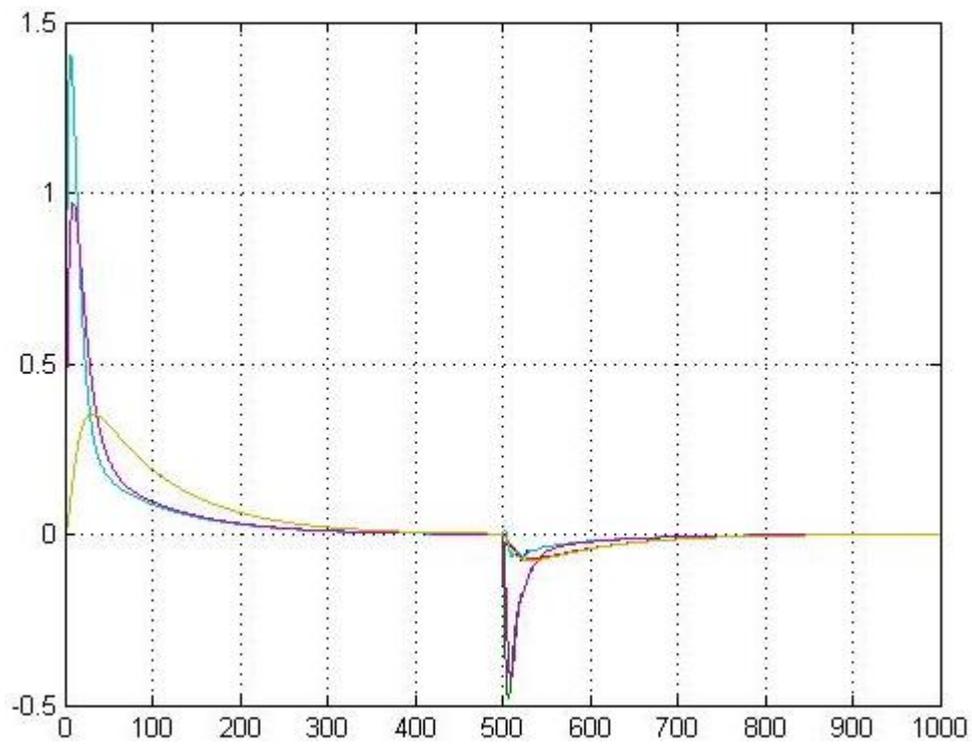


Abbildung E.56.: Sim. Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung

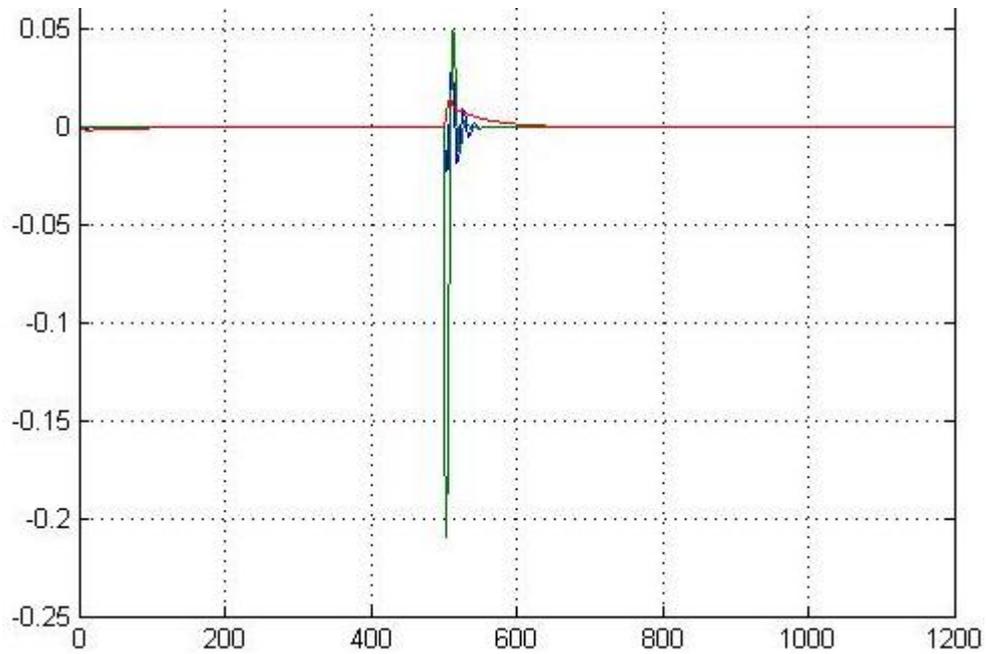


Abbildung E.57.: Sim. Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung

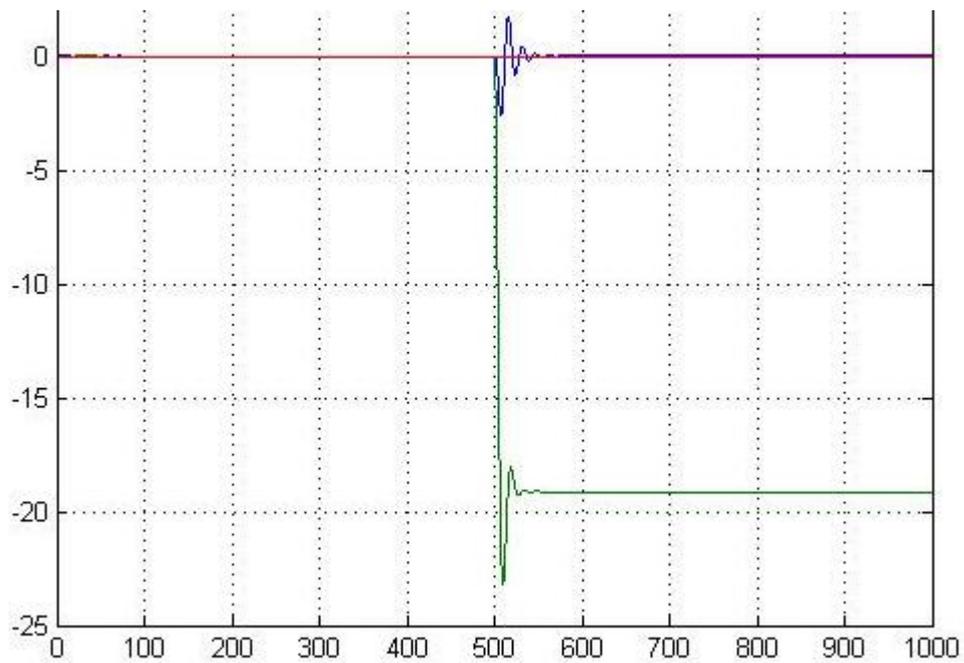


Abbildung E.58.: Sim. Störung Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung

(Abb. E.56, E.57 und E.58):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 700 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 600 sek

Maximale Differenz: 0,21 cm

Störung nach Sprung: 0 und -19

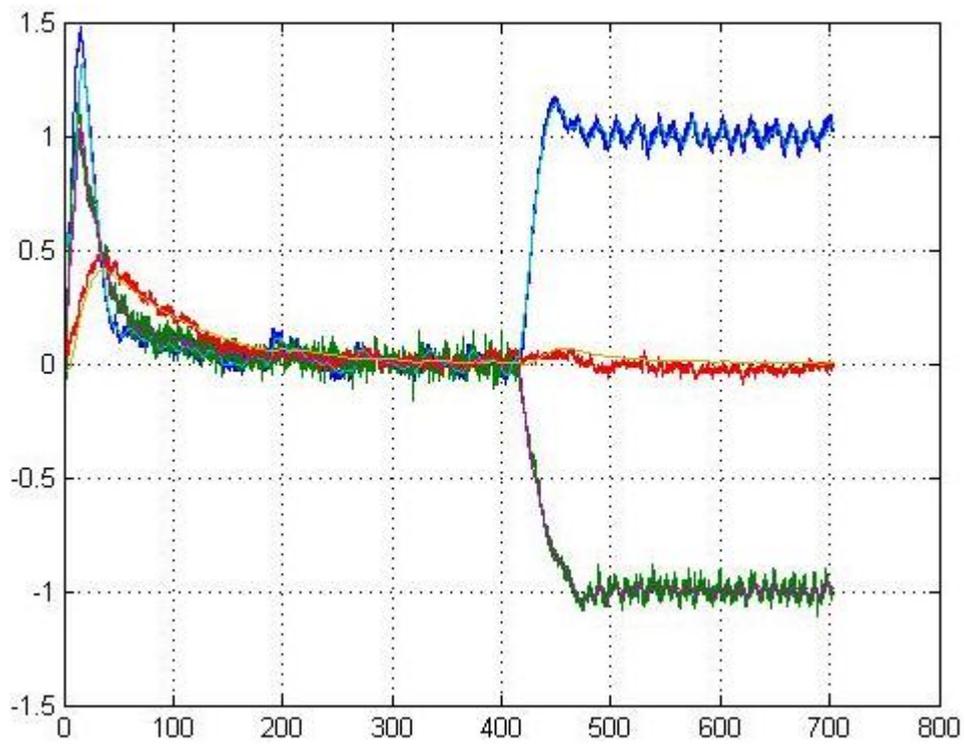


Abbildung E.59.: Real Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

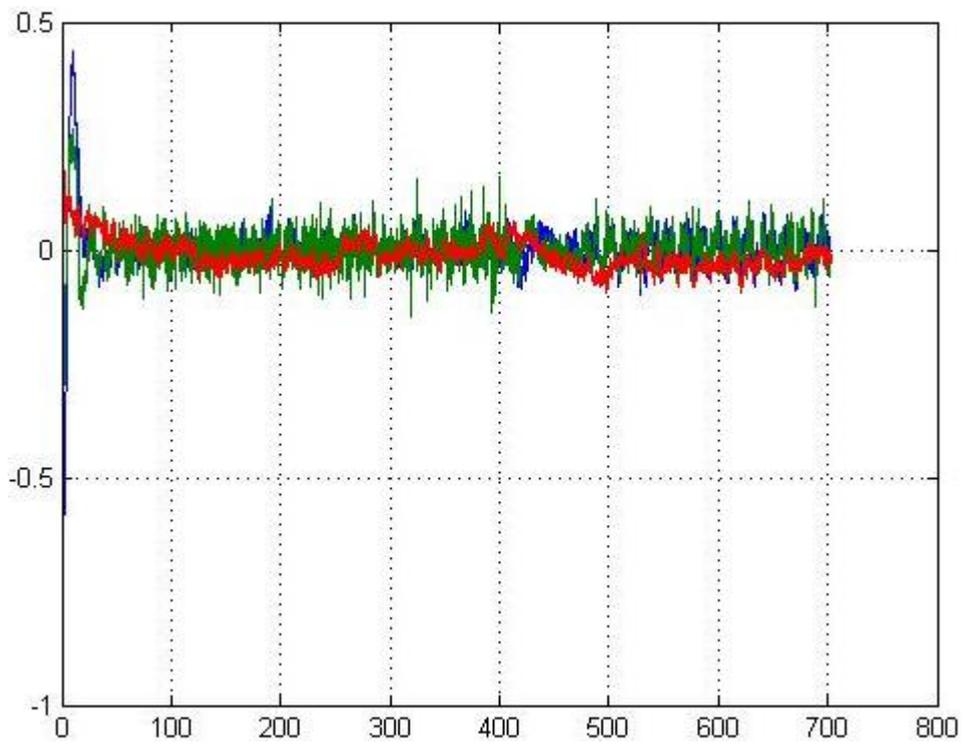


Abbildung E.60.: Real Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

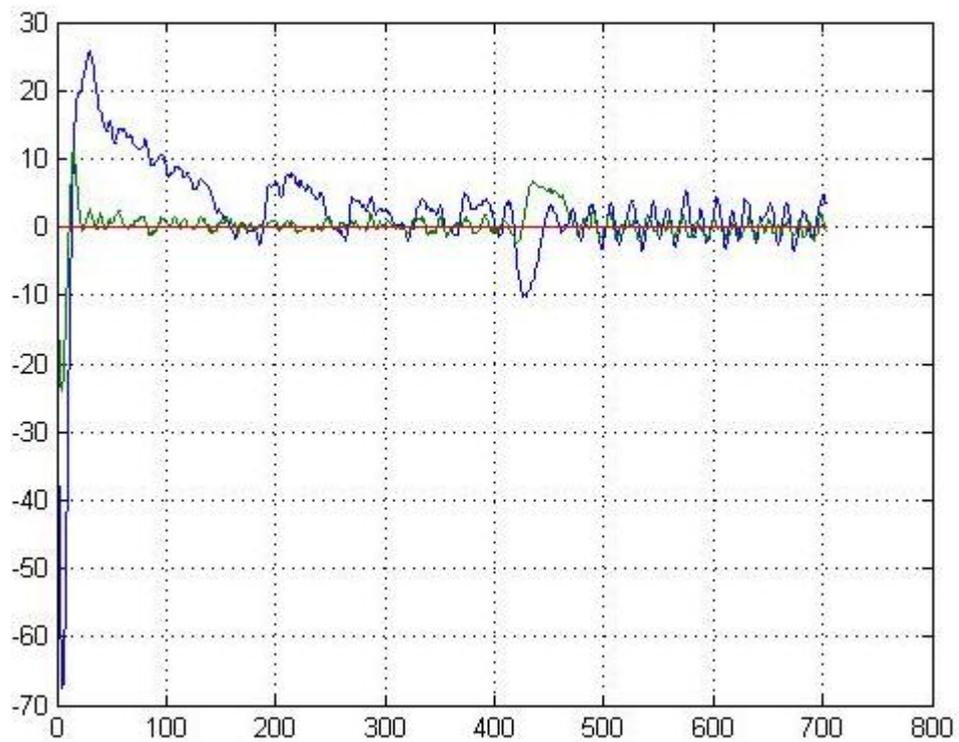


Abbildung E.61.: Real Störung Integralregler5 mit Prototyp10 Führungssprung

(Abb. E.59, E.60 und E.61):

Führungssprungbeginn: 420 sek

Führungssprungende: 520 sek

Maximale Differenz: 0,05 cm

Störung nach Sprung: gemittelt 0 und 0

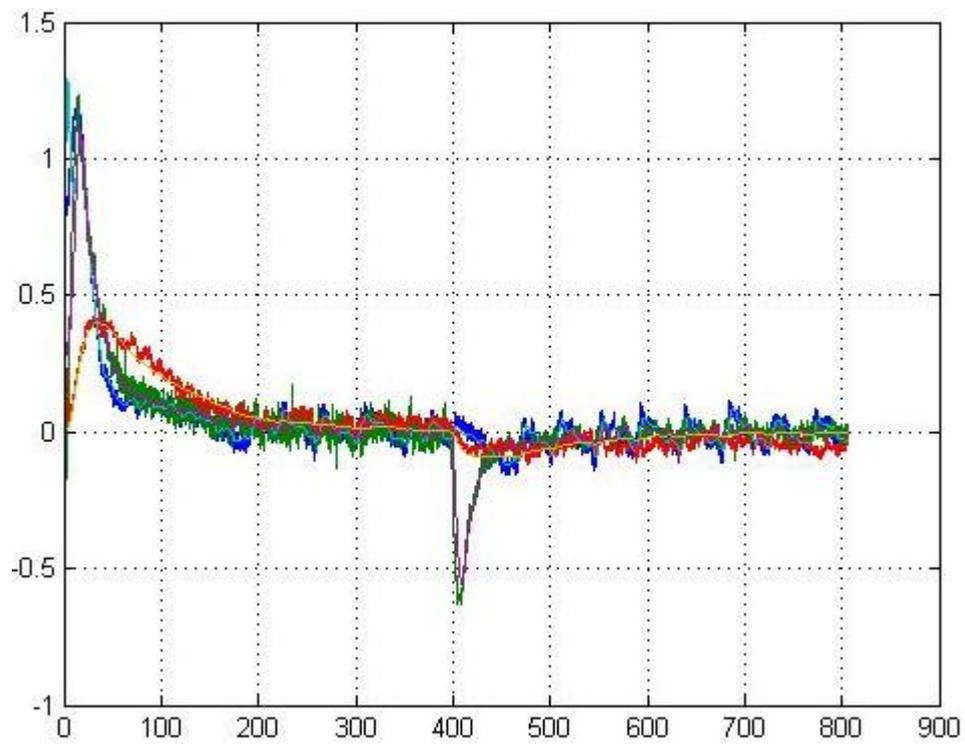


Abbildung E.62.: Real Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung

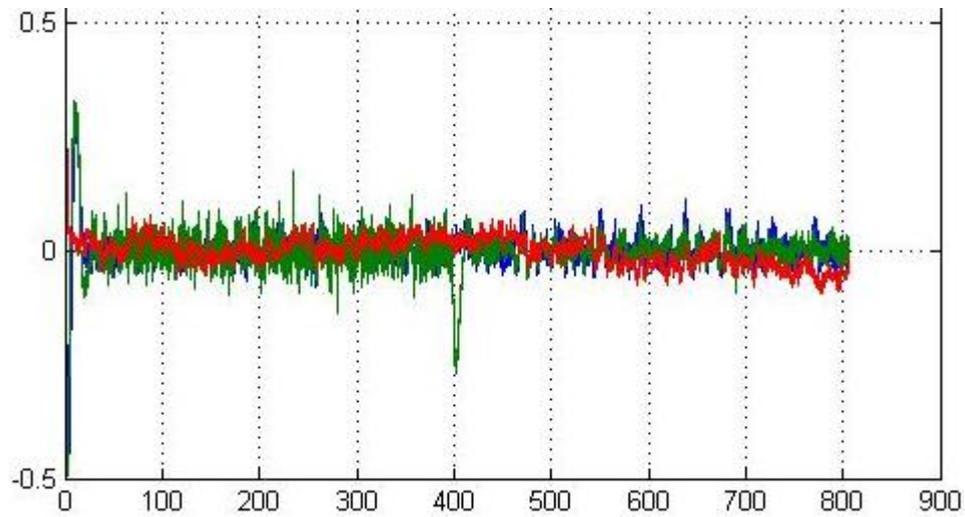


Abbildung E.63.: Real Dif. Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung

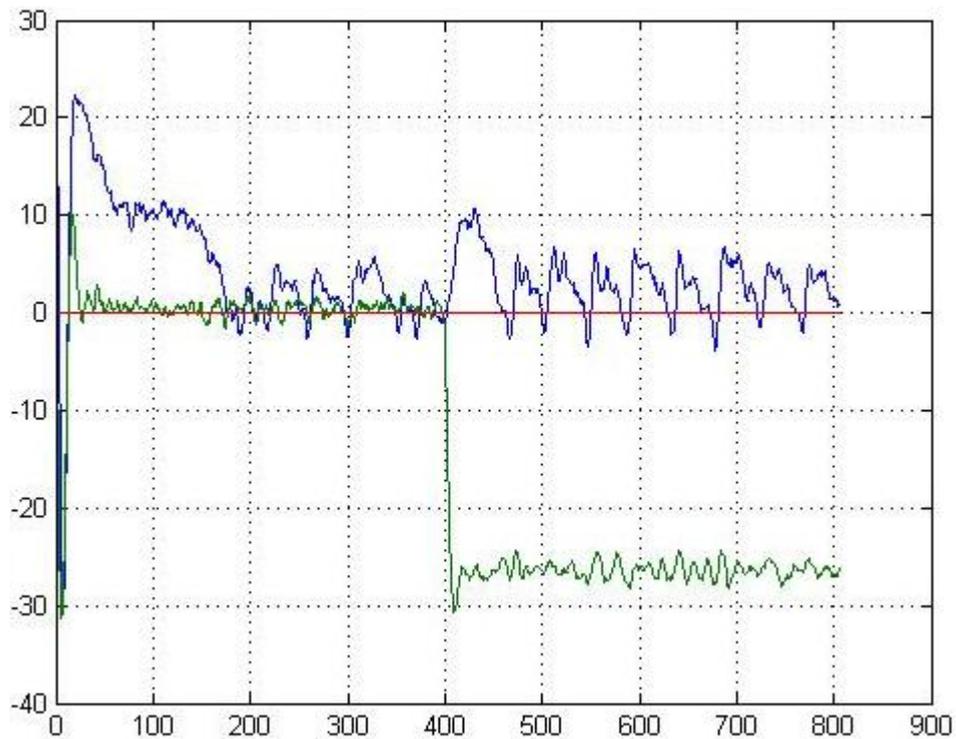


Abbildung E.64.: Real Störung Integralregler5 mit Prototyp10 Störsprung

(Abb. E.62, E.63 und E.64):

Störungssprungbeginn: 400 sek

Störungssprungende: 600 sek

Differenzsprungbeginn: 400 sek

Differenzsprungbeginn: 410 sek

Maximale Differenz: 0,25 cm

Störung nach Sprung: gemittelt 1 und -26,5

E.2. Messungen Integralregler55Z3

Die Störgröße wurde geändert. Das Ablassventil des mittleren/dritten Tanks dient nun als Störgröße. Die folgenden Graphen sind mit ein Integralregler und den Beobachtersystemen, die die Polstellen des Systems auf den fünffachen Wert bringen, durchgeführt worden:

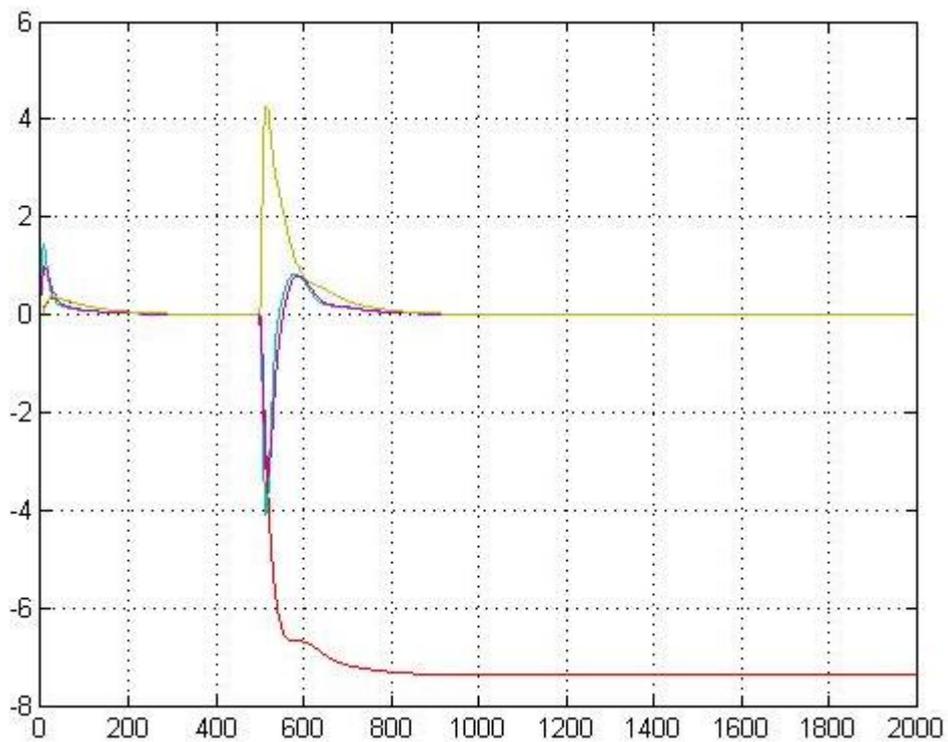


Abbildung E.65.: Sim. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

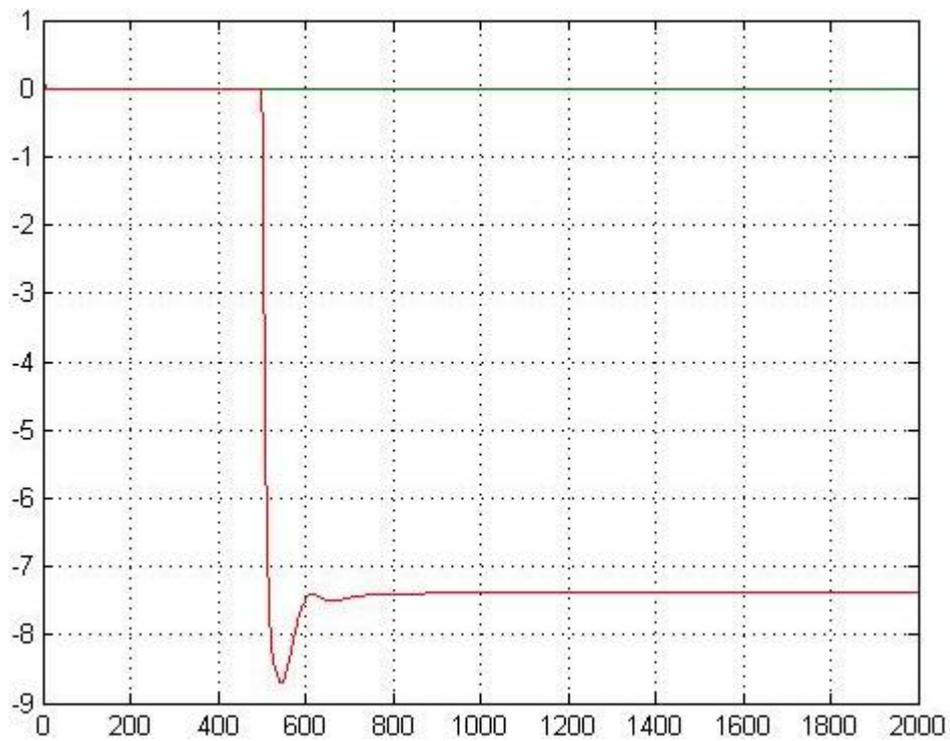


Abbildung E.66.: Sim. Dif. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

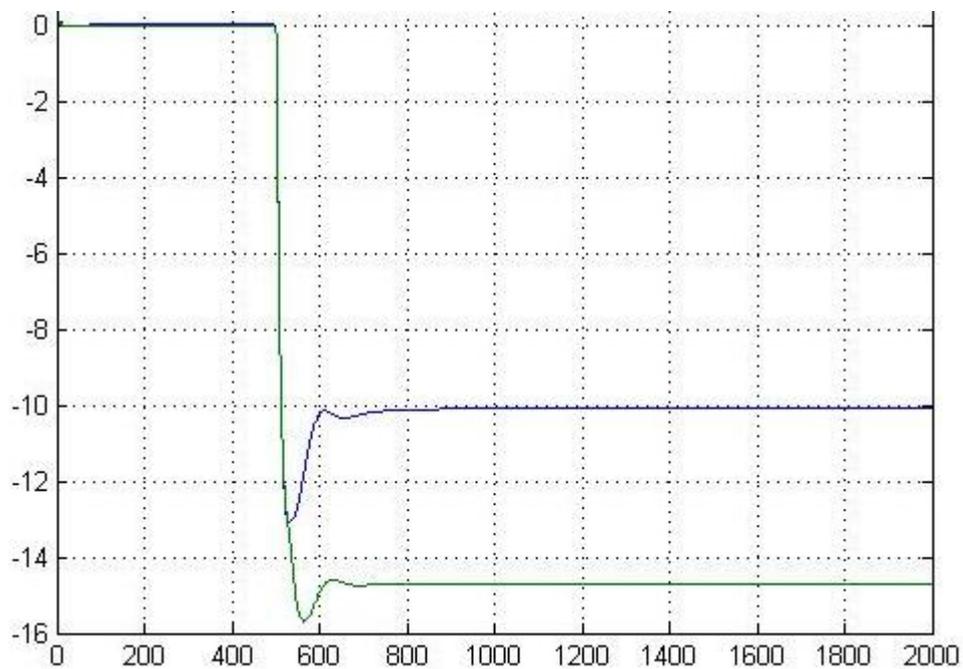


Abbildung E.67.: Sim. Störung Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

(Abb. E.65, E.66 und E.67):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 790 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 750 sek

Maximale Differenz: 8,8 cm

Störung nach Sprung: -10,1 und -14,6

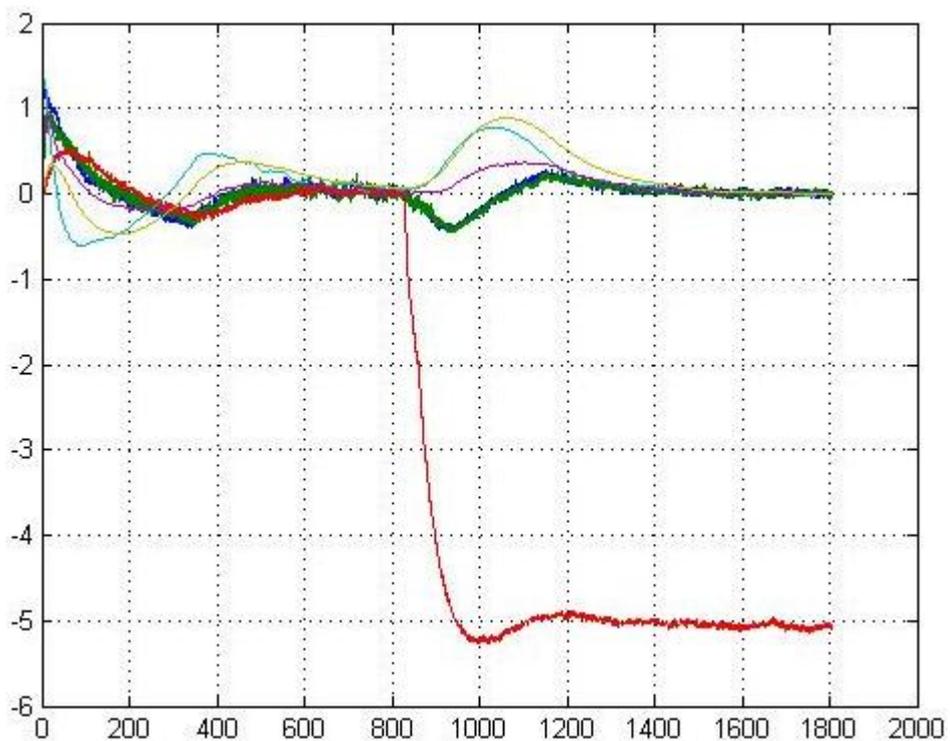


Abbildung E.68.: Real Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

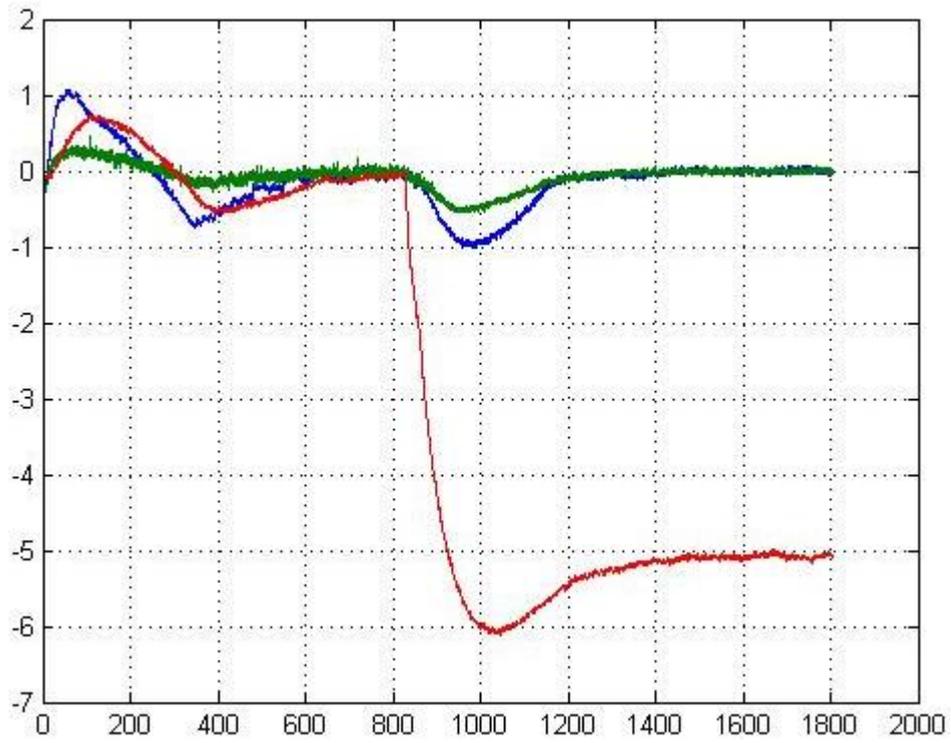


Abbildung E.69.: Real Dif. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

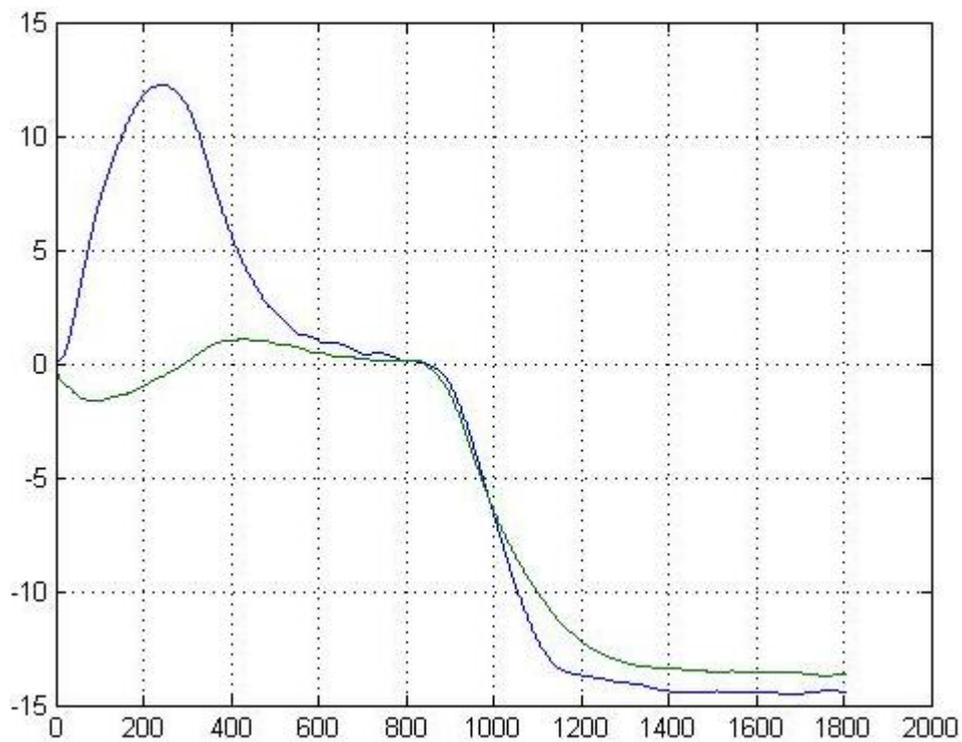


Abbildung E.70.: Real Störung Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

(Abb. E.68, E.69 und E.70):

Störungssprungbeginn: 828 sek

Störungssprungende: 1400 sek

Differenzsprungbeginn: 828 sek

Differenzsprungende: 1400 sek

Maximale Differenz: 6 cm

Störung nach Sprung: -13,65 und -14,62

E.3. Messungen Integralregler55Z3 drei Sensoren

Das Modell wurde um einen Sensor erweitert und das Beobachtersystem kann nun alle Zustandsgrößen mit denen vom realen Modell vergleichen. Die folgenden Graphen sind mit ein Integralregler und den Beobachtersystemen, die die Polstellen des Systems auf den fünffachen Wert bringen, durchgeführt worden:

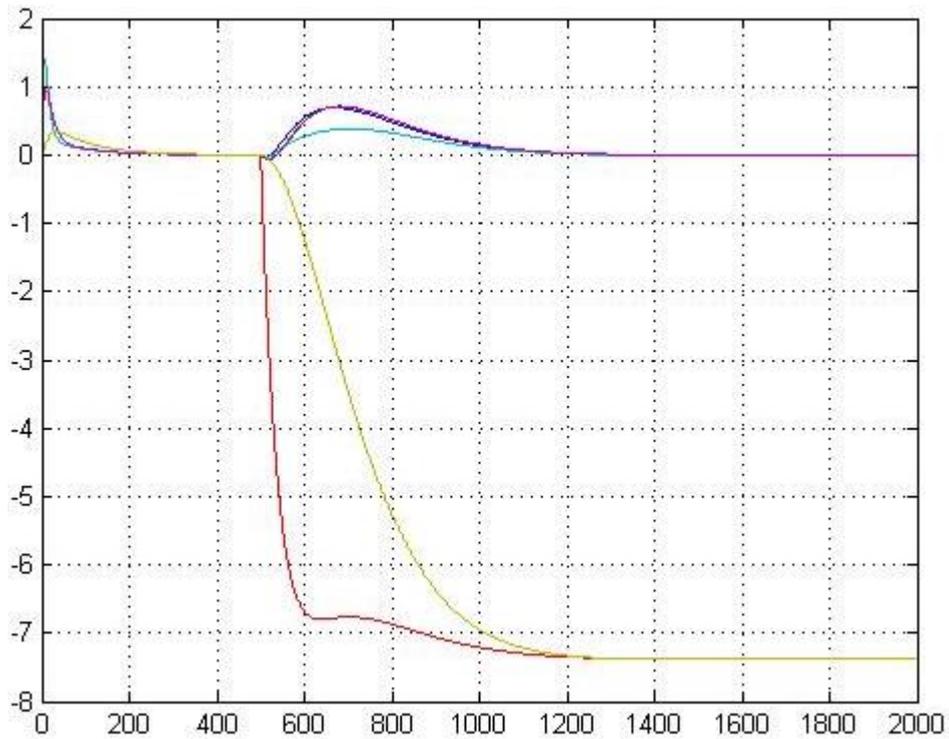


Abbildung E.71.: Sim. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren

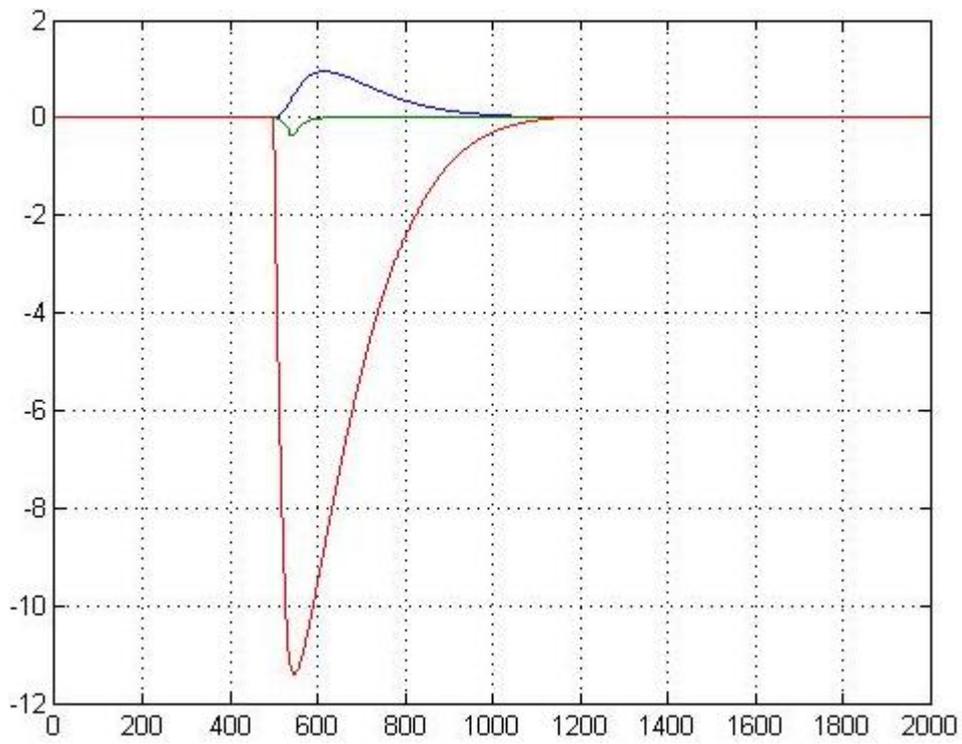


Abbildung E.72.: Sim. Dif. ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren

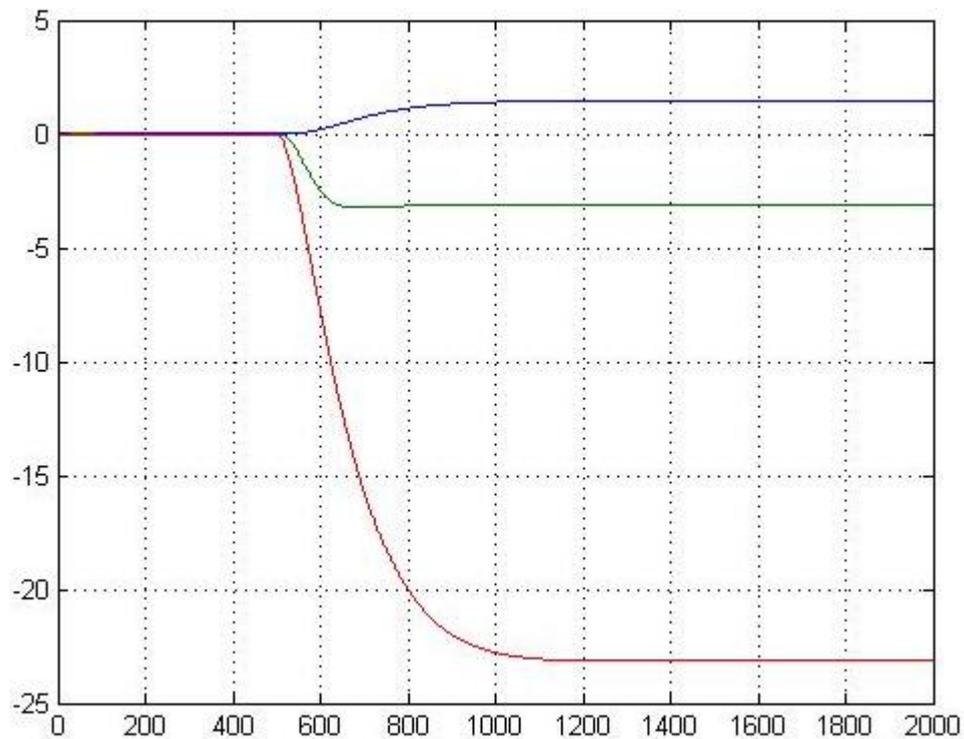


Abbildung E.73.: Sim. Störung ZR mit SGB5 Störsprung Tank3 3Sensoren

(Abb. E.71, E.72 und E.73):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 1150 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 1100 sek

Maximale Differenz: 11,3 cm

Störung nach Sprung: 1,5 , -2,96 und -22,96

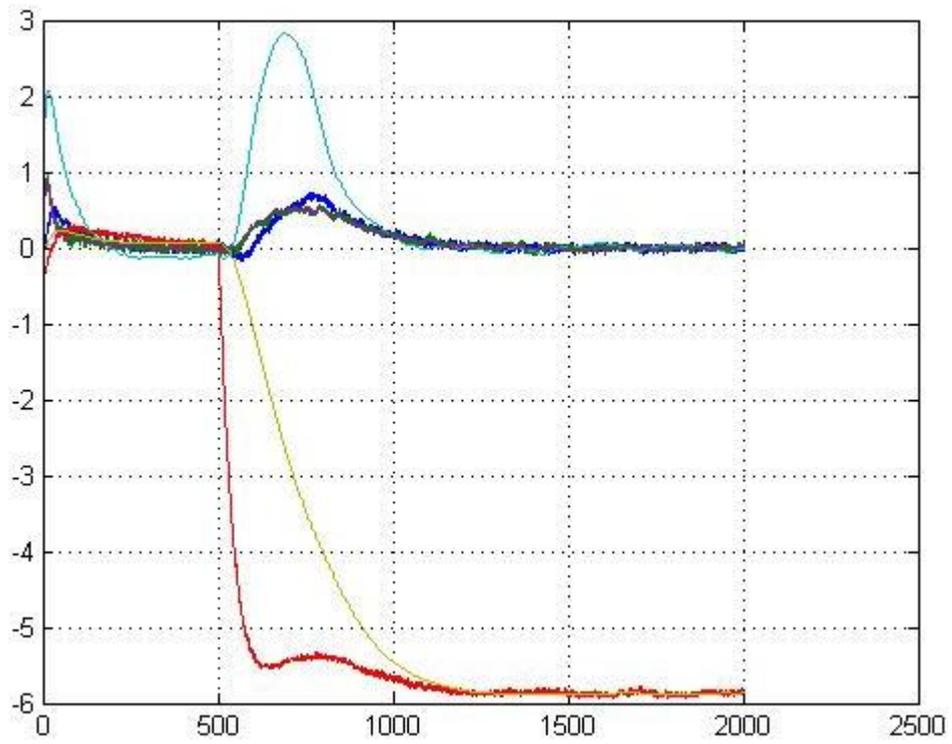


Abbildung E.74.: Real Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

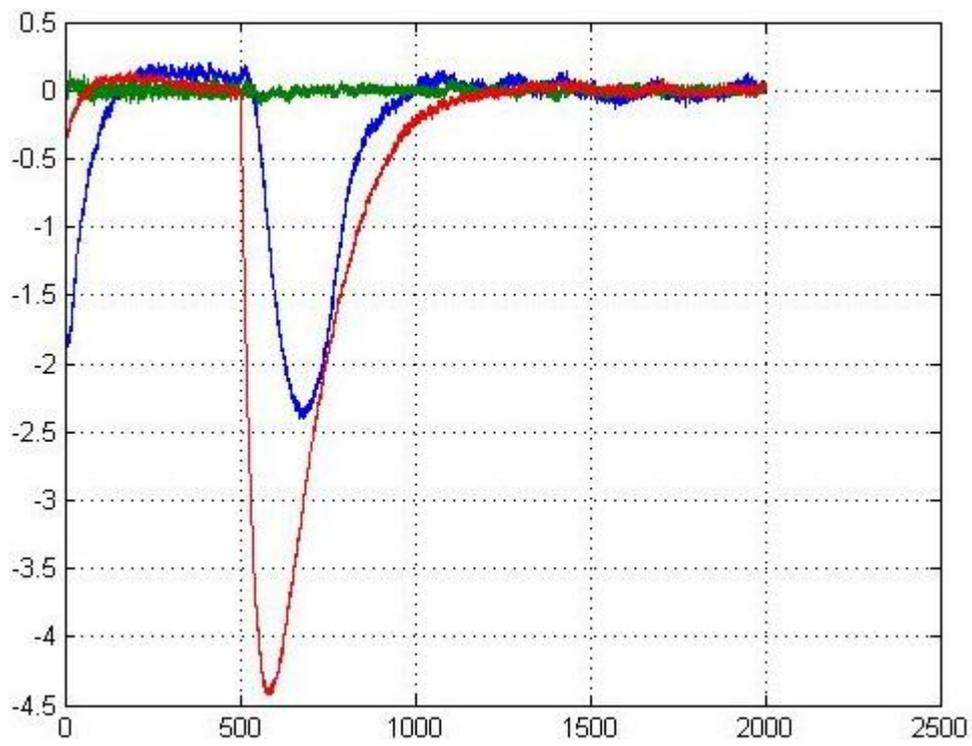


Abbildung E.75.: Real Dif. Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

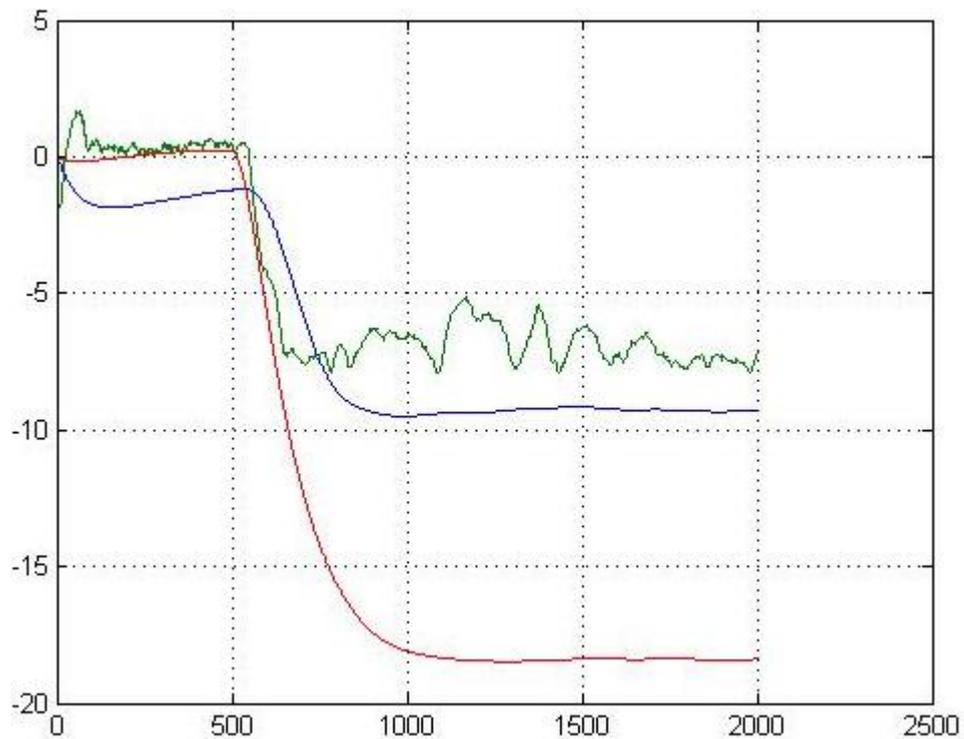


Abbildung E.76.: Real Störung Integralregler mit SGB5 Störsprung Tank3

(Abb. E.74, E.75 und E.76):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 1250 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 1250 sek

Maximale Differenz: 4,4 cm

Störung nach Sprung: -7,8 , -9,4 und -18,4

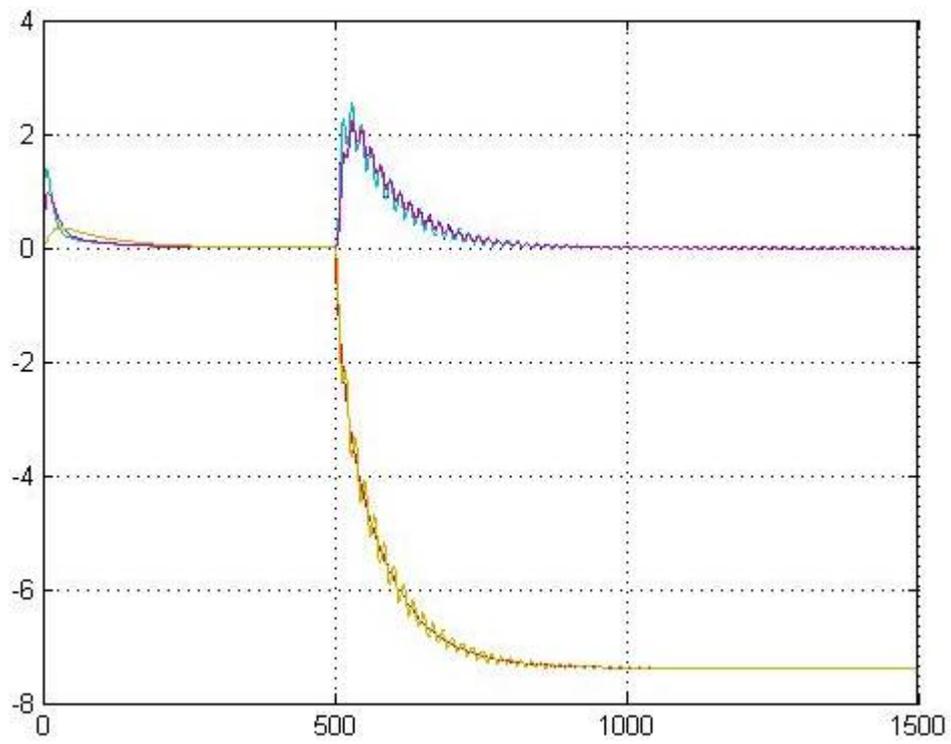


Abbildung E.77.: Sim. IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

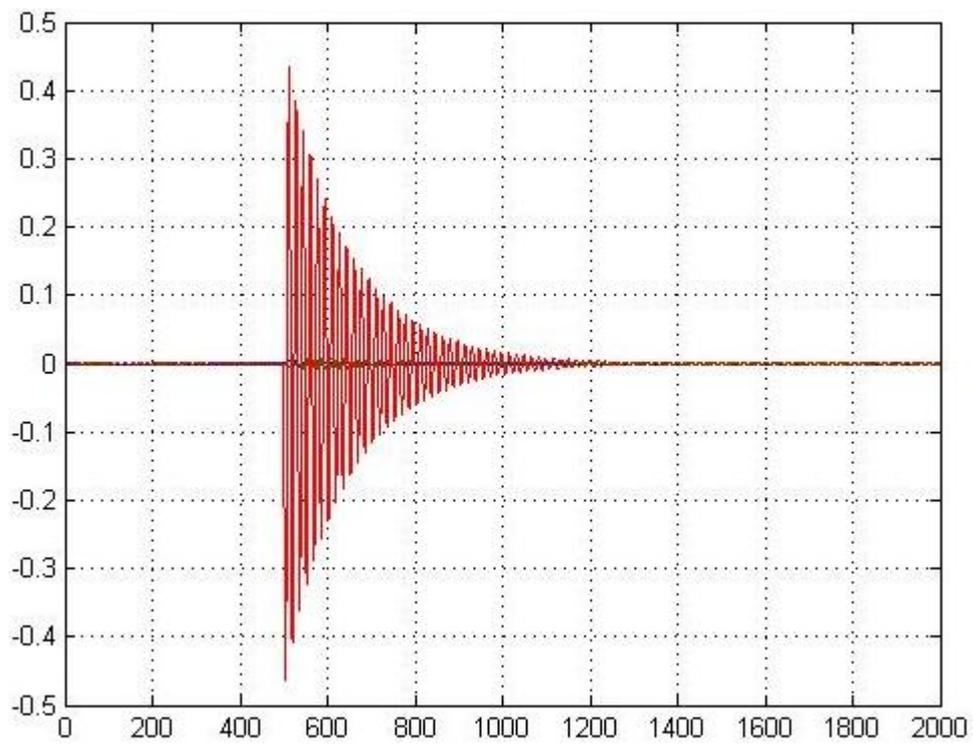


Abbildung E.78.: Sim. Dif. IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

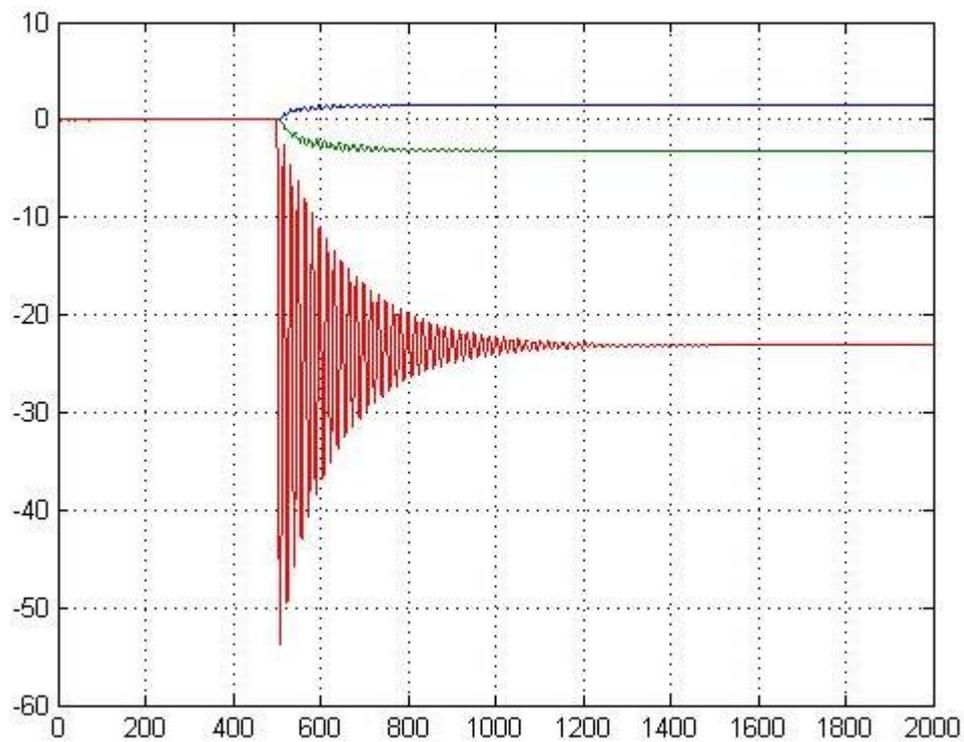


Abbildung E.79.: Sim. Störung IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

(Abb. E.77, E.78 und E.79):

Störungssprungbeginn: 500 sek

Störungssprungende: 857 sek

Differenzsprungbeginn: 500 sek

Differenzsprungende: 1200 sek

Maximale Differenz: 0,45 cm

Störung nach Sprung: 1,36 , -3,18 und -23,18

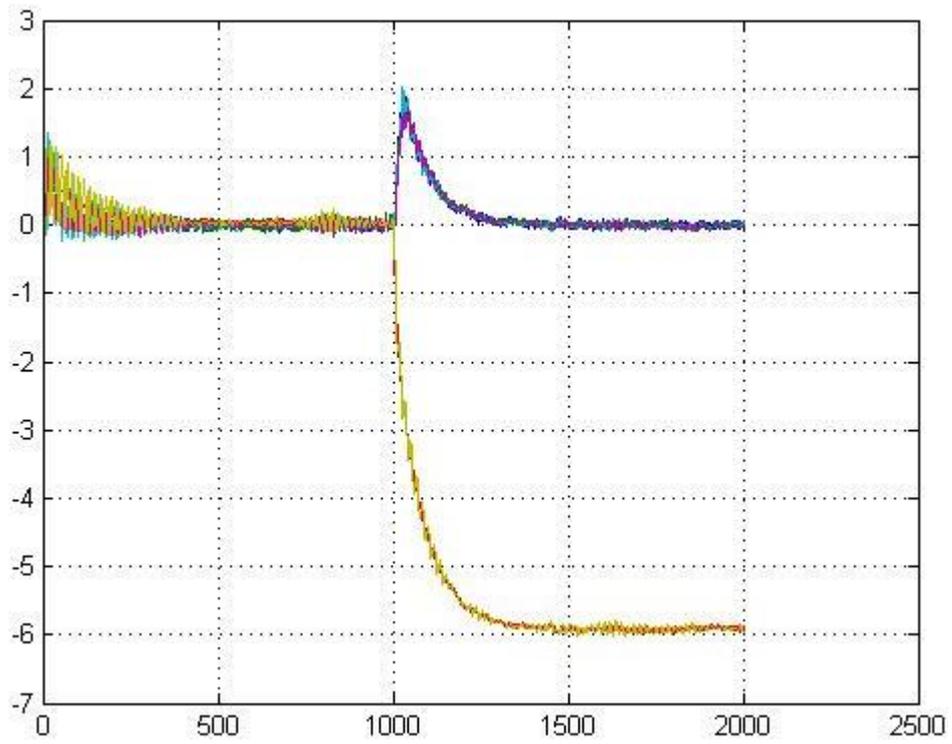


Abbildung E.80.: Real IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

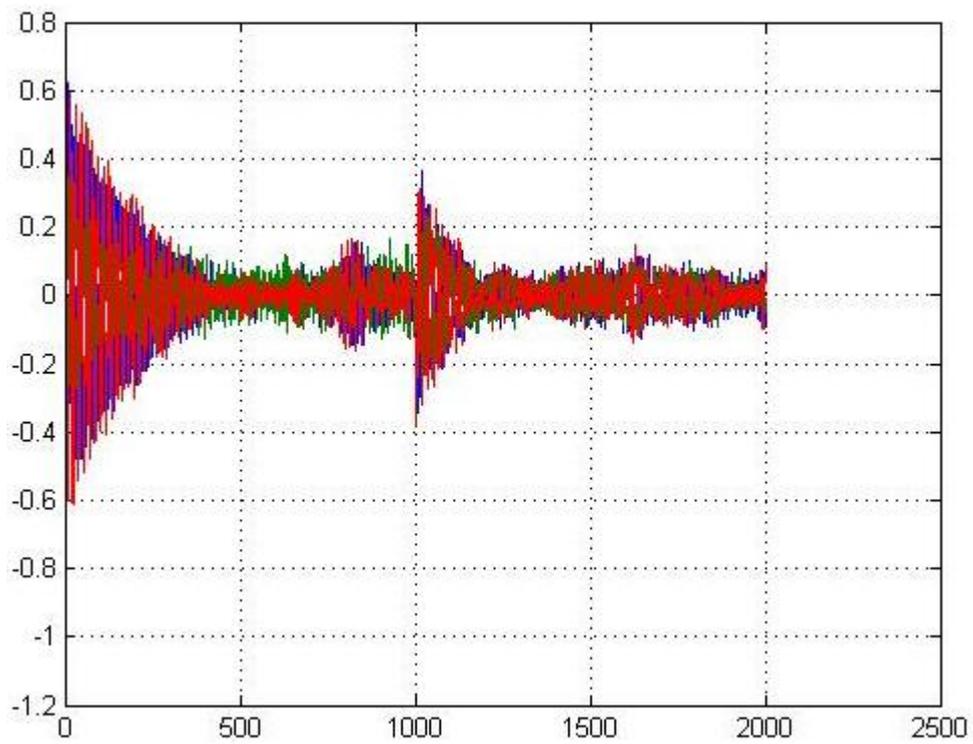


Abbildung E.81.: Real Dif. IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

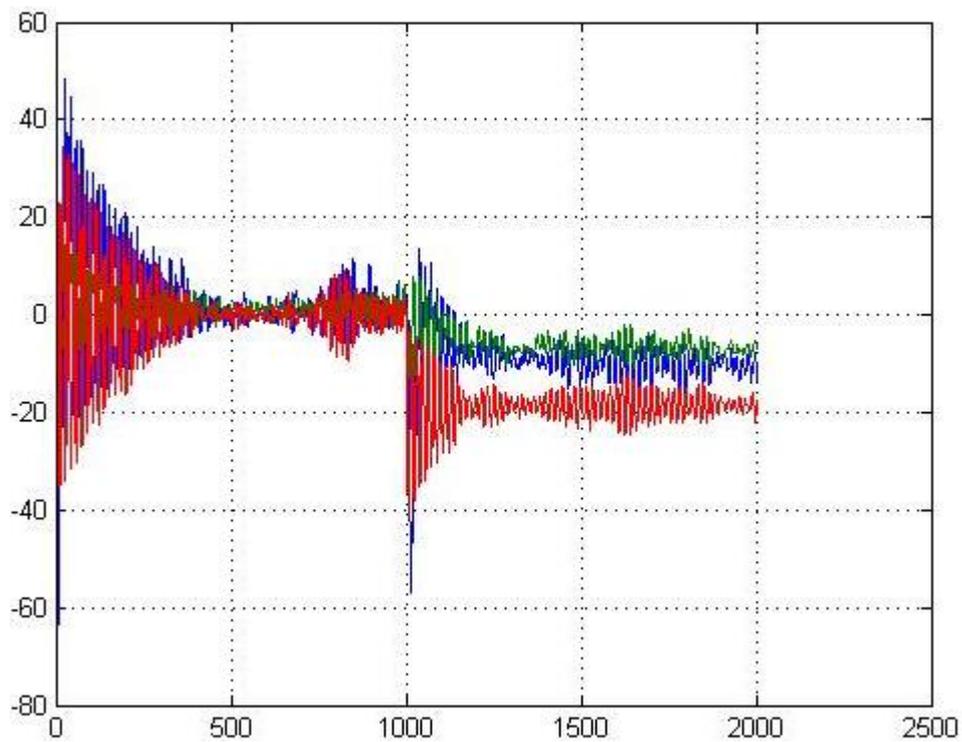


Abbildung E.82.: Real Störung IR mit Pro5 Störsprung Tank3 3Sensoren

(Abb. E.80, E.81 und E.82):

Störungssprungbeginn: 1000 sek

Störungssprungende: 1500 sek

Differenzsprungbeginn: 1000 sek

Differenzsprungende: 1187 sek

Maximale Differenz: 0,38 cm

Störung nach Sprung: -7, -11 und -19

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 24. Januar 2013

Ort, Datum

Unterschrift