



Zur Erlangung des Grades

eines

Master of Engineering (M. Eng.)

von Herrn Christian Baldus

geboren am: 29.01.1998

in: München

vorgelegte Abschlussarbeit: Masterarbeit

Thema: Untersuchungen zum Einsatz von Smith-Prädiktoren in der Prozessautomation

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Ortwein (INW)

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Wolfgang Trümper (Dow Olefinverbund GmbH)

Merseburg, 22. August 2022

**Aufgabenstellung für die Masterarbeit (M. Eng.)
von Herrn Christian Baldus (Matrikel-Nr. 25607)**

Thema: **Untersuchungen zum Einsatz von Smith-Prädiktoren in der Prozessautomation**

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Ortwein (INW)
 Dr.-Ing. Wolfgang Trümper (Dow Olefinverbund GmbH)

Aufgabenstellung

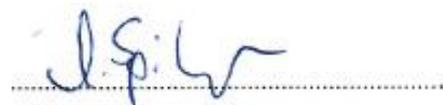
In der industriellen Prozessautomation ist die Totzeitkompensation mittels Smith-Prädiktoren eine wichtige Möglichkeit zur Verbesserung der Regelbarkeit von Prozessen. Dabei ist die Implementierung oftmals noch nicht sehr praxistauglich, auch in Hinsicht der Nachrüstung existierender Regelungen. Damit ist die tatsächliche Anwendbarkeit nicht so umfangreich, wie sie sein könnte.

Ziel der Arbeit ist es, einen stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktor zu entwickeln und unter verschiedenen Randbedingungen zu untersuchen, so dass hier eine verbesserte Praxistauglichkeit zu erreichen ist.

Schwerpunkte

1. Theorie zum Einsatz von Smith-Prädiktoren
2. Entwurf einer stufenlos einblendbaren Implementierung eines Smith-Prädiktors
3. Untersuchungen zur Performance des Smith-Prädiktors unter verschiedenen Randbedingungen
4. Untersuchungen zur Robustheit des Smith-Prädiktors gegenüber Modellabweichungen
5. Bewertung der Praxistauglichkeit des implementierten Smith-Prädiktors

abzugebende Exemplare: 2 + PDF-Datei



Prof. Dr. Andreas Spillner
Vorsitzender des Prüfungsausschusses



Prof. Dr.-Ing. Andreas Ortwein
Themenstellender Hochschullehrer

I. Selbstständigkeitserklärung

Erklärung:

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Merseburg, den 22.08.2022

Unterschrift

II. Inhaltsverzeichnis

I. Selbstständigkeitserklärung.....	- 3 -
II. Inhaltsverzeichnis	- 4 -
III. Abbildungsverzeichnis	- 6 -
IV. Tabellenverzeichnis	- 8 -
V. Symbolverzeichnis.....	- 8 -
1. Einleitung.....	- 10 -
1.1 Motivation.....	- 10 -
1.2 Struktur der Arbeit	- 10 -
2. Grundlagen	- 12 -
2.1 Regelkreis	- 12 -
2.2 Regler und Glieder	- 13 -
2.3 Totzeit.....	- 22 -
2.4 Smith-Prädiktor	- 25 -
2.4.1 Entstehung und Funktion	- 25 -
2.4.2 Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung.....	- 26 -
2.4.3 Smith-Prädiktor in IMC-Struktur.....	- 30 -
2.4.4 Filtered-Smith-Predictor	- 34 -
3. Methodik	- 37 -
3.1 MATLAB.....	- 37 -
3.2 Hintergrundinformationen zur Untersuchung des Smith-Prädiktors	- 37 -
3.3 Hintergrundinformationen zur stufenlosen Implementierung.....	- 40 -
3.4 Modell der Regelstrecke.....	- 41 -
3.5 Regelkreis mit Smith-Prädiktor	- 43 -
3.6 Grafische Bedienoberfläche	- 45 -
3.7 Regleranforderungen	- 46 -
4. Ergebnisse und Bewertung	- 49 -
4.1 Modell der Regelstrecke.....	- 49 -
4.2 Entwurf der stufenlos einblendbaren Implementierung des Smith-Prädiktors	- 53 -
4.3 Regelkreis mit und ohne Smith-Prädiktor	- 56 -

4.4	Verschiedene Formen der Verstärkungsänderungen	- 59 -
4.4.1	Sprungförmige Verstärkungsänderung	- 59 -
4.4.2	Kurvenförmige Verstärkungsänderung	- 62 -
4.4.3	Rampenförmige Verstärkungsänderung	- 65 -
4.4.4	Vergleich der Verstärkungsformen	- 69 -
4.5	Verstärkungsänderungen des Smith-Prädiktors	- 75 -
4.5.1	Verstärkungsänderung im einschwingenden Zustand	- 75 -
4.5.2	Verstärkungsänderung im ausgeschwungenen Zustand	- 81 -
4.6	Störanfälligkeit des Smith-Prädiktors	- 85 -
4.6.1	Störung im einschwingenden Zustand ohne Verstärkungsänderung	- 85 -
4.6.2	Störung im einschwingenden Zustand mit Verstärkungsänderung	- 87 -
4.6.3	Störung im ausgeschwungenen Zustand ohne Verstärkungsänderung	- 93 -
4.6.4	Störung im ausgeschwungenen Zustand mit Verstärkungsänderung	- 94 -
4.7	Vollständiges Ausschalten des Smith-Prädiktors	- 99 -
4.7.1	Ausschalten im einschwingenden Zustand	- 99 -
4.7.2	Ausschalten mit Störung im einschwingenden Zustand	- 103 -
4.7.3	Ausschalten im ausgeschwungenen Zustand	- 106 -
4.7.4	Ausschalten mit Störung im ausgeschwungenen Zustand	- 107 -
4.8	Robustheit des Smith-Prädiktors gegenüber Modellabweichungen	- 110 -
4.8.1	Totzeitabweichungen	- 110 -
4.8.2	Abweichungen der Zeitkonstanten	- 121 -
4.8.3	Abweichungen der Regelstreckenmodelle	- 132 -
4.9	Annäherung der Totzeit im Smith-Prädiktor	- 142 -
4.10	Bewertung der Praxistauglichkeit des untersuchten Smith-Prädiktors	- 151 -
4.10.1	Experteninterview	- 151 -
4.10.2	Schritte zur Implementierung des Smith-Prädiktors	- 154 -
5.	Zusammenfassung und Ausblick	- 157 -
5.1	Zusammenfassung	- 157 -
5.2	Ausblick	- 160 -
VI.	Literaturverzeichnis	- 161 -
VII.	Anlagenverzeichnis	- 162 -

III. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Geschlossener Regelkreis (Quelle:/1, S.4/)	- 12 -
Abb. 2.2: Regelkreis mit PID-Regler	- 17 -
Abb. 2.3: Regelgröße, PT_1 -Glieder mit unterschiedlichen Zeitkonstanten T_D	- 18 -
Abb. 2.4: Regelgröße, Regelkreis mit unterschiedlichen Dämpfungen D	- 21 -
Abb. 2.5: Förderband (Quelle:/8, S.93/)	- 24 -
Abb. 2.6: Regelkreis mit Smith-Prädiktor-Regler (Quelle:/5, S.172/)	- 26 -
Abb. 2.7: Rückführung der nicht messbaren, totzeitfreien Regelgröße (Quelle:/5, S.172/)	- 28 -
Abb. 2.8: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Darstellungsform mit innerer Rückführung	- 29 -
Abb. 2.9: IMC-Regelung und konventionelle Regelungsstruktur (Quelle:/5, S.167/)	- 30 -
Abb. 2.10: Regelkreis mit Sm.Pr., IMC-Struktur (Quelle:/5, S.172/)	- 32 -
Abb. 2.11: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Darstellungsform IMC-Struktur	- 33 -
Abb. 2.12: Filtered-Smith-Predictor (Quelle:/5, S.166/)	- 35 -
Abb. 2.13: Smith-Prädiktor-Regler mit Sollwert u. Prädiktionsfilter (Quelle:/5, S.175)	- 36 -
Abb. 3.1: Modell der Regelstrecke	- 41 -
Abb. 3.2: Regelkreis mit Smith-Prädiktor-Schaltung mit innerer Rückführung	- 43 -
Abb. 3.3: Graphische Bedienoberfläche	- 45 -
Abb. 4.1: Berechnung Verzugs- u. Ausgleichszeit	- 50 -
Abb. 4.2: Einstellverfahren nach Chien, Hrones und Reswick	- 51 -
Abb. 4.3: Regelgröße, Störgröße u. Sollwert, Regelkreis ohne Sm.Pr.	- 52 -
Abb. 4.4: Funktion der Lookup-Table in 5%- und 25%-Schritten	- 53 -
Abb. 4.5: Lineare Interpolation	- 54 -
Abb. 4.6: Lookup-Table-Block in MATLAB Simulink	- 55 -
Abb. 4.7: Regelgröße, Regelkreise mit u. ohne Sm.Pr.	- 57 -
Abb. 4.8: Regelkreis mit Sm.Pr., Verstärkungsform Sprung	- 59 -
Abb. 4.9: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform Sprung	- 61 -
Abb. 4.10: Regelkreis mit Sm.Pr., Verstärkungsform PT_1 -Glied	- 62 -
Abb. 4.11: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform PT_1 -Glied	- 64 -
Abb. 4.12: Regelkreis mit Sm.Pr., Verstärkungsform Rampe	- 65 -
Abb. 4.13: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform Rampe	- 67 -
Abb. 4.14: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform Rampe, untersch. m	- 68 -
Abb. 4.15: Regelgröße, Vergleich der Verstärkungsformen	- 69 -
Abb. 4.16: Ausgang Sm.Pr, Vergleich der Verstärkungsformen	- 70 -
Abb. 4.17: Reglerverstärkungen, Vergleich der Verstärkungsformen	- 71 -
Abb. 4.18: Anregelzeiten, Vergleich der Verstärkungsformen	- 72 -
Abb. 4.19: Ausregelzeiten, Vergleich der Verstärkungsformen	- 73 -
Abb. 4.20: Regelgröße, Verstärkungsänderung aufwärts, einschw. Zustand	- 77 -
Abb. 4.21: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung aufwärts, einschw. Zustand	- 78 -
Abb. 4.22: Regelgröße, Verstärkungsänderung abwärts, einschw. Zustand	- 79 -
Abb. 4.23: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung abwärts, einschw. Zustand	- 80 -
Abb. 4.24: Regelgröße, Verstärkungsänderung aufwärts, ausgeschw. Zustand	- 81 -

Abb. 4.25: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung aufwärts, ausgeschw. Zustand	82 -
Abb. 4.26: Regelgröße, Verstärkungsänderung abwärts, ausgeschw. Zustand	83 -
Abb. 4.27: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung abwärts, ausgeschw. Zustand	84 -
Abb. 4.28: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr, Störungsfall einschw. Zustand	86 -
Abb. 4.29: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts	89 -
Abb. 4.30: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts.....	90 -
Abb. 4.31: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts	91 -
Abb. 4.32: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts.....	92 -
Abb. 4.33: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Störungsfall	93 -
Abb. 4.34: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts	95 -
Abb. 4.35: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts.....	96 -
Abb. 4.36: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts	97 -
Abb. 4.37: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts.....	98 -
Abb. 4.38: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand.....	101 -
Abb. 4.39: Ausgang Sm.Pr., Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand	102 -
Abb. 4.40: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand, Störung	104 -
Abb. 4.41: Ausgang Sm.Pr., Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand, Störung	105 -
Abb. 4.42: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im ausgeschw. Zustand	106 -
Abb. 4.43: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im ausgeschw. Zustand, Störung.....	108 -
Abb. 4.44: Ausgang Sm.Pr., Ausschalten des Sm.Pr., Störung	109 -
Abb. 4.45: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., größere Totzeit im Sm.Pr.....	111 -
Abb. 4.46: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., kleinere Totzeit im Sm.Pr.....	113 -
Abb. 4.47: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Totzeitabweichungen.....	114 -
Abb. 4.48: Regelgröße, Totzeitabweichungen	116 -
Abb. 4.49: Ausgang Sm.Pr., Totzeitabweichungen	117 -
Abb. 4.50: Reglerverstärkungen, unterschiedliche Totzeitabweichungen	118 -
Abb. 4.51: Anregelzeiten, unterschiedliche Totzeitabweichungen.....	119 -
Abb. 4.52: Ausregelzeiten, unterschiedliche Totzeitabweichungen	120 -
Abb. 4.53: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., größere Zeitkonstante im Prädiktor.....	122 -
Abb. 4.54: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., kleinere Zeitkonstante im Prädiktor.....	124 -
Abb. 4.55: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Zeitkonstanten.....	125 -
Abb. 4.56: Regelgröße, Abweichungen der Zeitkonstanten	126 -
Abb. 4.57: Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Zeitkonstanten	128 -
Abb. 4.58: Reglerverstärkungen, Abweichungen der Zeitkonstanten.....	129 -
Abb. 4.59: Anregelzeiten, Abweichungen der Zeitkonstanten	130 -
Abb. 4.60: Ausregelzeiten, Abweichungen der Zeitkonstanten	131 -
Abb. 4.61: Regelkreis mit Sm.Pr. und Abweichungen der Regelstreckenmodelle	132 -
Abb. 4.62: Regelgröße, unterschiedliche Regelstreckenmodelle	134 -
Abb. 4.63: Regelgröße, Abweichungen der Regelstrecken.....	135 -
Abb. 4.64: Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Regelstrecken.....	136 -
Abb. 4.65: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Regelstrecken	138 -
Abb. 4.66: Reglerverstärkungen, unterschiedliche Regelstreckenmodellen	139 -
Abb. 4.67: Anregelzeiten, unterschiedliche Regelstreckenmodellen	140 -
Abb. 4.68: Ausregelzeiten, unterschiedliche Regelstreckenmodellen	141 -

Abb. 4.69: Regelkreis mit Sm.Pr. und Totzeitannäherung im Sm.Pr.	- 142 -
Abb. 4.70: Regelgröße, Totzeitannäherung im Sm.Pr.	- 144 -
Abb. 4.71: Ausgang Sm.Pr., Totzeitannäherung im Sm.Pr.	- 145 -
Abb. 4.72: Regelgröße, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung	- 146 -
Abb. 4.73: Reglerverstärkungen, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung	- 148 -
Abb. 4.74: Anregelzeiten, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung	- 149 -
Abb. 4.75: Ausregelzeiten, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung	- 150 -

IV. Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Werte der Regelkreise mit u. ohne Sm.Pr.	- 56 -
Tab. 4.2: Werte des Regelkreises mit der Verstärkungsform Sprung	- 60 -
Tab. 4.3: Werte des Regelkreises mit der Verstärkungsform PT_1 -Glied	- 63 -
Tab. 4.4: Werte des Regelkreises mit der Verstärkungsform Rampe	- 66 -
Tab. 4.5: Vor- u. Nachteile der Verstärkungsformen	- 74 -
Tab. 4.6: Werte des Regelkreises mit Verstärkungsänderungen	- 75 -
Tab. 4.7: Werte des Regelkreises mit u. ohne Störung	- 85 -
Tab. 4.8: Werte des Regelkreises mit Störung und Verstärkungsänderungen	- 87 -
Tab. 4.9: Werte des Regelkreises, Ausschalten des Sm.Pr.	- 100 -
Tab. 4.10: Werte des Regelkreises, Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand	- 103 -
Tab. 4.11: Werte des Regelkreises mit unterschiedlichen Regelstreckenmodellen	- 137 -
Tab. 4.12: Schritte zur Implementierung des Sm.Pr.	- 154 -

V. Symbolverzeichnis

Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
ε	%	Überschwingweite
ϑ	°	Winkel zur Beschreibung der Dämpfung D
ω	Hz	Kreisfrequenz
ω_b	dB	Bandbreite des Regelkreises

Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
d	-	Störgröße
D	-	Dämpfung
e	-	Regelabweichung
F	-	Sollwertfilter
F_r	-	Prädiktionsfilter
K	-	Gliedverstärkung
K_r	-	Reglerverstärkung
K_s	-	Kreisverstärkung
l	m	Länge
m	-	Steigung
n	-	Anzahl der PT_n -Glieder
S	-	Schwierigkeitsgrad
t	s	Zeit
t_{an}	s	Anregelzeit
t_{aus}	s	Ausregelzeit
T	s	Zeitkonstante
T_D	s	Verzögerungszeit
T_{D_Real}	s	Zeitkonstante der realen Regelstrecke
T_{D_SmPr}	s	Zeitkonstante im Smith-Prädiktor-Modell
T_g	s	Ausgleichszeit
T_I	s	Integrationszeit
T_{Modell}	s	Modellzeitkonstante
T_n	s	Nachstellzeit
T_t	s	Totzeit
T_{t_Real}	s	Totzeit der realen Regelstrecke
T_{t_SmPr}	s	Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell
T_u	s	Verzugszeit
u	-	Stellgröße
v	m/s	Bahngeschwindigkeit
V	%	Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung
w	-	Führungsgröße
y	-	Regelgröße

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die Automatisierung von Prozessen ist in Zeiten der Digitalisierung nicht mehr wegzudenken. Die Prozessautomation bzw. Prozessautomatisierung setzt sich aus den beiden Wörtern „Prozess“ und „Automatisierung“ zusammen und beschreibt den generellen Einsatz gerätetechnischer Ressourcen für selbsttätige Ausführungen beliebiger Prozesse. Das bedeutet, dass informations- und rechentechnische Mittel für das Steuern, Regeln, Optimieren, Überwachen und Führen von Prozessen eingesetzt werden.

Die Prozessautomation findet in zahlreichen Bereichen Anwendung, zum Beispiel in den Industriebereichen der Chemie, Getränke- & Nahrungsmittelherstellung, Petrochemie und Metallurgie. Die Möglichkeiten zur Automatisierung von Prozessen nehmen heutzutage deutlich zu. Es werden neue Lösungen zur Automatisierung gesucht, die zum Beispiel im Bereich der RPA Ansätze von „intelligenten Robotern“ ermöglichen. RPA bedeutet robotergesteuerte Prozessautomatisierung und ist eine Softwaretechnologie, die von zahlreichen Anwendern zur Automatisierung von digitalen Aufgaben eingesetzt werden kann. Diese Roboter können zum Beispiel unterschiedliche Rechnungen per Bilderkennung (OCR) erkennen und diese bearbeiten und buchen.

Auch in den Bereichen der Prozessoptimierung findet die Prozessautomation Anwendung. Dabei soll beispielsweise die vorhandene Regelung durch das Hinzufügen von zusätzlichen Schaltungen verbessert werden, indem sich die Regelungsergebnisse nach der Implementierung der zusätzlichen Schaltung deutlich verbessern lassen. Ein Beispiel für eine in den geschlossenen Regelkreis zusätzlich eingefügte Schaltung ist der sogenannte Smith-Prädiktor. Dieser findet bei Prozessen Anwendung, bei denen große Totzeiten vorliegen. Diese Totzeiten beeinflussen die Parametrisierung der verwendeten Regeleinrichtung zum Beispiel in Form eines PI-Reglers negativ, weil der Regler aufgrund der vorliegenden Totzeit nicht stark eingestellt werden kann. In dieser Arbeit wird eine Form der Erweiterung betrachtet, ein stufenlos einblendbarer Smith-Prädiktor, der mithilfe einer selbst entwickelten Implementierung die stufenlose Verstellung des Einflussgrades der Prädiktor-Schaltung ermöglichen soll.

1.2 Struktur der Arbeit

Um die Thematik des stufenlosen Smith-Prädiktors beschreiben und daraus Erkenntnisse für die Praxistauglichkeit der Implementierung gewinnen zu können, sind umfangreiche Untersuchungen erforderlich. Ziel der Arbeit ist es, einen stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktor zu entwickeln und unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu untersuchen, so dass eine verbesserte Praxistauglichkeit zu erreichen ist.

Zu Beginn der Arbeit werden die Grundlagen der Regelungstechnik vorgestellt. Diese beinhalten neben den Grundlagen des Regelkreises, des PID-Reglers und der Totzeit auch die Theorie des Smith-Prädiktors. Dabei wird auf die Herkunft der Prädiktor-Schaltung, dessen Funktion und die unterschiedlichen Darstellungsformen eingegangen.

Im Abschnitt 3 der Methodik werden neben dem verwendeten Modell der Regelstrecke auch das Softwaretool MATLAB sowie die Anforderungen an die Regeleinrichtung vorgestellt. Nach der Vorstellung der stufenlos einblendbaren Implementierung des Smith-Prädiktors folgen im Abschnitt 4 die Untersuchungen zur Performance des Prädiktors unter verschiedenen Randbedingungen. Es wird zunächst eine von drei Verstärkungsformen ausgewählt und anschließend der Einfluss der Verstellung des Einflussgrades des Smith-Prädiktors in unterschiedlichen Fällen simuliert, analysiert und bewertet. Neben der Störanfälligkeit des Regelkreises mit stufenlos einblendbarem Smith-Prädiktor wird das vollständige Ausschalten der Prädiktor-Schaltung unter verschiedenen Rahmenbedingungen simuliert.

Anschließend wird die Robustheit des Smith-Prädiktors gegenüber Modellabweichungen untersucht. Welchen Einfluss unterschiedliche Zeitkonstanten, Totzeiten und unterschiedliche Regelstrecken innerhalb des Regelkreises haben, wird anhand von ausgewählten Größen dargestellt und bewertet. Abschließend wird die Praxistauglichkeit des implementierten Smith-Prädiktors anhand eines Experteninterviews mit Herrn. Dr.-Ing. Wolfgang Trümper bewertet.

Im letzten Abschnitt 5 dieser Arbeit werden die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse zusammengefasst und auf mögliche Erweiterungen des Themengebietes des stufenlosen Smith-Prädiktors eingegangen.

2. Grundlagen

2.1 Regelkreis

„Die Regelungstechnik befasst sich mit der Aufgabe, einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft.“

(Quelle:/1, S.4/)

Das Ziel dieser Aufgabe ist die Entwicklung einer Regeleinrichtung, die maßgeblich dazu beiträgt, das vorgegebene Regelungsziel zu erreichen. Dazu wird ein dynamisches System einer Regelstrecke mit einer äußerlich beeinflussbaren Stellgröße und einer messbaren Regelgröße verwendet. Es werden physikalische, chemische oder technische Größen gezielt durch einen technischen Regelvorgang beeinflusst, beispielsweise die Regelung von Füllstand, Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt eines Rührkessel-Reaktors. Um einen Regelvorgang realisieren zu können, wird ein sogenannter geschlossener Regelkreis benötigt. Dieser stellt einen geschlossenen Wirkungsablauf für die Beeinflussung einer physikalischen Größe in einem technischen System dar. Innerhalb dieses Regelkreises wird der Istwert immer rückgeführt und zusätzlich eine Differenz aus dem Istwert und dem Sollwert, die sogenannte Regelabweichung bestimmt. Dadurch entsteht eine Unabhängigkeit der Regelgröße bezogen auf die vorliegende Störgröße [1]. Der typische Aufbau eines geschlossenen Regelkreises ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

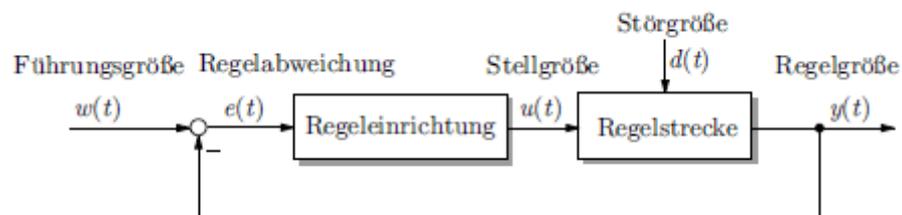


Abb. 2.1: Geschlossener Regelkreis (Quelle:/1, S.4/)

Das Ziel einer Regelung ist, dass die Regelgröße $y(t)$ konstant gehalten wird. Für eine möglichst optimale Regelung sind drei Schritte notwendig.

1. Messen:

Es wird die Regelgröße direkt gemessen und falls die Messung nicht möglich ist, wird die nichtmessbare Regelgröße aus anderen Größen wie zum Beispiel Qualitätskennwerten rechnerisch ermittelt.

2. Ermittlung der Regelabweichung:

Es wird der Wert der Regelgröße $y(t)$ mit dem Wert der Führungsgröße $w(t)$ verglichen und aus der Differenz $e(t) = w(t) - y(t)$ die Regelabweichung $e(t)$ bestimmt.

3. Bestimmung der Stellgröße:

Unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke wird aus der Regelabweichung die benötigte Stellgröße $u(t)$ bestimmt.

Die Regelgröße $y(t)$, auch Istwert genannt, hat innerhalb des Regelkreises eine große Bedeutung. Sie soll mithilfe einer Regeleinrichtung beispielsweise in Form eines PID-Reglers möglichst konstant gehalten und bei Abweichungen im Störfall umgehend wieder auf den definierten Sollwert zurückgeführt werden. Dabei hängt der Istwert von der Stellgröße $u(t)$ und der Störgröße $d(t)$ ab. Die Stellgröße $u(t)$ ist die von der Regeleinrichtung aus der Regeldifferenz abgeleitete Größe, die eine Änderung der Regelgröße über ein Stellglied bewirkt. Die Störgröße $d(t)$ ist die sich negativ auf die Regelgröße $y(t)$ auswirkende Größe. Sie führt dazu, dass eine Abweichung zwischen der Regelgröße und der Führungsgröße entsteht. Die Führungsgröße $w(t)$, die auch als Sollwert bezeichnet wird, gibt den zu erreichenden Wert der Regelgröße vor. Die nach der Führungsgröße folgende Regelabweichung $e(t)$, auch Regelfehler genannt, ist die aus der Differenz $e(t) = w(t) - y(t)$ aus der zurückgeführten Regelgröße, auch Rückführgröße genannt und der Führungsgröße $w(t)$ ermittelte Größe. Im Idealfall hat die Regelabweichung einen Wert von 0. In diesem Fall besitzen die Rückführgröße und die Führungsgröße denselben Wert. Dies ist aber in der Praxis kaum möglich. Das Annähern des Idealfalls ist das Ziel einer Regeleinrichtung, indem die Regelabweichung mithilfe von Stelleingriffen dem Wert von 0 angenähert wird [1].

2.2 Regler und Glieder

Innerhalb eines Regelkreises wird eine Regeleinrichtung mit verschiedenen Kombinationen von sogenannten Gliedern verwendet. Ein stetiger Regler ist häufig in Form eines PI-, oder PID-Reglers zu finden. Es gibt aber noch andere Kombinationen von Reglern z.B. den PD- oder I-Regler. Die unterschiedlichen Reglerkombinationen werden für verschiedene Modelle und Regelungsziele verwendet. Die einzelnen Regler setzen sich aus Gliedern zusammen. Insgesamt stehen drei Glieder zur Verfügung, das P-, I- und D-Glied. Dabei ist die Wahl und Parametrierung der einzelnen Glieder ausschlaggebend für das Regelungsergebnis [2]. Im Folgenden werden die einzelnen Glieder und Reglerkombinationen nach [1] und [2] vorgestellt.

P-Glied:

Das P-Glied hat die Aufgabe, die Eingangsgröße um einen konstanten Faktor zu verstärken. Im Gegensatz zum D-Glied kann das Proportionalglied als ein reiner Regler (P-Regler) verwendet werden, beispielsweise bei einem Modell einer Regelstrecke, bei dem eine bleibende Regelabweichung nicht störend ist. Dieses dynamische Glied hat die Charaktereigenschaft, dass es sehr schnell auf Regelabweichungen der Eingangsgröße reagiert und die auftretenden Unstimmigkeiten schnell ausregelt. Hierbei gilt, dass je größer die Regelabweichung ist, desto größer muss die Stellgröße sein [1].

Das proportionale Übertragungsglied lässt sich mithilfe der nachfolgenden Gleichung beschreiben.

$$x_a(t) = K_p \cdot x_e(t) \quad (2.1)$$

Gleichung (2.1) stellt den Zusammenhang zwischen der Eingangs- und Ausgangsgröße im Zeitbereich da. Für die Übertragungsfunktion ergibt sich:

$$G(s) = K_p \quad (2.2)$$

I-Glied:

Das I-Glied verstärkt nicht nur wie das P-Glied die Summe, sondern integriert auch die Regelabweichung. Auch das I-Glied kann wie das P-Glied als reiner Regler genutzt werden, zum Beispiel bei Regelstrecken, die keine hohe Dynamik aufweisen. Hier ist aber zu beachten, dass die Regelstrecken keinerlei Verzögerungen jeglicher Art aufweisen dürfen, da dies zu instabilem Verhalten führen würde. Das Übertragungsglied ist in der Lage, bleibende Regelabweichungen vollständig auszuregeln. Das Prinzip, nach dem das I-Glied arbeitet, lautet, solange eine Regelabweichung auftritt, muss die Stellgröße verändert werden [1].

Dieses integrale Übertragungsglied lässt sich mit Gleichung (2.3), die das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße im Zeitbereich darstellt beschreiben.

$$x_a(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t x_e(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

Wenn die Stellgröße x_e den Wert 0 annimmt, wird die Stellgröße nicht verändert. Dann ist der aktuelle Wert der Stellgröße derjenige, mit dem der vorgegebene Sollwert erreicht bzw. mit dem die Störung kompensiert wird. Die Übertragungsfunktion des I-Gliedes lautet:

$$G(s) = \frac{1}{s \cdot T_I} \quad (2.4)$$

D-Glied:

Das D-Glied differenziert die Eingangsgröße und errechnet so die Ausgangsgröße. Es kann nicht als reiner Regler eingesetzt werden, nur in Kombination mit einem oder beiden der anderen Glieder. Nur so kann es in einen Regler eingebunden werden. Das D-Glied ist ein sehr dynamisches Übertragungsglied und reagiert ähnlich wie das P-Glied sehr schnell auf jegliche Veränderungen der Eingangsgröße. Hierbei gilt, dass je stärker sich die Regelabweichung ändert, desto stärker muss die Regelung eingreifen. Der Regler reagiert bereits mit einer großen Stellgröße, wenn die Regelabweichung sehr stark zunimmt, auch wenn diese noch keinen großen Wert aufweist [1].

Das differentielle Übertragungsglied lässt sich mit Gleichung (2.5) darstellen. Es wird wiederum das Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsgröße dargestellt.

$$x_a(t) = T_D \cdot \frac{d}{dt} \cdot x_e(t) \quad (2.5)$$

Die Übertragungsfunktion lautet:

$$G(s) = s \cdot T_D \quad (2.6)$$

PI-Regler:

Es gibt mehrere Kombinationen von Übertragungsgliedern um einen Regler für den entsprechenden Anwendungsfall zusammzusetzen. Der PI-Regler kombiniert hierbei das P- und I-Glied und nutzt die Vorteile beider Glieder. Die Charaktereigenschaft des dynamischen proportionalen P-Gliedes, das schnell bei Regelabweichung der Eingangsgröße eingreift, wird mit der Eigenschaft der exakten Ausregelung des Integralgliedes kombiniert. Aus diesem Grund wird der PI-geregelte Regelkreis sehr genau und mittelschnell. Für die PI-Kombination ergibt sich folgende Übertragungsfunktion:

$$G(s) = K_p + \frac{1}{s \cdot T_I} \quad (2.7)$$

Wenn die Sprungantwort eines PI-Reglers betrachtet wird, fällt auf, dass diese im Vergleich zu der mit reinem P-Regler keine bleibende Regeldifferenz mehr aufweist. Dafür hat diese aber einen deutlich größeren Überschwinger. Der Grund hierfür ist das Verhalten des I-Anteils. Dieser Anteil muss den Wert für die Kompensation der bleibenden Regeldifferenz durch Integration ermitteln. Deshalb müssen die Flächen zwischen dem festgelegten Sollwert w und der Regelgröße y gleich groß sein, damit der Integrator einen konstanten Ausgangswert erzeugen kann [3].

PD-Regler:

Die proportional-differential Kombination verknüpft die Vorteile des P- und D-Anteils. Der D-Teil bewertet hierbei die Änderung einer Regelabweichung. Der Differentialanteil differenziert und berechnet so die Änderungsgeschwindigkeit, die dann zum P-Anteil hinzuaddiert wird. Der PD-Regler reagiert schon auf Ankündigungen von Veränderungen und das damit auftretende Verhalten des Vorhaltens beim Regeln wird sichtbar. Dank des P-Anteils ist diese Kombination sehr schnell. Das Problem des proportionalen Anteils, die bleibende Regelabweichung ist aber weiterhin vorhanden. Für die Kombination des P und D-Gliedes ergibt sich folgende Übertragungsfunktion:

$$G(s) = K_p + s \cdot T_D \quad (2.8)$$

Es gibt einen weiteren Nachteil bei der Verwendung des D-Anteils. Dieser kann Unruhe im Regelkreis erzeugen, beispielsweise wenn das Sensorsignal verrauscht ist. Wird das Rauschen durch die Differentiation weiter verstärkt und wieder in den Regelkreis eingeführt, ruft dies eine stärkere Belastung des Aktuators hervor. Wenn der Regler hohe Ausschläge als Folge von schnellen Änderungen des Sollwertes aufzeigt, besteht die Möglichkeit, dass das Stellglied oder der Aktuator diese nicht umsetzen kann. Die Wirkung des D-Anteils würde dann durch die Begrenzung verpuffen und das Einschwingverhalten wäre nicht wie berechnet, sondern meist langsamer. Dieses Verhalten gilt aber nur im Fall von großen Sprüngen [3].

PID-Regler:

In der heutigen Prozessindustrie werden geschätzt 97% aller Basisregelkreise in Form eines PID-Algorithmus verwendet [4]. Ein PID-Regler findet sich in der industriellen Anwendung zum Beispiel in Kombination mit Logik-Bausteinen, Rechengliedern und anderen Funktionsbausteinen wieder [5]. Bei dem universellsten der klassischen Regler werden alle drei Glieder miteinander vereint. Dieser PID-geregelte Kreis ist genau und sehr schnell. Es werden wiederum die einzelnen Eigenschaften der einzelnen Glieder miteinander kombiniert. Damit ergibt sich folgende Übertragungsfunktion:

$$G(s) = K_p + \frac{1}{s \cdot T_I} + s \cdot T_D \quad (2.9)$$

Ein störendes Verhalten einer Regelung ist der sogenannte Überschwinger (siehe Anlage 1), ein Sprung, der sich nach einer gewissen Zeit „einschwingt“. Nach einer bestimmten Zeit erreicht die Regelgröße wieder den Sollwert und die Sprungantwort geht in den ausgeschwungenen Zustand über. Der Überschwinger wird mithilfe der Überschwingweite ε beschrieben. Für möglichst geringes Überschwingen wird die Dämpfung D genutzt, welche in Form des D-Anteils vorliegt. Die Verbesserung der Dämpfung ist notwendig, beim Auftreten einer Regeldifferenz so schnell wie möglich einen Stelleingriff vornehmen zu können. Dieser Eingriff muss bereits beim Auftreten einer Änderung der Regeldifferenz vollzogen werden. Diese Änderung der Regeldifferenz wird mit dem D-Glied durchgeführt. Durch das Hinzufügen des D-Anteils ist es möglich (siehe Anlage 2), eine schnelle Reaktion auf einen Führungsgrößensprung als auch eine Systemantwort ohne Überschwingen zu erreichen [3].

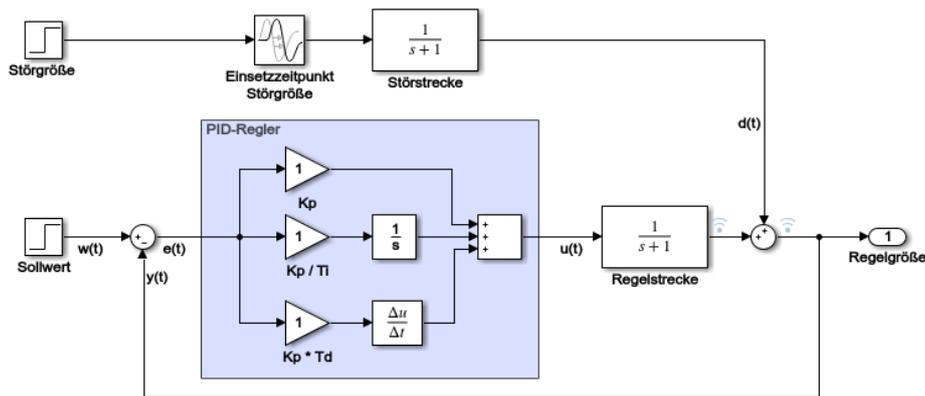


Abb. 2.2: Regelkreis mit PID-Regler

In Abb. 2.2 ist ein einfacher Regelkreis dargestellt, in dem die Regeleinrichtung farblich hervorgehoben wurde. Der verwendete PID-Regler beinhaltet alle drei Glieder und nutzt damit alle Vorteile der jeweiligen Glieder kombiniert. Diese Form der „offenen“ Darstellung des Reglers wird in den folgenden Abschnitten nicht verwendet, da MATLAB einen eigenen Reglerblock enthält, in dem die einzelnen Glieder ausgewählt und parametrisiert werden können

PT₁-Glieder:

Das PT₁-Glieder, auch LZI-Übertragungsglied genannt besitzt ein proportionales Übertragungsverhalten mit einer Verzögerung 1. Ordnung. Viele einfache Regelstrecken besitzen ein solches Verhalten und können näherungsweise damit beschrieben werden. Im Grunde ist es ein P-Glied mit nicht vernachlässigbarem Zeitverhalten. Das bekannteste Beispiel für ein PT₁-Glieder in der Elektrotechnik ist ein Tiefpass 1. Ordnung, der beispielsweise durch ein RC-Glied realisiert werden kann [6]. Das Verzögerungsglied 1. Ordnung findet in dieser Arbeit zur Beschreibung von Übertragungsverhalten Anwendung. Die Übertragungsfunktion dafür lautet:

$$G(s) = \frac{K}{(s + T_s)} \quad (2.10)$$

Wenn das Verhalten des PT₁-Glieder angepasst werden soll, kann eine größere Verzögerungszeit T_D eingefügt werden. Damit verzögert sich das Verhalten um den eingestellten Wert. Wenn die Zeit T_D in die Übertragungsfunktion (2.10) eingefügt wird, ergibt sich folgende Gleichung:

$$G(s) = \frac{K}{(T_D \cdot s + T_s)} \quad (2.11)$$

Um den Effekt von unterschiedlichen Verzögerungszeiten darzustellen, wurde ein einfaches PT₁-Glieder mit unterschiedlichen Zeitkonstanten T_D versehen. In der folgenden Abb. 2.3 sind die jeweiligen Sprungantworten dargestellt.

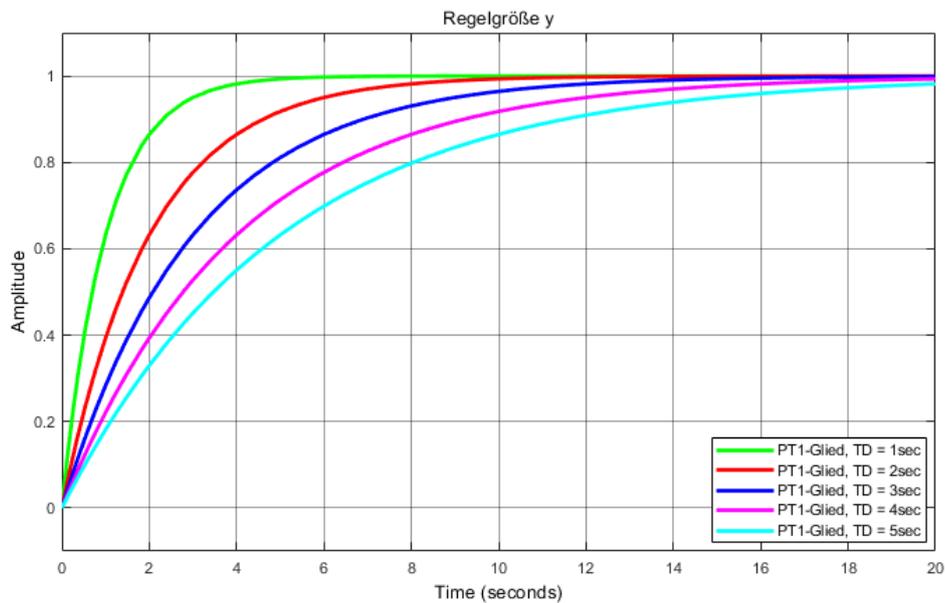


Abb. 2.3: Regelgröße, PT_1 -Glieder mit unterschiedlichen Zeitkonstanten T_D

Je größer der Wert der Verzögerungszeit T_D gewählt wird, desto länger dauert es, bis die Sprungantwort den Sollwert von 1 erreicht. Der Wert der Verzögerungszeit hat einen deutlichen Einfluss auf das Regelungsergebnis. Die Sprungantworten werden mit größeren Verzögerungszeiten langsamer und erreichen den vorgegebenen Sollwert später. Für die Darstellung der Sprungantworten wurde in MATLAB eine Step-Funktion verwendet, die ab $t = 0s$ ein Eingangssignal bzw. einen Sollwert von 1 vorgibt. Das Signal wird an das PT_1 -Glieder mit der entsprechenden Verzögerungszeit weitergeleitet und dann die Sprungantwort mithilfe eines Scope-Blocks aufgezeichnet.

PT_2 -Glieder:

Das PT_2 -Glieder wird ebenfalls als LZI-Übertragungsglieder bezeichnet, hat aber im Gegensatz zum PT_1 -Glieder eine Verzögerung 2. Ordnung. Auf eine Eingangssignal-Änderung antwortet das Glieder mit einem oszillatorisch gedämpften Ausgangssignal. Dieses Verhalten tritt wegen den konjugierten komplexen Polen auf. Ein PT_2 -Glieder lässt sich in zwei Verzögerungsglieder 1. Ordnung zerlegen. Dies kann aber nur erfolgen, wenn der Dämpfungsgrad $D \geq 1$ ist. Der Dämpfungsgrad D gibt mithilfe des Zeitverhaltens die Schwingeeigenschaften des Systems an [1]. Ein typisches Beispiel für ein PT_2 -System ist der RLC-Schwingkreis in der Elektrotechnik oder das gedämpfte Federmassenpendel im Maschinenbau. Die proportionale Strecke mit Verzögerungsgliedern 2. Ordnung enthält zwei Energiespeicher und je nach Art werden diese in nichtschwingungsfähige und schwingungsfähige Regelstecken unterschieden. Nichtschwingungsfähige Regelstecken entstehen, wenn zwei Energiespeicher gleiches physikalisches Verhalten aufweisen. Schwingungsfähige Regelstecken entstehen, wenn zwei unterschiedlich wirksame Energiespeicher zusammengeschaltet werden, z.B. RCL-Glieder. Diese können nur gedämpfte Schwingungen ausführen, da die Energie durch die Dämpfung aus dem System entnommen wird.

Je größer die Dämpfung eines Systems ist, desto kleiner die Schwingung. Bei einer Dämpfung von $D \geq 1$ treten auch bei zwei unterschiedlichen Energiespeichersystemen keine Schwingungen auf [1]. Die Beschreibung eines PT₂-Gliedes erfolgt anhand der folgenden Differentialgleichung.

$$1 \cdot y(t) + 2 \cdot D \cdot T \cdot \frac{dy}{dt} + T^2 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = K \cdot x(t) \quad (2.12)$$

Diese Gleichung beinhaltet neben der Zeitkonstante T auch den Dämpfungsfaktor D . Die Konstante K ist die Verstärkung des Gliedes. In Abhängigkeit von diesen Parametern können PT₂-Glieder sehr unterschiedliche Übergangsfunktionen erzeugen. Wird ein PT₂-Glieder in zwei PT₁-Glieder zerlegt, lässt sich die Übertragungsfunktion folgendermaßen beschreiben [1].

$$G(s) = \frac{K_1}{(T_{D1} \cdot s + T_{s1})} \cdot \frac{K_2}{(T_{D2} \cdot s + T_{s2})} \quad (2.13)$$

Diese Darstellung ist im Fall von $D \geq 1$ möglich. Wird die Übertragungsfunktion zusammengefasst und ausmultipliziert, entsteht folgende Gleichung:

$$G(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot D \cdot T \cdot s + 1} \quad (2.14)$$

Die Übertragungsfunktion lässt sich auch durch die Normalform der Übertragungsfunktion des PT₂-Schwingungsgliedes mit der Eigenfrequenz ω_0 darstellen. Dazu wird die Konstante T mit $T = \frac{1}{\omega_0}$ ersetzt. Die Übertragungsfunktion lautet dann:

$$G(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_0^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot D}{\omega_0} \cdot s + 1} \quad (2.15)$$

Das PT₂-Glieder besitzt zwei Pole in der linken Halbebene der s-Ebene. Diese können entweder reell oder konjugiert komplex sein. Bei der Klassifizierung der unterschiedlichen Pollagen werden drei Fälle unterschieden.

Erster Fall, $D \geq 1$:

Dieser Fall wird aperiodischer Fall genannt. Der Grund hierfür ist, dass die Übertragungsfunktion des PT₂-Gliedes den statischen Endwert $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = K$ aperiodisch erreicht. Wird die Übertragungsfunktion aus Gleichung (2.14) herangezogen, lässt sich anschließend folgende Übertragungsfunktion aufstellen:

$$G(s) = \frac{K_1}{T_1 \cdot T_1 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1} \quad (2.16)$$

Es gilt unter anderem:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{T_1 \cdot T_2}} \quad \text{und} \quad \frac{2D}{\omega_0} = T_1 + T_2 \quad (2.17)(2.18)$$

In diesem Fall lässt sich das PT₂-Element als Reihenschaltung zweier PT₁-Glieder auffassen. Wird die Sprungantwort als Funktion dargestellt, ergibt sich folgende Gleichung:

$$h(t) = K \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right); \quad t \geq 0 \quad (2.19)$$

Zweiter Fall, $D = 1$:

In diesem aperiodischen Grenzfall verschwindet der Ausdruck unter der Wurzel und die beiden Pole sind reell und besitzen denselben Wert.

$$s_1 = s_2 = -\frac{1}{T_1} = -\omega_0 \quad (2.20)$$

Der Nenner der Übertragungsfunktion wird zu einem Binom und es resultiert folgende Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1 \cdot s + 1)^2} \quad (2.21)$$

Aufgrund des Doppelpols entsteht die folgende Sprungantwort $h(t)$:

$$h(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{t}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad T_1 = T_2 \quad (2.22)$$

Dritter Fall, $0 < D < 1$:

Dieser stabile Schwingfall enthält komplexe Pole der Form:

$$s_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm j \cdot \sqrt{a_0 - \frac{a_1^2}{4}} = -\omega_0 \cdot D \pm j \cdot \omega_0 \sqrt{1 - D^2} = \omega_0 \cdot \left(-D \pm j \cdot \sqrt{1 - D^2} \right) \quad (2.23)$$

Dabei liegen die Pole in der linken s-Ebene auf einem Kreis mit dem Radius ω_0 . Der Winkel ϑ ist dabei ein Maß für die Dämpfung [1]. Dieser Winkel lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$\cos \vartheta = D \quad (2.24)$$

Für den Winkel $\vartheta = 0$ liegen beide Pole auf der negativen reellen Achse. Für $\vartheta = \pi/2, D = 0$ liegen die Pole bei $\pm j \cdot \omega_0$ auf der imaginären Achse. Wird wiederum die Sprungantwort betrachtet, ergibt sich folgende Gleichung:

$$h(t) = K \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-D^2}} \cdot e^{-D \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \sqrt{1-D^2} t + \vartheta) \right] \quad (2.25)$$

Werden alle drei oben benannten Fälle grafisch anhand eines selbst gewählten PT₂-Gliedes dargestellt, sind die Unterschiede von unterschiedlichen Dämpfungen deutlich zu erkennen.

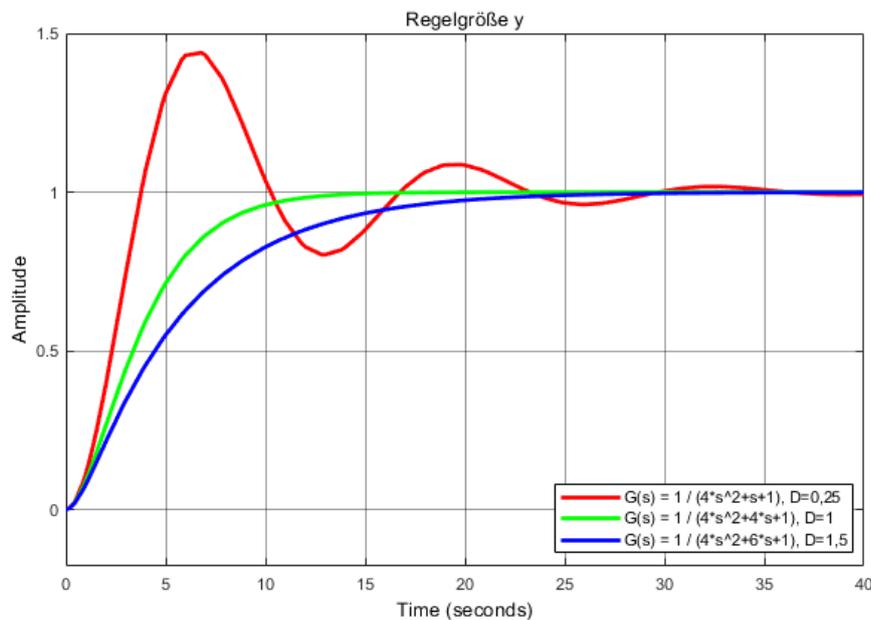


Abb. 2.4: Regelgröße, Regelkreis mit unterschiedlichen Dämpfungen D

Es wurde ein PT₂-Glied mit einer Konstante von $T_D = 2$ verwendet und die Dämpfung anhand der drei Fälle gewählt. Dabei wurden Werte von $D = 0,25$, $D = 1$ und $D = 1,5$ verwendet. In Abb. 2.4 ist zu erkennen, dass je höher die Dämpfung ist, umso geringer ist das Schwingverhalten. Die maximale Amplitude der einzelnen Sprungantworten ist unterschiedlich, auch die Anregel- und Ausregelzeiten unterscheiden sich deutlich. Werden die drei Sprungantworten verglichen fällt auf, dass je kleiner die Dämpfung wird, umso geringer die Anregelzeit wird. Die Ausregelzeit ist aufgrund des deutlichen Nachschwingens bei $D = 0,25$ deutlich höher als bei den $D = 1$ und $D = 1,5$.

Ein weiterer Grenzfall eines stabilen PT₂-Gliedes ist der Fall $D = 0$. Hier liegen die konjugierten komplexen Pole auf der Ordinate der s-Ebene. Dadurch erhält man für die Dämpfung $D = 0$ eine harmonische Schwingung. Als Sonderfall für den Parameter D der Dämpfung lassen sich zwei Werte, die wegen ihrer speziellen Eigenschaften häufig zur Auslegung von Regelkreisen verwendet werden finden. Bei $1/\sqrt{2} \leq D < 1$ tritt für $\omega > 0$ kein lokales Maximum von $|G(j\omega)|$ (Resonanzhöhung) mehr auf. Dabei beträgt das Überschwingen der Sprungantwort 5% bezogen auf den stationären Endwert für $D = 1/\sqrt{2}$.

Für $D \geq 1$ findet kein Überschwingen der Sprungantwort über den statischen Endwert mehr statt. Dieses Verhalten ist auch deutlich in Abb. 2.4 erkennbar, wo die Sprungantworten von $D \geq 1$ kein Überschwingen mehr aufweisen. Es gibt neben den oben genannten drei stabilen Fällen und dem Grenzfall von $D = 0$ noch weitere Fälle, in denen das PT₂-Glied instabiles Verhalten aufweist. Dies bedeutet, dass die Schwingung aufklingt und das System sich sozusagen aufschwingt, indem die Schwingintensität immer mehr zunimmt [7].

Wenn eine Regelstrecke in Form eines Verzögerungsgliedes höherer Ordnung vorliegt, ist die Regelung aufwändiger. Alle Regelstrecken die ein PT₁-artiges Verhalten aufweisen sind gutartiger und das Regeln unkritischer. Weist hingegen das PT₂-Glied instabiles Verhalten auf, ist die Regelung des Systems noch schwieriger.

2.3 Totzeit

Technische Systeme im Transportbereich besitzen üblicherweise eine „lange Leitung“. Beispiele sind das Warmwasser, das in der Leitung fließt, die Kohlemenge auf dem Förderband, die Information, die mittels Internetprotokoll per Satellit übertragen wird, das Telefongespräch, das über Lichtwellenleiter transportiert wird, der Schall, der sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet und als Echo zurückhallt, der Abtastwert, der von einem Prozessrechner für die Regelung verarbeitet wird usw. Alle Beispiele besitzen eine Gemeinsamkeit, das Signal wird um die Totzeit verzögert und nicht verändert oder verstärkt. Das Verhalten von Transportsystemen wird mithilfe von Totzeitgliedern beschrieben. Sie können in Regelkreisen als sehr störend empfunden werden, da sie eine frequenzabhängige Phasenverschiebung zur Folge haben, die die Stabilität des geschlossenen Regelkreises deutlich verschlechtert [3]. Das Ausgangssignal ist das zeitverzögerte Eingangssignal und lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$x(t) = V \cdot y(t - T_t) \quad (2.26)$$

Die zeitliche Verschiebung $(t - T_t)$ bedeutet, dass das Signal unverändert, aber um die Zeitverschiebung T_t verzögert und versehen mit der Verstärkung V ausgegeben wird. Wenn $y(t)$ das Eingangssignal ist, lässt sich das Ausgangssignal auch folgendermaßen beschreiben:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < T_t \\ y(t - T_t) & \text{für } t \geq T_t \end{cases} \quad (2.27)$$

Die Zeitverschiebung T_t darf nicht negativ sein, sonst könnte das System in die Zukunft blicken. Für Echtzeitsysteme gilt $T_t \geq 0$, damit das System die Kausalitätsbedingung einhalten kann. In der Übertragungstechnik wird öfters mit abgespeicherten Signalen gearbeitet, die sich hinsichtlich einer zeitlichen Verschiebung beliebig beständig verhalten. Hier besteht im Gegensatz zu den echtzeitbehafteten Regelkreisen die Möglichkeit, negative Verschiebungen zu verwenden die nichtkausal oder gar rückwärts arbeiten.

Wenn außer der Zeitverzögerung nichts passiert, führt das dazu, dass der Amplitudengang des Totzeitsystems den Wert V besitzt. Beim Phasengang tritt jedoch eine Verschiebung um die Zeit T_t auf. Es lässt sich folgende Übertragungsfunktion definieren:

$$G(s) = V \cdot e^{-sT_t} \quad (2.28)$$

Das Totzeitsystem besitzt im Amplitudengang den Verstärkungsfaktor V und den frequenzabhängigen Phasengang e^{-sT_t} . Bei der Frequenz von $\omega = 1/T_t$ wird die Phasenverschiebung von 2π erreicht. Die Ortskurve des Totzeitgliedes hat eine kreisförmige Darstellung, wobei zu jeder Frequenz ein Punkt auf dem Kreis gehört. Mit steigender Frequenz wird der Kreis mehrfach umlaufen. Das Bode-Diagramm des Totzeitgliedes besitzt die Amplitude von V , aber einen Phasenverlauf, der erst flach beginnt, dann immer steiler wird und eine negative Phasenverschiebung aufweist [3].

Totzeitsysteme treten in der Praxis auch an zunächst unerwarteten Orten auf. Prozessrechner und digitale Regler werden häufig in Regelungssystemen eingesetzt. Sie bestehen aus einem Mikroprozessor und die Signale werden von außen mit Hilfe von Analog-Digital-Wandlern in quantisierter Form aufgenommen. Anschließend werden diese Signale verarbeitet und durch Digital-Analog-Wandler wieder an die analoge Umwelt ausgegeben. Diese digitalen Regler arbeiten mit einer Abtastfrequenz. Sie besitzen auch eine Zeitverzögerung von mindestens einem Abtasttakt. Somit sind digitale Regler Totzeitsysteme. Die Berechnung von Abtastsystemen mit deren Verarbeitungstotzeit ist in der sogenannten zeitdiskreten Regelung, auch Abtastregelung enthalten [3].

Totzeiten in verfahrenstechnischen Anlagen treten vor allem bei Laufzeiten flüssiger oder gasförmiger Medien in Rohren, oder Laufzeiten von Schüttgütern auf Fördereinrichtungen auf. So beispielsweise bei der Temperaturregelung über Einspeisung von Heißdampf oder Warmwasser in einen Reaktor-Mantel. Nach dem Öffnen des Ventils dauert es eine bestimmte Zeit, bis das wärmere Medium über die Rohrleitung in den Mantel gelangt. Das Verhalten der Regelstrecke wird bestimmt von dem Verhältnis der Totzeit zu den anderen Zeitkonstanten des Reaktors, z.B. denjenigen, die mit den Wärmekapazitäten von Reaktor-Mantel und Reaktor-Inhalt zusammenhängen. Ein weiteres Beispiel ist die Temperaturregelung in Reaktoren oder Destillationskolonnen über externe Wärmetauscher. Nach einem Stelleingriff am Wärmetauscher dauert es eine bestimmte Zeit, bis das anders temperierte Medium über die Rohrleitung zurück in den Reaktor oder die Kolonne gelangt. [3].

Von allen Zeitverzögerungen hat die Totzeit den lästigsten Effekt, da nicht nur die Information über eine Änderung der Regelgröße um die Totzeit verschoben, sondern auch die Reaktion der Stellgröße um die Totzeit verspätet wird. Eine vereinfachte Erklärung der Totzeit ist die Signallaufzeit vom Stellort bis zum Messort. Das gängigste Beispiel ist die Regelung der Beladung von einem Förderband, wo der räumliche Abstand zwischen Stelleingriff und Messsystem über die Bandgeschwindigkeit direkt in eine Totzeit umgerechnet werden kann. In der Praxis haben Förderbänder eine Totzeit. Dabei ist die Eingangsgröße meist die Schieberstellung y und die Ausgangsgröße die pro Zeiteinheit vom Band geförderte Menge x [3].

Bildlich lässt sich dieses Beispiel nach [8] folgendermaßen darstellen:

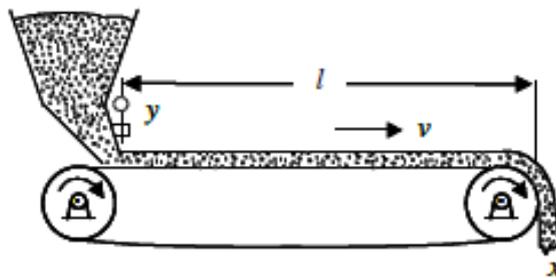


Abb. 2.5: Förderband (Quelle:[8], S.93)

Anfangs ist der Schieber geschlossen und wird erst zum Zeitpunkt von $t = 0s$ sprunghaft geöffnet. Dabei gilt folgende Gleichung:

$$y(t) = y_0 \cdot \sigma(t) \quad (2.29)$$

Nach der Totzeit T_t wird am Ausgang eine der Schiebestellungen proportionale Menge vom Band laufen. Die dafür benötigte Formel lautet:

$$x(t) = K_{PS} \cdot y_0 \cdot \sigma(t - T_t) \quad (2.30)$$

Die Totzeit lässt sich aus der Entfernung l zwischen dem Stell- und Messort und der konstanten Bandgeschwindigkeit v berechnen. Die Formel dafür lautet:

$$T_t = \frac{l}{v} \quad (2.31)$$

Die Ursache für das Auftreten von Totzeiten ist die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Signals zwischen Stell- und Messort bzw. zwischen Sende- und Empfangsort. Totzeiten haben auch zur Folge, dass die verwendeten Regler anders eingestellt werden müssen. Genau in diesem Fall kann die Implementierung von Prädiktor-Schaltungen helfen, den Regler aggressiver einzustellen und damit das Regelungsergebnis zu verbessern. Im Folgenden werden die Thematik und die einzelnen Darstellungsformen des Smith-Prädiktors vorgestellt.

2.4 Smith-Prädiktor

2.4.1 Entstehung und Funktion

Das Wort „Prädiktor“ stammt vom Lateinischen „praedicere“ und bedeutet Vorhersage. Im Grunde ist der Prädiktor eine Vorhersagevariable, die aus einer oder mehreren Variablen errechnet wird um die zur Vorhersage benötigte Variable zu ermitteln. Ein Prädiktor nutzt zur Vorhersage im Gegensatz zu einem Beobachter direkt das Wissen des Regelstreckenmodells anhand von Regelgrößenverläufen. Der in der Regelungstechnik verwendete Beobachter nutzt indirekt das Wissen der Regelstrecke. Er rekonstruiert aus bekannten Eingangs- und Ausgangsgrößen nicht messbare Größen oder Zustände [1].

Der Smith-Prädiktor wurde im Jahre 1957 von O.J.M. Smith, einem Professor der „University of California Berkeley“ erfunden. Er wurde 1917 in Illinois, USA geboren und studierte Elektrotechnik. Danach arbeitete er in diversen Firmen und Forschungseinrichtungen. Von ihm stammt auch die Bezeichnung des Prädiktors, „Smith-Prädiktor“. Prozesse in der Verfahrenstechnik z.B. beim Transport von Stoffen über „lange Leitungen“ haben teilweise große Totzeiten, die die aggressive Einstellung der verwendeten Regler behindern. Die Implementierung eines Smith-Prädiktors sollte genau bei diesen Prozessen zu einer aggressiveren Einstellung der Regler führen, um die Regelungsergebnisse deutlich zu verbessern [9].

Bei der Regelung von Prozessen wird häufig ein PID-Regler eingesetzt. Bei großen Totzeiten hingegen führt die Verwendung eines PID-Reglers zu einer Limitierung der Regelgüte. Der im Regler enthaltene D-Anteil liefert zwar eine Vorhersage der Regelgröße, diese ist aber ungenau und kann nur über den kurzen Zeitraum der Vorhaltzeit getroffen werden. Aus diesem Grund wird bei totzeitdominierenden Prozessen der D-Anteil meist herausgenommen. Bessere Ergebnisse können erreicht werden, wenn eine modellbasierte Vorhersage der Regelgröße verwendet wird. Für die Vorhersage wird hierbei ein Smith-Prädiktor verwendet. Die Grundidee besteht darin, die am realen Prozess mit der Übertragungsfunktion nicht messbare, totzeitfreie Regelgröße modellgestützt zu schätzen und diesen Schätzwert als Regelgröße dem PI-Regler zurückzuführen. Daraus entsteht die Möglichkeit, die Reglereinstellungen des PI-Reglers viel aggressiver vorzunehmen, als das bei der Verwendung der messbaren, totzeitbehafteten Regelgröße der Fall wäre. Zu beachten ist hierbei, dass die Wirksamkeit dieser Struktur von der Kenntnis eines exakten Prozessmodells abhängt, insbesondere von einer möglichst genauen Kenntnis der Totzeit selbst [5].

Wenn die vorliegende Regelstrecke oder die vorhandene Totzeit nicht exakt bekannt ist, kann es zu großen Abweichungen zwischen dem Modell der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell kommen. Im Smith-Prädiktor wird die reale Regelstrecke ohne Totzeit „kopiert“ und implementiert. Die Totzeit wird ebenfalls erfasst und in das Smith-Prädiktor-Modell eingefügt. Stimmen die Modelle der vorliegenden Regelstrecke und des Smith-Prädiktors nicht überein, kommt es zu starken Modellabweichungen, die den Regelkreis sehr negativ beeinflussen. Modellabweichungen sind die große Schwachstelle des Prädiktors und können auf verschiedene Art und Weisen entstehen (siehe Abschnitt 4.8). Für den Smith-Prädiktor stehen drei Darstellungsformen zur Auswahl, die in den kommenden Abschnitten zunächst vorgestellt werden und anschließend eine Variante für die folgenden Untersuchungen ausgewählt wird.

2.4.2 Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung

Die Grundidee eines Smith-Prädiktors mit innerer Rückführung ist, die im realen Prozess nicht messbare totzeitfreie Regelgröße $y'(t)$ modellgestützt zu schätzen und diesen Schätzwert als Regelgröße dem Regler rückzuführen. Hiermit soll eine wesentlich aggressivere Einstellung des Reglers ermöglicht und die Regelungsergebnisse damit deutlich verbessert werden.

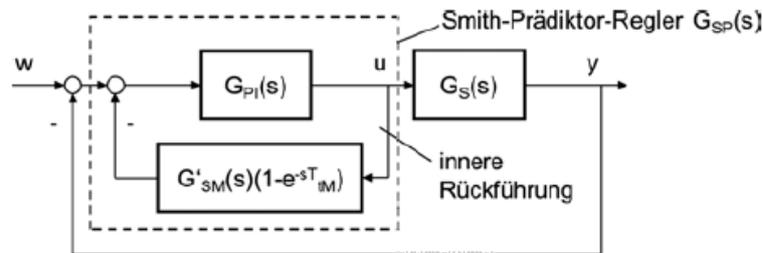


Abb. 2.6: Regelkreis mit Smith-Prädiktor-Regler (Quelle:/5, S.172)

In Abb. 2.6 ist ein Regelkreis dargestellt, der einen Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung enthält. Der umrandete Bereich ist der Smith-Prädiktor-Regler $G_{SP}(s)$. Dieser ist für die Schätzung des realen Prozesses verantwortlich und enthält neben der totzeitfreien Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ auch das Totzeitmodell e^{-sT_M} und den verwendeten PI-Regler $G_{PI}(s)$. Der Regelkreis enthält neben der Führungsgröße w , die zu regelnde Regelgröße y und die Stellgröße u . Der oben dargestellte Regelkreis lässt sich anhand von Gleichungen nach [5] beschreiben. Die Übertragungsfunktionen des realen Prozesses und des PI-Reglers lauten:

$$G_S(s) = G'_S(s) \cdot e^{-sT_t} \quad (2.32)$$

$$G_R(s) = G_{PI}(s) \quad (2.33)$$

Die Übertragungsfunktion $G_S(s)$ beinhaltet dabei die Kombination der Regelstrecke $G'_S(s)$ mit der dazugehörenden Totzeit T_t . $G_R(s)$ repräsentiert die Reglereinrichtung und liegt in Form eines PI-Reglers vor. Der Grund, warum kein D-Anteil im Regler verwendet wird, ist, dass der D-Anteil zwar eine Vorhersage der Regelgröße liefert, diese ist aber ungenau und kann nur über den kurzen Zeitraum der Vorhaltzeit getroffen werden. Deswegen wird bei totzeitdominierten Prozessen der D-Anteil meist herausgenommen. Durch die Rückführung des Schätzwertes der Regelgröße $y'(t)$ lässt sich der Regler wesentlich aggressiver einstellen als bei der Verwendung der messbaren totzeitbehafteten Regelgröße. Dabei hängt die Wirksamkeit der Smith-Prädiktor-Schaltung von der möglichst genauen Kenntnis des Prozessmodells und der vorliegenden Totzeit ab. Eine ungenaue Erfassung der Regelstrecke und Totzeit würde zu Modellabweichungen und zu schlechterem Regelungsverhalten führen. Innerhalb der Struktur wird der PI-Regler mit einer inneren Rückführung versehen.

Daraus leitet sich auch die Bezeichnung dieser Darstellungsform „Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung“ ab. Die Übertragungsfunktion der inneren Rückführung lautet:

$$G_{SP,rück}(s) = G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_{tM}}) \quad (2.34)$$

$G'_{SM}(s)$ ist das Modell der totzeitfreien Regelstrecke und $e^{-sT_{tM}}$ das Modell der Totzeit. Wenn der Smith-Prädiktor-Regler $G_{SP}(s)$ mit PI-Regler und innerer Rückführung betrachtet wird, ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion.

$$G_{SP}(s) = \frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot (G'_{SM}(s) - G_{SM}(s))} = \frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_t})} \quad (2.35)$$

Wenn das gesamte Modell des geschlossenen Regelkreises betrachtet wird, lautet die Gleichung:

$$G_{yw}(s) = \frac{G_{SP}(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_{SP}(s) \cdot G_S(s)} \quad (2.36)$$

Wird die Übertragungsfunktion $G_S(s)$ in die Gleichung (2.36) eingesetzt, entsteht die folgende Funktion.

$$G_{yw}(s) = \frac{G_{SP}(s) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}}{1 + G_{SP}(s) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}} \quad (2.37)$$

Im nächsten Schritt wird die Übertragungsfunktion (2.35) eingesetzt.

$$G_{yw}(s) = \frac{\left(\frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_t})} \right) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}}{1 + \left(\frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_t})} \right) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}} \quad (2.38)$$

Vereinfacht entsteht die Übertragungsfunktion (2.39).

$$G_{yw}(s) = \frac{G_{PI}(s) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) - G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) \cdot e^{-sT_t} + G_{PI}(s) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}} \quad (2.39)$$

Ist das Prozessmodell exakt, vereinfacht sich die Übertragungsfunktion zu:

$$G_{yw}(s) = \frac{G_{PI}(s) \cdot G'_S(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_S(s)} \cdot e^{-sT_t} \quad (2.40)$$

Dabei müssen auch die folgenden Bedingungen gelten.

$$G'_{SM}(s) \equiv G'_s(s) \quad (2.41)$$

$$e^{-sT_{tM}} \equiv e^{-sT_t} \quad (2.42)$$

Diese beiden Bedingungen bedeuten, dass die Strecke $G'_{SM}(s)$ mit der Regelstecke $G'_s(s)$ übereinstimmt. Dasselbe gilt für die jeweiligen Totzeiten. Der Regelkreis aus Abb. 2.6 kann bei der Einhaltung der oben genannten Bedingungen vereinfacht werden. In der folgenden Abbildung 2.7 ist der vereinfachte Regelkreis zu erkennen.



Abb. 2.7: Rückführung der nicht messbaren, totzeitfreien Regelgröße (Quelle:/5, S.172/)

Die dem PI-Regler zugeführte Regeldifferenz kann folgendermaßen berechnet werden.

$$E_{Korr}(s) = E(s) - (Y'(s) - Y(s)) = W(s) - Y(s) - (Y'(s) - Y(s)) \quad (2.43)$$

$$E_{Korr}(s) = W(s) - Y'(s) \quad (2.44)$$

Es gelten dabei auch die folgenden Gleichungen.

$$Y'(s) = G'_s(s) \cdot U(s) = G'_{SM}(s) \cdot U(s) \quad (2.45)$$

$$Y(s) = G'_s(s) \cdot e^{-sT_t} \cdot U(s) = G'_{SM}(s) \cdot e^{-sT_{tM}} \cdot U(s) \quad (2.46)$$

$$Y(s) = e^{-sT_t} \cdot Y'(s) \quad (2.47)$$

Wenn die Gleichung (2.47) wieder in den Zeitbereich rücktransformiert wird, entsteht:

$$y'(t) = y(t + T_t) \quad (2.48)$$

Die Größe $y'(t)$ ist hierbei eine Art Vorhersage von $y(t)$ über T_t Zeiteinheiten. Der Regler „denkt“, dass er einen totzeitfreien Prozess regelt und kann damit wesentlich stärker eingestellt werden. In manchen Automatisierungssystemen wird die Konfiguration eines solchen Smith-Prädiktor-Reglers unterstützt. Der Anwender muss dann zusätzlich zu den PI-Reglerparametern das Modell der Regelstrecke $G_{SM}(s) = G'_{SM}(s) * e^{-sT_t}$ vorgeben.

Wird die Darstellungsform des Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung verwendet, muss bei der Implementierung und Verwendung auf Folgendes geachtet werden. Der Ausgang des Smith-Prädiktors wird immer auf den Wert von 0 zurückgeführt. Das kann Verwirrung auslösen, da beispielsweise der Operator annimmt, dass der Smith-Prädiktor ausgeschaltet ist, weil der Wert des Ausgangs des Smith-Prädiktors auf 0 liegt, obwohl der Prädiktor vollständig angeschaltet ist. In Abb. 2.8 ist das Verhalten der Smith-Prädiktor-Schaltung dargestellt.

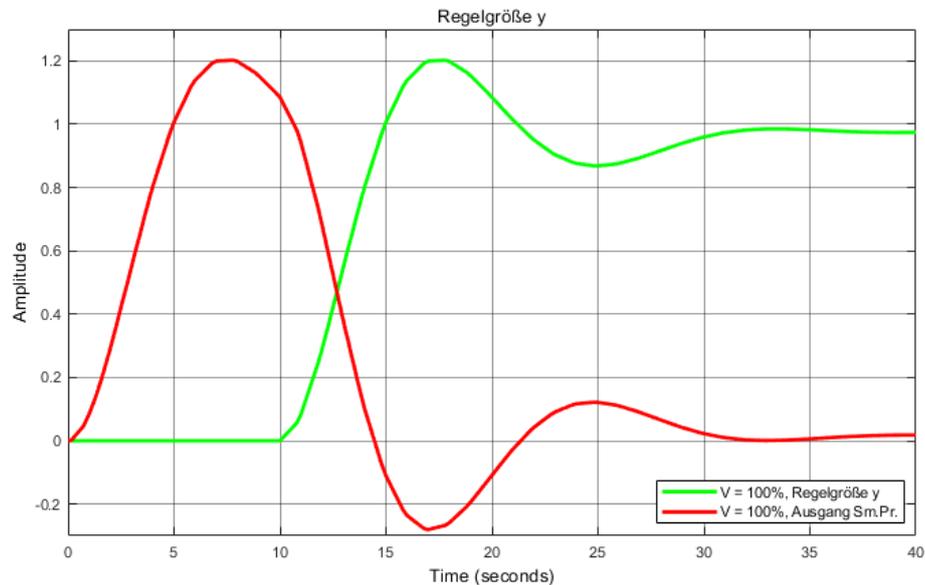


Abb. 2.8: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Darstellungsform mit innerer Rückführung

Die grüne Sprungantwort ist die der Regelgröße y und die rote die vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung. Die in diesem Beispiel verwendete Regelstrecke besteht aus zwei PT_1 -Systemen mit jeweils einer Zeitkonstante von $T_D = 5$ s. Der verwendete PI-Regler hat dabei eine Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ und die Smith-Prädiktor-Schaltung ist zu $V = 100\%$ aktiv. Die stufenlose Verstellung der Schaltung wird in Abschnitt 3.3 zunächst vorgestellt und im Abschnitt 4.2 im Detail erläutert. Der voreingestellte Sollwert hat einen Wert von 1. Die Sprungantwort vom Ausgang des Smith-Prädiktors wird, wie im vorherigen Verlauf beschrieben, schlussendlich wieder auf den Wert von 0 zurückgeführt. Dieses Verhalten der Smith-Prädiktor-Schaltung tritt bei den beiden anderen Darstellungsformen, dem Smith-Prädiktor in IMC-Struktur und dem Filtered-Smith-Predictor nicht auf. Hier wird der Wert der Prädiktor-Schaltung auf den voreingestellten Sollwert zurückgeführt. Die Erklärung der beiden genannten Darstellungsformen ist in den folgenden zwei Abschnitten zu finden.

2.4.3 Smith-Prädiktor in IMC-Struktur

Im Jahre 1989 wurde eine Regelungsstruktur mit dem Namen „Internal Mode Control“ von Manfred Morari und Evangelhos Zafiriou entwickelt. Diese Struktur verwendet ein Modell der Regelstrecke im laufenden Betrieb der Regelung, der sogenannten „Arbeitsphase“. Die Regelungsstruktur gehört wie ein Kompensationsregler zu den modellbasierten Regelungsverfahren und unterscheidet sich von anderen Regelungsverfahren dadurch, dass das Modell der Regelstrecke von vorneherein als Bestandteil des Reglers verwendet wird [5]. Daher kommt auch die Bezeichnung „Internal Mode Control“ (IMC). Zunächst wird die Grundidee des IMC-Verfahrens und anschließend die Verwendung mit Smith-Prädiktor erklärt.

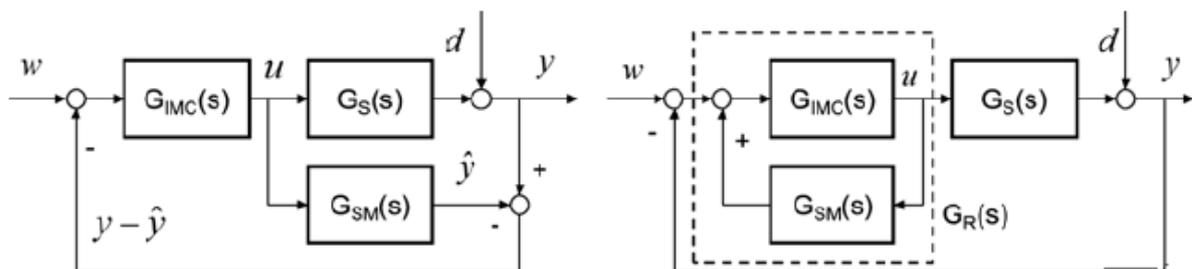


Abb. 2.9: IMC-Regelung und konventionelle Regelungsstruktur (Quelle:/5, S.167/)

In Abb. 2.9 ist der Wirkungsplan einer IMC-Regelungsstruktur zu erkennen. Auffällig ist, dass ein Modell des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke parallel zum Prozess selbst mit Stellgröße geschaltet wurde. Die über das Modell berechnete bzw. vorhergesagte Regelgröße \hat{y} wird mit der am Prozess gemessenen Regelgröße verglichen und die Differenz $y - \hat{y}$, nicht die Regelgröße y selbst, zurückgeführt. Die Übertragungsfunktion des Streckenmodells wurde mit $G_{SM}(s)$ bezeichnet, das vorliegende Regelstreckenmodell mit $G_S(s)$ und die Übertragungsfunktion des Reglers mit $G_{IMC}(s)$. Wird der Regelkreis der IMC-Regelung im linken Teil von Abb. 2.9 umgeformt und der IMC-Regler mit der inneren Rückführung zusammengefasst, entsteht der Wirkungsplan im rechten Teil der Abbildung. Mit dieser Umformung ist der Vergleich des IMC-Reglers mit der konventionellen Regelungsstruktur möglich. Der gestrichelte Teil stellt den Regler dar und wurde mit $G_R(s)$ bezeichnet [5]. Die mathematischen Beschreibungen orientieren sich dabei an [5]. Zwischen den Übertragungsfunktionen des konventionellen und des IMC-Reglers besteht nach der Umformung der folgende Zusammenhang.

$$G_R(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{SM}(s) \cdot G_{IMC}(s)} \quad (2.49)$$

$$G_{IMC}(s) = \frac{G_R(s)}{1 + G_{SM}(s) \cdot G_R(s)} \quad (2.50)$$

Ein IMC-Regler kann immer nach Gleichung (2.49) in einen konventionellen Regler umgerechnet werden.

Wird der geschlossene Regelkreis in IMC-Struktur betrachtet, gelten die folgenden Beziehungen.

$$Y(s) = \frac{G_S(s) \cdot G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s) \cdot (G_S(s) - G_{SM}(s))} \cdot W(s) + \frac{1 - G_{SM}(s) \cdot G_{IMC}(s)}{1 + G_{IMC}(s) \cdot (G_S(s) - G_{SM}(s))} \cdot D(s) \quad (2.51)$$

$$U(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 + G_{IMC}(s) \cdot (G_S(s) - G_{SM}(s))} \cdot (W(s) - D(s)) \quad (2.52)$$

Das Verhalten des IMC-Regelkreises lässt sich am besten anhand eines fehlerfreien Modells beschreiben. Im Nominalfall wird angenommen, dass die Regelstrecke vollkommen fehlerfrei ist und das Modell der Regelstrecke mit dem realen Streckenverhalten übereinstimmt. Dabei gelten die folgenden Beziehungen.

$$G_S(s) \equiv G_{SM}(s) \quad (2.53)$$

$$Y(s) = G_S(s) \cdot G_{IMC}(s) \cdot W(s) + (1 - G_S(s) \cdot G_{IMC}(s)) \cdot D(s) \quad (2.54)$$

Im Nominalfall stimmen die vorhergesagte und gemessene Regelgröße exakt überein. Die Differenz $y - \hat{y}$ ergibt einen Wert von 0 und die zurückgeführte Größe lässt sich als Schätzwert für die nichtmessbare Störgröße d auffassen. Der IMC-Regelkreis ist genau dann stabil, wenn die Regelstrecke selbst als auch der Regler stabil sind. Im Nominalfall ist anhand von Gleichung (2.54) erkennbar, dass die Regelung „perfekt“ ist. Das bedeutet, dass $y = w$ für alle Störgrößen d gilt. Dabei muss der IMC-Regler die folgende Bedingung erfüllen.

$$G_{IMC}(s) = \frac{1}{G_S(s)} \quad (2.55)$$

Die Übertragungsfunktion des IMC-Reglers muss die Inverse der Übertragungsfunktion der Regelstrecke bzw. ihres Modells sein. Die IMC-Regelungsstruktur lässt sich in der angegebenen Form nicht unmittelbar realisieren. Erstens stimmt das Modell der Regelstrecke und des realen Prozessverhaltens in der Praxis so gut wie nie genau überein und zweitens führt die Invertierung der Übertragungsfunktion des Modells der Regelstrecke im Allgemeinen auf eine nicht realisierbare Übertragungsfunktion des IMC-Reglers.

Für die Realisierung des IMC-Reglers $G_{IMC}(s)$ müssen die folgenden Punkte vorausgesetzt werden. Zum einen muss die Zählerordnung von $G_{IMC}(s)$ kleiner oder gleich der Nennerordnung sein und zum anderen muss der IMC-Regler kausal sein. Das heißt, dass der Regler die Steuergröße nur auf der Grundlage vergangener oder aktueller Messwerte bestimmen kann. Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, ist der IMC-Regler physikalisch nicht realisierbar. Werden die Bedingungen erfüllt, kann der IMC-Regler auch in eine Smith-Prädiktor-Struktur umgebaut werden, da die IMC-Struktur mit einem Smith-Prädiktor-Regler eng verwandt ist [5].

In der folgenden Abb. 2.10 wurde ein Smith-Prädiktor in IMC-Struktur dargestellt. Dabei ähnelt dieser Regelkreis der Struktur aus Abb. 2.9 auf der linken Seite mit dem Unterschied, dass ein Totzeitmodell eingefügt wurde.

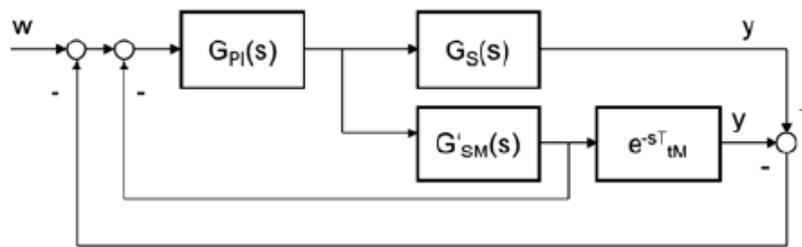


Abb. 2.10: Regelkreis mit Sm.Pr., IMC-Struktur (Quelle:/5, S.172/)

Innerhalb des Regelkreises wird die reale Regelstrecke mit Totzeit im Smith-Prädiktor aufgeteilt, in den Modellteil ohne Totzeit $G'_{SM}(s)$ und mit der Totzeit selbst. Die Totzeit wird mithilfe der rechten Schleife „aufgehoben“, indem die Totzeit durch den Addier- Subtrahier-Block korrigiert wird. Rechnerisch ist die IMC-Darstellungsform äquivalent zur Darstellung mit innerer Rückführung (siehe Abschnitt 2.4.2). Der Unterschied zwischen den einzelnen Darstellungsformen wird anhand vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung deutlich. Die Sprungantworten werden auf der kommenden Seite dargestellt. Die Übertragungsfunktionen des Reglers $G_{PI}(s)$ und der Regelstrecke $G_S(s)$ lauten:

$$G_S(s) = G'_S(s) \cdot e^{-sT_t} \quad (2.56)$$

$$G_R(s) = G_{PI}(s) \quad (2.57)$$

Die Verwendung eines PI-Reglers als Regeleinrichtung $G_{PI}(s)$ erfordert Fingerspitzengefühl. Bei Prozessen mit großen Totzeiten bezogen auf die dominierende Verzögerungszeitkonstante muss ein PI-Regler sehr langsam eingestellt und entsprechende Abstriche bei der Regelgüte in Kauf genommen werden. Die Regelgüte kann über das IMC-Prinzip deutlich verbessert werden. Dazu wird die Übertragungsfunktion der Regelstrecke in einen totzeitfreien Anteil und den reinen Totzeitanteil zerlegt. Nur die totzeitbehaftete Regelgröße y kann am realen Prozess gemessen werden. Aus dem Prozessmodell kann jedoch eine virtuelle, totzeitfreie Schätzung der Regelgröße entnommen und dem Regler zugeführt werden. Der Regler selbst kann also für den Prozess ohne Totzeitanteil entworfen und daher sehr viel schärfer eingestellt werden. Zur Kompensation unbekannter Störungen wird eine Schätzung der totzeitbehafteten Regelgröße im Modell ermittelt und mit der echt gemessenen Regelgröße verglichen. Diese Differenz wird ebenfalls auf den Regler rückgekoppelt [5].

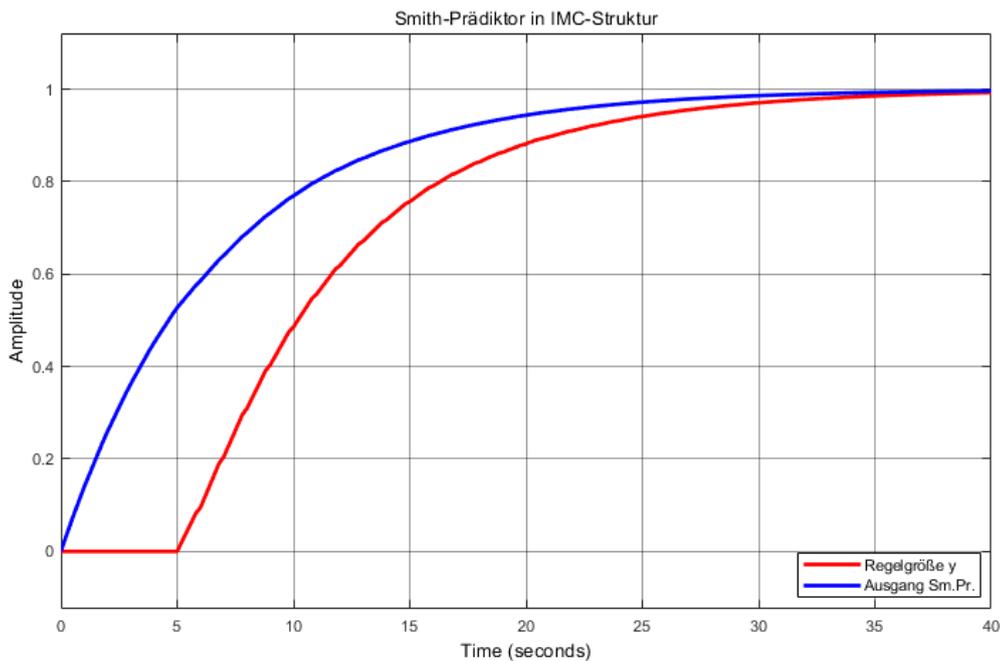


Abb. 2.11: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Darstellungsform IMC-Struktur

Werden die Sprungantworten der Regelgröße und des Ausgangs der Smith-Prädiktor-Schaltung aufgenommen, ergeben sich die in Abb. 2.11 dargestellten Verläufe. Die Totzeit der realen Regelstrecke und der Strecke im Smith-Prädiktor-Modell haben hier einen Wert von $T_t = 5s$. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Übereinstimmung des Smith-Prädiktor-Modells $G'_{SM}(s)$ mit dem realen Prozess $G_S(s)$, die rote und blaue Sprungantworten identisch sind, mit dem Unterschied, dass der Regelgrößensprung um die Totzeit verschoben ist. Der Grund für die identischen Verläufe ist, dass die Totzeit mithilfe des Addier- Subtrahier-Blocks korrigiert und nur die Sprungantwort der totzeitfreien Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ aufgenommen wird. Die identischen Verläufe der Sprungantworten sind nur möglich, wenn die vorliegende Regelstrecke und die Totzeit genau bekannt sind. Eine ungenaue Kenntnis würde zu Modellabweichung und zu schlechteren Regelungsergebnissen führen.

Die IMC-Darstellungsform hat einen entschiedenen Vorteil gegenüber der Darstellungsform mit innerer Rückführung. Bei der Form mit innerer Rückführung klingt der Ausgang des Smith-Prädiktors immer auf den Wert von 0 ab. In der IMC-Struktur hingegen wird der Ausgang auf den eingestellten Sollwert zurückgeführt. Diese Eigenschaft stellt einen entschiedenen Vorteil für die Implementierung dieser Variante in Prozessleitsystemen dar. Hier werden meist Standard-Reglermodule verwendet z.B. für die PID-Regler. Diese Module verfügen über Faceplates, die zu einem Bedienobjekt vereinte Detailbilder von Reglern, Motoren, Ventilen und Messstellen darstellen. Sie sind mit dem SPS-Programm verschaltet und lassen sich durch einen Mausklick aus dem Prozessbild öffnen. Zu jedem Faceplate gibt es die dazugehörigen Funktionen in der SPS-Programmierung, die die Automatisierungsaktionen ausführt. Sie ermöglichen den Bedienern, dem Wartungspersonal oder den Technologen, alle für sie notwendigen Anlagenteile leicht und komfortabel bedienen und beobachten zu können.

Für die Anwender ist es sehr irritierend, wenn der Wert vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung einen Wert von 0 anzeigt, obwohl der Prädiktor angeschaltet ist. In der praktischen Umsetzung stellt das ein Problem dar. Das Problem besteht darin, dass nicht die tatsächliche Prozessgröße, sondern eine „veränderte“ Größe angezeigt wird. Das kann bei Grenzwertüberschreitungen oder Stelleingriffen problematisch werden, wenn diese Eingriffe anhand der geregelten Prozessgröße getroffen werden. Es könnte beispielsweise ein Ventil innerhalb einer Anlage geschlossen werden, weil die „veränderte“ Prozessgröße einen Grenzwert überschreitet. Für die praktische Umsetzung eines Smith-Prädiktors ist die Darstellungsform mit IMC-Regler geeigneter als die Darstellungsform mit innerer Rückführung, da die IMC-Struktur die „tatsächliche“ Prozessgröße anzeigt.

Für Simulationszwecke ist es dagegen sehr schwierig, eine stufenlose Implementierung des Prädiktors in IMC-Struktur zu implementieren. Die Smith-Prädiktor-Schaltung aus Abb. 2.10 hat zwei Eingänge in die Prädiktor-Schaltung. Wenn zwei Eingangsstränge vorhanden sind, müssen hier zwei Gain-Blöcke für die stufenlose Einstellung der Verstärkung bzw. des Einflussgrades des Prädiktors eingefügt werden. Diese beiden Gain-Elemente müssen dabei exakt aufeinander abgestimmt werden und im richtigen Verhältnis stehen, damit der Einfluss des Smith Prädiktors nicht verfälscht wird. Dazu müsste zunächst ein Zusammenhang zwischen den beiden Eingangssträngen gefunden und richtig implementiert werden.

Wird die Darstellungsform mit innerer Rückführung aus Abschnitt 2.4.2 verwendet, ist die Implementierung und die Simulation des stufenlosen Smith-Prädiktors wesentlich unproblematischer. Die Schaltung hat einen Eingangsstrang und es wird nur ein Gain-Element benötigt. Aus diesem Grund wird für die weiteren Untersuchungen die Struktur mit innerer Rückführung verwendet. Die IMC-Struktur hat Vorteile und wird auch in Prozessleitsystemen implementiert. Hier ist aber keine stufenlose Verstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors vorhanden. Der Prädiktor ist immer zu 100% angeschaltet oder vollständig ausgeschaltet. Die IMC-Darstellungsform kann modifiziert werden, indem ein oder zwei Filter eingebaut werden. Dabei entsteht der sogenannte „Filtered Smith Predictor“, der im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

2.4.4 Filtered-Smith-Predictor

Im vorherigen Abschnitt 2.4.3 wurde die Darstellungsform eines Smith-Prädiktors in IMC-Struktur vorgestellt. Diese „Internal Mode Control“ Darstellungsform ermöglicht durch das Vorhersagen der vorliegenden Prozessgröße eine deutlich aggressivere Einstellung des verwendeten Reglers. Eine große Schwachstelle bei dieser und allen anderen Smith-Prädiktor-Strukturen sind Modellabweichungen. Sie können infolge einer ungenauen Kenntnis des vorliegenden Prozesses oder Totzeit entstehen und die Performance des Regelkreises deutlich verschlechtern. Im schlimmsten Fall ist eine vollständige Destabilisierung des gesamten Regelkreises möglich. Bei zu großen mathematischen Abweichungen ist das Auftreten von instabilen Verhalten durchaus möglich, wenn das reale Prozessmodell und das im Smith-Prädiktor implementierte Modell stark voneinander abweichen.

Eine Lösung für das Minimieren von Abweichungen ist die möglichst exakte Kenntnis des vorliegenden Prozessmodells und der Totzeit. In der Praxis ist das häufig nicht möglich. Abhilfe schaffen Filter, die in die Smith-Prädiktor-Schaltung eingebaut werden. Wenn in die IMC-Struktur ein Filter eingefügt wird, entsteht der sogenannte „Filtered-Smith-Predictor“ (FSP). In der folgenden Abbildung 2.12 ist der Regelkreis des FSP dargestellt.

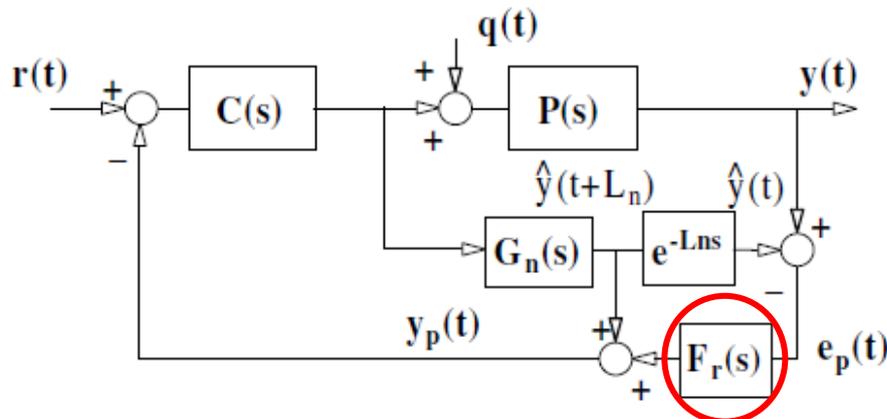


Abb. 2.12: Filtered-Smith-Predictor (Quelle: [5], S.166/)

Im rot hervorgehobenen Bereich ist der neu eingefügte Filter $F_r(s)$, auch Prädiktionsfilter genannt zu erkennen. Innerhalb des Regelkreises trägt die Regeleinrichtung die Bezeichnung $C(s)$, die reale Regelstrecke mit Totzeit $P(s)$, das totzeitfreie Modell der Regelstrecke $G_n(s)$ und das Totzeitmodell die Bezeichnung $e^{-L_n s}$. Die Implementierung eines Filters soll die Robustheit des Regelkreises steigern, wenn die erfasste Totzeit nicht mit der real vorliegenden Totzeit übereinstimmt. Modellabweichungen können allerdings zu instabilen Verhalten führen und den gesamten Regelkreis sehr negativ beeinflussen [10].

Am Anfang der Simulationszeit von $t = t_0$ sind die Abweichungen zwischen dem realen Modell und dem geschätzten Modell $e_p(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ gleich 0. Erst, wenn die Simulation zum Zeitpunkt $t = t_0 + x$ startet, werden die auftretenden Abweichungen auf den Regler zurückgeführt. Dieses „fehlerbehaftete“ Signal verursacht in der „closed-loop“ (inneren Schleife) eine Instabilität. Wenn dieser Fehler aber vor der Rückführung auf den Regler erfasst und korrigiert wird, kann die innere Schleife des Regelkreises stabil gehalten werden. Hier kommt der Prädiktionsfilter $F_r(s)$ ins Spiel, der meist in Form eines Tiefpassfilters verwendet wird [11]. Er hat die Aufgabe, Modellabweichungen und Überschwingen zu unterbinden. Beim Entwerfen des Filters muss besonders auf die Robustheit geachtet werden, denn wenn die Auslegung des Filters nicht optimal auf das vorhandene Modell abgestimmt ist, bewirkt die Implementierung von $F_r(s)$ das Gegenteil dessen, was es zu vermeiden galt. Der falsch abgestimmte Filter verursacht ungewollte Abweichungen, die über die Rückführung an den Regler zurückgeführt werden. Im Nominalfall, wenn das geschätzte Modell mit dem vorliegenden Prozessmodell übereinstimmt, hat der Filter $F_r(s)$ keinerlei Einfluss auf den Regelkreis. Wenn keine Abweichungen von $e_p(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ vorliegen, muss der Filter nicht eingreifen und das rückgeführte Signal korrigieren. Dabei ist aber zu beachten, dass die Implementierung eines Filters die Antwort der Smith-Prädiktor-Schaltung verlangsamt [10].

In die FSP-Struktur kann neben einem Tiefpassfilter ein weiterer Filter eingebaut werden. In der folgenden Abb. 2.13 ist das Blockschaltbild mit einem zusätzlichen Sollwertfilter dargestellt.

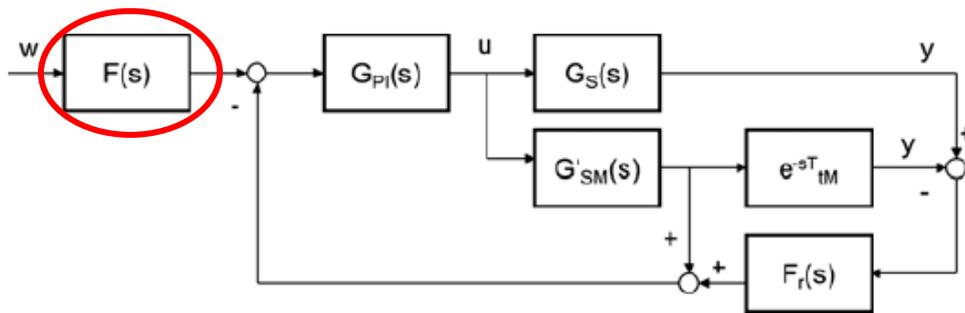


Abb. 2.13: Smith-Prädiktor-Regler mit Sollwert u. Prädiktionsfilter (Quelle:/5, S.175)

Es besteht die Möglichkeit, das Sollwertsignal dynamisch so zu verändern, dass ein Überschwingen der Regelung vermieden wird. Die Übertragungsfunktion $F(s)$ wird obwohl es im Grunde keine Regelung ist vereinzelt auch als Führungsregler bezeichnet. Die zutreffendere Bezeichnung ist Vorfilter. Das Ziel von $F(s)$ ist, den Regelkreis bei einem Sollwertsprung nicht so stark anzuregeln, dass es zu starkem Überschwingen kommt. Mithilfe des Filters können die Sollwertänderungen so gedämpft werden, dass der Regelkreis der gedämpften Sollwertänderung „folgen“ kann. Dadurch wird vermieden, dass er bei einer abrupten Sollwertänderung bei der Korrektur über das Ziel hinauschießt. Diese Art von Filter wird vor allem dann eingesetzt, wenn der Regler für optimales Störverhalten eingestellt wurde und schnelle Sollwertänderungen zu störendem Überschwingen führen. Oft werden durch solche Vorfilter auch Probleme mit Sättigungen der Stellglieder vermieden. Wird ein Sollwert- und Prädiktionsfilter eingefügt, können zwei große Vorteile der Schaltung genutzt werden. Zum einen lassen sich das Führungs- und Störverhalten des Regelkreises unabhängig voneinander und unter Beachtung von Forderungen an die Robustheit entwerfen. Zum anderen ermöglicht die geeignete Wahl der Filterstruktur die Anwendung von integrierenden und instabilen Regelstrecken. Für die optimale Regelung ist der korrekte Entwurf der einzelnen Regler ausschlaggebend- Rechnerisch sind die Darstellungsformen der inneren Rückführung und der IMC-Struktur gleich. Bei der FSP-Form hingegen ist der mathematische Zusammenhang durch das Einfügen von Filtern leicht verändert [5].

Der Ausgang des Prädiktors wird auf den eingestellten Sollwert geführt. Die FSP-Struktur ist eine modifizierte IMC-Struktur mit eingefügten Filtern und die stufenlose Implementierung in MATLAB Simulink ist aus diesem Grund problematisch. Die Smith-Prädiktor-Schaltung verfügt ebenfalls über zwei Eingangsstränge, die zwei Gain-Elemente benötigen. Für die stufenlose Implementierung, Simulation und Darstellung der Sprungantworten wurde für die kommenden Untersuchungen die Darstellungsform aus Abschnitt 2.4.2 mit innerer Rückführung ausgewählt. Bei dieser Struktur ist ein Eingangsstrang der Prädiktor-Schaltung vorhanden. Es muss somit nur ein Gain-Element eingefügt werden und die stufenlose Verstellung der Verstärkung bzw. des Einflussgrades des Smith-Prädiktors ist damit besser realisierbar. In den folgenden Abschnitten werden neben dem Regelkreis mit implementierter Smith-Prädiktor-Schaltung die Regleranforderungen, die Möglichkeit der stufenlosen Implementierung und die untersuchten Szenarien erläutert.

3. Methodik

3.1 MATLAB

Das im Jahre 1984 in den USA vom amerikanischen Unternehmen „The MathWorks“ herausgegebene kommerzielle Softwaretool MATLAB ermöglicht, mathematische Problemstellungen mithilfe numerischer Berechnungen lösen und visualisieren zu können. Der Name MATLAB leitet sich aus den Begriffen „**MAT**rix **LAB**oratory“ ab. Im Gegensatz zu Computeralgebrasystemen (CAS) dient MATLAB zur numerischen Lösung von Problemen. Es enthält den Live-Editor zum Erstellen von Skripten, die Programmcode, Ausgaben und formatierten Text in einem ausführbaren Notebook kombinieren. MATLAB enthält außerdem das zeitgesteuerte, grafikorientierte Softwaretool und Simulationsprogramm Simulink, das als Unterprogramm von MATLAB implementiert wurde. Es dient zur Modellierung von technischen, physikalischen, finanzmathematischen und anderen Systemen. Simulink ist ähnlich wie das ebenfalls vorhandene Unterprogramm Stateflow eine Art Zusatzprodukt, das aber das Hauptprogramm MATLAB zum Ausführen der Simulationen braucht. Die blockorientierte Darstellungsweise von Simulink ermöglicht das Erstellen von zahlreichen komplexen Systemen und wird in den Abschnitten 3.4 ff. für das Entwerfen von verschiedenen Regelkreisen und graphischen Oberflächen verwendet. Um die jeweiligen Regelkreise und Modelle erstellen zu können, werden die gewünschten Blöcke aus der Bibliothek, auch „Simulink Library Browser“ genannt herausgenommen und in das angelegte Modell eingefügt und parametrisiert. Der Datenfluss zwischen den verwendeten Blöcken wird grafisch über Verbindungslinien realisiert. Ein so erstelltes System kann innerhalb von Simulink simuliert werden. Für die numerische Simulation des erstellten Regelkreises oder Modells werden verschiedene Lösungsverfahren (engl. "Solver") eingesetzt.

3.2 Hintergrundinformationen zur Untersuchung des Smith-Prädiktors

Die stufenlose Implementierung des Smith-Prädiktors mit innerer Rückführung wird anhand von unterschiedlichen Szenarien untersucht, die neben der Anpassungsvorschrift und dem Experteninterview im Folgenden näher erläutert werden.

Anpassungsvorschrift:

Für die Untersuchungen ab Abschnitt 4. wurde eine Anpassungsvorschrift definiert. Sie legt fest, wie die verwendete Regeleinrichtung angepasst bzw. parametrisiert werden soll, damit ein stufenlos einblendbarer Smith-Prädiktor realisiert werden kann. Die automatische Anpassung des verwendeten PI-Reglers innerhalb des Regelkreises wird mithilfe der Reglerverstärkung K_r realisiert. Dabei soll die Bedingung einer Überschwingweite von 20% des Regelgrößensprungs bei sämtlichen eingestellten Verstärkungen V des Smith-Prädiktors erreicht werden. Um die prozentuale Einflussnahme V der Prädiktor-Schaltung stufenlos realisieren zu können, wird eine Lookup-Table verwendet. Für die Erklärung der stufenlosen Implementierung siehe Abschnitt 4.2. Die Reglerverstärkung des Smith-Prädiktors wird anhand der gewählten Schrittweite von 5%-Schritten von V ermittelt und für die Lookup-Table aufgenommen.

Verstärkungsformen:

Vor der Ermittlung der Werte von K_r in 5%-Schritten musste zunächst eine Verstärkungsform ausgewählt werden. Sie gibt an, wie sich der Einflussgrad des Smith-Prädiktors nach der Einstellung von V ändert. Dazu wurden unterschiedliche Verstärkungsformen des Prädiktors in den Regelkreis implementiert. Die Verstärkung V bzw. der prozentuale Einfluss des Prädiktors auf den Regelkreis soll eingestellt werden. Ob der Einfluss bei der Einstellung oder Verstellung der Verstärkung sprunghaft erfolgt, oder in Form einer PT_1 -förmigen Sprungantwort stellt den ersten Teil der Untersuchungen da. Es besteht auch die Möglichkeit, die Verstärkung rampenförmig bis zum eingestellten Maximalwert hochzufahren. Nach der Vorstellung der drei Verstärkungsformen werden alle drei Varianten verglichen, bewertet und anschließend in Abschnitt 4.4.4 eine für die kommenden Untersuchungen ausgewählt.

Verstärkungsänderungen ohne Störung:

Nach der Auswahl der Verstärkungsform folgt die Untersuchung der Verstellung der Verstärkung innerhalb und außerhalb des Ausregelvorgangs des Führungsgrößensprungs. Dazu wird die Verstärkung bei einer Simulationszeit von $t = 25s$ oder $t = 200s$ um einen bestimmten Wert nach oben oder nach unten verstellt. Die Ergebnisse werden anhand von Sprungantworten und ermittelten Werten der Anregelzeit, Ausregelzeit und Reglerverstärkung dargestellt, ausgewertet und anschließend bewertet.

Störungsfall mit / ohne Verstärkungsänderungen:

Die Robustheit des Smith-Prädiktors unter verschiedenen Rahmenbedingungen spielt für die praktische Umsetzung der Schaltung eine große Rolle. Deswegen wird eine Störung mit einer Störstrecke in den Regelkreis eingefügt und der Einsetzzeitpunkt der Störung variiert. Zunächst wird das Auftreten einer Störung bei $t = 25s$ im einschwingenden Zustand simuliert und anschließend der Einsetzzeitpunkt der Störung auf $t = 200s$ in den ausgeschwungenen Zustand gelegt. Die Verstärkung wird dabei am Anfang der Simulationszeit auf einen bestimmten Wert eingestellt und konstant bis zum Ende der Simulationszeit auf diesem Wert belassen und nicht verändert, trotz einsetzender Störung.

Verstärkungsänderungen im Störungsfall folgen nach den Untersuchungen ohne Veränderungen von V . Der Einflussgrad des Smith-Prädiktors wird bei einer Veränderung von V im einschwingenden sowie im ausgeschwungenen Zustand nach oben oder unten verstellt mit zusätzlich vorliegender Störung. Die Sprungantworten des Regelkreises werden bei einer Nichtanpassung und Anpassung der Reglerparameter aufgenommen und ausgewertet.

Ausschalten des Smith-Prädiktors:

Es wird ein vollständiges Ausschalten des Prädiktors im einschwingenden und ausgeschwungenen Zustand simuliert. Die Verstärkung des Smith-Prädiktors wird bei $t = 25s$ im einschwingenden oder $t = 200s$ im ausgeschwungenen Zustand schlagartig auf einen Wert von $V = 0\%$ gestellt. Das Einfügen einer Störung entweder im einschwingenden oder ausgeschwungenen Zustand folgt im Anschluss. Auch hier werden die Simulationsergebnisse in Form von Graphen und Werten der Anregelzeit, Ausregelzeit und Reglerverstärkung aufgenommen. Außerdem wird auf den Vorteil des Herausnehmens des Smith-Prädiktors aus dem Regelkreis eingegangen.

Modellabweichungen:

In Abschnitt 4.8. wird die größte Schwachstelle des Smith-Prädiktors untersucht, Modellabweichungen innerhalb des Regelkreises, die durch eine ungenaue Erfassung der vorliegenden Regelstrecke entstehen können. Modellabweichungen können einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis mit Prädiktor haben und im schlimmsten Fall, den Regelkreis vollständig destabilisieren. Die untersuchten Modellabweichungen liegen in Form einer Abweichung der Zeitkonstanten, der Totzeiten und der implementierten Regelstrecken vor. Die Zeitkonstanten der zwei PT_1 -Glieder im Smith-Prädiktor-Modell werden zunächst jeweils auf $T_D = 4s$ und anschließend auf $T_D = 6s$ gestellt. Die Totzeitabweichungen werden durch das Verstellen der Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell von $T_t = 10s$ auf $T_t = 8s$ bzw. $T_t = 12s$ simuliert. Die Zeitkonstanten der realen Regelstrecke und des Smith-Prädiktor-Modells stimmten bei den Totzeitabweichungen überein. Die letzten untersuchten Modellabweichungen in Form von Regelstreckenabweichungen sind in Abschnitt 4.8.3. zu finden. Dabei wird die Ordnung der im Smith-Prädiktor-Modell implementierten Regelstrecke verändert und die Einflüsse der Prädiktor-Schaltung bei unterschiedlichen Einflussgraden V untersucht.

Annäherung der Totzeit:

Die Implementierung eines Totzeitgliedes ist in der Praxis meist nicht möglich. Aus diesem Grund werden Annäherungen der vorliegenden Totzeit verwendet. In Abschnitt 4.9. wird eine Annäherung der Totzeit in Form einer Reihenschaltung von Verzögerungsgliedern 1. Ordnung verwendet. Dabei handelt es sich wie bei den vorher genannten Abweichungen um eine Modellabweichung zwischen der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell.

Experteninterview / Implementierungsschritte:

In Abschnitt 4.10. wird die Praxistauglichkeit der untersuchten stufenlosen Implementierung des Smith-Prädiktors anhand eines Experten-Interviews mit Dr.-Ing. Wolfgang Trümper bewertet. Es werden die Vor- und Nachteile sowie Verbesserungsvorschläge und Implementierungsmöglichkeiten dargestellt. Außerdem werden alle notwendigen Schritte für eine Implementierung des stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktors in chronologischer Reihenfolge in Abschnitt 4.10.1 aufgeführt.

3.3 Hintergrundinformationen zur stufenlosen Implementierung

Eine stufenlose Verstellung der implementierten Smith-Prädiktor-Schaltung erfordert neben einer Anpassungsvorschrift auch eine Möglichkeit der automatischen situationsbedingten Anpassung des verwendeten Reglers. Die Einstellung der Verstärkung bzw. des Einflusses des Smith-Prädiktors soll dabei stufenlos möglich sein. Die Grundidee ist, dass der Anwender den Smith-Prädiktor nach Belieben rein- oder raustunen kann. Der prozentuale Einfluss der Schaltung soll eingestellt und das Regelungsergebnis entsprechend beeinflusst werden können. Dazu muss die Implementierung stufenlos erfolgen, damit keine Sprünge das Regelungsergebnis negativ beeinflussen und die beste Leistung der Schaltung ermöglicht wird.

Die Anpassungsvorschrift wurde bereits in Abschnitt 3.2. genannt. Die Sprungantworten der Regelgröße sollen unabhängig von der prozentual eingestellten Verstärkung des Smith-Prädiktors eine Amplitude von 1,2 bzw. eine Überschwingweite von 20% aufweisen. Die Amplitude und Überschwingweite bezieht sich auf den Ausregelvorgang des FührungsgrößenSprungs, da der Regler anhand des Führungsverhaltes eingestellt wurde. Der Toleranzbereich von $1,2 \pm 5\%$ der Amplitude soll dabei nicht verlassen werden.

Dazu muss eine möglichst geringe Schrittweite für die Definition der Reglerverstärkungen gewählt werden. Der verwendete Regler wird anhand der Reglerverstärkung K_r eingestellt. Die Nachstellzeit wird in Abschnitt 4.1. berechnet und als Faktor $1/T_n$ in den I-Anteil des Reglers eingefügt, um die vollständige Beschreibung der Reglereinrichtung zu ermöglichen. Dabei wurde die entsprechende Reglerverstärkung bei einer Verstärkung des Smith-Prädiktors von $V = 0\% \dots 100\%$ experimentell in 5% Schritten ermittelt und für die Weiterverarbeitung hinterlegt. Eine Schrittweite von 5% ermöglicht die stufenlose Implementierung mit der Einhaltung der Bedingung von einer Amplitude von $1,2 \pm 5\%$ bei der vorliegenden Regelstrecke und Totzeit.

Für die Implementierung wird eine Lookup-Tabelle verwendet. Sie ermöglicht aufgrund der linearen Interpolation eine stufenlose Verstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors. Für die genaue Erklärung dieser Implementierungsvariante siehe Abschnitt 4.2. Die Verwendung einer Lookup-Table erfordert einen geschlossenen Regelkreis mit eingefügter Smith-Prädiktor-Schaltung. Im folgenden Abschnitt 3.4 wird der für alle Untersuchungen verwendeter Regelkreis dargestellt.

Die stufenlose Implementierung einer Prädiktor-Schaltung bringt Vorteil mit sich, die im Laufe der Untersuchungen ab Abschnitt 4.1 aufgezeigt werden. Für die besten Regelungsergebnisse ist die richtige Parametrierung der verwendeten Regeleinrichtung von entscheidener Bedeutung, denn wenn der Regler falsch oder nicht optimal eingestellt wurde, können die Vorteile der Prädiktor-Schaltung nicht ausgenutzt werden. Die stufenlose Verstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors kann nur dann sicher erfolgen, wenn der Regler sich automatisch der vorliegenden Situation anpasst. Die Wichtigkeit der Anpassung wird vor allem beim Vorliegen von Modellabweichungen, die ab Abschnitt 4.8 untersucht werden sichtbar. Für die Untersuchungen eines stufenlosen Smith-Prädiktors wird zunächst ein Modell der Regelstrecke benötigt. Dieses wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

3.4 Modell der Regelstrecke

Für die in Abschnitt 3.2 genannten Untersuchungen wird ein Regelkreis benötigt. Neben der realen Regelstrecke sollte er auch über eine Störstrecke und eine Regeleinrichtung verfügen. In der folgenden Abbildung ist der für die kommenden Untersuchungen entworfene Regelkreis dargestellt.

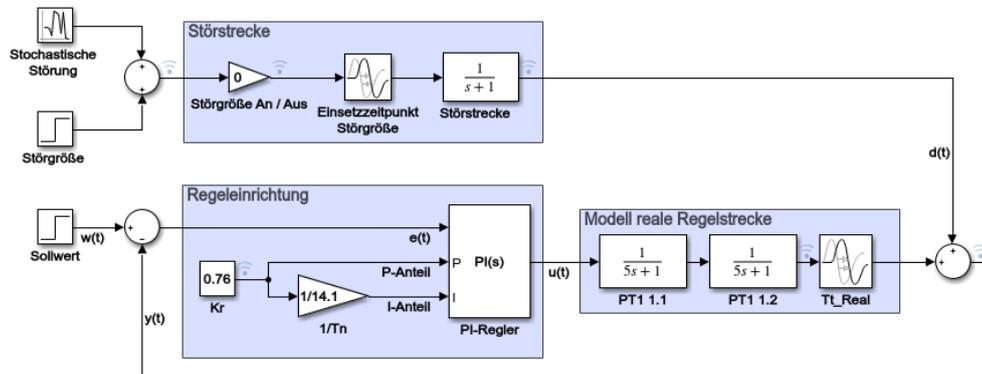


Abb. 3.1: Modell der Regelstrecke

Der in Abb 3.1 dargestellte geschlossene Regelkreis verfügt über eine Regelstrecke in Form von zwei PT_1 -Gliedern und einer Totzeit mit der Bezeichnung T_{t_Real} . Die Totzeit hat einen Wert von $T_t = 10s$ und die Zeitkonstante hat bei jedem der beiden PT_1 -Glieder einen Wert von $T_D = 5s$. Die Summe der Zeitkonstanten ist bei diesem Regelkreis so groß wie die vorliegende Totzeit. Wird die Übertragungsfunktion der realen Regelstrecke aufgestellt, ergibt sich die folgende Funktion.

$$G(s) = \left(\frac{K_1}{(T_{D1} \cdot s + T_{s1})} \cdot \frac{K_2}{(T_{D2} \cdot s + T_{s2})} \right) \cdot e^{-sT_t} \quad (3.1)$$

Werden die entsprechenden Werte der Zeitkonstanten, Verstärkungen und der Totzeit eingesetzt, ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion.

$$G(s) = \left(\frac{1}{(5s + 1)} \cdot \frac{1}{(5s + 1)} \right) \cdot e^{-10s} \quad (3.2)$$

Die beiden PT_1 -Glieder lassen sich auch zu einem PT_2 -Glied zusammenfassen. Das ist aber nur möglich, wenn das PT_2 -Glied über eine Dämpfung von $D = 1$ verfügt [1]. Die 1 bzw. die 2 nach der Bezeichnung PT steht für die Ordnung des Gliedes, in diesem Fall handelt es sich um zwei Systeme 1. Ordnung oder um ein System 2. Ordnung.

Das Verhältnis der vorliegenden Totzeit zur Summe der Zeitkonstanten ist in der Praxis in jeglichen Varianten zu finden und typischerweise 1:1. Auch ein Verhältnis von größeren Totzeiten zur Summe der Zeitkonstanten ist möglich.

Das vorliegende Verhältnis von 1:1 stellt den Grenzfall dar, der dann vorliegt, wenn die Totzeit eine „echte“ Totzeit ist oder eine, die sich aus einer Vielzahl von Verzögerungen ergibt. Dabei muss die Totzeit mindestens so groß sein, wie die Verzögerungszeit bzw. die Zeitkonstante der Prozesstrecke. Liegt ein solches Verhältnis vor ist die Implementierung eines Smith-Prädiktors sinnvoll. Ein Beispiel für das Verhältnis von 1:1 ist bei Temperaturregelungen zu finden. Diese Regelungen haben eigentlich keine Totzeiten, wenn aber das betrachtete Medium durch sehr viele speichernde Elemente wie große Öfen mit dicken Außenmauern, dicke Hülzen oder Stahlrohre fließen muss bis es den Bestimmungsort erreicht, dann entsteht dadurch gewissermaßen eine Totzeit. Diese Totzeit besitzt dann meist annähernd denselben Wert wie die Zeitkonstante T_D .

Der in Abb. 3.1 dargestellte Regelkreis hat eine Störgröße $d(t)$ und eine Störstrecke. Um die Störgröße darzustellen wurde in MATLAB das Sprungelement „Step-Function“ verwendet. Das Element gibt zu einem voreingestellten Zeitpunkt den Einfluss der Störgröße auf den Regelkreis vor. Aber eine sprunghafte Veränderung der Störgröße ist in der Realität kaum möglich und deshalb wurde zusätzlich zu der Störgröße eine Störstrecke eingefügt. Diese Strecke wurde in Form eines PT_1 -Gliedes mit einer Zeitkonstante von $T_D = 1$ gewählt. Da die Veränderungen der Störgröße realistisch annähernd rampenförmig zu finden sind, ist das mit der Sprungantwort eines PT_1 -Gliedes näherungsweise beschreibbar. Außerdem wird eine Addition mit einer stochastischen Störung verwendet, um die Störung realistischer zu gestalten. Der Block der stochastischen Störung erzeugt zufällige Änderungen der Störgröße und diese werden nach der Addition mit dem Step-Function-Signal auf die Störstrecke geleitet. Bei der Störstrecke wird aber im Gegensatz zur Regelstrecke keine Verzögerungszeit verwendet, weil die Störgröße meist schneller wirkt als die Stellgröße. Wird die Übertragungsfunktion der Störstrecke aufgestellt, ergibt sich die folgende Funktion.

$$G_{Störung}(s) = \frac{K}{(T_D \cdot s + T_s)} \quad (3.3)$$

Wird die vorliegende Zeitkonstante T_D und Verstärkung K und T_s eingesetzt, ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion.

$$G_{Störung}(s) = \frac{1}{(s + 1)} \quad (3.4)$$

Für die Regelung wird ein Regler mit Proportional- und Integralanteil (PI-Regler) verwendet. Das P-Glied verstärkt die Eingangsgröße und das I-Glied verstärkt die Summe und integriert die Regelabweichung. Bei der Verwendung des PI-Reglers werden die Eigenschaften des P- und I-Gliedes kombiniert. Die richtige Parametrierung des Reglers ist von großer Bedeutung, wenn ein Smith-Prädiktor in den Regelkreis eingefügt wird, denn der Prädiktor ermöglicht wesentlich höhere Reglereinstellungen. Erfolgt die Einstellung des verwendeten PI-Reglers nur über die Reglerverstärkung, wird die Nachstellzeit T_n vernachlässigt. Sie wurde im Rahmen der folgenden Anpassungsvorschrift ermittelt und ist auf die verwendete Regelstrecke angepasst.

Die Nachstellzeit, die bei jeder Regelstrecke unterschiedlich ist, wurde anhand des Einstellungsverfahrens von Chien, Hrones und Reswick berechnet (siehe Abschnitt 4.1) und als Faktor $1/T_n$ in den I-Anteil des Reglers eingefügt. Der I-Anteil wird mithilfe der Reglerverstärkung angepasst, weil sich der Wert von K_r sowohl auf den P- als auch auf den I-Anteil identisch multiplikativ auswirkt. Der Wert von K_r ändert sich abhängig von der eingestellten Verstärkung des Smith-Prädiktors. Damit ändert sich auch der Einfluss der Integralzeit, da der Wert der Reglerverstärkung auf den Faktor $1/T_n$ geführt und mit $1/T_n$ multipliziert wird. Nach der Multiplikation mit dem Faktor $1/T_n$ wird das Signal in den PI-Reglerblock geführt. Je größer der Wert von K_r , desto größer wird der Einfluss des I-Anteils.

In Abb. 3.1 wurde die Reglerverstärkung K_r mithilfe eines „Konstanten-Blocks“ realisiert. Im nächsten Abschnitt 3.5 wird dieser Block durch eine Lookup-Table ersetzt. Die Implementierung dieser Herangehensweisen soll die stufenlose Verstellung der Verstärkung der Smith-Prädiktor-Schaltung ermöglichen.

3.5 Regelkreis mit Smith-Prädiktor

Für die Implementierung einer stufenlosen Einstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors wird ein Modell der Regelstrecke mit Smith-Prädiktor benötigt. Innerhalb dieses Modells sollen alle Berechnungen und das Erfassen der betrachteten Größen t_{an} , t_{aus} , Amplituden, Überschwingweite, Toleranzbereiche, Reglerverstärkung K_r , Simulationszeit, Störgrößeneinflüsse und die Smith-Prädiktor-Verstärkung automatisch erfolgen. Aus diesem Grund erweitert sich das Modell aus Abschnitt 3.4 um eine Vielzahl von Blöcken, Anzeigen, Funktionen und Einstellungsmöglichkeiten. Das modifizierte Modell des Regelkreises ist in der folgenden Abb. 3.2 zu sehen.

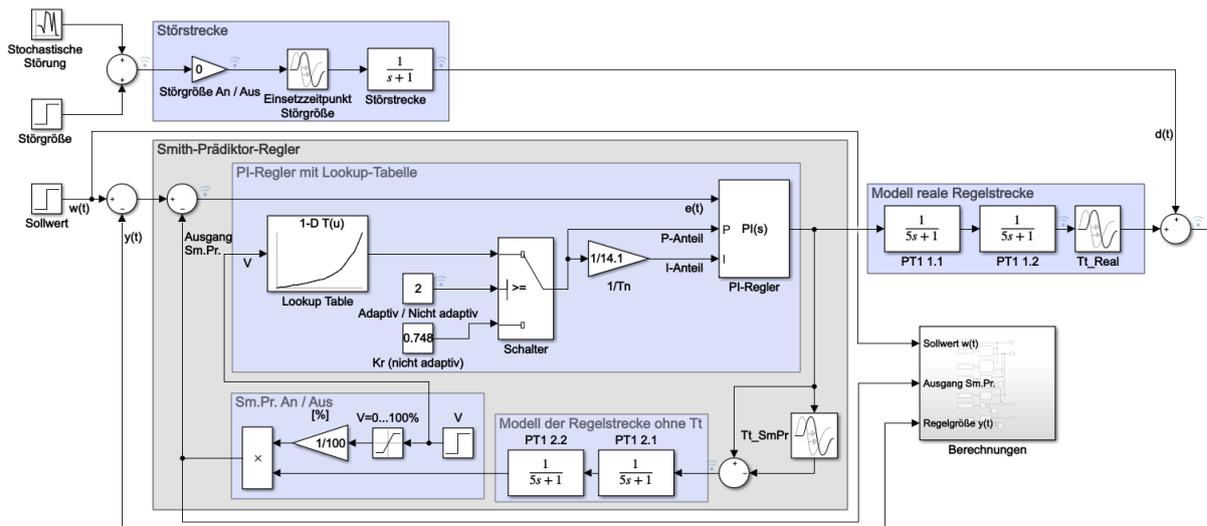


Abb. 3.2: Regelkreis mit Smith-Prädiktor-Schaltung mit innerer Rückführung

Das dargestellte Blockschaltbild steht in direkter Verbindung mit der dazu erstellten grafischen Bedienoberfläche, die in Abschnitt 3.6 vorgestellt wird. Um die nötigen Werte, Daten und Verläufe für die Bedienoberfläche aufnehmen zu können, wurde das modifizierte Modell des Regelkreises direkt mit der Oberfläche, auch „Dashboard“ genannt, verbunden. Alle ermittelten Werte werden direkt an sie gesendet und können vom Bediener anhand von Anzeigen und Sprungantworten eingesehen werden. Die Grundlage für das komplexe Modell aus Abb.3.2 ist ein geschlossener Regelkreis mit einem Modell der realen Regelstrecke, einem PI-Regler, Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung, Störgröße und einer Störstecke. Die Zeitkonstanten und Totzeiten stimmen bei der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell überein und werden erst in Abschnitt 4.8. verändert, um den Einfluss von Modellabweichungen auf den Regelkreis darzustellen.

Der verwendete PI-Regler wird hier in Form eines MATLAB-Blocks verwendet. Die Werte des P- und I-Anteils werden extern definiert und als Input in den Reglerblock geführt. Die Parametrisierung der Reglerverstärkung erfolgt anhand einer Lookup-Table, die den Wert von K_r abhängig von der eingestellten Verstärkung V berechnet. Dieser Wert wird im P-Anteil direkt und im I-Anteil zunächst mit dem Faktor $1/T_n$ multipliziert und anschließend als Input-Signal in den Reglerblock gesendet.

Die Lookup-Table ermöglicht die stufenlose Einstellung des Smith-Prädiktors mithilfe der linearen Interpolation. Die Verstärkung der Smith-Prädiktor-Schaltung ist von $V = 0\% \dots 100\%$ einstellbar. Ein „Saturation-Block“ verhindert die Einstellung von Verstärkungen von $V < 0\%$ oder $V > 100\%$. Wird eine Verstärkung größer 100% oder kleiner 0% ausgewählt, wird der jeweilige Grenzwert von $V = 0\%$ oder $V = 100\%$ automatisch eingestellt.

Im oberen Teil des Modells ist die Störstrecke in Form eines PT_1 -Gliedes, die genau wie die Totzeitglieder über einen Delay-Block, der den Einsatzzeitpunkt der Störung vorgibt zu erkennen. Wenn das ebenfalls eingefügte Gain-Element (Störgröße An / Aus) auf den Wert von 1 gesetzt wird, ist die Störstrecke aktiv und nimmt Einfluss auf den Regelkreis abhängig vom gewählten Einsatzzeitpunkt t . Besitzt das Gain-Element den Wert von 0, ist die Störstrecke nicht aktiv und hat keinerlei Einfluss auf den Regelkreis. Die Störgröße liegt in Form einer Step-Funktion und einer stochastischen Störung vor. Die Addition der beiden Störgrößensignale werden auf die Störstrecke weitergeleitet und wenn diese aktiv ist (Gain-Element „Störgröße An / Aus“ = 1) auf den rechten Additionsblock im Regelkreis weitergeleitet.

Im rechten Teil des Modells ist ein Subsystem mit der Bezeichnung „Berechnungen“. Es enthält sämtliche Berechnungen der wichtigsten Größen. Innerhalb des Subsystems werden beispielsweise die Anregel- sowie Ausregelzeit mithilfe von Stateflow-Blöcken berechnet, die anhand einer grafischen Programmiersprache die Werte ermitteln und an die Bedienoberfläche weiterleitet. Das Subsystem mit den jeweiligen Berechnungen ist in Anlage 3 zu finden.

Die Einstellungsmöglichkeit der Verstärkung des Smith-Prädiktors in Prozent wird anhand eines weiteren Step-Blocks ermöglicht. Der eingestellte Wert von V wird zunächst in Prozent umgerechnet und dann mit dem Ausgang des Smith-Prädiktor-Modells multipliziert. Die Smith-Prädiktor-Schaltung verfügt genau wie das Modell der realen Regelstrecke über zwei PT_1 -Glieder. Dieses Regelstreckenmodell ist der geschätzte Prozessverlauf und enthält keine Totzeit. Die geschätzte Totzeit, die mit T_{t_SmPr} bezeichnet wurde, wurde separat in der Smith-Prädiktor-Schaltung implementiert.

Liegen Abweichungen zwischen der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell vor, treten unerwünschte Verläufe der Sprungantworten auf, die anhand von zahlreichen unterschiedlichen Fällen ab Abschnitt 4.6. dargestellt und erklärt werden. Alle ermittelten Werte werden an die grafische Bedienoberfläche weitergeleitet und in dieser dargestellt. Die eigenständig in MATLAB Simulink entworfene Oberfläche wird im folgenden Abschnitt 3.6 vorgestellt.

3.6 Grafische Bedienoberfläche

Für die Ermittlung der betrachteten Größen, die Analyse und Bewertung des implementierten stufenlosen Smith-Prädiktors wurde eine grafische Bedienoberfläche erstellt. Sie ist in Abb. 3.3 dargestellt und dient dazu, dass der Anwender sämtliche Einstellungen und Szenarien in einem Subsystem zentral durchführen kann und nicht für jeden neuen Simulationsfall die Einstellungen innerhalb vom Blockschaltbild des Regelkreises eingeben muss. Sie wird auch für die Vorführung der Implementierung verwendet.

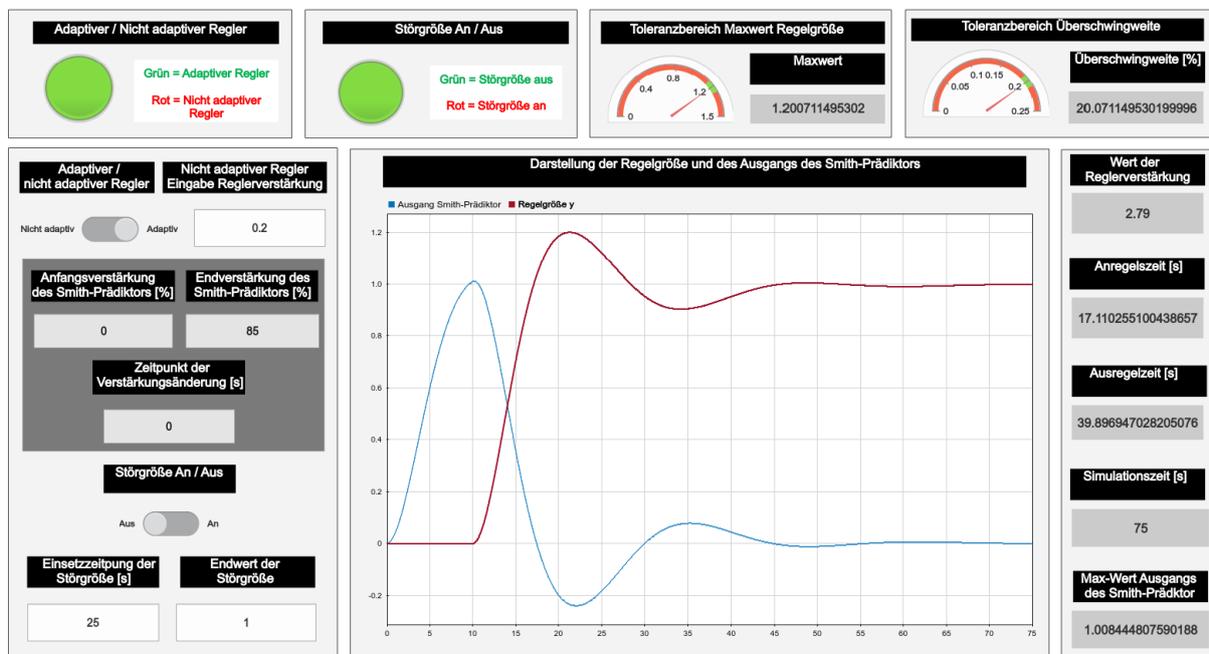


Abb. 3.3: Graphische Bedienoberfläche

Neben Einstellungsmöglichkeiten verfügt die Bedieneinheit über Kontrollleuchten, Kontrollanzeigen und Toleranzanzeigen. Sie ist in drei Abschnitte unterteilt, die Eingabeseite (links), die Ausgabeseite mit grafischer Anzeige und Messwerten (Mitte und rechts) sowie Kontrollleuchten und Toleranzbereichsanzeigen (oben). Im linken Teil ist es möglich, eine Störgröße einzuschalten, die nach der Festlegung des Einsetzzeitpunktes in [s] und des Endwertes (0 = ausgeschaltet, 1 = angeschaltet) Einfluss auf den Regelkreis nimmt. Neben der Störgröße ist auch die Wahl eines adaptiven und nicht adaptiven Reglers möglich. Der nicht adaptive Regler ermöglicht eine manuelle Festlegung der Reglerverstärkung K_r .

Der adaptive Regler setzt im Gegensatz zum nicht adaptiven Regler eigene vordefinierte Reglerparameter automatisch abhängig von der gewählten Verstärkung. Die Verstärkung kann im dunkelgrau hervorgehobenen Bereich eingestellt werden. Es kann sowohl eine Anfangs- als auch eine Endverstärkung und der Zeitpunkt der Verstärkungsänderung in [s] eingestellt werden. Die dabei verwendete Verstärkungsform ist ein Sprung, das heißt, dass die Verstärkung sprunghaft von der Anfangsverstärkung auf die Endverstärkung springt.

In der Mitte der Bedienoberfläche befindet sich eine Anzeige in Form eines Graphen, die die Sprungantworten der Regelgröße und des Ausgangs des Smith Prädiktors darstellt. Sie ist für die Auswertung der Szenarien entscheidend. Im oberen Teil befinden sich Kontrollanzeigen und Kontrollleuchten, die den Zustand der Reglerwahl und das Einhalten der vorgegebenen Toleranzbereiche anzeigen. Es wird der gewählte Regler (Grün = Adaptiver Regler, Rot = Nicht adaptiver Regler) in Form einer Lampe sowie der Zustand der Störgröße (Grün = Störgröße nicht aktiv, Rot = Störgröße aktiv) angezeigt. Im rechten oberen Bereich finden sich zwei Anzeigen, die das Einhalten der Toleranzbereiche wertetechnisch darstellen. Die linke halbrunde Anzeige zeigt den Toleranzbereich und daneben den aktuellen Wert der Regelgröße. Der maximale Wert der Regelgröße sollte bei einer Amplitude von 1,2 liegen. Diese Vorgabe wurde auch für sämtliche Reglereinstellungen in den kommenden Abschnitten verwendet. Bei einem Sollwert von 1 und einer Maximalen Amplitude von 1,2 ergibt sich eine Überschwingweite von 20%. Der Toleranzbereich und der gemessene Wert wird im rechten oberen Teil der Bedienoberfläche angezeigt.

Der für den Anwender wichtigste Teil der Bedienoberfläche ist der rechte Teil, da dieser sämtliche Ausgabewerte der Simulation beinhaltet. Neben der Simulationszeit in [s] werden auch die Anregelzeit in [s], die Ausregelzeit in [s], der maximale Wert des Ausgangs des Smith-Prädiktors, der Wert der Reglerverstärkung und die eingestellte Verstärkung des Smith-Prädiktors angezeigt. Dieser Bereich beinhaltet sämtliche wichtigen Daten für jede Simulation. Für die Simulation der unterschiedlichen Szenarien, die in Abschnitt 3.3. vorgestellt wurden, muss der im Regelkreis verwendete Regler bestimmte Anforderungen erfüllen. Diese Regleranforderungen werden im kommenden Abschnitt erläutert.

3.7 Regleranforderungen

Für eine möglichst optimale Regelung ist die Einstellung des Reglers von großer Bedeutung. Die Dimensionierung des P- und I-Anteils des PI-Reglers ist ausschlaggebend, für die nach der Simulation als Ergebnis entstandenen Sprungantworten. Dabei soll der verwendete Regler bestimmte Anforderungen erfüllen. Diese betreffen neben der Stabilität auch die Sollwertfolge, das Störverhalten und die Robustheit. Wichtig hierbei ist die sogenannte Regelgüte. Sie bezeichnet verschiedene Gütekriterien, mit deren Hilfe die Qualität der Regelung beurteilt werden kann. Gütekriterien haben die Aufgabe, die Güte eines Regelungssystems qualitativ und quantitativ zu bewerten. Sie können unterschiedlichen Gruppierungen zugeordnet werden und ergeben sich im Allgemeinen aus der Anforderungsbeschreibung des Regelungssystems. Anforderungen sind oft rein qualitativ formuliert. Neben der Bewertung von Regelungssystemen sind Gütekriterien essentiell für die Anwendung von Optimierungsverfahren [1].

Generell kann zwischen unterschiedlichen Kriterienarten und ihrer Verwendung unterschieden werden, die im Folgenden kurz dargestellt werden

Stabilität:

Ein geschlossener Regelkreis sollte stabil sein. Auch wenn dies eigentlich eine selbstverständliche Grundanforderung ist, kann es Konfigurationen geben, bei denen die Regelstrecke instabil ist und der Regler für sich genommen ein instabiles Verhalten aufzeigen kann. Der Unterschied zwischen einem stabilen und instabilen System lässt sich anhand des Beispiels von Herrn Dr. Romberg erklären. Er balancierte bei den Bremer Stahlwerken einen Besen sehr lange auf der Nase, während seine Kollegen die Ausbildungswerkstatt ausfegten. Der Besen auf der Nase verhält sich wie ein stehendes Pendel, das umfällt sobald eine auch noch so kleine Störung auftritt. Man bezeichnet dies als instabiles System, das seinen aktuellen Zustand mit zunehmender Geschwindigkeit verlässt, sobald eine Störung vorliegt. Im Gegensatz dazu ist das hängende Pendel, zum Beispiel ein Container, der an einem Verladekran im Hafen hängt, ein stabiles System. Wenn auf dieses System eine Störung einwirkt, dann versucht dieses seinen aktuellen Zustand beizubehalten [3].

Sollwertfolge:

Der sogenannte Sollwert ist der von einem anderen System vorgegebene Wert, von dem der Istwert so wenig wie möglich abweichen soll. Bei einem geschlossenen Regelkreis sollte die Regelgröße y dem vorgegebenen Sollwert w , auch Führungsgröße genannt, asymptotisch folgen. Das heißt, dass die Differenz zwischen den beiden Größen im eingeschwungenen Zustand gegen 0 gehen sollte. Dabei ist eine bleibende Regeldifferenz unerwünscht [3].

Störverhalten:

Die Art und Weise, wie die Regelgröße dem Sollwert folgt, wird auch als Führungsverhalten bezeichnet. Dabei ist der Zusammenhang zwischen der Regelgröße und der Störgröße das sogenannte Störverhalten. Ein zu schnelles Einschwingverhalten hat die Folge, dass durch große Reglerverstärkungen zu große Werte der Stellgröße entstehen. Das relative Maximum wird Überschwingweite genannt und mit der Größe ε definiert, die zum Überschwingzeitpunkt erreicht wird. Sie ist die größte vorübergehende Sollwertabweichung, die zu einem Zeitpunkt auftritt, nachdem die Regelgröße den neuen Toleranzbereich nach einem Sprung der Führungsgröße erstmals erreicht hat. Im weiteren Zeitverlauf schwingt sich der geschlossene Regelkreis ein. Die Minimierung der Überschwingweite kann durch Reglereinstellungen erfolgen und trägt zu einer Verbesserung der Sprungantwort bei [3].

Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden auch zwei Zeiten betrachtet, t_{an} und t_{aus} . Die sogenannte Anregelzeit t_{an} ist die Zeit, die die Sprungantwort braucht, um den Sollwert das erste Mal zu erreichen, hier einen Sollwert von 1. Die Ausregelzeit t_{aus} gibt an, wann die Sprungantwort den Zielkorridor ($\pm 5\%$ vom Sollwert von 1) nicht mehr verlässt.

Robustheit:

In der Regelungstechnik erfordern Modellunsicherheiten einen robusten Reglerentwurf. Modellunsicherheiten können entstehen, wenn beispielsweise die Regelstrecke nicht exakt bekannt ist, sodass kein ausreichend genaues Modell aufgestellt werden kann. Ein weiterer Grund für das Auftreten von Unsicherheiten entsteht aus der Vereinfachung eines komplexen Modells. Dies tritt z.B. bei der Linearisierung eines nichtlinearen Modells auf [12].

Eine robuste Regelung bedeutet, dass bei einem Entwurf eines Reglers und dessen Parameter-Auslegung besonders darauf geachtet werden sollte, dass dieser trotz Abweichungen des Streckenverhaltens von einem Nominalverhalten die gewünschten Anforderungen erfüllt. Ein Beispiel für eine Anforderung ist das Einhalten eines vom Kunden vorgegebenen Bereichs der Überschwingweite. Parameter können sich mit der Zeit ändern und zu einer Verschlechterung des Regelkreises bis zur Instabilität führen. Aus diesem Grund ist richtige Einstellung des Reglers mit dem Augenmerk auf eine robuste Regelung so entscheidend [3].

4. Ergebnisse und Bewertung

4.1 Modell der Regelstrecke

Das Modell der Regelstrecke wurde in Abschnitt 3.4 vorgestellt. Der verwendete geschlossene Regelkreis hat neben einer Störstrecke in Form eines PT_1 -Gliedes mit Step-Funktion und stochastischer Störung auch einen PI-Regler und ein Modell der realen Regelstrecke in Form von zwei PT_1 -Gliedern mit jeweils einer Zeitkonstante von $T_D = 5s$. Das Totzeitglied innerhalb des Modells der realen Regelstrecke wurde mit einem Wert von $T_t = 10s$ belegt. Vor der Darstellung und Auswertung der Sprungantworten der Regelstrecke wird auf die Berechnung der benötigten Größen eingegangen. Vor der Einstellung der Reglerverstärkung K_r des verwendeten Reglers müssen die Größen der Verzugszeit T_u , der Ausgleichszeit T_g und die der Nachstellzeit T_n bestimmt werden. Diese Größen sind entscheidend für die vollständige Beschreibung des verwendeten PI-Reglers. Er hat in seiner Grundform ein proportionales und ein integrierendes Glied. Im I-Anteil ist zusätzlich ein Faktor enthalten, der mit $1/T_n$ definiert und mithilfe des Einstellverfahrens nach Chien, Hrones und Reswick ermittelt wurde. Erfolgt die Berechnung der benötigten Größen der Verzugs- und Ausgleichszeit mit dem genannten Einstellverfahren, wird der Wendepunkt der Sprungantwort des Systems und die Wendetangente benötigt. In Abb. 4.1 wurde neben der Sprungantwort der totzeitfreien Regelstrecke auch die Wendetangente und die erste Ableitung der Sprungantwort dargestellt.

Zunächst wurde die grüne Sprungantwort (siehe Abb. 4.1) des Systems abgeleitet. Die zweite Ableitung wurde gleich 0 gesetzt und der dazugehörige X-Wert ermittelt. Der dazugehörige Y-Wert wurde durch das Einsetzen des X-Wertes in die Sprungantwort ermittelt und damit der Wendepunkt von (5,35 | 0,2871) berechnet. Der nächste Schritt bestand darin, die Wendetangente zu bestimmen. Dazu wurde eine Geradengleichung verwendet, die im Folgenden zu erkennen ist.

$$y = m \cdot x + b \quad (4.1)$$

Der Parameter m ist die Steigung der Geraden und b der Schnittpunkt mit der Y-Achse. Zunächst wurde der Wendepunkt der Sprungantwort (5,35 | 0,2871) in die erste Ableitung der Sprungantwort der Regelstrecke eingesetzt und damit die Steigung von $m = 0,0709$ ermittelt. Anschließend wurde die Schnittstelle mit der Y-Achse berechnet. Es resultierte ein Wert von $b = 0,09217$. Werden alle berechneten Werte in Gleichung (4.1) eingesetzt, folgt die Gerade der Wendetangente.

$$y = 0,0709 \cdot x + 0,09217 \quad (4.2)$$

Gleichung (4.2) der Wendetangente wurde in das MATLAB-Simulink-Modell übernommen und ist in Abb. 4.1 als blaue Gerade zu erkennen.

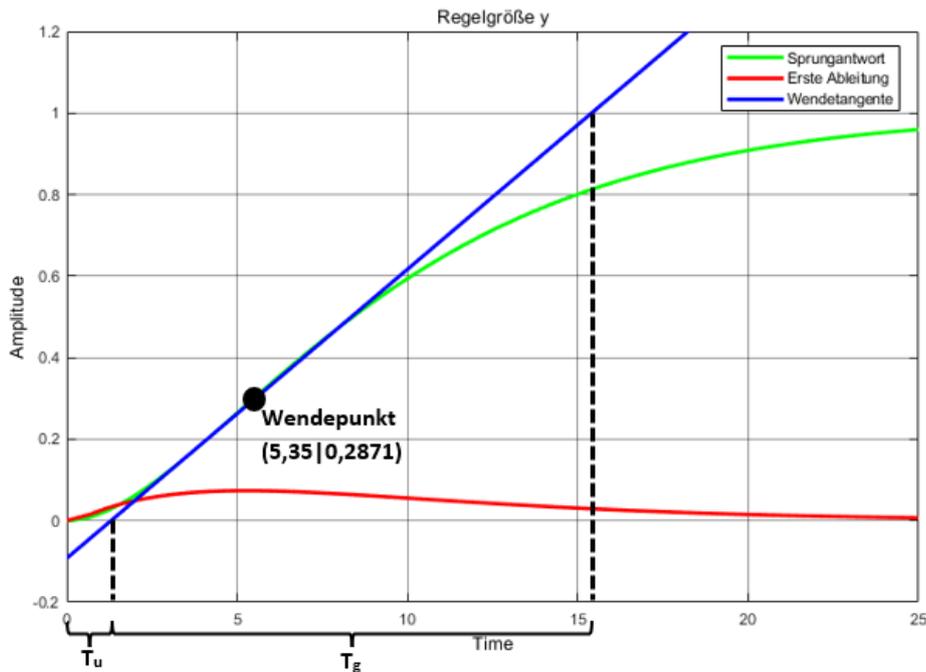


Abb. 4.1: Berechnung Verzugs- u. Ausgleichszeit

In der oberen Abbildung ist der s-förmige Verlauf (grün) des Regelstreckenmodells zu erkennen. Dieser beginnt mit einer Anstiegsgeschwindigkeit von $\dot{x}(0) = 0$ und hat eine zunehmende Geschwindigkeit bis zum Wendepunkt. Nach dem Erreichen des Wendepunktes nimmt die Anstiegsgeschwindigkeit ab und erreicht den Endwert von 1 außerhalb der Simulationszeit von $t = 25s$. Mit zunehmender Zahl der Speicherglieder und mit zunehmender Größe der jeweiligen Zeitkonstanten wird der Anfangsverlauf immer flacher. Sprungantworten von PT_n -Strecken unterscheiden sich prinzipiell nur wenig von Strecken mit einem dominierenden Speicher und Totzeit bzw. Ersatztotzeit. Der s-förmige Verlauf kann durch die Lage und Steigung der Wendetangente im Wendepunkt charakterisiert werden.

Nach der Einstellregel von Chien, Hrones und Reswick müssen zwei Größen ermittelt werden, die Verzugszeit T_u und die Ausgleichszeit T_g . Beide Größen sind in der oberen Abbildung eingezeichnet. Dabei beträgt die Streckenverstärkung K_s den Wert von 1. In der Sprungantwort der Regelstrecke wird durch den Wendepunkt die berechnete Tangente angelegt. Der Abstand zwischen dem Schnittpunkt dieser Tangente mit der Abszisse (waagerechte Achse) und der Ordinate (senkrechte Achse) heißt Verzugszeit T_u . Die Ausgleichszeit T_g ist der Abstand zwischen dem Schnittpunkt der Tangente mit Sollwert von 1 minus der Verzugszeit T_u . Beide Größen können abgelesen werden.

- $T_u = 1,3s$
- $T_g = 14,1s$

Aus den beiden oben ermittelten Zeitabschnitten T_u und T_g ergibt sich ein wichtiger Kennwert, mit dem die Regelbarkeit einer Regelstrecke angegeben werden kann. Dieser Kennwert ist der sogenannte Schwierigkeitsgrad S . Er lässt sich anhand der folgenden Formel nach [6] beschreiben.

$$S = \frac{T_u}{T_g} \quad (4.3)$$

Dabei gilt, je größer das Verhältnis aus Verzugszeit und Ausgleichszeit, desto schwerer ist die Regelung der Strecke. Die Regelbarkeit von PT_n -Modellen lässt sich nach [6] folgendermaßen beschreiben. Eine gute Regelbarkeit von PT_n -Modellen mit gleichgroßen Zeitkonstanten ist bei einem Schwierigkeitsgrad von $S < 0,1$ erreichbar. Liegt der Wert von S zwischen 0,1 und 0,4 ist nur noch eine mäßige Regelbarkeit möglich. Steigt der Wert des Schwierigkeitsgrades über 0,4 ist die Regelbarkeit schlecht. Der Schwierigkeitsgrad der Regelung der vorliegenden Regelstrecke beträgt $S = 0,0921$. Das Modell ist gut regelbar, da der Wert unter $S < 0,1$ beträgt. Neben der Reglerverstärkung muss der Faktor $1/T_n$ bestimmt werden. Die dazu notwendigen Größen wurden anhand der Wendetangente mithilfe des Einstellverfahrens nach Chien, Hrones und Reswick bestimmt.

Regler		Aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20 % Überschwingen	
		Störung	Führung	Störung	Führung
P	K_p	$0.3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.3 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
PI	K_p	$0.6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.35 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
	T_n	$4 \cdot T_u$	$1.2 \cdot T_g$	$2.3 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$
PID	K_p	$0.95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$1.2 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0.95 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
	T_n	$2.4 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$	$2 \cdot T_u$	$1.35 \cdot T_g$
	T_v	$0.42 \cdot T_u$	$0.5 \cdot T_u$	$0.42 \cdot T_u$	$0.47 \cdot T_u$

Abb. 4.2: Einstellverfahren nach Chien, Hrones und Reswick

Für die Simulationen wurde ein PI-Regler verwendet und die Bedingung einer Überschwingweite von 20% festgelegt. Der Regler wurde nach dem Führungsgrößensprung eingestellt. Der rot hervorgehobene Bereich zeigt, welche Einstellregel für den vorliegenden Regelkreis gilt. Die Größe der Nachstellzeit wird durch das Multiplizieren der Ausgleichszeit mit dem Faktor 1 definiert. Der Faktor im I-Anteil wird durch $1/T_n$ beschrieben und hat einen Wert von $1/14,1$. Dieser Faktor wurde noch vor dem Input des Reglerbausteines des I-Anteils eingefügt, um die vollständige Beschreibung der Regeleinrichtung zu gewährleisten. Nach dem Einfügen des Faktors konnten die Simulationen durchgeführt und die Sprungantworten aufgenommen werden.

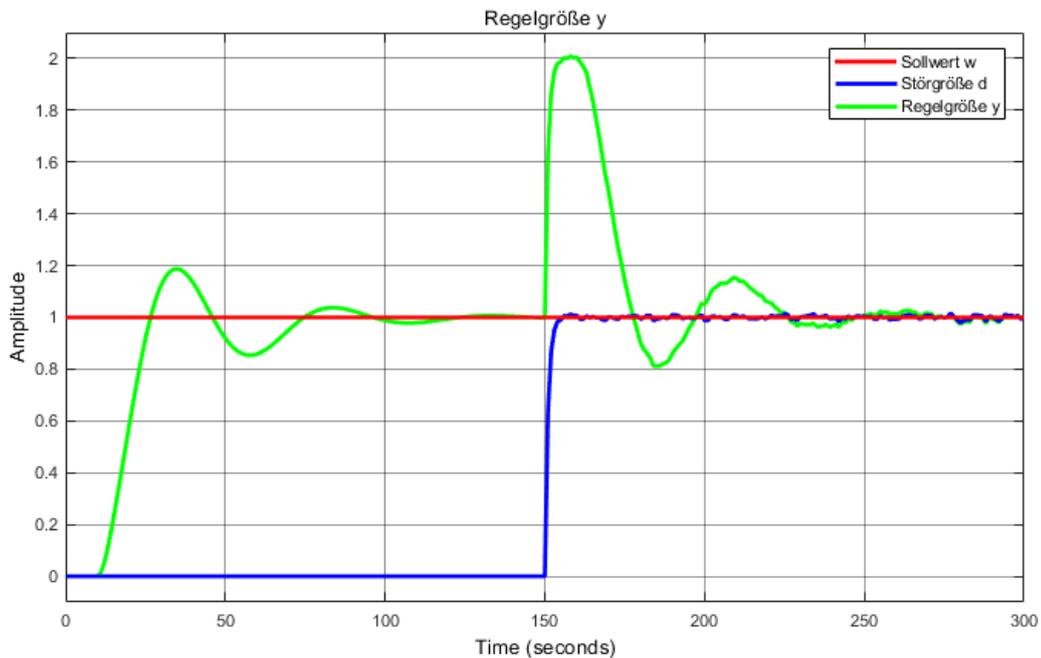


Abb. 4.3: Regelgröße, Störgröße u. Sollwert, Regelkreis ohne Sm.Pr.

Die Simulationszeit betrug $t = 300s$, in der die Störgröße zum Zeitpunkt von $t = 150s$ einsetzte. Der verwendete PI-Regler wurde mit einer Reglerverstärkung von $K_r = 0,748$ versehen, damit die Bedingung der Einhaltung einer Amplitude des Führungsgrößen sprungs von 1,2 erfüllt werden konnte. Es ist zu erkennen, dass der Ausregelvorgang des Führungsgrößen sprungs nach Vollstreichen der Totzeit von $T_t = 10s$ beginnt und die grüne Sprungantwort nach ca. $t = 135s$ den Sollwert von 1 erreicht. Die Anregelzeit, die den Zeitpunkt des erstmaligen Erreichens des Sollwertes angibt beträgt hier $t_{an} = 23,95s$. Die Ausregelzeit ist die Zeit bis die Sprungantwort von y den Zielkorridor des Toleranzbereiches ($\pm 5\%$ des Sollwertes von 1) nicht mehr verlässt. Sie hat in der vorliegenden Simulation einen Wert von $t_{aus} = 48,95s$. Das Einsetzen der Störgröße ist bei $t = 150s$ deutlich zu erkennen und beeinflusst das Regelungsergebnis negativ. Der Verlauf der Regelgröße steigt beim $t = 150s$ sprunghaft an und erreicht bis zum Ende der Simulationszeit wieder den Sollwert von 1. Um den Störgrößeneinfluss verringern zu können, müssten Störgrößenaufschaltungen eingefügt werden, um die Störung kompensieren zu können. In Abb. 4.3 wurde der Smith-Prädiktor nicht angeschaltet und hat keinen Einfluss auf den Regelkreis. Um die stufenlose Verstellung der Verstärkung des Prädiktors zu ermöglichen, muss zunächst eine Implementierungsmethode gefunden werden. Sie wurde anhand einer Lookup-Table realisiert. Im folgenden Abschnitt 4.2 wird die stufenlose Implementierung des Smith-Prädiktors vorgestellt.

4.2 Entwurf der stufenlos einblendbaren Implementierung des Smith-Prädiktors

Die stufenlose Implementierung des Smith-Prädiktors konnte durch den Zusammenhang zwischen der verwendeten Reglerverstärkung K_r und der Verstärkung V bzw. dem Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung realisiert werden. Das wurde mithilfe einer Lookup-Tabelle realisiert. In MATLAB-Simulink gibt es eine Auswahl an unterschiedlichen Lookup-Table-Blöcken, die neben einer 1-D-Tabelle auch 2-D-Tabellen und n-D-Tabellen zur Verfügung stellen. Dabei können entweder eine, zwei oder mehrere dimensionale Funktionen approximiert werden. Es wurde die 1-D Lookup-Tabelle verwendet, da hier nur ein Wert von K_r einem Wert der Verstärkung V zugeordnet werden musste. Eine Lookup-Tabelle ist im Grunde ein Array, ein Datentyp, in dem beliebig viele Werte abgespeichert werden können. Während eine Variable eines elementaren Datentyps immer nur einen einzelnen Wert enthält, kann eine Arrayvariable eine größere Anzahl verschiedenster Werte enthalten. Mithilfe dieses Arrays kann eine Approximation in Form einer linearen Interpolation erfolgen. Dazu werden abhängig von der Anzahl der im Block gespeicherten Werte Geraden von Punkt P_1 zu Punkt P_2 gezogen und eine Funktion gebildet, die der Aneinanderreihung von einzelnen Geraden gleicht. In der folgenden Abbildung ist die Funktion der Verstärkung bezogen auf den Wert von K_r für die Verstärkungsform Sprung dargestellt.

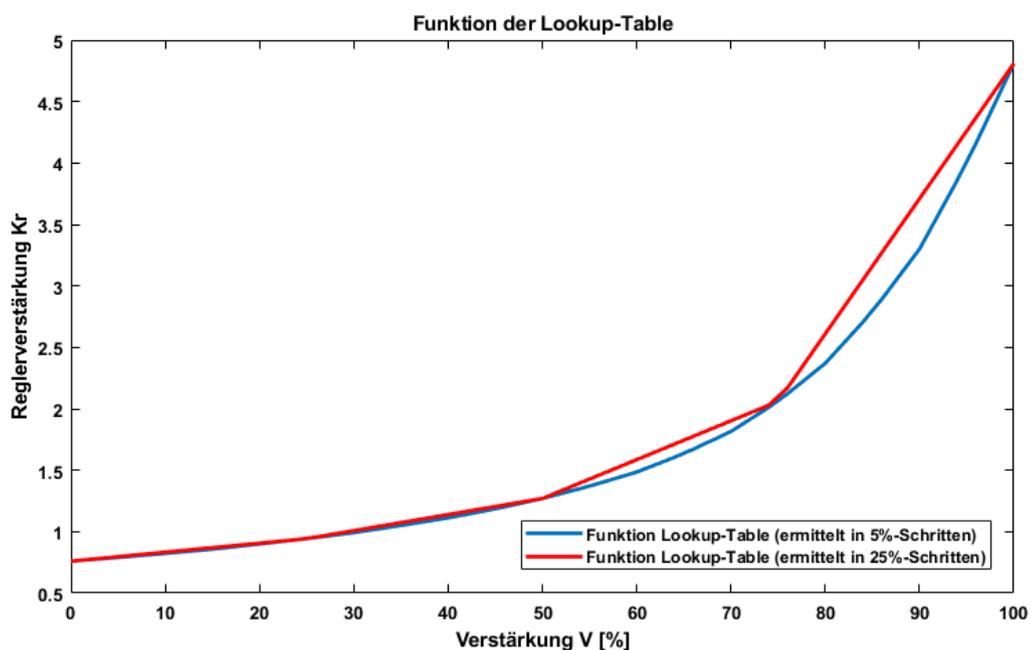


Abb. 4.4: Funktion der Lookup-Table in 5%- und 25%-Schritten

Es ist zu erkennen, dass die z.B. die rote Funktion aus einzelnen hintereinanderliegenden Geraden besteht. Dabei ist die X-Achse des Graphen die Verstärkung V bzw. der Einflussgrad des Smith-Prädiktors und die Y-Achse der Wert der Reglerverstärkung K_r . Die Werte der Reglerverstärkung wurden anhand von 5%-Schritten der Verstärkung (blauer Verlauf) ermittelt und in die Lookup-Tabelle eingefügt. Diese Schrittweite ermöglichte die Einhaltung der Toleranzgrenzen und einer Überschwingweite von 20%.

Je kleiner die Schritte gewählt werden, umso genauer wird die von der Lookup-Tabelle ausgegebene Funktion, da die einzelnen Geraden immer „kleiner“ werden und der Anstieg weniger stufenförmig wird. Der Zusammenhang zwischen V und K_r ist nicht linear oder quadratisch, eher exponentiell oder kubisch. Die Beschreibung des Zusammenhangs anhand quadratischer Funktionen war nicht möglich, was Anlage 10 zeigt. Die Beschreibung des systematischen Zusammenhangs steht noch aus und könnte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

25%-Schritte bei der Ermittlung der Werte der Reglerverstärkung ergeben den in Abb. 4.4 dargestellten roten Verlauf. Es wurden die Werte von K_r bei unterschiedlichen Verstärkungen des Smith-Prädiktors ermittelt und in die Lookup-Table implementiert. Die lineare Interpolation ermöglicht wiederum die stufenlose Einstellung der Verstärkung. Bei Verstärkungen bis $V = 75\%$ sind die Unterschiede der beiden Verläufe aus Abb. 4.4 mit unterschiedlichen Schrittweiten relativ gering. Wesentlich größere Differenzen ergeben sich ab $V > 75\%$. Hier sind die Reglerverstärkungen der roten Kurve zu groß, aber der Toleranzbereich der Amplitude von $1,2 \pm 5\%$ wurde nicht überschritten. Für die weiteren Untersuchungen wurde eine Schrittweite von 5% gewählt, um die möglichst genaue Einstellung des Reglers und das Erreichen einer maximalen Amplitude von 1,2 bei allen eingestellten Verstärkungen zu gewährleisten.

Die Lookup-Table ermöglicht die stufenlose Einstellung der Reglerverstärkung anhand der linearen Interpolation. Sie wurde von Isaac Newton begründet und ermöglicht das Verbinden von zwei gegebenen Datenpunkten. In diesem Fall sind es z.B. die Datenpunkte (Verstärkung | K_r - Wert) von P_1 (0 | 0,76) und P_2 (5 | 0,79). Die berechnete Gerade hat am Punkt P_1 ihren Anfang und am Punkt P_2 ihr Ende. Wenn aber der eingestellte Wert der Variable des Inputs, in diesem Fall der Verstärkung des Smith-Prädiktors nicht in dem Array der Lookup-Table vorhanden ist, findet eine Interpolation statt.

V [%]	0	5	10	15	20	25	30	35	40
K_r	0,76	0,79	0,823	0,875	0,9	0,943	0,992	1,05	1,112

Lineare Interpolation ↓

V [%]	0	5	10	15	20	22	25	30	35	40
K_r	0,76	0,79	0,823	0,875	0,9	0,917	0,943	0,992	1,05	1,112

Abb. 4.5: Lineare Interpolation

In Abb. 4.5 ist die Implementierung der Verstärkung und K_r innerhalb der Lookup-Table zu sehen. Es wurde der Bereich zwischen $V = 0\%$ und $V = 40\%$ dargestellt. Dabei wurde jeder Verstärkung, die anhand von 5%-Schritten erfasst wurde jeweils ein Wert von K_r zugewiesen. Die einzelnen Wertepaare (Verstärkung | K_r) sind dabei sogenannte „Breakpoint-Values“. Wenn eine Verstärkung von $V = 20\%$ im Konstanten-Block innerhalb der Smith-Prädiktor-Schaltung eingestellt wird, ist der Output der Lookup-Table $K_r = 0,9$. Wenn aber eine Verstärkung eingestellt wird, die nicht in der Lookup-Table hinterlegt ist, findet die schon genannte Interpolation statt. Dies ist z.B. beim Input von $V = 22\%$ der Fall. Dieser Wert wurde nicht innerhalb der Tabelle hinterlegt, da hier nur 5%-Schritte für die Wertermittlung genutzt wurden.

Der Lookup-Table-Block ermittelt den dazugehörenden Wert von K_r für eine Verstärkung von $V = 22\%$, indem der Block die lineare Interpolation anwendet. Dazu wird der Wert von K_r auf der Geraden von $P_1 (0 | 0,76)$ zu $P_2 (5 | 0,79)$ gesucht und der entsprechende Werte für $V = 22\%$ ermittelt. Dieser neu ermittelte Punkt $(22 | 0,9172)$ liegt auf der Geraden von P_1 zu P_2 .

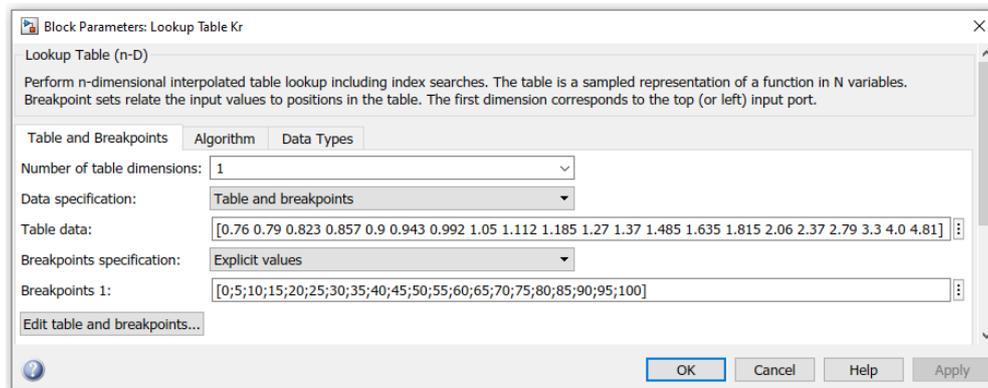


Abb. 4.6: Lookup-Table-Block in MATLAB Simulink

Die obere Zeile in Abb. 4.6 der „Table data“ beinhaltet die definierten Werte der Reglerverstärkung K_r , und die untere Zeile „Breakpoints 1“ die Werte der Verstärkungen V . Wird eine Verstärkung gewählt, die nicht in der Zeile „Breakpoints 1“ enthalten ist, berechnet der Block mithilfe der linearen Interpolation den dazugehörenden Wert von K_r . Der Lookup-Table-Block verfügt nicht nur über eine lineare Interpolationsfunktion, die die Werte zwischen zwei Datenpunkten ermittelt, sondern auch über eine lineare Extrapolations-Funktion. Diese Funktion ermöglicht die Ermittlung von Werten jenseits der Grenzen der definierten Werte. Wenn z.B. eine Verstärkung von $V = 110\%$ eingestellt wird, erfolgt die Berechnung einer Geraden. Sie wird von dem letzten Datenpunkt $(100 | 4,81)$ zum Punkt von $V = 110$ gezogen. Dabei hat die neue Gerade den gleichen Anstieg, wie die Gerade zwischen den Punkten $P_{19} (95 | 4)$ und $P_{20} (100 | 4,81)$. Es wird anhand der Punkte P_{19} und P_{20} der neue Punkt von $V = 110$ und der dazugehörenden Reglerverstärkung ermittelt. Eine Verstärkungseinstellung von $V > 100\%$ oder $V < 0\%$ ist in der Praxis nicht umsetzbar, in der Simulation schon, da ein Wert von $V = 110\%$ eingestellt werden kann und die Lookup-Table den entsprechenden Wert von K_r berechnet. Um dies zu verhindern wurde eine Begrenzung anhand eines „Saturation-Blocks“ eingebaut. Dabei kann die Verstärkung den Bereich von $V = 0\% \dots 100\%$ nicht verlassen.

Wird das Kriterium einer gleichbleibenden Überschwingweite von 20% beim Einstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktors zwischen $V = 0\% \dots 100\%$ gewählt, kann eine Schrittweite von 25% gewählt werden. Dabei ist aber zu beachten, welche Regelstrecke vorliegt und welche Ordnung diese besitzt. Wenn definierte Toleranzgrenzen eingehalten werden müssen und 25%-Schritte dazu führen, dass die Toleranzbereiche der betrachteten Größen über- oder unterschritten werden, sollte die Schrittweite verkleinert werden, bis der Toleranzbereich der definierten Größen nicht mehr verlassen wird. Wird ein anderes Kriterium zur Einstellung des Reglers zum Beispiel das einer bestimmten Anregel- oder Ausregelzeit verwendet, ist der Verlauf der Funktion der Lookup-Table anders. Dabei kann trotzdem auf die Lookup-Table zurückgegriffen werden, aber die Anpassung der einzelnen Parameter innerhalb der Tabelle ist zwingend notwendig.

4.3 Regelkreis mit und ohne Smith-Prädiktor

Das in Abschnitt 3.4 vorgestellte Modell der Regelstrecke wird mit einem Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung versehen und mit einem Regelkreis ohne Prädiktor-Schaltung verglichen, um die Vor- und Nachteile der eingefügten Schaltung aufzuzeigen.

Tab. 4.1: Werte der Regelkreise mit u. ohne Sm.Pr.

Regelkreis	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
Ohne Sm.Pr.	0,76	26,6	69,7
Mit Sm.Pr. (K_r nicht angepasst)	0,76	125	75,8
Mit Sm.Pr. (K_r angepasst)	4,81	15	29,1

In Tab. 4.1 sind die Simulationsergebnisse der Regelkreise mit und ohne Smith-Prädiktor dargestellt. In den Regelkreisen mit Smith-Prädiktor-Schaltung wurde die Verstärkung auf einen Wert von $V = 100\%$ eingestellt. Die ermittelten Werte der Größen t_{an} und t_{aus} beziehen sich auf das Ausregeln des Führungsgrößensprungs und nicht auf den weiteren Verlauf der Sprungantworten im Störungsfall. Für die Simulation wurden die Sprungantworten der Regelkreise ohne, mit Smith-Prädiktor und nicht angepassten Werten von K_r und mit Smith-Prädiktor mit angepassten Reglerverstärkungen aufgenommen.

Die Reglerverstärkung des Regelkreises ohne Smith-Prädiktor hat einen Wert von $K_r = 0,76$. Dieser Wert von K_r wurde in einen Regelkreis mit Smith-Prädiktor übernommen und anschließend mit einem Regelkreis mit Prädiktor und angepassten Reglerparametern verglichen. Die Sprungantworten der drei Regelkreise unterscheiden sich deutlich voneinander. Für die Einstellung der PI-Regler gilt, dass die Amplitude des Ausregelvorgangs der Führungsgröße eine Amplitude von 1,2 erreichen und diese im Idealfall weder unter- noch überschreiten soll.

Die Anregelzeit t_{an} ist die Zeit, die benötigt wird, bis die Sprungantwort der Regelgröße das erste Mal den Wert des Sollwertes von 1 kreuzt. Die Ausregelzeit t_{aus} ist die Zeit, die die Sprungantwort braucht, damit der Toleranzbereich von $\pm 5\%$ (0,95-1,05) des Sollwertes nicht mehr verlassen wird. Werden die Anregel- und die Ausregelzeiten aus Tab. 4.1 betrachtet, fällt auf, dass sich die jeweiligen Werte deutlich bei der Verwendung der alten Reglerverstärkung von $K_r = 0,76$ im Regelkreis mit Smith-Prädiktor verschlechtern. Der Regler wurde zu schwach eingestellt. Wird die Reglerverstärkung auf einen Wert von $K_r = 4,81$ korrigiert, hat der Regelkreis mit Smith-Prädiktor im Vergleich die besten Anregel- und Ausregelzeiten.

Die aggressivere und damit höhere Belegung von K_r ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse und damit eine wesentlich aggressivere Einstellung des verwendeten Reglers. Die Folgen lassen sich auch anhand der jeweiligen Sprungantworten aus Abb. 4.7 erkennen. Dabei ist zu beachten, dass bei den Regelkreisen mit Smith-Prädiktor die Verstärkung auf $V = 100\%$ gestellt wurde. Im Gegensatz dazu ist beim Regelkreis ohne Prädiktor diese Einstellung nicht möglich, da hier keine Prädiktor-Schaltung vorhanden ist.

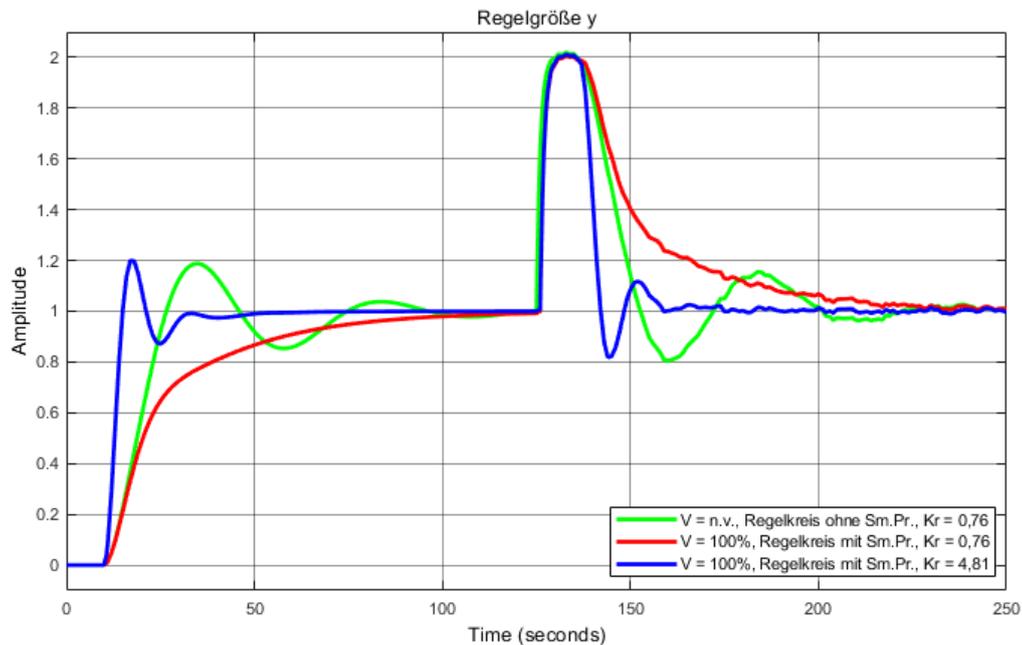


Abb. 4.7: Regelgröße, Regelkreise mit u. ohne Sm.Pr.

Neben der Sprungantwort des Regelkreises ohne Smith-Prädiktor sind in Abb. 4.7 auch die Verläufe der Regelgröße des Regelkreises mit Smith-Prädiktor mit $K_r = 0,76$ sowie $K_r = 4,81$ dargestellt. Alle verwendeten Regelkreise haben identische Totzeiten. Diese beträgt beim Modell der Regelstrecke des realen Prozesses sowie innerhalb der Smith-Prädiktor-Schaltung $T_t = 10s$. Neben dem Führungsverhalten wurde auch die Reaktion der Regelkreise im Störungsfall aufgenommen. In allen Fällen lag ein exaktes Prozessmodell vor.

Die grüne Sprungantwort des Regelkreises ohne Smith-Prädiktor verzeichnet das stärkste Nachschwingen (grüne Sprungantwort). Deutliche Verbesserungen des Führungsverhaltens sind beim Regelkreis mit Smith-Prädiktor (blaue Sprungantwort) und einer Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ zu sehen. Beim Regelkreis ohne Smith-Prädiktor ist das Ausregeln des Führungsgrößensprungs und der Störung wesentlich langsamer als beim Regelkreis mit Smith-Prädiktor und angepasster Reglerverstärkung. Wird die „alte“ Reglerverstärkung von $K_r = 0,76$ und eine Prädiktor-Schaltung verwendet, ist die Anstiegsgeschwindigkeit der Sprungantwort im Vergleich zu den beiden anderen am geringsten. Auch die Anregel- und Ausregelzeiten haben die größten Werte und die Regelungsergebnisse sind die schlechtesten, da der Regler viel zu schwach eingestellt wurde. Die Implementierung einer Smith-Prädiktor-Schaltung ermöglicht wesentlich höhere Reglerverstärkungen mit einer gleichzeitigen Verbesserung der Regelungsverläufe, wenn der Regler richtig eingestellt wird. Dann sind die besten Regelungsergebnisse möglich.

Dies zeigt sich vor allem, wenn die grüne und blaue Sprungantwort verglichen werden. Der grüne Verlauf verzeichnet deutliches Nachschwingen, das bei der blauen Sprungantwort der Regelgröße durch eine Anpassung der Reglerverstärkung deutlich minimiert wird. Die Anregel- und Ausregelzeit verbessert sich ebenfalls, wenn ein Smith-Prädiktor und ein hoch eingestellter Regler Anwendung findet. Trotz der deutlichen Verbesserung der Regelungsergebnisse kann nach [5] ein Problem bei der Implementierung einer Smith-Prädiktor-Schaltung entstehen.

$$G_{yw}(s) = \frac{G_{PI}(s) \cdot G'_S(s) \cdot e^{-sT_t}}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) + G_{PI}(s) \cdot (G'_S(s) \cdot (e^{-sT_t}) - G'_{SM}(s) \cdot (e^{-sT_t}))} \quad (4.4)$$

Die Übertragungsfunktion (4.4) des Regelkreises mit Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 hergeleitet. Sie zeigt, dass der geschlossene Regelkreis Polstellen hat. Diese ergeben sich aus den Polstellen der Regelstrecke $G_S(s)$ und den Nullstellen des Nenners von $G_{yw}(s)$. Wenn der Regelkreis stabil gehalten werden soll, muss auch die Regelstrecke selbst stabil sein.

$$G_{SP}(s) = \frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot (G'_{SM}(s) - G_{SM}(s))} = \frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s) \cdot G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_t})} \quad (4.5)$$

Gleichung (4.5) ist die Übertragungsfunktion des Smith-Prädiktor-Reglers, die ebenfalls im Abschnitt 2.4.2 hergeleitet wurde. Sie zeigt, dass der Smith-Prädiktor-Regler $G_{SP}(s)$ für integrierende Strecken keinen I-Anteil hat, auch dann nicht, wenn der Regler $G_{PI}(s)$ einen I-Anteil besitzt. Aus diesem Grund ergibt sich eine bleibende Regeldifferenz bei sprungförmigen Störungen am Streckeneingang. Das bedeutet, dass der Smith-Prädiktor-Regler in seiner einfachen Form weder für integrierende noch für instabile Regelstrecken geeignet ist. Modellabweichungen zwischen dem realen Prozessmodell und der im Smith-Prädiktor eingefügten Regelstrecke können, wie Abschnitt 4.8 zeigen wird, einen destabilisierenden Einfluss auf den gesamten geschlossenen Regelkreis haben.

Die Verbesserung der Regelgüte beim Führungsverhalten ist wesentlich stärker ausgeprägt, als die Verbesserung im Störverhalten. Wenn die Übertragungsfunktion unter der Bedingung eines exakt bekannten Prozessmodells für das Störverhalten betrachtet wird, ergibt sich die folgende Gleichung.

$$G_{yd}(s) = \frac{G_S(s)}{1 + G_{SP}(s) \cdot G_S(s)} = G_S(s) \left(1 - \frac{G_R(s) \cdot G'_S(s)}{1 + G_R(s) \cdot G'_S(s)} \cdot e^{-sT_t} \right) \quad (4.6)$$

Aufgrund des verwendeten Reglers können in Gleichung (4.6) die Streckenpole nicht gekürzt werden. Deswegen ist die Regelkreisdynamik für das Störverhalten nicht schneller als die Dynamik der Regelstrecke. Wenn das Störverhalten verbessert werden soll, ist die Anwendung von Störgrößenaufschaltungen notwendig. Die Implementierung von SGAs wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

4.4 Verschiedene Formen der Verstärkungsänderungen

4.4.1 Sprungförmige Verstärkungsänderung

Für die in Abschnitt 3.2 genannten Untersuchungen wurde der Regelkreis mit Smith-Prädiktor mit einer Einstellungsmöglichkeit (Sm.Pr. An/Aus) versehen. Es werden im Folgenden unterschiedliche Verstärkungsformen untersucht. Neben einer sprunghaftigen stehen auch eine rampenförmige und eine kurvenartige Verstärkungsänderung zur Auswahl. Dabei wird jeweils eine Anfangsverstärkung von $V = 0\%$ festgelegt und abhängig von der gewählten Verstärkungsform die eingestellte Endverstärkung erreicht. Zunächst wird die Form der sprunghaften Verstärkungsänderung dargestellt, analysiert und abschließend in Abschnitt 4.4.4 mit den anderen zwei Verstärkungsformen verglichen und bewertet.

Die Untersuchung der drei möglichen Einstellungsvarianten dient dazu herauszufinden, welche Verstärkungsform am besten für die kommenden Untersuchungen geeignet ist und welche über das gesamte Verstärkungsspektrum von $V = 0\% \dots 100\%$ die besten Regelungsergebnisse erzielt. Es werden neben der Reglerverstärkung K_r auch die Anregelzeit t_{an} und Ausregelzeit t_{aus} betrachtet. Die Einstellung der Verstärkung wird bei allen drei Varianten auf den Ausgang des Smith-Prädiktors gelegt. In der Praxis bestehen Begrenzungen, die das System beeinflussen. Deswegen wird die Einstellung von V auf den Ausgang des Prädiktors gelegt.

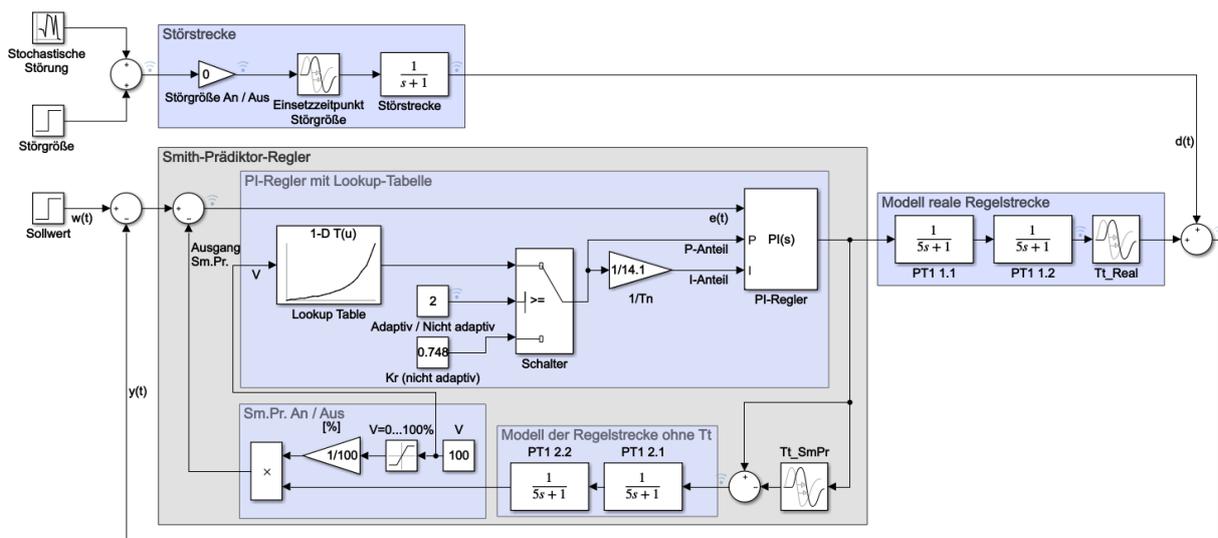


Abb. 4.8: Regelkreis mit Sm.Pr., Verstärkungsform Sprung

In Abb. 4.8 ist der Regelkreis mit Smith-Prädiktor und der Verstärkungsform Sprung dargestellt. Er beinhaltet neben einer Regelstrecke in Form von zwei PT_1 -Gliedern mit jeweils einer Zeitkonstante von $T_D = 5s$ auch eine Totzeit von $T_t = 10s$, einen PI-Regler, eine PT_1 -förmige Störstrecke und einem Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung. Die Zeitkonstanten und die Totzeit der realen Regelstrecke stimmen mit denen im Smith-Prädiktor-Modell überein. Die Verstärkung lässt sich mithilfe des Blocks V einstellen.

Die Verstärkung wird bei dieser Verstärkungsform sprunghaft von $V = 0\%$ auf den eingestellten Wert der Endverstärkung gestellt. Die Lookup-Tabelle ermöglicht mit der linearen Interpolation die stufenlose Einstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors.

Es wurde ein PI-Regler verwendet und der D-Anteil nicht mitverwendet. Der D-Anteil liefert zwar eine Vorhersage der Regelgröße, sie ist aber ungenau und kann nur über den kurzen Zeitraum der Vorhaltzeit getroffen werden. Aus diesem Grund wurde der D-Anteil nicht in den Regler miteingebunden.

Tab. 4.2: Werte des Regelkreises mit der Verstärkungsform Sprung

V [%]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5
10	0,823	25,6	67,5
20	0,9	24,8	65,1
30	0,992	24	62,6
40	1,112	23,3	59,7
50	1,27	22,1	56,6
60	1,485	21	53
70	1,815	19,6	48,5
80	2,37	17,9	43,4
90	3,3	16,3	36,7
100	4,81	15	29,1

In Tab. 4.2 sind alle Reglerverstärkungen für die unterschiedlichen Verstärkungen von $V = 0\%$ bis $V = 100\%$ in 10% Schritten dargestellt. Die vollständige Tabelle in 5% Schritten ist in Anlage 4 zu finden. Neben den Werten von K_r wurde auch die Anregel- und Ausregelzeit aufgenommen. Die Anregelzeit ist die Zeit, die die Sprungantwort braucht, bis der Sollwert von 1 das erste Mal erreicht wird. Es ist eine deutliche Verbesserung dieser Größe zu erkennen, wenn die Verstärkung des Smith-Prädiktors einen hohen Wert aufweist. Die Anregelzeiten nehmen mit größer werdenden Verstärkungen ab.

Auch bei den Ausregelzeiten lassen sich deutliche Verbesserungen feststellen. Die Größe t_{aus} ist die Zeit, bis die Sprungantwort den Zielkorridor ($\pm 5\%$ des Sollwertes von 1) nicht mehr verlässt. Bei hohen Verstärkungen sind die Ausregelzeiten am kleinsten. Je höher die Verstärkung der Smith-Prädiktor-Schaltung gewählt wird, umso geringer die Ausregelzeiten.

Werden alle aufgenommenen Werte verglichen, zeigt sich, dass die Verstärkungsform Sprung eine deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse ermöglicht. Es gilt, je höher die eingestellte Verstärkung, umso besser die Anregel- und Ausregelzeiten. Auch das Nachschwingen der Sprungantworten der Regelgröße nimmt mit hohen Verstärkungen ab. Die sprungförmige Verstärkungseinstellung ermöglicht eine aggressive Einstellung des verwendeten PI-Reglers und damit eine gesteigerte Performance des Regelkreises. Die Reglerverstärkung wurde anhand der Amplitude des Führungsgrößen sprungs eingestellt. Diese sollte bei allen Verstärkungen einen Wert von 1,2 aufweisen.

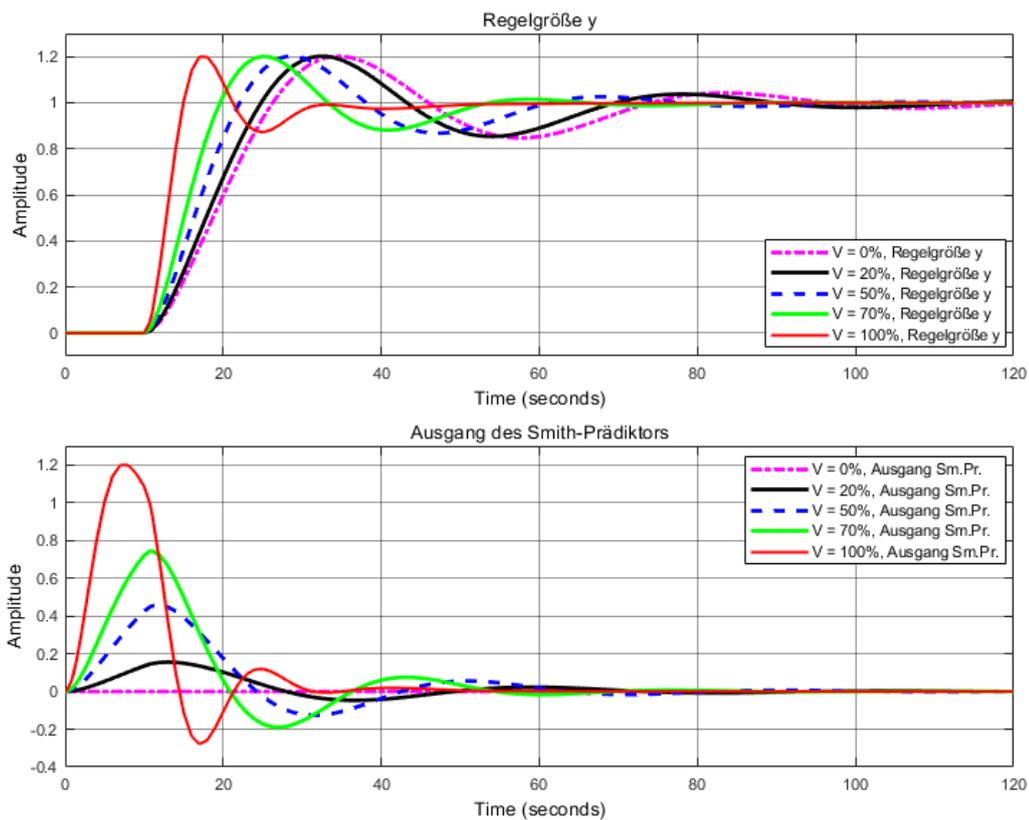


Abb. 4.9: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform Sprung

In Abb. 4.9 sind die Sprungantworten der Regelgröße und des Ausgangs des Smith-Prädiktors dargestellt. Sie wurden bei einer Verstärkung von $V = 0\%$, $V = 20\%$, $V = 50\%$, $V = 70\%$ und $V = 100\%$ aufgenommen. Die Totzeit von $T_t = 10s$ ist anfangs im oberen Graph deutlich zu erkennen. Erst nach dem Vollstreichen dieser Zeit setzt der Regelgrößensprung ein. Das schnellste Erreichen des Sollwertes liegt bei einer Verstärkung von $V = 100\%$ vor. Auch das Nachschwingen ist bei $V = 100\%$ am geringsten. Die volle Verstärkung des Prädiktors ermöglicht die stärkste Einstellung des Reglers. Dieser hat bei $V = 100\%$ eine Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$. Je kleiner die Verstärkung bzw. der Einflussgrad des Smith-Prädiktors gewählt wird, desto geringer ist die Reglerverstärkung.

Die Anregel- und die Ausregelzeiten werden immer größer, je kleiner die eingestellte Verstärkung ist. Die Sprungantworten sind bei kleinen Verstärkungen „langsam“, erst bei hohen Verstärkungen werden sie deutlich schneller. Das zeigt sich an den Anregelzeiten. Die Anforderung einer möglichst aggressiven Einstellung des PI-Reglers wird erst bei hohen Werten von V erreicht. Bei einer Verstärkung von beispielsweise $V = 20\%$ hat der Regler eine Reglerverstärkung von $K_r = 0,9$ und bei $V = 70\%$ einen Wert von $K_r = 1,815$. Bei maximaler Verstärkung steigt der Wert auf $K_r = 4,81$. Die besten Regelungsergebnisse können bei maximaler Verstärkung der Prädiktor-Schaltung erzielt werden. Alle Sprungantworten sind stabil und zeigen bei sämtlichen eingestellten Verstärkungen kein instabiles oder stark schwingendes Verhalten. Die Sprungantworten der Smith-Prädiktor-Schaltung (siehe unterer Graph) zeigen, dass, je höher die Verstärkung eingestellt wird, desto größer die Amplitude der Sprungantwort.

Bei einer Verstärkung von $V = 100\%$ hat die Amplitude ihren maximalen Wert von 1,2. Das Einsetzen der Sprungantwort erfolgt bei $t = 0\text{s}$ und „kompensiert“ damit die Totzeit von $T_t = 10\text{s}$. Der Regler erhält eine Schätzung der Regelgröße y' , damit er seine Regleraktivität schnellstens hochfahren kann. Dadurch werden bessere Regelungsergebnisse erzielt. Ausnahmen gibt es, wenn Modellabweichungen vorliegen. Sie können zu instabilem Verhalten führen.

Die höchste Aktivität der Prädiktor-Schaltung ist bei hohen Verstärkungen zu verzeichnen. Diese steigt, je höher der Wert von V ist. Die Amplituden nehmen mit größer werdenden Verstärkungen zu. Bei $V = 100\%$ hat die Sprungantwort eine maximale Amplitude von 1,2, bei $V = 50\%$ nur eine Amplitude von 0,47. Es verschiebt sich auch der Peak der Sprungantworten nach links auf der Zeitachse, je größer die Verstärkung wird.

Der Ausgang des Smith-Prädiktors wird immer auf den Wert von 0 zurückgeführt. Andere Darstellungsvarianten des Prädiktors z.B. in IMC-Struktur führen den Ausgang der Schaltung immer auf den eingestellten Sollwert zurück. Neben der sprungförmigen Verstärkungsform stehen noch zwei weitere zur Auswahl. Im folgenden Abschnitt wird die kurvenförmige Verstärkungsform vorgestellt.

4.4.2 Kurvenförmige Verstärkungsänderung

Die zweite zur Auswahl stehende Verstärkungsform wurde mithilfe eines PT_1 -Gliedes realisiert. Es wird derselbe Regelkreis wie im letzten Abschnitt verwendet, mit dem Unterschied, dass hier zusätzlich zu dem Konstanten-Block V ein PT_1 -Glied „PT1“ eingefügt wurde (siehe Abbildung 4.10). Die Verstärkung kann von $V = 0\% \dots 100\%$ stufenlos eingestellt werden.

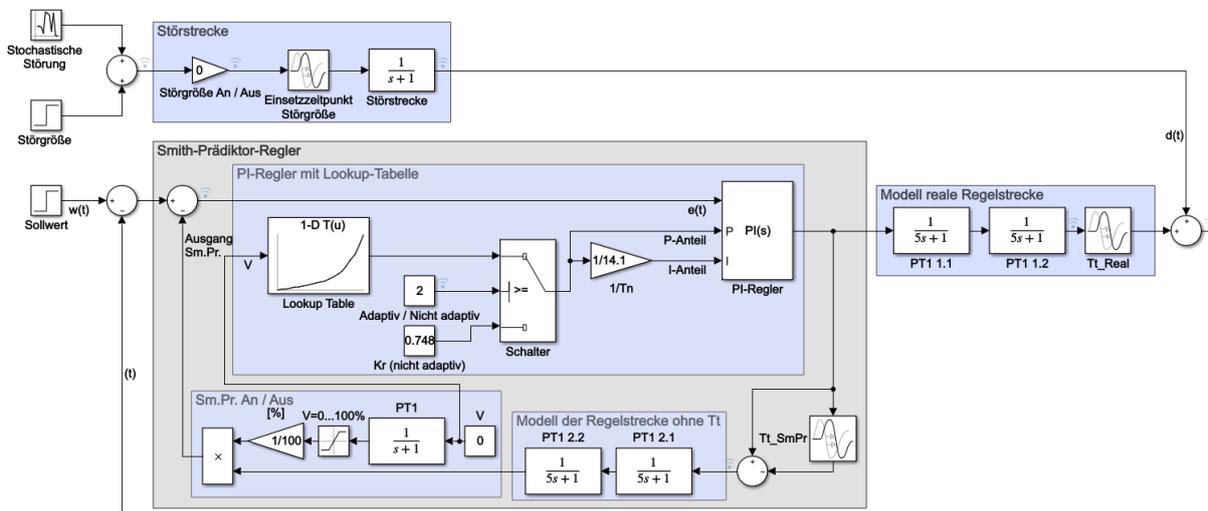


Abb. 4.10: Regelkreis mit Sm.Pr., Verstärkungsform PT_1 -Glied

Diese Verstärkungsform fährt im Gegensatz zum Sprung die Verstärkung V nicht sprunghaft, sondern kurvenartig hoch. Diese Kurve hat den typischen Verlauf der Sprungantwort eines PT_1 -Systems, bei dem der erste Anstieg der Sprungantwort sehr steil ist und im Lauf der Zeit abflacht, bis der Maximalwert erreicht wird.

Der verwendete PI-Regler wurde angepasst, indem die Reglerverstärkung korrigiert wurde. Das Einstellungskriterium, eine Überschwingweite von 20% bei sämtlichen Verstärkungen zu halten, wurde dafür zugrunde gelegt.

Tab. 4.3: Werte des Regelkreises mit der Verstärkungsform PT_1 -Glied

V [%]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5
10	0,823	24,7	67,5
20	0,9	24	65
30	0,992	23,2	62,7
40	1,11	22,3	59,8
50	1,265	21,3	56,8
60	1,485	20,3	52,9
70	1,81	19	48,6
80	2,357	17,5	43,1
90	3,215	16	36,6
100	4,47	14,8	29,8

In Tab. 4.3 wurden neben der Reglerverstärkung auch die Anregel- und Ausregelzeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auch hier mit hohen Verstärkungen größere Werte von K_r verwendet werden können. Höhere Werte von K_r haben eine Verkürzung der Anregelzeit zur Folge und ermöglichen damit bessere Regelungsergebnisse. Wird die Ausregelzeit betrachtet, fällt auf, dass sich auch diese Größe bei hohen Verstärkungen konstant verbessert. Wenn der Smith-Prädiktor auf $V = 0\%$ gestellt wird, beträgt die Ausregelzeit $t_{aus} = 69,5s$. Bei maximaler Verstärkung wird dieser Wert um mehr als 50% verbessert. Die Ausregelzeit hat bei $V = 100\%$ einen Wert von $t_{aus} = 29,8$.

Trotz der kurvenförmigen Verstärkungsänderung können die Regelungsergebnisse deutlich verbessert werden, wenn die in Tab. 4.3 aufgelisteten Größen mit den Werten des Regelkreises ohne Smith-Prädiktor ($V = 0\%$) verglichen werden. Diese Verstärkungsform hat aber trotzdem Nachteile. Diese werden im Abschnitt 4.4.4 genannt.

Die Implementierung eines Smith-Prädiktors hat abhängig von der gewählten Verstärkung einen großen Einfluss auf die Verbesserung der Regelungsergebnisse und die damit verbundenen Größen. In den folgenden Abb. 4.11 wird das deutlich sichtbar. Das schnellste Erreichen des Sollwertes des Regelgrößensprungs wird bei einer Verstärkung von $V = 100\%$ erreicht.

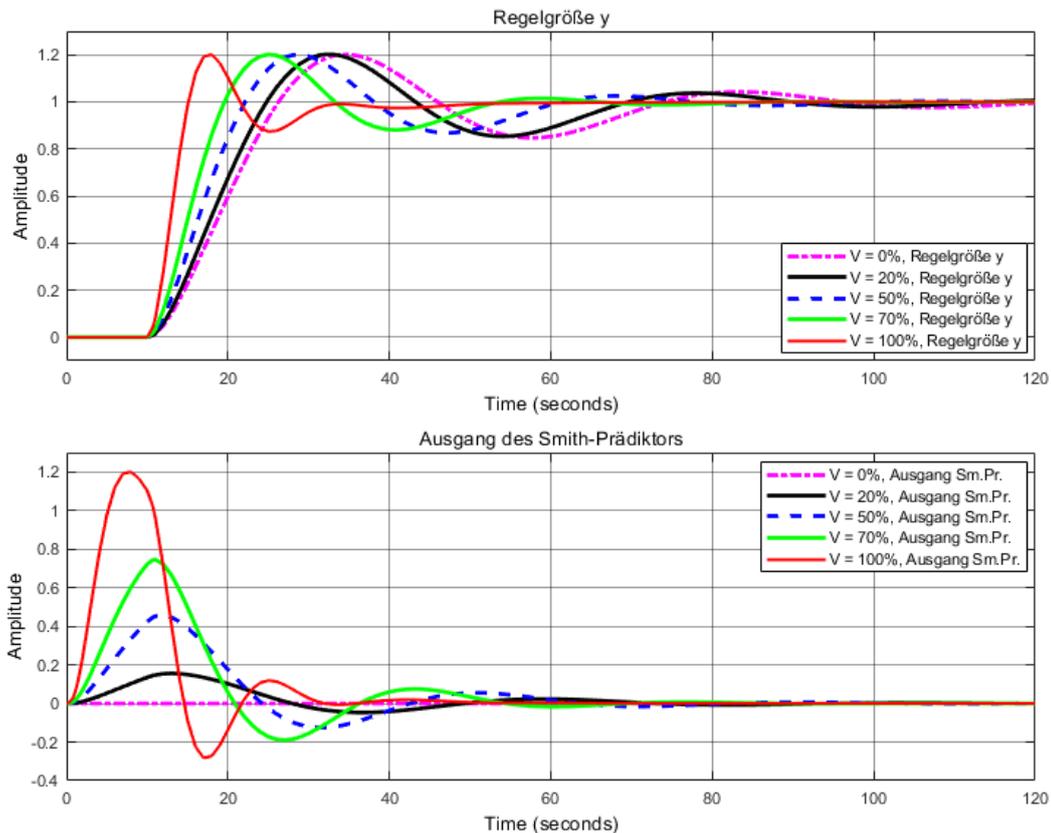


Abb. 4.11: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform PT_1 -Glied

Die Anregel- und die Ausregelzeit werden besser, je höher die Verstärkung bzw. der Einflussgrad des Smith-Prädiktors gewählt wird. Dabei wandert der Zeitpunkt der maximalen Amplitude immer weiter nach links auf der Zeitachse und die Sprungantworten werden schneller, je höher die Verstärkung V ist. Das Schwingverhalten nimmt auch deutlich ab, je größer der Wert von V definiert wird. Das Nachschwingen ist bei $V = 0\%$ am höchsten und bei $V = 100\%$ am geringsten.

Die Sprungantworten der Smith-Prädiktor-Schaltung (siehe unterer Graph) zeigen, dass die Amplituden der Sprungantworten bei hohen Verstärkungen am größten sind. Bei einer Verstärkung von $V = 100\%$ hat die Amplitude ihren maximalsten Wert von 1,2. Das Einsetzen der Sprungantworten erfolgt bei $t = 0s$ und „kompensiert“ damit die Totzeit von $T_t = 10s$. Die Sprungantworten aus Abb. 4.11 ähneln dabei den Sprungantworten aus Abschnitt 4.4.1. Die Unterschiede der Sprungantworten werden in Abschnitt 4.4.4 dargestellt.

Die höchste Aktivität der Prädiktor-Schaltung ist bei hohen Verstärkungen zu verzeichnen. Die Amplituden nehmen mit größer werdenden Verstärkungen zu. Der Ausgang des Smith-Prädiktors wird schlussendlich immer auf den Wert von 0 zurückgeführt. Die Implementierung der Smith-Prädiktor-Schaltung ermöglicht gute Regelungsergebnisse, auch bei dieser Verstärkungsform. Alle Sprungantworten sind stabil und zeigen keinerlei instabiles oder aufschwingendes Verhalten. Bei der Verwendung einer rampenförmigen Verstärkungsänderung hingegen sind die Sprungantworten ab einer bestimmten Verstärkung nicht mehr akzeptabel. Im nächsten Abschnitt 4.4.3 wird die rampenförmige Verstärkungsform vorgestellt und anhand von Sprungantworten bewertet.

4.4.3 Rampenförmige Verstärkungsänderung

Die letzte betrachtete Verstärkungsform liegt in Form einer Rampe vor. Hier wird im Gegensatz zu den beiden anderen eine konstant ansteigende Verstärkung mit der Steigung von $m = 1$ verwendet. Dazu wird die Verstärkung von $V = 0\%$ bis auf den eingestellten Wert der Endverstärkung linear hochgefahren. Die Verstärkungseinstellung ist bei dieser Verstärkungsform umständlicher. Sie erfolgt nicht über einen Konstanten-Block, da die verwendeten Rampen-Blöcke keine externen Inputs besitzen. Um die Verstärkung einstellen zu können, wurden zwei Rampenblöcke verwendet, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt aufheben. Der untere Rampen-Block hebt die Steigung der oberen Rampe am eingestellten Zeitpunkt auf. Nach dem Aufheben der Steigung wird der im unteren Rampen-Block eingestellte Wert der Verstärkung konstant bis zum Ende der Simulationszeit gehalten. Wenn z.B. eine Verstärkung von $V = 50\%$ eingestellt wird, hebt die untere Rampe die obere Rampe zum Zeitpunkt von $t = 50s$ auf und hält den Wert von $V = 50\%$ konstant bis zum Ende der Simulationszeit.

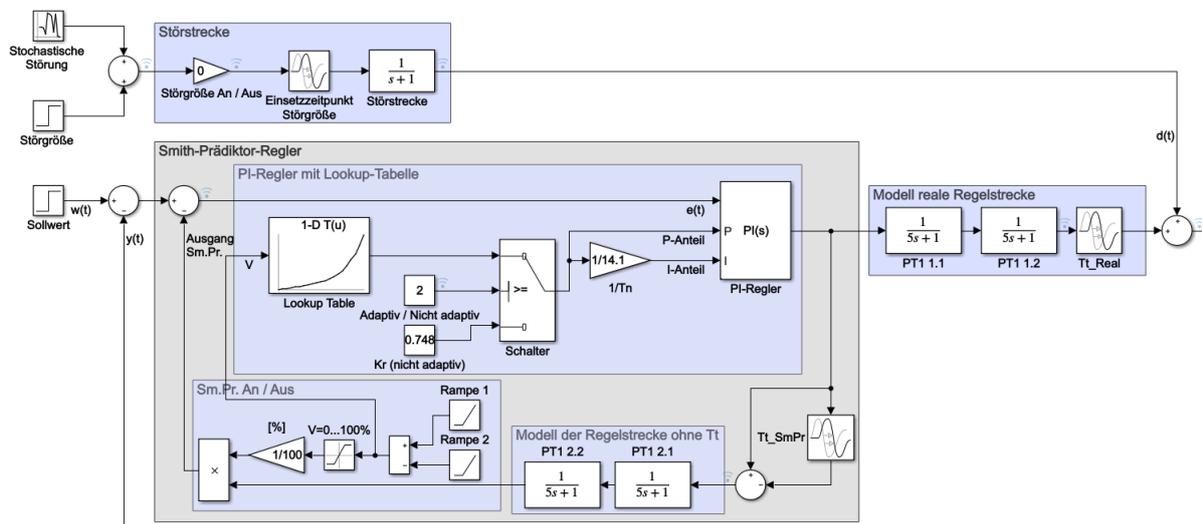


Abb. 4.12: Regelkreis mit Sm.Pr., Verstärkungsform Rampe

In dem in Abbildung 4.12 dargestellten Regelkreis wird ein PI-Regler verwendet, der neue Reglereinstellungen erhält. Das Einstellungskriterium für die Ermittlung der Reglerverstärkungen ist das Einhalten einer Überschwingweite von 20%, unabhängig von der eingestellten Verstärkung. Die stufenlose Einstellung der Verstärkung wird mithilfe einer Lookup-Table realisiert. Im Gegensatz zu der PT_1 -förmigen Verstärkungsänderung wird bei der Verwendung der Rampe die Verstärkung linear verändert. Das bringt aber auch Nachteile mit sich. Die Rampe hat eine Steigung von $m = 1$ und deswegen dauert es bei einer Verstärkung von $V = 50\%$ $t = 50s$, bis die eingestellte Verstärkung erreicht wird.

Die Rampenfunktion als Verstärkungsänderung hat ein Problem. Die Verstärkung ändert sich bei einer Steigung der Rampe von $m = 1$ immer um $1\%/s$. Je höher die eingestellte Verstärkung ist, desto länger dauert es, bis diese erreicht wird. Wenn eine Verstärkung von $V = 75\%$ eingestellt wird, dauert es ab dem Zeitpunkt der Einstellung $t = 75s$ bis diese erreicht wird.

Der Regelkreis benötigt aber die eingestellte Verstärkung bzw. die dazugehörige Reglerverstärkung so schnell wie möglich, damit die Performance des Regelkreises möglichst hoch ist. Es treten aber weitere Verstärkungsänderungen im eingeschwungenen Zustand der Regelgröße auf, bis die Endverstärkung erreicht wird.

Das langsame Hochfahren der Verstärkung bringt ein weiteres Problem mit sich. Die Reglerverstärkung ändert sich laufend, da die Lookup-Table die Verstärkung als Input besitzt. Wird V rampenförmig hochgefahren, ändert sich das Inputsignal und damit auch die Reglerverstärkung ständig. Das hat zur Folge, dass ab einer Verstärkung von $V \geq 40\%$ die Anpassung von K_r nicht mehr sinnvoll ist, da sich ab dieser Verstärkung die Regelungsergebnisse nicht mehr verbessern. Wird eine höhere Verstärkung eingestellt, finden Verstärkungsänderungen nach dem Zeitpunkt der maximalen Amplitude des Führungsgrößensprungs statt. Trotz der Anpassung verändern sich weder die Regelungsergebnisse noch die Verläufe der Sprungantworten.

Tab. 4.4: Werte des Regelkreises mit der Verstärkungsform Rampe

V [%]	Anpassung von K_r bis V = 40%			Anpassung von K_r bis V = 100%		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5
10	0,85	24,7	66,8	0,85	24,7	66,8
20	0,9	24,7	65,9	0,9	24,7	65,9
30	0,992	24,7	64,3	0,992	24,7	64,3
40	1,112	24,7	62,3	1,112	24,7	62,3
50	1,112	24,7	62,3	1,27	24,7	62,3
60	1,112	24,7	62,3	1,485	24,7	62,3
70	1,112	24,7	62,3	1,815	24,7	62,3
80	1,112	24,7	62,3	2,37	24,7	62,3
90	1,112	24,7	62,3	3,3	24,7	62,3
100	1,112	24,7	62,3	4,81	24,7	62,3

Ab einer Verstärkung von $V \geq 40\%$ nehmen die Anregel- und Ausregelzeiten nicht mehr ab, sondern verharren konstant auf einem Wert, unabhängig davon, ob die Reglerverstärkung angepasst wird oder nicht (siehe Tab. 4.4). Der Wert von K_r entspricht bis $V = 100\%$ exakt den Werten der sprungförmigen Verstärkungsänderung.

Ab einer Verstärkung von $V \geq 40\%$ wurden die Werte von K_r konstant auf $K_r = 1,112$ gelassen. Die betrachteten Größen änderten sich ab dieser Verstärkung nicht mehr, auch wenn K_r verändert wurde. Der Anstieg der Rampe von $m = 1$ verhindert bessere Regelungsergebnisse und höhere Reglerverstärkungen. Die Anregel- und Ausregelzeiten verbessern sich nur bis zu einer Verstärkung von $V = 40\%$, danach nicht mehr, auch wenn eine Anpassung der Reglerverstärkung erfolgt.

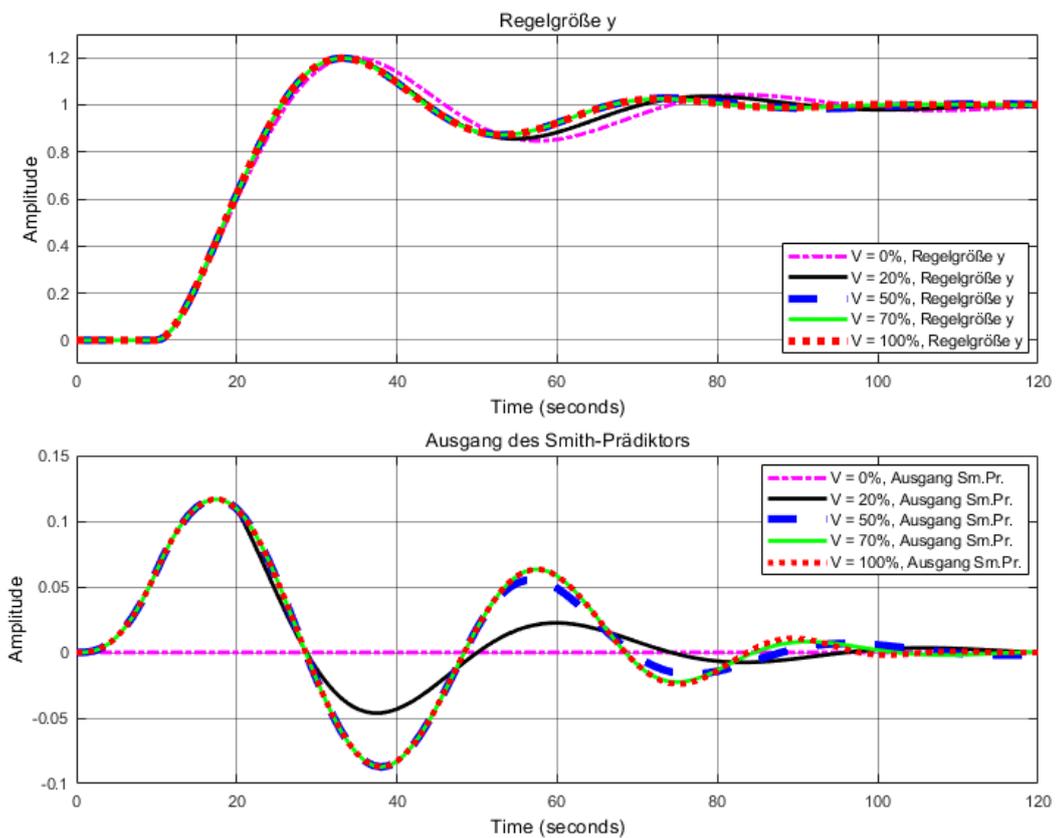


Abb. 4.13: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform Rampe

In Abb. 4.13 sind die Verläufe der Regelgröße und vom Ausgang des Smith-Prädiktors mit unterschiedlichen Verstärkungen V dargestellt. Auffällig ist, dass sich bei hohen Verstärkungen die Sprungantworten nicht mehr unterscheiden. Ab einer Verstärkung von $V \geq 40\%$ haben alle Sprungantworten nahezu einen identischen Verlauf. Auch das Hochstellen der Reglerverstärkung ab $V \geq 40\%$ hat kaum Einfluss auf den Verlauf der Sprungantworten.

Die Implementierung einer rampenförmigen Verstärkungsänderung hat nicht den gewünschten Effekt auf den Regelkreis. Die deutliche Verbesserung der betrachteten Größen bleibt aus. Positiv ist dennoch, dass die Belegung der Werte der Reglerverstärkung höher gewählt werden kann als bei einem Regelkreis ohne Smith Prädiktor.

Die ausbleibende Verbesserung der Regelungsergebnisse ab $V \geq 40\%$ lässt sich auch am Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung erkennen. Auch hier sind die Verläufe der Sprungantworten ab einer Verstärkung $V \geq 40\%$ nahezu identisch. Der Verlauf von $V = 50\%$ unterscheidet sich nur noch minimal von den Verläufen mit höheren Einflussgraden V . Wenn größere Verstärkungen betrachtet werden, sind die Sprungantworten sogar identisch. Somit haben mittlere und hohe Verstärkungen der Smith-Prädiktor-Schaltung einen nahezu identischen Einfluss auf den Regelkreis, unabhängig davon, wie hoch die Verstärkung ab $V = 50\%$ gestellt wird. Die Veränderung der Steigung m der Rampenfunktion bewirkt keine Verbesserung der Regelungsergebnisse, was Abb. 4.14 zeigt.

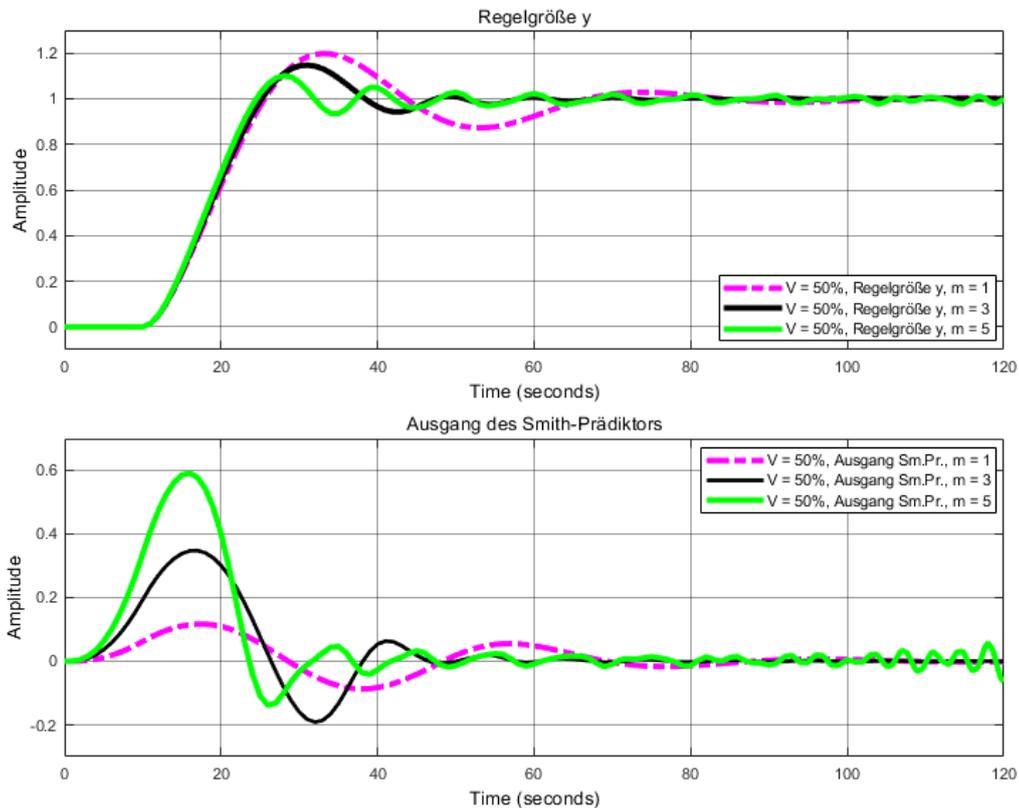


Abb. 4.14: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsform Rampe, untersch. m

In der oberen Abb. 4.14 sind die Sprungantworten der Regelgröße und vom Ausgang des Smith-Prädiktors bei einer Verstärkung von $V = 50\%$ und unterschiedlichen Steigungen m der Rampe zu erkennen. Wird die Steigung der Rampe verändert, hat dies eine deutliche Verschlechterung der Sprungantworten des Regelkreises zur Folge, wenn der Wert von m zu groß gewählt wird. Die grüne Sprungantwort von $m = 5$ zeigt, dass der Regelkreis verstärkt schwingt und sich am Ende der Simulationszeit aufschwingt. Der Regelkreis wird in diesem Fall instabil, was anhand der grünen Sprungantwort im unteren Graphen zu erkennen ist. Die stabilste Sprungantwort ist bei einer Steigung von $m = 1$ feststellbar.

Das Problem der langsamen Verstärkungsänderung von $1\%/s$ bleibt bestehen. Je höher der Wert von m gewählt wird, desto schneller wird die Endverstärkung erreicht, aber es tritt instabiles schwingendes Verhalten des Regelkreises auf. Die Veränderung der Steigung m der Rampe erzielt nicht die gewünschten Regelungsergebnisse und sollte aus Stabilitätsgründen auf dem Wert von $m = 1$ belassen werden. Auch eine Steigung von $m = 3$ (schwarze Sprungantwort) hat ein deutlich stärkeres Schwingen der Sprungantworten zu Folge. Diese Verstärkungsform ist für die weiteren Untersuchungen nicht empfehlenswert, was auch der Vergleich im kommenden Abschnitt 4.4.4 zeigen wird.

4.4.4 Vergleich der Verstärkungsformen

Nach der Vorstellung werden in diesem Abschnitt die drei Verstärkungsformen in Form eines Sprungs, einer Rampe und PT_1 -Glied verglichen, bewertet und anschließend eine für die kommenden Untersuchungen ab Abschnitt 4.5 ausgewählt. Dabei soll unter anderem die Frage beantwortet werden, welche Form der Verstärkungsänderung anwendungssicher ist.

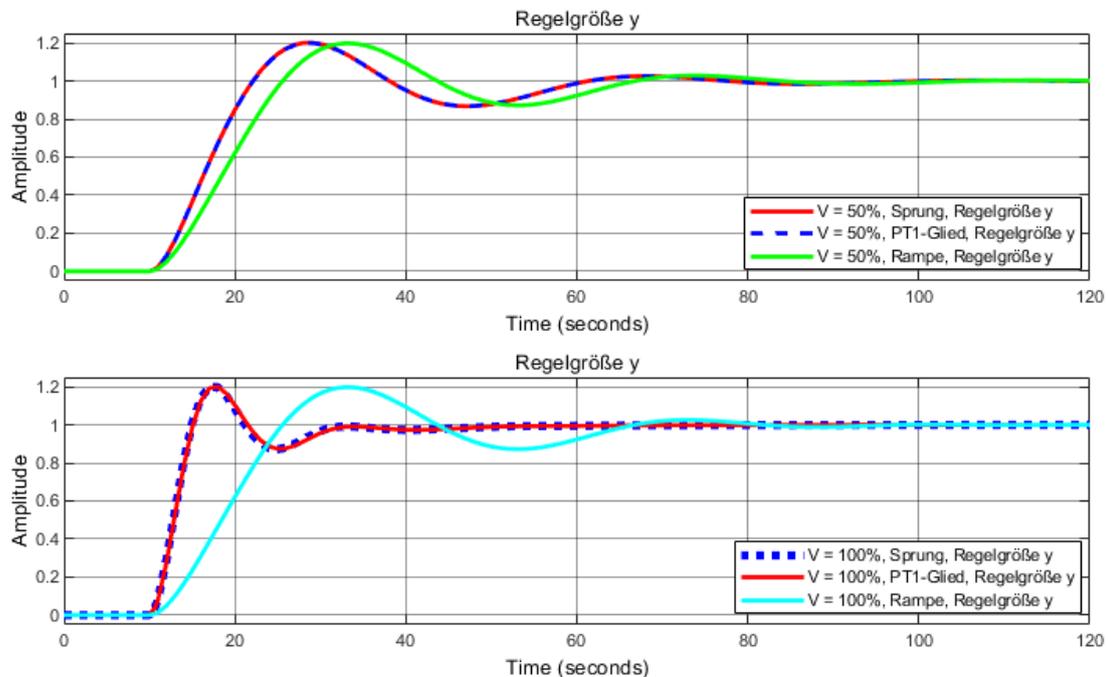


Abb. 4.15: Regelgröße, Vergleich der Verstärkungsformen

In Abb. 4.15 sind die Sprungantworten der Regelgröße mit den drei untersuchten Verstärkungsformen bei halber und voller Verstärkung V des Smith-Prädiktors dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Sprungantworten der Verstärkungsform Sprung und PT_1 -Glied kaum unterscheiden. Beide Sprungantworten haben bei beiden dargestellten Verstärkungen einen nahezu identischen Verlauf.

Die Sprungantworten der Verstärkungsform Rampe hingegen hat einen anderen Verlauf als die Verstärkungsform Sprung und PT_1 -Glied. Die grüne ($V = 50\%$) und cyanfarbige ($V = 100\%$) Sprungantworten sind im Vergleich zu den anderen Verläufen deutlich langsamer und weisen größere Anregel- sowie Ausregelzeiten auf. Die Steigung von $m = 1$ der Rampe (1%/s Verstärkungsänderung) ist der Grund für die deutlich langsameren Sprungantworten. Bei voller Verstärkung ist diese Verstärkungsform im Vergleich zu den beiden anderen weit abgeschlagen und ermöglicht keine zufriedenstellenden Regelungsergebnisse. Die beiden Verstärkungsformen Sprung und PT_1 -Glied ermöglichen viel bessere Regelungsergebnisse und sind der rampenförmigen Verstärkungsänderung in allen betrachteten Untersuchungen überlegen. Werden die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors (siehe Abb. 4.16) betrachtet, wird deutlich, dass auch hier die Verstärkungsform Rampe nicht die gewünschten Ergebnisse liefert.

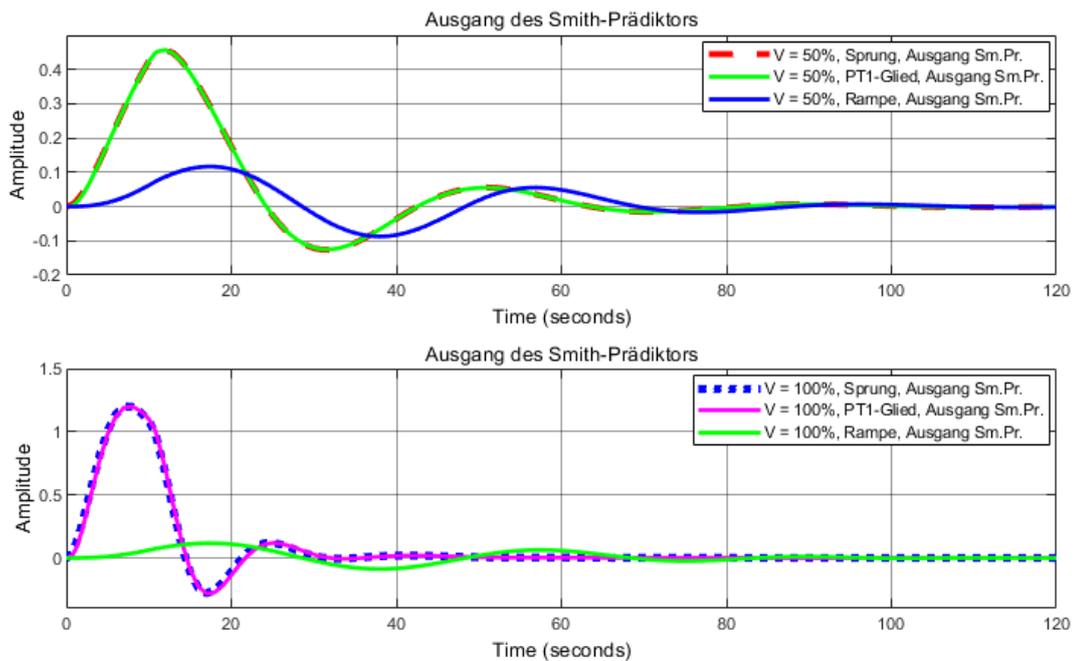


Abb. 4.16: Ausgang Sm.Pr, Vergleich der Verstärkungsformen

Die Verläufe der Verstärkungsform Sprung und PT_1 -Glied sind in Abb. 4.16 fast identisch. Die rampenförmige Verstärkungsform hingegen hat wiederum einen deutlich anderen Verlauf. Die geringere Amplitude bei $V = 50\%$ und $V = 100\%$ zeigt, dass die Einflussnahme der Schaltung auf den Regelkreis wesentlich geringer ist als die der sprungförmigen oder PT_1 -förmigen Verstärkungsform. Dieses Verhalten wird vor allem bei der Betrachtung der Sprungantworten bei voller Verstärkung sichtbar. Der grüne Verlauf hat eine sehr kleine Amplitude (0,116) im Vergleich zum Sprung (1,205) und PT_1 -Glied (1,203).

Der Grund für die schlechteren Regelungsergebnisse ist wiederum die problembehaftete Charakteristik dieser Verstärkungsform. Die Steigung von $m = 1$ der Rampe und die damit sich laufend ändernden Verstärkungen haben einen negativen Einfluss auf den Regelkreis. Trotz voller Verstärkung der Smith-Prädiktor-Schaltung sind die Regelungsergebnisse nicht deutlich besser als ein Regelkreis mit fehlender Smith-Prädiktor-Schaltung.

Wird die Steigung der Rampe verändert, kann bei zu großen Werten von m instabiles Verhalten im Regelkreis auftreten. Die Veränderung der Anstiegsgeschwindigkeit der Verstärkungsänderung hat keinen positiven Effekt auf die Regelung. Auch die Werte der Reglerverstärkung können beim rampenförmigen Hochfahren der Verstärkung nicht groß gewählt und damit der verwendete Regler nicht so aggressiv eingestellt werden als bei einer sprungförmigen oder PT_1 -förmigen Verstärkungsänderung. Die rampenförmige Verstärkungsänderung erzielt nicht die gewünschten Ergebnisse. Dies ist auch bei der Betrachtung der folgenden drei Abbildungen deutlich zu erkennen.

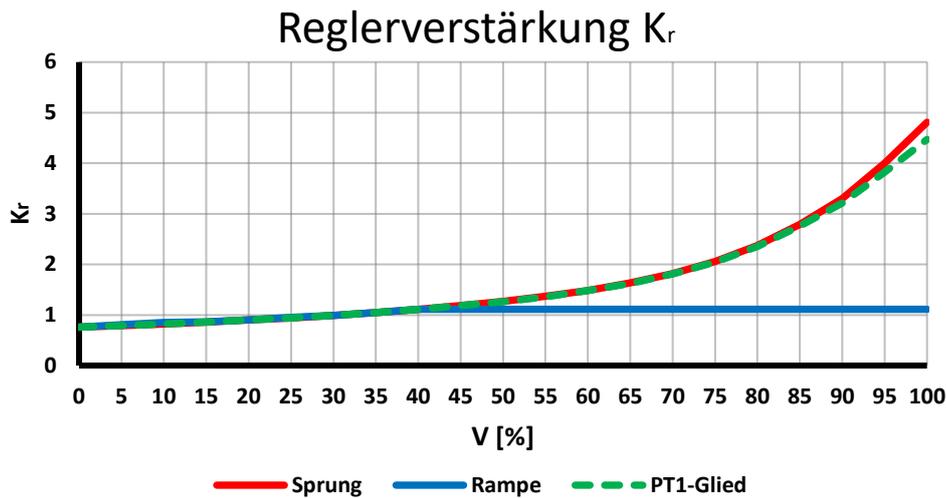


Abb. 4.17: Reglerverstärkungen, Vergleich der Verstärkungsformen

In Abb. 4.17 sind die Verläufe der angepassten Reglerverstärkungen K_r für die betrachteten Verstärkungsformen zu erkennen. Zunächst fällt auf, dass die Kurve von K_r der Rampe, des Sprungs und des PT_1 -Gliedes einen identischen Verlauf bis $V = 40\%$ haben. Bei höheren Verstärkungen von $V > 40\%$ treten die ersten deutlichen Unterschiede zwischen den Verläufen auf. Die Reglerverstärkung der Verstärkungsform Rampe wurde ab $V \geq 40\%$ auf dem Wert von $K_r = 1,112$ belassen, da auch größere Werte von K_r keinen positiven Einfluss auf das Regelungsergebnis mehr hatten. Wenn die Lookup-Table der Reglerverstärkungen des Sprungs in den Regelkreis mit rampenförmiger Verstärkungsänderung implementiert wird, unterscheiden sich die Sprungantworten der Regelgröße und die vom Ausgang des Smith-Prädiktors nicht von denen, bei einer konstanten Reglerverstärkung von $K_r = 1,112$ ab $V \geq 40\%$. Deswegen wurden die Werte von K_r ab $V \geq 40\%$ konstant gehalten.

Der exponentielle Verlauf der Werte des PT_1 -Gliedes und des Sprungs sind sehr ähnlich. Bei niedrigen Verstärkungen z.B. $V = 40\%$ sind die Werte von K_r nahezu gleich (Sprung: $K_r = 1,112$, PT_1 -Glied: $K_r = 1,11$). Erst ab einer Verstärkung von $V \geq 85\%$ sind sichtbare Unterschiede vorhanden. Höhere Werte werden bei der sprungförmigen Verstärkungsänderung erreicht und der Regler konnte aggressiver eingestellt werden. Bei $V = 100\%$ sind die Unterschiede zwischen der sprungförmigen und PT_1 -förmigen Verstärkungsform am größten. Bei $V = 100\%$ hat der Regelkreis mit der Verstärkungsform Sprung eine Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ und der Regelkreis mit PT_1 -förmiger Verstärkungsform eine Reglerverstärkung von $K_r = 4,47$. Werden nur die Werte der Reglerverstärkung als Auswahlkriterium verwendet, dann ist die Verstärkungsform Sprung die beste Wahl. Der verwendete Regler kann hier im Vergleich, vor allem bei hohen Verstärkungen am stärksten eingestellt werden kann.

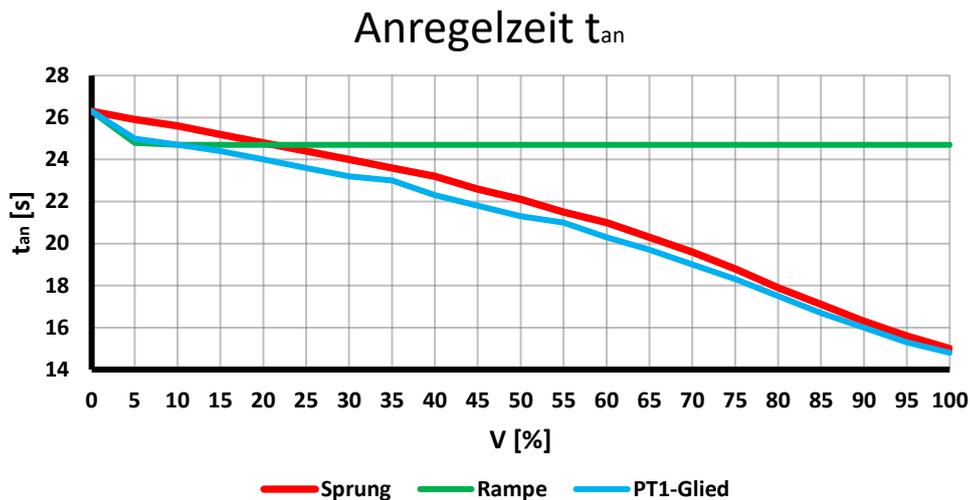


Abb. 4.18: Anregelzeiten, Vergleich der Verstärkungsformen

Der Regelkreis mit PT_1 -förmiger Verstärkungsform hat im Vergleich die besten bzw. die kürzesten Anregelzeiten. Bei mittleren Verstärkungen V ist das sichtbar, da der blaue Verlauf deutlich unter dem roten Verlauf des Sprungs und dem grünen Verlauf der Rampe liegt. Der Abstand der Verläufe des Sprungs und des PT_1 -Gliedes wird bei großen Verstärkungen immer kleiner. Wird der Smith-Prädiktor zu $V = 100\%$ in den Regelkreis eingebunden, sind die Anregelzeiten der Verstärkungsformen des Sprungs und des PT_1 -Gliedes nahezu identisch (Sprung: $t_{an} = 15s$, PT_1 -Glieder: $t_{an} = 14,8s$). Beide Verläufe unterscheiden sich aber deutlich bei kleineren Verstärkungen, beispielsweise bei $V = 40\%$ (Sprung: $t_{an} = 23,2s$, PT_1 -Glieder: $t_{an} = 22,3s$). Hier ist die Anregelzeit der Verstärkungsform mit PT_1 -Glieder nahezu eine Sekunde kürzer als die des Sprungs.

Die Anregelzeiten der rampenförmigen Verstärkungseinstellung haben ab einer Verstärkung von $V \geq 10\%$ einen Wert von $t_{an} = 24,7$. Dieser Wert ändert sich nicht mehr, unabhängig davon, wie hoch die Verstärkung des Smith-Prädiktors gewählt wird. Im Vergleich weist der grüne Verlauf die längsten und damit schlechtesten Anregelzeiten auf. Diese ändern sich nicht, auch wenn die Werte der Verstärkungsform Sprung in den Regelkreis mit rampenförmiger Verstärkungseinstellung eingefügt und sämtliche Verstärkungen simuliert werden.

Wenn das Auswahlkriterium der Verstärkungsform die Anregelzeit ist, sollte eine PT_1 -förmige Verstärkungsform gewählt werden, da diese Form über den gesamten Bereich von $V = 0\%$ bis $V = 100\%$ die kürzesten Anregelzeiten garantiert. Werden dagegen die Ausregelzeiten betrachtet, hat die PT_1 -förmige Verstärkungsform keine großen Vorteile gegenüber der Verstärkungsform Sprung (siehe Abb. 4.19). Die besten Werte wurden mit der Verstärkungsform Sprung erzielt. Die Anregel- und Ausregelzeiten wurden mithilfe der angepassten Reglerverstärkungen aufgenommen. Dazu wurden die Regler anhand der Anpassungsvorschrift in 5%-Schritten eingestellt und die ermittelten Werte in die jeweilige Lookup-Table eingefügt.

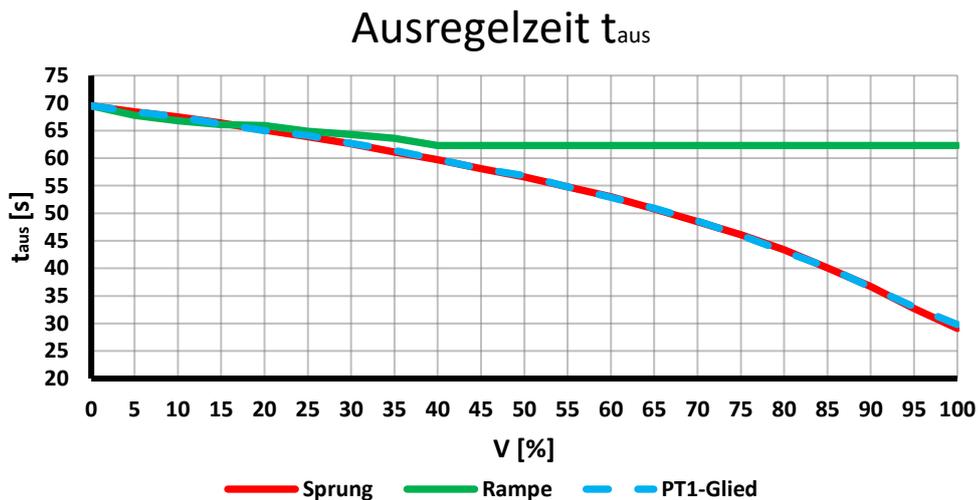


Abb. 4.19: Ausregelzeiten, Vergleich der Verstärkungsformen

Die Verläufe der Verstärkungsform Sprung und PT_1 -Glied sind bis zu einer Verstärkung von $V \leq 90\%$ nahezu identisch. Bei voller Verstärkung des Smith-Prädiktors von $V = 100\%$ sind die Unterschiede sehr klein, die Ausregelzeit des Sprungs beträgt $t_{aus} = 29,1s$ und die der Form mit PT_1 -Glied $t_{aus} = 29,8s$. Werden kleinere Verstärkungen gewählt z.B. $V = 50\%$ sind die Ausregelzeiten sehr nahe beieinander (Sprung: $t_{aus} = 56,6s$, PT_1 -Glied: $t_{aus} = 56,8s$).

Die Ausregelzeiten der rampenförmigen Verstärkungsform hingegen sind ab einer Verstärkung von $V \geq 40\%$ konstant auf dem Wert von $t_{aus} = 62,3s$. Dieses Verhalten ist auch in den vorherigen Abbildungen der Reglerverstärkung und der Anregelzeit zu finden. Im Vergleich zu den beiden anderen Verstärkungsformen liefert die Verwendung einer Rampe die schlechtesten Regelungsergebnisse und wird aus diesem Grund nicht für weitere Untersuchungen verwendet. Die Variante der sprunghaften Verstärkungseinstellung hat im Vergleich zur PT_1 -förmigen Darstellungsform minimal bessere Ausregelzeiten und höhere Reglerverstärkungen beim maximalen Einfluss der Smith-Prädiktor-Schaltung. Die PT_1 -Form hingegen hat deutlich bessere Anregelzeiten, unterliegt aber wertetechnisch bei allen anderen Größen der Verstärkungsform Sprung.

Das Augenmerk bei der Implementierung einer Smith-Prädiktor-Schaltung lag auf der möglichst aggressivsten Einstellung des Reglers und aus diesem Grund wurde die sprunghafte Verstärkungsform für die Untersuchungen ab Abschnitt 4.5 ausgewählt. Die geringeren Ausregelzeiten dieser Verstärkungsform ermöglichen bessere Regelungsergebnisse bei hohen Verstärkungen und steigern damit die Effektivität der Smith-Prädiktor-Schaltung. In Anlage 4 sind alle ermittelten Werte der drei untersuchten Verstärkungsformen aufgeführt. Diese Tabelle war die Grundlage für die Erstellung der Graphen (Abb. 4.17 - 4.19). Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Verstärkungsformen tabellarisch dargestellt.

Tab. 4.5: Vor- u. Nachteile der Verstärkungsformen

	Vorteile	Nachteile
Sprung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr gute Ausregelzeiten ▪ Gute Anregelzeiten ▪ Hohe Werte von K_r bei hohen Verstärkungen V ▪ Aggressiv eingestellter Regler möglich ▪ Deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse ▪ Einfache Implementierung ▪ Einfache stufenlose Verstärkungseinstellung ▪ Sofortige Verstärkungsänderung bei Verstärkungseinstellung 	
PT₁-Glied	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr gute Anregelszeiten ▪ Deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse ▪ Gute Ausregelzeiten ▪ Einfache stufenlose Verstärkungseinstellung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativ aufwändige Implementierung
Rampe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gleichmäßige Verstärkungsänderung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verstärkungsänderung mit 1%/s zu langsam ($m = 1$) ▪ Vergrößerung von m führt zu instabilen Verhalten ▪ Keine deutliche Verbesserung von t_{an} ▪ Aufwändige Implementierung ▪ Komplexe Verstärkungseinstellung ▪ Niedrige Reglerverstärkungen

In Tab. 4.5 ist zu erkennen, dass die Verstärkungsform Sprung die meisten Vorteile hat. Neben hohen Reglerverstärkungen und guten Regelungsergebnissen ist auch die Implementierung im Vergleich die Einfachste. Aufgrund der zahlreichen Vorteile fiel die Wahl der Verstärkungsform auf die sprunghafte Verstärkungseinstellung für alle folgenden Untersuchungen. Wenn das bestmögliche Regelungsergebnis bei sämtlichen Verstärkungen des Smith-Prädiktors erzielt werden soll und als Einstellungskriterium eine Überschwingweite von 20% gewählt wird, sollte die sprungförmige Verstärkungsform verwendet werden. Wenn die Ausregelzeit als Einstellungskriterium verwendet wird, sollte die PT₁-förmige Verstärkungsform gewählt werden. Dabei ist zu beachten, welche Regelstrecke vorliegt und welche Ordnung diese besitzt. Die möglichst genaue Ermittlung der vorliegenden Regelstrecke ermöglicht bei der Implementierung des Smith-Prädiktors die besten Regelungsergebnisse, auch bei hohen Verstärkungen. Regelstrecken z.B. höherer Ordnung können andere Regelungsergebnisse und ein anderes Verhalten bei der Verwendung der unterschiedlichen Verstärkungsformen aufweisen.

In den folgenden Abschnitten werden die Untersuchungen zur Robustheit der Smith-Prädiktor-Schaltung durchgeführt. Es werden neben Verstärkungsänderungen im einschwingenden Zustand auch Änderungen im ausgeschwungenen Zustand simuliert und ausgewertet.

4.5 Verstärkungsänderungen des Smith-Prädiktors

4.5.1 Verstärkungsänderung im einschwingenden Zustand

Die Möglichkeit, den implementierten Smith-Prädiktor prozentual in den Regelkreis einzubinden, wurde in Abschnitt 4.2 beschrieben. Mithilfe dieser Verstellungsmöglichkeit lässt sich nicht nur die Anfangsverstärkung einstellen, es ist auch die Umstellung der Verstärkung der Prädiktor-Schaltung möglich. Dazu wird zu einem beliebigen Zeitpunkt eine neue Verstärkung eingestellt, um den Prädiktor teilweise oder vollständig rein- oder rauszunehmen. Die situationsbedingte und korrekte Anpassung der Reglerparameter ist bei einer Verstärkungsumstellung zwingend notwendig. Das ist unter anderem in Tab. 4.6 zu erkennen.

Tab. 4.6: Werte des Regelkreises mit Verstärkungsänderungen

V [%]	Ohne Anpassung von K_r			Mit Anpassung von K_r		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
10 → 20	0,823	25,6	66,7	0,9	25,6	65,5
10 → 50	0,823	25,6	62,9	1,27	25,6	60,8
10 → 70	0,823	25,6	59,2	1,815	25,6	55,1
10 → 100	0,823	25,6	41,9	4,81	25,6	44,4
20 → 10	0,9	24,8	81,6	0,823	24,8	66,4
50 → 10	1,27	22,1	161,7	0,823	22,1	62,2
70 → 10	1,815	16,6	n.v.	0,823	16,6	58,6
100 → 10	4,81	15	n.v.	0,823	15	56,1

In den linken Spalten der Tabelle wurden die Werte eines Regelkreises ohne Anpassung der Reglerverstärkung aufgelistet. Die Nichtanpassung der Reglerparameter bedeutet, dass die Reglerverstärkung konstant gehalten und nicht korrigiert wird, auch wenn sich der prozentuale Einfluss des Smith-Prädiktors ändert. Wenn beispielsweise die Anfangsverstärkung einen Wert von $V = 10\%$ hat und bei $t = 25s$ auf $V = 70\%$ verstellt wird, hat die Reglerverstärkung von Anfang bis zum Ende der Simulationszeit einen Wert von $K_r = 0,823$. Dieser Wert wird nicht bei $t = 25s$ angepasst, obwohl die Verstärkung bzw. der Einfluss des Smith-Prädiktors verstellt wird. Die Anfangsverstärkung ist die zu Beginn der Simulationszeit eingestellte Verstärkung der Smith-Prädiktor-Schaltung. Die Werte des Regelkreises mit angepasster Reglerverstärkung sind auf der rechten Seite von Tab. 4.6 zu erkennen. Anpassung der Reglerverstärkung bedeutet, dass der Wert von K_r abhängig von der eingestellten Verstärkung des Smith-Prädiktors korrigiert wird. Wenn der Einfluss der Prädiktor-Schaltung von $V = 10\%$ auf $V = 70\%$ verstellt wird, erfolgt eine automatische und sofortige Anpassung der Reglerverstärkung von $K_r = 0,823$ ($V = 10\%$) auf $K_r = 1,815$ ($V = 70\%$).

Wenn der Wert von K_r auf dem am Anfang eingestellten Wert der entsprechenden Verstärkung gelassen und nicht verändert wird, obwohl eine Umstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors erfolgt, wird der Regelkreis instabil. Große mathematische Abweichungen innerhalb des Regelkreises treten vor allem bei einer Nichtanpassung und gleichzeitigen Verstellung der Prädiktor-Schaltung auf. Das Resultat ist ein instabiler, sich aufschwingender Regelkreis. In Tabelle 4.6 ist das bei $V = 70\% \rightarrow V = 10\%$ zu erkennen. Der Regelkreis schwingt sich im Laufe der Zeit immer mehr auf und ermöglicht damit keine Ausregelzeiten.

Die Anpassung der Reglerverstärkung ermöglicht auch bei großen Verstärkungsumstellungen gute Ausregelzeiten, da der Regelkreis kein instabiles Verhalten mehr aufweist und die Sprungantwort der Regelgröße den Zielkorridor von $\pm 5\%$ vom Sollwert ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr verlässt. Das instabile Verhalten bei einer Nichtanpassung der Reglerparameter tritt erst bei großen Verstärkungsumstellungen auf. Wird der Einfluss des Smith-Prädiktors von einem kleinen Wert auf einen großen Wert gestellt und die Reglerverstärkung nicht angepasst, ist der Regler gutmütig bzw. sehr schwach eingestellt. Hier tritt kein instabiles Verhalten auf. Wenn von einem großen Wert von V auf einen kleinen Wert von V gestellt wird, ist der Regler viel zu stark eingestellt und der Regelkreis wird instabil.

Beim Hochstellen der Verstärkung und gleichzeitiger Anpassung der Reglerparameter verbessern sich die Regelungsergebnisse deutlich. Die Ausregelzeiten werden kürzer und die Sprungantworten schneller. Die Werte von t_{aus} sind bei einer Nichtanpassung von K_r und einem zu gutmütig eingestellten Regler deutlich schlechter als bei einer Anpassung der Reglerverstärkung. Nur der Wert der Ausregelzeit von $V = 100 \rightarrow V = 10\%$ verschlechtert sich bei einer Anpassung. Der Grund ist der ungewöhnliche Verlauf der Sprungantwort der Regelgröße, der erst $t = 2,5s$ später den Sollwert von 1 erreicht als die Sprungantwort mit nichtangepasster Reglerverstärkung. Die Anregelzeiten unterscheiden sich bei einer Anpassung und Nichtanpassung von K_r nicht.

Das Runterstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktors hat einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis, wenn der Regler nicht angepasst wird. Der Regelkreis schwingt sich bei großen Verstärkungsänderungen auf und wird instabil. Eine Anpassung der Reglerparameter ist zwingend notwendig, damit einerseits instabiles Verhalten vermieden werden kann und andererseits die Regelungsergebnisse deutlich verbessert werden können.

Die Anregelzeiten werden beim Hoch- und Runterstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktors nicht beeinflusst. Alle Regelkreise verzeichneten keine Verbesserung oder Verschlechterung dieser Größe. Der Grund ist der Zeitpunkt der Verstärkungsumstellung von $t = 25s$. Beim Hochstellen von V dauert es eine gewisse Zeit, bis der Regelkreis sich der neuen Situation anpasst. Eine Anregelzeit von $t_{an} = 25,6s$ (0,6s nach Verstärkungsumstellung) wird hier nicht beeinflusst. Beim Runterstellen von V verändern sich die Anregelzeit nicht, unabhängig ob eine Anpassung von K_r durchgeführt wird oder nicht. Die Umstellung von V erfolgt beim Runterstellen von V nach dem erstmaligen Erreichen des Sollwertes von 1, deswegen wird die Größe t_{an} weder verbessert noch verschlechtert.

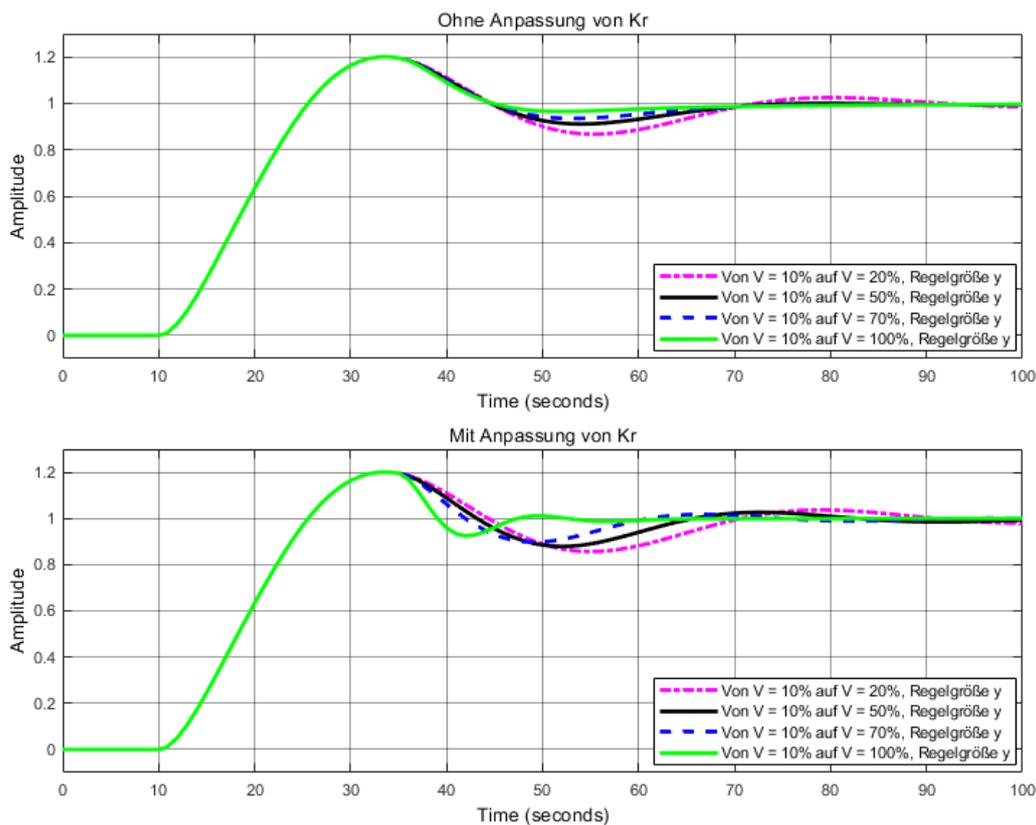


Abb. 4.20: Regelgröße, Verstärkungsänderung aufwärts, einschw. Zustand

In Abb. 4.20 sind die Sprungantworten der Regelgröße bei einer Nichtanpassung (oberer Graph) und Anpassung (unterer Graph) der Reglerverstärkung zu erkennen. Der Wert von V wurde jeweils von $V = 10\%$ bei $t = 25s$ auf eine höhere Verstärkung gestellt. Bei der Nichtanpassung von K_r ist der Regler „gutmütig“ eingestellt und hat eine Reglerverstärkung von $K_r = 0,823$ ($V = 10\%$). Dieser Wert wird nicht verändert, auch wenn die Verstärkung umgestellt wird. Die Folge ist im oberen Graphen zu erkennen. Die Amplituden des Nachschwingers nehmen bei großen Verstärkungsänderungen ab. Der zu schwach eingestellte Regler ermöglicht keine guten Regelungsergebnisse, aber die Ausregelzeiten verbessern sich trotz der fehlerbehafteten Parametrierung des Reglers und das auch bei großen Verstärkungsumstellungen.

Eine Anpassung der Reglerverstärkung hat eine deutliche Verbesserung der Sprungantworten zur Folge. Im unteren Teil von Abb. 4.20 ist das deutlich zu erkennen. Die Sprungantworten werden schneller und damit die Ausregelzeiten kürzer. Die Anpassung des Reglers erfolgt im Moment der Verstärkungsänderung. Zum Zeitpunkt von $t = 25s$ wird beispielsweise bei $V = 10\% - V = 100\%$ der Wert von K_r von $K_r = 0,823$ auf $K_r = 4,81$ korrigiert. Eine Anpassung der Reglerparameter ist hier nicht zwingend notwendig, da der Regler beim Hochstellen der Verstärkung „nur zu schwach“ eingestellt ist und kein instabiles Verhalten verursacht. Die Regelungsergebnisse sind im oberen Teil von Abb. 4.20 akzeptabel, da hier kein unerwünschtes Verhalten auftritt. Sie sind auch bei einer Verstärkungsänderung ohne Anpassung von K_r besser als die eines Regelkreises ohne Smith-Prädiktor (Regelkreis ohne Sm.Pr. $t_{aus} = 69,7$, Regelkreis mit Sm.Pr. und $V = 10\% \rightarrow V = 100\%$ $t_{aus} = 65,5s$).

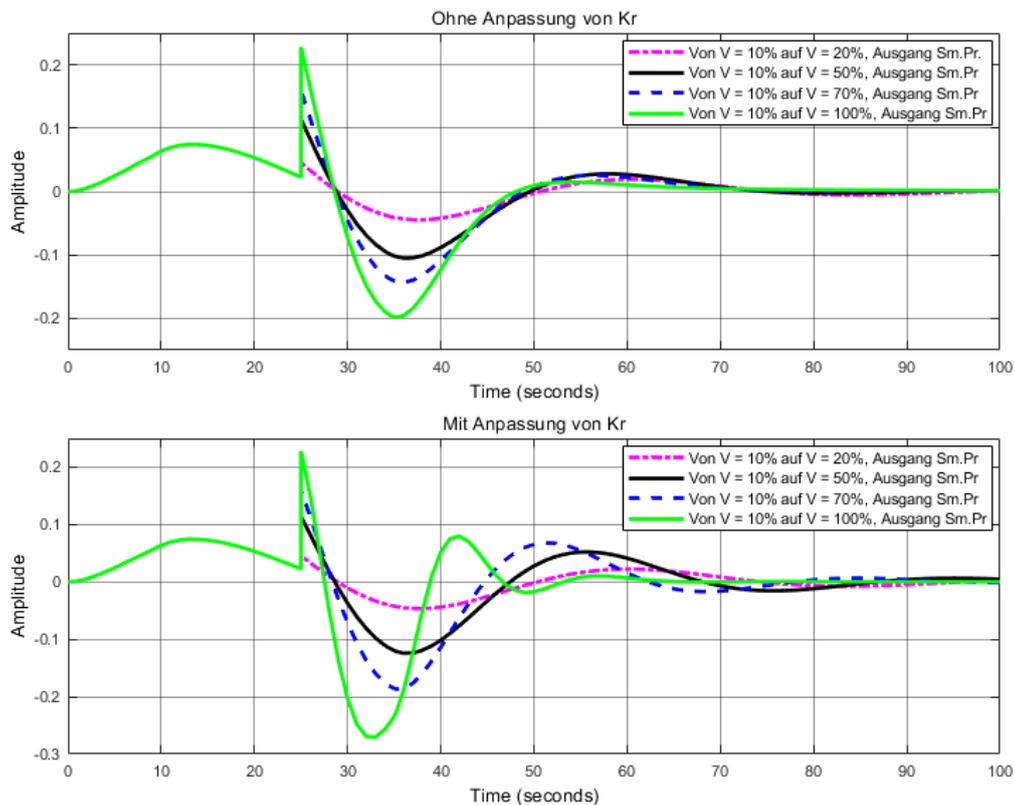


Abb. 4.21: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung aufwärts, einschw. Zustand

Werden die Sprungantworten vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung betrachtet, ist ein deutlicher Unterschied zwischen einer Anpassung und Nichtanpassung von K_r sichtbar. Im oberen Teil von Abb. 4.21 haben die Sprungantworten einen ähnlichen Verlauf. Anfangs sind die Verläufe bis $t = 25s$ identisch, da die Verstärkungsumstellung erst ab diesem Zeitpunkt erfolgt. Der größte Unterschied ist anhand der einzelnen Amplituden im Zeitpunkt der Verstärkungsumstellung ($t = 25s$) und dem folgenden Nachschwingen zu erkennen. Je größer die Verstärkungsumstellung ist, desto größer sind die Amplituden. Die Sprungantworten bei großen Änderungen beispielsweise bei $V = 10\% \rightarrow V = 70\%$ sind nicht deutlich schneller als die Sprungantworten bei kleineren Änderungen, nur die Amplituden unterscheiden sich deutlich. Werden die Reglerparameter im Moment der Verstärkungsänderung ($t = 25s$) des Smith-Prädiktors angepasst, hat das einen deutlichen Einfluss auf die Sprungantworten der Prädiktor-Schaltung. Die Verläufe bei großen Änderungen vom Einfluss des Prädiktors heben sich jetzt deutlich von denen mit kleineren Änderungen ab. Die grüne Sprungantwort ($V = 10\% \rightarrow V = 100\%$) hat im unteren Teil der Abbildung einen viel schnelleren Verlauf als im oberen Teil der Abbildung. Diese schnellere Reaktion der Prädiktor-Schaltung trägt auch zu der deutlichen Verbesserung der Regelungsergebnisse bei. Der Regler wurde in diesem Fall optimal eingestellt und ist weder zu stark noch zu schwach.

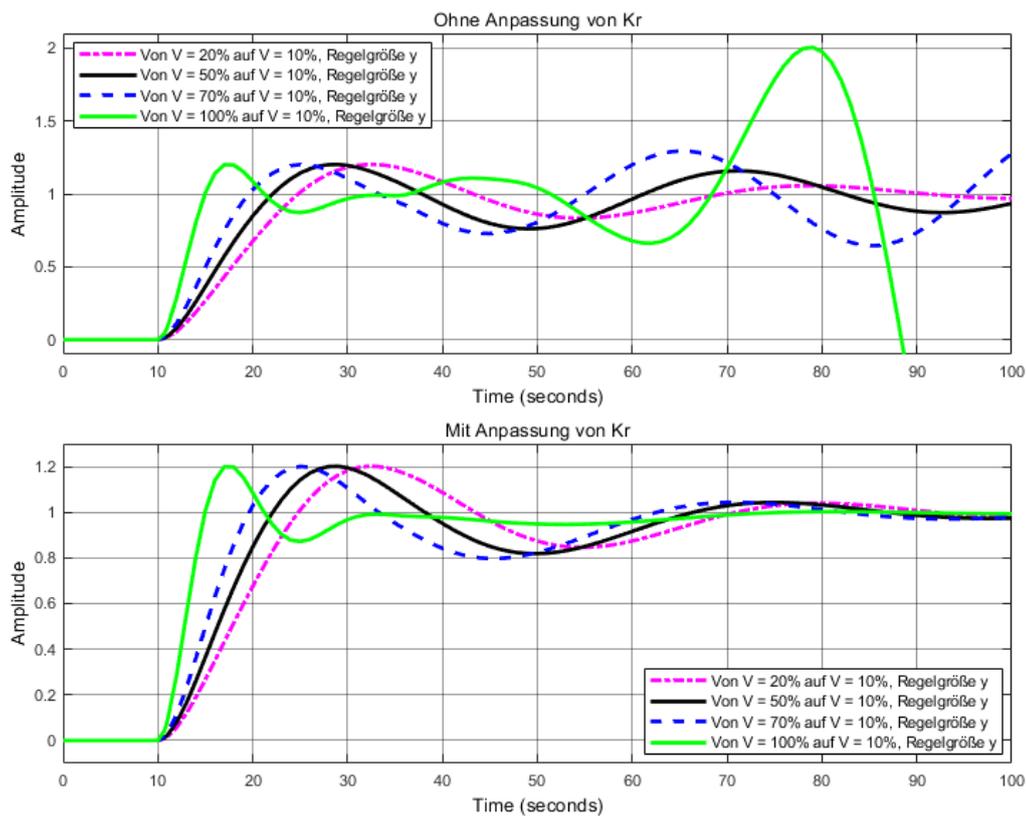


Abb. 4.22: Regelgröße, Verstärkungsänderung abwärts, einschw. Zustand

Eine Anpassung der Reglerparameter ist beim Runterstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktors zwingend notwendig. Der Regler ist sonst nicht gutmütig, sondern viel zu stark eingestellt. Das Resultat ist im oberen Teil von Abb. 4.22 zu erkennen. Eine zu große Reglerverstärkung hat ein instabiles und aufschwingendes Verhalten des Regelkreises zur Folge. Die Sprungantworten schwingen sich im Laufe der Simulationszeit auf und destabilisieren damit das gesamte System. Auch die Verläufe bei mittleren Verstärkungsänderungen beispielsweise bei $V = 50\% \rightarrow V = 10\%$ sind nicht mehr akzeptabel. Auch hier ist ein deutliches Nachschwingen der Sprungantwort zu erkennen. Erst bei größeren Verstärkungsänderungen wird die Stabilitätsgrenze des Regelkreises überschritten und das System wird instabil.

Die Anpassung der Reglerverstärkung verhindert das Auftreten von instabilem Verhalten. Der Regler wird situationsbedingt mithilfe der implementierten Lookup-Table angepasst und ist immer optimal eingestellt. Damit wird nicht nur der Regelkreis stabilisiert, auch die Sprungantworten und die Ausregelzeiten verbessern sich deutlich. Eine Anpassung muss beim Hochstellen vom Einfluss der Smith-Prädiktor-Schaltung unbedingt erfolgen, damit einerseits die Stabilitätsgrenze des Regelkreises nicht überschritten wird und andererseits die bestmöglichen Regelungsergebnisse erzielt werden können. Dasselbe lässt sich anhand der Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors in der folgenden Abbildung schlussfolgern.

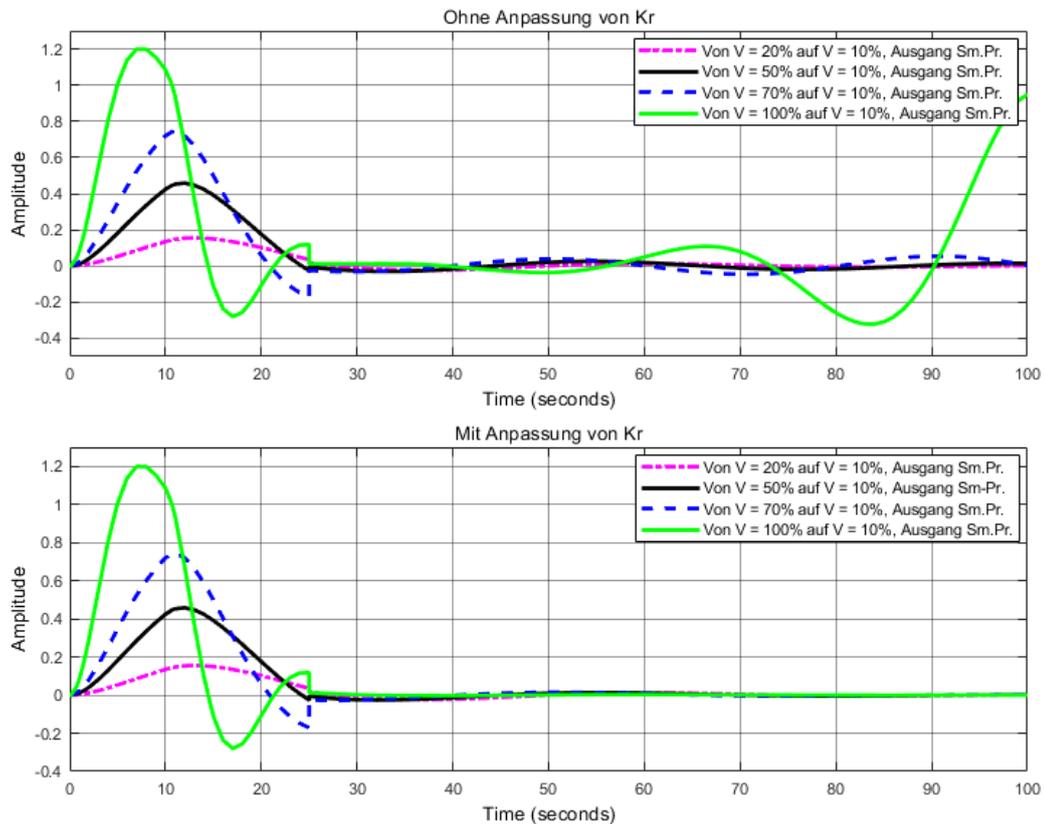


Abb. 4.23: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung abwärts, einschw. Zustand

Die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors verzeichnen genau wie die Verläufe der Regelgröße instabiles Verhalten bei großen Verstärkungsänderungen. Der grüne Verlauf im oberen Graphen von Abb. 4.23 schwingt sich im Laufe der Simulationszeit immer weiter auf. Die Anpassung der Reglerverstärkung verhindert auch bei der Smith-Prädiktor-Schaltung instabiles Verhalten. Im unteren Graphen der Abbildung ist die grüne Sprungantwort stabil und verzeichnet keinerlei Aufschwingen. Der Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung wird immer gegen 0 geführt, aber kleine numerische Abweichungen innerhalb des Regelkreises können ausreichen den Regelkreis bei einem zu stark eingestellten Regler zu destabilisieren. Aus diesem Grund ist eine Anpassung beim Runterstellen der Verstärkung zwingend notwendig um die mathematischen Abweichungen so gering wie möglich zu halten.

Abschließend lässt sich feststellen, dass bei einer Verstärkungsumstellung im Einschwingvorgang die Regelungsergebnisse verbessert werden können, wenn der Regler entsprechend automatisch angepasst wird. Erfolgt keine Anpassung der Reglerparameter ist instabiles, aufschwingendes Verhalten des Regelkreises die Folge. Eine Anpassung beim Hochstellen der Verstärkung ist nicht zwingend notwendig, aber eine situationsbedingte Korrektur der Reglerparameter garantiert bessere Regelungsergebnisse. Beim Runterstellen von V hingegen ist die Anpassung der Reglerparameter zwingend notwendig, damit der Regelkreis stabil gehalten werden kann.

4.5.2 Verstärkungsänderung im ausgeschwungenen Zustand

Im vorherigen Abschnitt 4.5.1 wurde die Verstärkungsänderung im einschwingenden Zustand betrachtet. Dabei hatte die Nichtanpassung der Reglerverstärkung einen sehr negativen und destabilisierenden Einfluss auf den Regelkreis. Im Folgenden werden die Simulationen aus dem vorherigen Abschnitt wiederholt, mit dem Unterschied, dass die Verstärkungsänderung erst im ausgeschwungenen Zustand bei $t = 200s$ erfolgt. Dabei werden die Regelungsergebnisse bei einer Nichtanpassung und Anpassung der Reglerverstärkung aufgenommen, verglichen und anschließend bewertet.

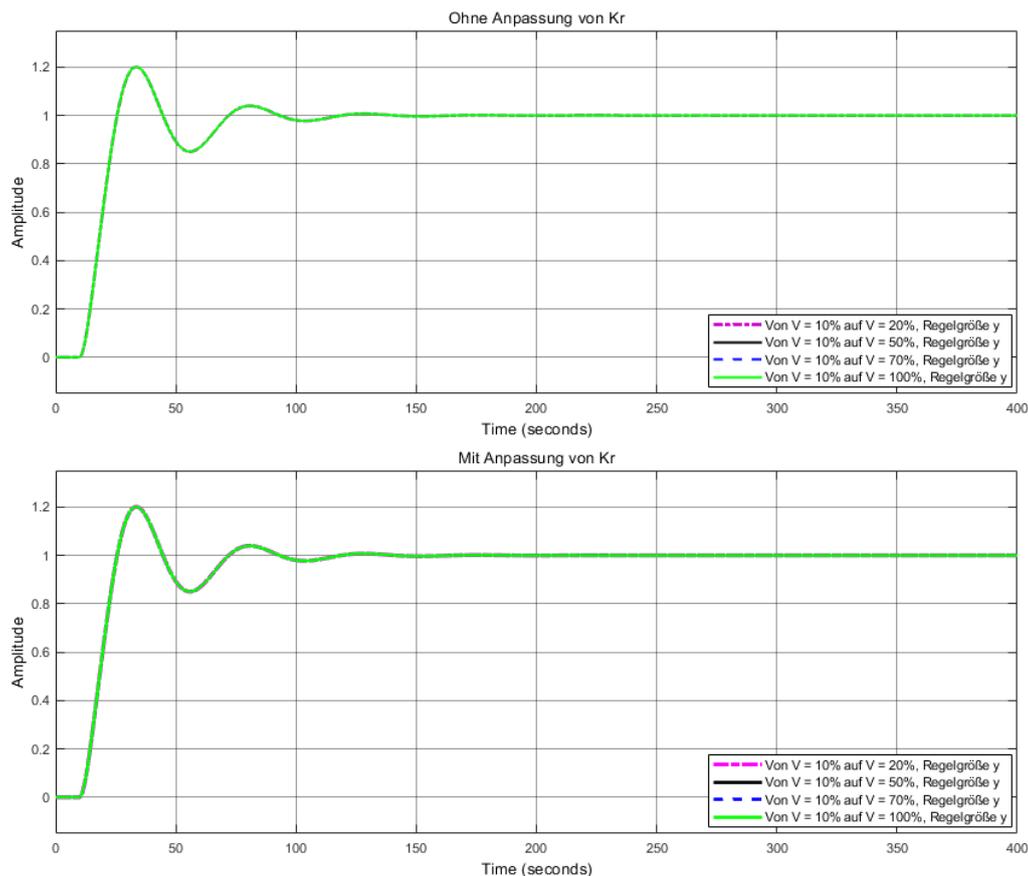


Abb. 4.24: Regelgröße, Verstärkungsänderung aufwärts, ausgeschw. Zustand

Werden die Sprungantworten in Abb. 4.24 betrachtet, fällt auf, dass sowohl die Verläufe mit als auch ohne angepasster Reglerverstärkung denselben Verlauf aufweisen. Eine Umstellung in Form eines Hochstellens der Verstärkung bei $t = 200s$ hat keinen Einfluss auf die Regelgröße. Alle Sprungantworten sind stabil und zeigen keinerlei instabiles Verhalten. Die mathematischen Abweichungen innerhalb des Regelkreises sind nicht groß genug, um die Stabilitätsgrenze des Regelkreises zu überschreiten. Der verwendete PI-Regler ist beim Hochstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktor gutmütig bzw. sehr schwach eingestellt, wenn K_r nicht angepasst wird. Eine Anpassung der Reglerparameter ist in diesem Simulationsfall nicht zwingend notwendig, da alle Sprungantworten einen identischen Verlauf aufweisen und kein unerwünschtes Verhalten auftritt. Die Anpassung ist trotzdem empfehlenswert, um die mathematischen Abweichungen innerhalb des Regelkreises zu minimieren und den Regelkreis in allen Situationen stabil zu halten.

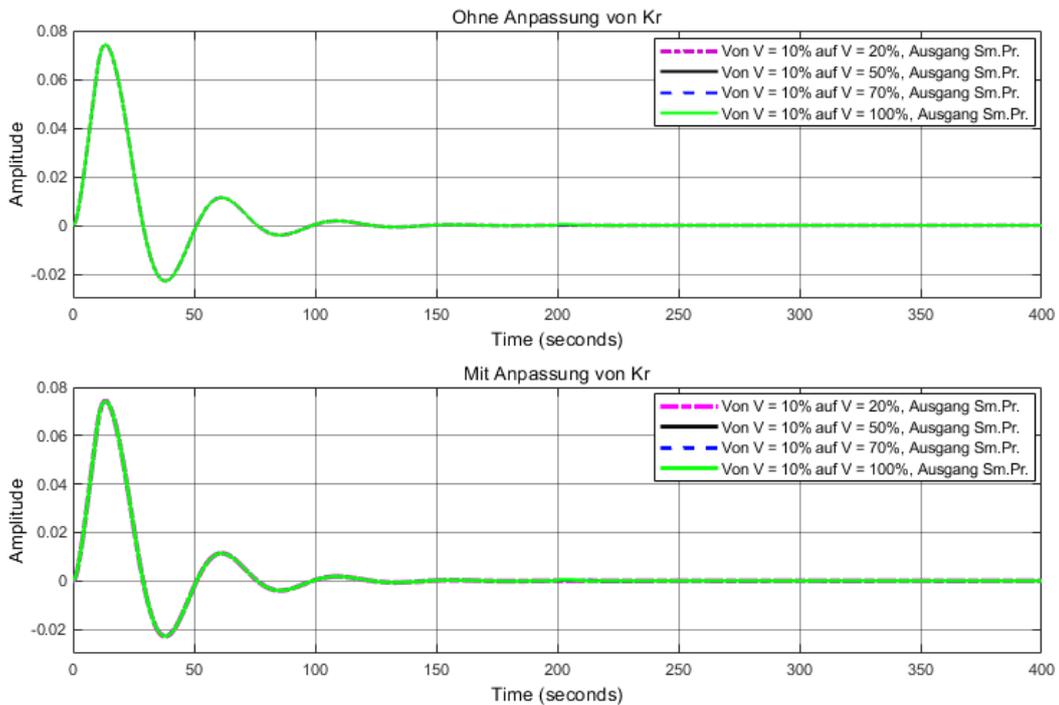


Abb. 4.25: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung aufwärts, ausgeschw. Zustand

Die Sprungantworten vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung haben bei einer Nichtanpassung und Anpassung von K_r einen identischen Verlauf. Die verwendete Art des Smith-Prädiktors führt den Ausgang der Schaltung schlussendlich immer gegen den Wert von 0. Die Aktivität der einzelnen Schaltungen ist identisch, da bei allen Reglern dieselben Werte von K_r für $V = 10\%$ festgelegt wurden ($K_r = 0,823$). Alle Schaltungen haben somit die gleichen Voraussetzungen und damit identische Verläufe bis $t = 200s$.

Das Hochstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktors bei $t = 200s$ hat keinerlei sichtbaren Einfluss auf die Verläufe der Sprungantworten. Das gilt sowohl bei kleinen als auch bei großen Verstärkungsänderungen. Der Grund für die identischen Sprungantworten ist, dass die Smith-Prädiktor-Schaltung zum Zeitpunkt $t = 200s$ bei der Umstellung von V bereits einen Wert von nahezu 0 angenommen hat. Die Regelgröße hat auch bis $t = 200s$ den Sollwert von 1 längst erreicht und hält diesen bis zum Ende der Simulationszeit. Eine Verstellung von V hat in diesem Fall keinen sichtbaren Einfluss auf den Regelkreis, da alle Sprungantworten konstant auf dem jeweiligen Wert bleiben.

Diese „gutmütige“ Variante der Verstärkungsänderung, wo der Regler zu schwach eingestellt wurde, hat kein instabiles oder unerwünschtes Verhalten zur Folge. Die Abweichungen innerhalb des Regelkreises sind zwar vorhanden, aber noch nicht groß genug, um den Regelkreis negativ zu beeinflussen. Wenn der Einfluss des Smith-Prädiktors in die entgegengesetzte Richtung verstellt wird, indem eine große Anfangsverstärkung eingestellt und bei $t = 200s$ runtergestellt wird, ergibt sich ein vollständig anderes Bild. Der Regelkreis wird in diesem Fall instabil, was in der folgenden Abb. 4.26 zu erkennen ist.

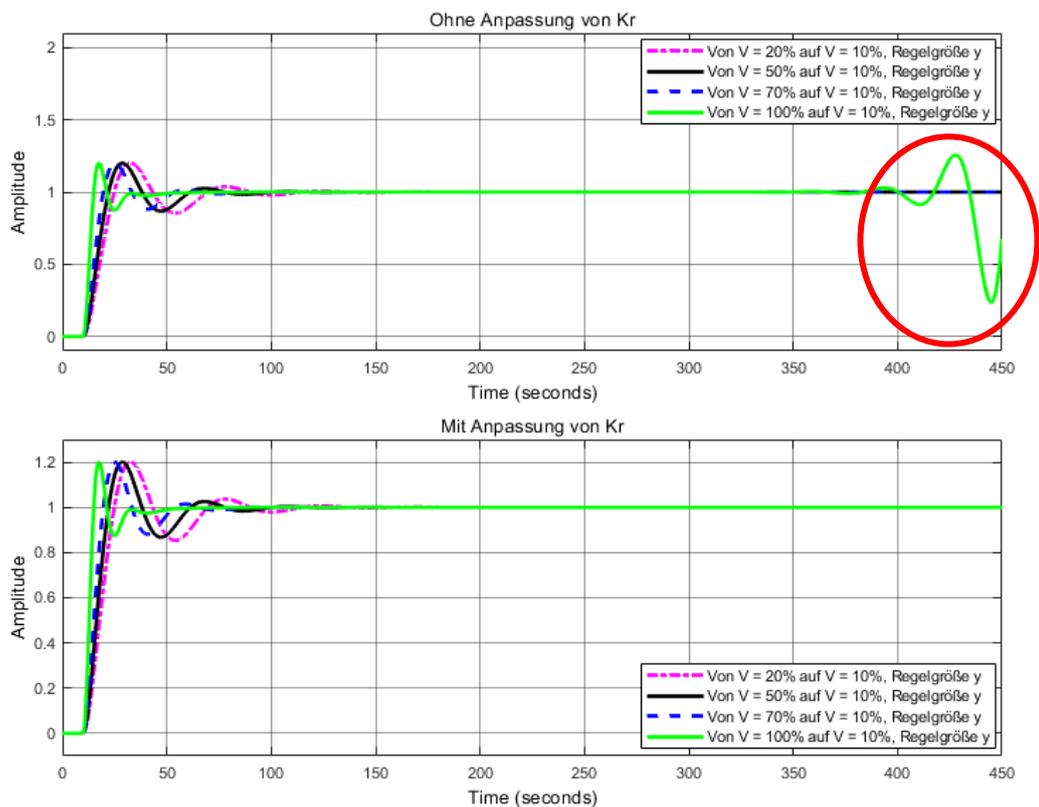


Abb. 4.26: Regelgröße, Verstärkungsänderung abwärts, ausgeschw. Zustand

In Abb. 4.26 sind die Sprungantworten der Regelgröße bei einer Verstärkungsänderung des Smith-Prädiktors im ausgeschwungenen Zustand bei $t = 200s$ ohne (oberer Graph) und mit (unterer Graph) Anpassung der Reglerverstärkung K_r zu erkennen. Anfangs haben die Sprungantworten einen von der anfangs eingestellten Verstärkung abhängenden Verlauf. Je höher die eingestellte Verstärkung gewählt wurde, desto schneller sind die Sprungantworten. Im oberen Graphen von Abb. 4.26 schwingt sich der Regelkreis bei einer Verstärkungsumstellung von $V = 100\% \rightarrow V = 10\%$ am Ende der Simulationszeit auf. Der Grund für das Aufschwingen ist, dass bereits kleinste mathematische Abweichungen ausreichen, um das System instabil zu machen. Der Regler ist bei einer Nichtanpassung von K_r in allen Fällen zu stark eingestellt und destabilisiert damit den Regelkreis. Die Stabilitätsgrenze wird erst bei großen Änderungen von V überschritten und das instabile Verhalten wird sichtbar.

Wenn das System instabil ist, reichen kleinste Abweichungen aus, die im numerischen System immer vorhanden sind, damit sich die Sprungantworten aufschwingen. Im realen System kann es vorkommen, dass reale Dämpfungen das System noch stabil halten können aber sobald noch eine Störung eintritt, kann es zu instabilem Verhalten kommen. Die Dämpfung ist für das stabile Verhalten bei kleineren Verstärkungsänderungen verantwortlich, da hier die Größe D ausreicht, das System stabil zu halten und die Stabilitätsgrenze noch nicht erreicht wurde. Bei höheren Veränderungen reicht die Dämpfung nicht mehr aus um instabiles Verhalten zu verhindern. Eine Anpassung der Reglerparameter ist beim Runterstellen der Verstärkung V zwingend notwendig, damit instabiles Verhalten verhindert werden kann. Im unteren Teil von Abb. 4.26 sind die Sprungantworten mit angepassten Reglerparametern zu erkennen.

Die automatische Anpassung erfolgt mithilfe einer Lookup-Table, die immer die optimale Reglerverstärkung ausgibt. Eine Anpassung stabilisiert den Regelkreis und alle Sprungantworten sind stabil und zeigen keinerlei instabiles, aufschwingendes Verhalten.

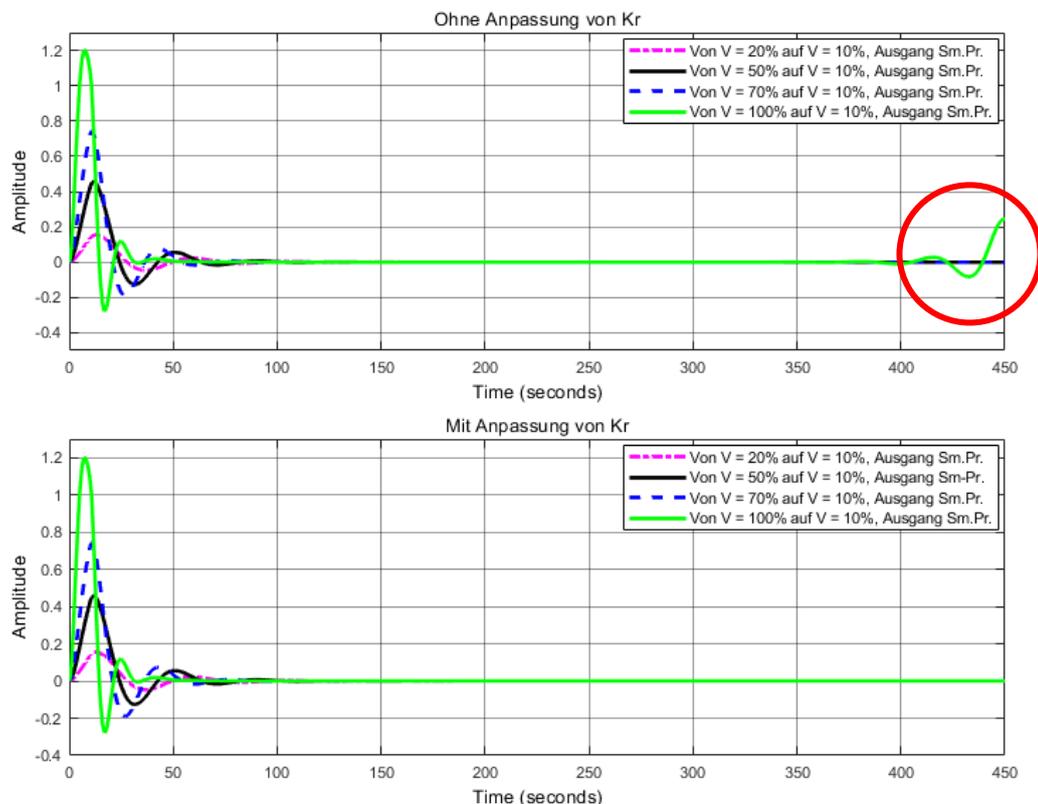


Abb. 4.27: Ausgang Sm.Pr., Verstärkungsänderung abwärts, ausgeschw. Zustand

Der Ausgang des Smith-Prädiktors schwingt sich bei großen Verstärkungsänderungen auf. Das ist im oberen Graphen von Abb. 4.27 im rot hervorgehobenen Bereich zu erkennen. Auch hier ist das instabile Verhalten erst bei großen Verstärkungsänderungen erkennbar. Wird eine automatische situationsbedingte Anpassung des Reglers vorgenommen, wird jegliches instabiles und aufschwingendes Verhalten unterdrückt (unterer Graph).

Im unteren Graphen von Abb. 4.27 sind alle Sprungantworten stabil und schwingen sich zu keinem Zeitpunkt auf. Der Ausgang des Smith-Prädiktors wird schlussendlich wieder gegen den Wert von 0 geführt und dank der Anpassung von K_r nicht mehr verlassen, auch wenn die Verstärkung der Prädiktor-Schaltung verändert wird. Die Untersuchungen innerhalb dieses Abschnitts haben gezeigt, dass eine Nichtanpassung der Reglerverstärkung beim Runterstellen der Verstärkung zu instabilem Verhalten führt. Die viel zu starke Einstellung des Reglers lässt die Sprungantworten bei großen Verstärkungsumstellungen aufschwingen und destabilisiert den geschlossenen Regelkreis. Eine Anpassung der Reglerparameter ist hier zwingend notwendig. Auch beim Hochstellen der Verstärkung der Prädiktor-Schaltung ist eine Anpassung empfehlenswert, obwohl hier die Sprungantworten keinerlei sichtbaren Einfluss der Umstellung zeigen, unabhängig ob eine Anpassung von K_r durchgeführt wurde oder nicht. Trotzdem sollte der Regler in allen Fällen angepasst werden, weil eine Störung die Abweichungen innerhalb des Regelkreises deutlich beeinflussen und bei einem falsch eingestellten Regler das System destabilisieren kann.

4.6 Störanfälligkeit des Smith-Prädiktors

4.6.1 Störung im einschwingenden Zustand ohne Verstärkungsänderung

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Störungen, die einen geschlossenen Regelkreis negativ beeinflussen können. Ein Beispiel für eine Störgröße ist der Zulaufvolumenstrom bei der Füllstandregelung eines Kessels. Liegt eine Störung vor, wirkt sich diese auf den gesamten Regelkreis und damit auch auf eingefügte Schaltungen, beispielsweise einer Smith-Prädiktor-Schaltung negativ aus. Der Störungsfall im einschwingenden Zustand wird in diesem Abschnitt untersucht und die Auswirkung auf den Regelkreis bei unterschiedlichen Einflussgraden des Smith-Prädiktors simuliert und ausgewertet.

Tab. 4.7: Werte des Regelkreises mit u. ohne Störung

V [%]	Ohne Störung			Mit Störung		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	117,4
20	0,9	24,8	65,1	0,9	24,8	106,4
50	1,27	22,1	56,6	1,27	22,1	81,7
70	1,815	19,6	48,5	1,815	19,6	74,2
100	4,81	15	29,1	4,81	15	55,4

In Tab. 4.7 sind die erfassten Werte der Simulation des Störungsfalls dargestellt. Im linken Teil der Tabelle sind die Werte ohne Störung aufgelistet, wobei die Störung die in Abschnitt 3.4 beschriebene PT_1 -Form mit einer zusätzlichen stochastischen Störung hat. Da die Veränderungen der Störgröße realistisch annähernd rampenförmig zu finden sind, ist das mit der Sprungantwort eines PT_1 -Giedes näherungsweise beschreibbar. Außerdem wird eine Addition einer stochastischen Störung auf die Störstrecke geleitet, um die Störung realitätsnaher zu gestalten. Bei der Störstrecke wird im Gegensatz zur Regelstrecke keine Verzögerungszeit verwendet, weil die Störgröße meist schneller wirkt als die Stellgröße. Der Einsetzzeitpunkt der Störung von $t = 25s$ wurde mithilfe eines Delay-Blocks innerhalb der Störstrecke realisiert. Es findet keine Verstärkungsänderung und damit keine Anpassung der Reglerparameter statt, da der Wert von K_r nur beim Umstellen der Verstärkung V des Smith-Prädiktors automatisch angepasst wird. Es werden die Anregel- und Ausregelzeiten sowie die entsprechende Reglerverstärkung ohne Veränderung des Einflussgrades des Smith-Prädiktors erfasst. Der Einfluss einer Umstellung der Verstärkung des Smith-Prädiktors im Störungsfall wird im kommenden Abschnitt 4.6.2 dargestellt. Die Anregelzeiten in Tab. 4.7 werden beim Einsetzen der Störung nicht verändert. Alle erfassten Werte von t_{an} sind bei den jeweiligen Verstärkungen mit und ohne Störung gleich. Die Ausregelzeiten verschlechtern sich dagegen deutlich, da die Störung hier nicht mithilfe von Störgrößenaufschaltungen kompensiert wird. Die Störung hat einen negativen Einfluss auf die Ausregelzeiten und den Verlauf des Regelgrößensprungs.

Auffällig ist, dass bei hohen Verstärkungen die Ausregelzeiten kürzer werden. Das liegt an den höheren Reglerverstärkungen der jeweiligen Regelkreise, denn je höher der Wert von V , desto aggressiver die Einstellung des Reglers. Damit haben die Regelkreise mit hohen Verstärkungen des Smith-Prädiktors bessere Regelungsergebnisse als die Regelkreise ohne oder mit kleinen Verstärkungen von V . Das ist auch in der folgenden Abb. 4.28 zu erkennen.

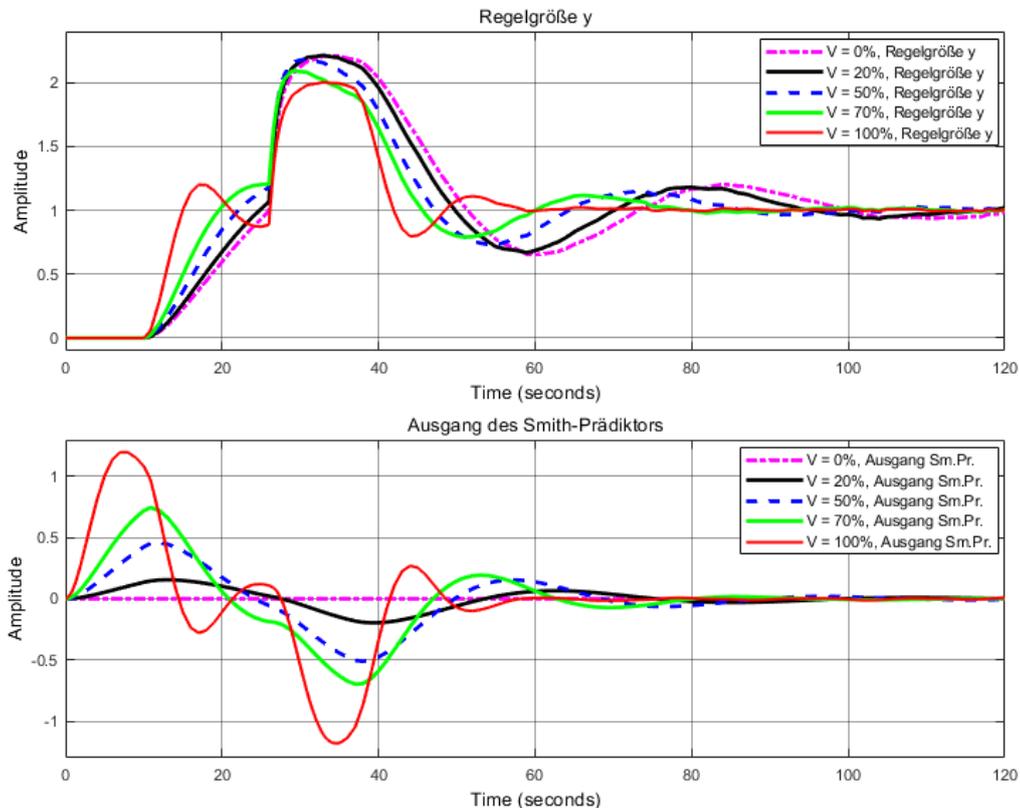


Abb. 4.28: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr, Störungsfall einschw. Zustand

Die einzelnen Regelkreise reagieren unterschiedlich auf den Störungsfall. Die Verläufe der Regelkreise mit höheren Verstärkungen haben schnellere Sprungantworten und damit bessere Regelungsergebnisse als die mit mittleren oder kleinen Verstärkungen V . Das lässt sich vor allem anhand der Ausregelzeit erkennen. Bei $V = 0\%$ hat diese einen Wert von $t_{aus} = 117,4s$ und bei $V = 100\%$ einen Wert von $t_{aus} = 55,4s$. Die Sprungantworten sind anfangs auch schneller, je höher die Anfangsverstärkung gewählt wurde.

Die Amplituden der Sprungantworten nach dem Einsetzen der Störung sind ebenfalls unterschiedlich. Diese sind umso größer, je kleiner die Verstärkung des Smith-Prädiktors ist. Höhere Einflussgrade des Smith-Prädiktors und damit höhere Reglerverstärkungen ermöglichen besseren Ausregelzeiten und haben eine Minimierung des Störgrößeneinflusses (Amplituden geringer) zur Folge. Der Ausgang des Smith-Prädiktors hat je nach gewählter Verstärkung unterschiedliche Sprungantworten. Je höher die Anfangsverstärkung gewählt wurde, desto größer sind die Amplituden und die Schnelligkeit der Schaltung. Die stärker eingestellten Regler bei hohen Einflüssen des Prädiktors ermöglichen schnellere Reaktionen des Regelkreises auf das Einsetzen einer Störung.

Wird die Verstärkung nicht verändert, tritt kein instabiles Verhalten auf und die Sprungantworten sind stabil und akzeptabel. Regelkreise mit hohen Verstärkungen des Smith-Prädiktors haben in diesem Simulationsfall Vorteile, da höhere Werte von K_r bessere Regelungsergebnisse und damit auch schnellere Sprungantworten ermöglichen. Auch im Störungsfall hat der Einsatz des Smith-Prädiktors Vorteile gegenüber einem Regelkreis ohne Prädiktor-Schaltung ($V = 0\%$), selbst wenn die eingestellte Anfangsverstärkung des Smith-Prädiktors einen niedrigen Wert besitzt. Welchen Einfluss eine Veränderung der Verstärkung im Störungsfall hat, wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

4.6.2 Störung im einschwingenden Zustand mit Verstärkungsänderung

Im vorherigen Abschnitt wurde die Störanfälligkeit des Regelkreises mit implementiertem Smith-Prädiktor untersucht. Dabei setzte eine Störung im einschwingenden Zustand ein, aber eine Veränderung des Einflussgrades der Prädiktor-Schaltung fand nicht statt. Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss eine Änderung von V mit einsetzender Störung im einschwingenden Zustand auf den Regelkreis hat.

Tab. 4.8: Werte des Regelkreises mit Störung und Verstärkungsänderungen

V [%]	Ohne Anpassung von K_r			Mit Anpassung von K_r		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
10 → 20	0,823	25,6	96,1	0,9	25,6	109,8
10 → 50	0,823	25,6	92,9	1,27	25,6	87,1
10 → 70	0,823	25,6	92,5	1,815	25,6	79,7
10 → 100	0,823	25,6	105,4	4,81	25,6	60,2
20 → 10	0,9	24,8	132,2	0,823	24,8	111,5
50 → 10	1,27	22,1	260,4	0,823	22,1	109,2
70 → 10	1,815	16,6	n.v.	0,823	16,6	96,8
100 → 10	4,81	15	n.v.	0,823	15	99,1

Werden die ermittelten Werte aus Tab. 4.8 verglichen lässt sich feststellen, dass die Anpassung der Reglerverstärkung K_r in allen betrachteten Fällen zu besseren Regelungsergebnissen führt. Die Anregelzeiten stimmen bei den Regelkreisen mit und ohne Anpassung überein, wobei die Verstärkungsänderung bei $t = 25s$ auftritt und die Störung bei allen Regelkreisen im selben Moment bei $t = 30s$ einsetzt. Die Anregelzeiten von $t_{an} = 25,6s$ bleiben bestehen, weil es eine gewisse Zeit dauert, bis der Regelkreis auf die Verstärkungsänderung reagiert. Die Ausregelzeiten verbessern sich deutlich beim Hochstellen der Verstärkung des Smith-Prädiktors und gleichzeitiger Anpassung von K_r . Die größte Verbesserung ist bei einer Verstärkungsänderung von $V = 10\% \rightarrow V = 100\%$ feststellbar.

Die Anregelzeit verbessert sich von $t_{an} = 105,4s$ auf $t_{an} = 60,2s$. Nur bei einer Verstärkungsänderung von $V = 10\% \rightarrow V = 20\%$ verschlechtert sich die Ausregelzeit, weil die minimal größere Reglerverstärkung von $K_r = 0,9$ eine höhere Auslenkung in Y-Richtung des Nachschwingers der Sprungantwort hervorruft und damit die Ausregelzeit um $t = 13,7s$ verschlechtert. Die Sprungantwort wird aber in diesem Fall deutlich schneller, weil der Regler aggressiver eingestellt wurde. Diese „gutmütige“ Variante der Verstärkungsänderung hat im Gegensatz zum Absenken der Verstärkung keinen destabilisierenden Einfluss auf den Regelkreis, wenn die Reglerparameter nicht angepasst werden. Wird die Reglerverstärkung und damit der Regler an die entsprechende Situation angepasst, ist der Regelungsvorgang wesentlich schneller. Damit verbessern sich neben den Ausregelzeiten auch die Verläufe der Sprungantworten.

Im Fall des Verringerns der Verstärkung im einschwingenden Zustand mit vorhandener Störung hat eine Nichtanpassung von K_r einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis, der vor allem bei hohen Verstärkungsänderungen beispielsweise bei $V = 70\% \rightarrow V = 10\%$ sichtbar wird. Hier tritt aufgrund des viel zu stark eingestellten Reglers instabiles Verhalten auf. Dabei schwingt sich die Sprungantwort der Regelgröße immer weiter auf und destabilisiert den Regelkreis. Die Stabilitätsgrenze wird hier überschritten und ermöglicht keine Ausregelzeiten bei hohen Verstärkungsänderungen, weil der Zielkorridor von $\pm 5\%$ vom Sollwert laufend verlassen wird. Eine Anpassung der Reglerparameter ist hier zwingend notwendig, um den Regelkreis zu stabilisieren.

Die Anpassung erfolgte wiederum anhand der Reglerverstärkung, die im Moment der Verstärkungsänderung entsprechend mithilfe der implementierten Lookup-Table automatisch korrigiert wurde. Bei $V = 100\% \rightarrow V = 10\%$ wird die Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ auf $K_r = 0,823$ umgestellt und passt damit den Regler automatisch an die momentane Situation an. Für die vollständige Beschreibung der Implementierung der Lookup-Table siehe Abschnitt 4.2.

Die Implementierung des Smith-Prädiktors hat auch im Störungsfall Vorteile im Vergleich zu einem Regelkreis ohne Prädiktor. Grundvoraussetzung ist dabei, dass der Regler der Situation angepasst wird und ein gutes Modell der Regelstrecke vorliegt. Erfolgt keine situationsbedingte automatische Anpassung der Reglerparameter, verschlechtern sich die Regelungsergebnisse deutlich. Trotz der Verstärkungsänderungen sind gute Regelungsergebnisse möglich, wenn der verwendete PI-Regler mithilfe der Regerverstärkung angepasst wird. Der Unterschied und die Auswirkungen auf den Regelkreis bei einer Anpassung und Nichtanpassung der Reglerparameter sind in den folgenden Abbildungen zu erkennen.

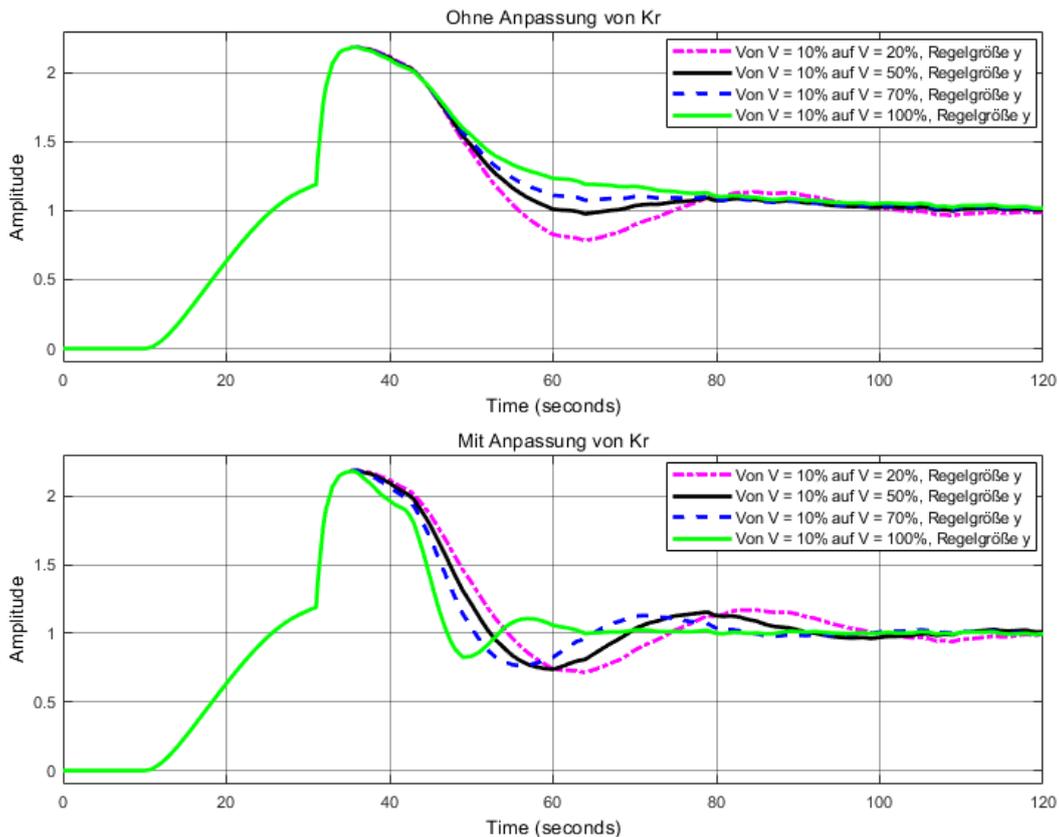


Abb. 4.29: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts

In Abb. 4.29 sind die Sprungantworten der Regelgröße mit angepasster und nicht angepasster Reglerverstärkung dargestellt. Die Verstärkungsänderung erfolgt bei $t = 25s$ und die Störung setzt bei $t = 30s$ ein. Im ersten Verlauf der Sprungantworten sind alle Verläufe identisch, da alle Regelkreise die gleiche Voraussetzung bzw. identische Reglerverstärkungen haben. Tritt eine Umstellung von V und eine Störung ein, reagiert der Regelkreis mit voller Verstärkung am langsamsten. Hier ist zwar der Einfluss des Smith-Prädiktors am höchsten, aber der Wert von K_r ist viel zu klein. Alle Regelkreise haben einen Wert von $K_r = 0,823$ und dieser wird bei einer Nichtanpassung beibehalten. Wird die Verstärkung ohne Anpassung von K_r erhöht, ist der Regler viel zu „gutmütig“ eingestellt. Die Sprungantworten haben bei hohen Verstärkungen einen langsamen Verlauf und erreichen den Sollwert von 1 immer später, je größer die Endverstärkung gewählt wurde.

Eine Anpassung der Reglerparameter hat einen positiven Einfluss auf das Regelungsergebnis. Der Regler hat optimale Einstellungen, um die bestmögliche Regelung zu ermöglichen und die Regelungsergebnisse damit deutlich zu verbessern. Die Sprungantworten werden bei einer Anpassung von K_r deutlich schneller, haben kürzere Ausregelzeiten und der Sollwert von 1 wird schneller erreicht. Eine Anpassung von K_r ist beim Erhöhen von V nicht zwingend notwendig, weil keinerlei instabiles oder aufschwingendes Verhalten erkennbar ist. Eine Anpassung von K_r ermöglicht aber wesentlich bessere Regelungsergebnisse, ist aber nicht unbedingt erforderlich.

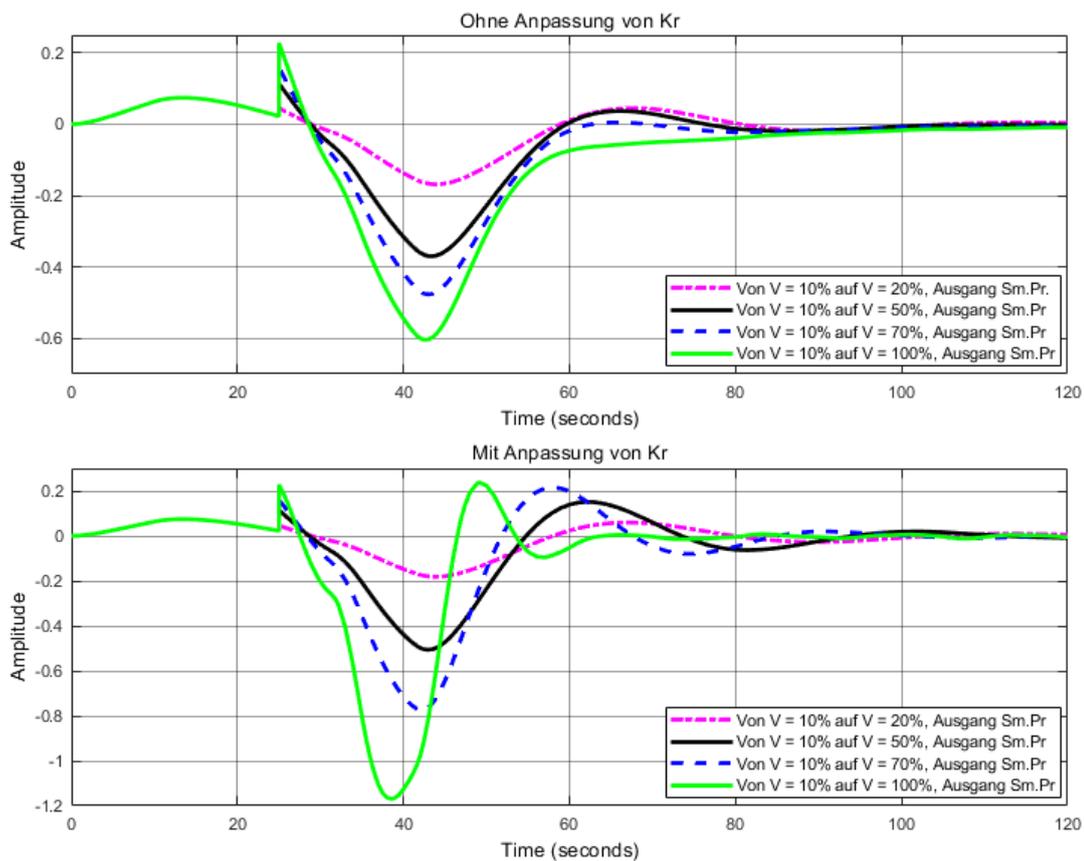


Abb. 4.30: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts

Auch beim Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Sprungantworten mit angepasstem und nicht angepasstem Regler zu erkennen. Die Sprungantworten haben im oberen Graphen von Abb. 4.30 einen annähernd ähnlichen Verlauf. Alle Sprungantworten erreichen den Endwert von 0 nahezu zum selben Zeitpunkt. Der deutlichste Unterschied zwischen den Sprungantworten ist anhand der einzelnen Amplituden zu erkennen. Je höher die anfangs eingestellte Verstärkung V betrug, desto größer die resultierende Amplitude der Sprungantwort. Eine Anpassung der Reglerparameter ist hier nicht zwingend notwendig, da auch bei den oben dargestellten Sprungantworten keinerlei aufschwingendes Verhalten auftritt. Trotzdem hat eine Anpassung einen deutlichen Einfluss auf den Verlauf der Sprungantworten. Die automatische und situationsbedingte Anpassung von K_r hat schnellere Sprungantworten zur Folge. Im unteren Graphen von Abb. 4.30 unterscheiden sich die einzelnen Sprungantworten deutlich von denen aus dem oberen Graphen der Abbildung. Große Verstärkungsänderungen haben schnellere Sprungantworten zur Folge. Auch die Auslenkung in Y-Richtung der einzelnen Verläufe ändert sich im Vergleich deutlich. Die grüne Sprungantwort ($V = 10\% \rightarrow V = 100\%$) hat im oberen Graphen eine Auslenkung bei $t = 42$ von -0,6 und bei einer Anpassung von K_r zum Zeitpunkt $t = 38$ von -1,19. Dabei verkürzt sich die Schwingungsdauer der Sprungantworten und diese werden schneller.

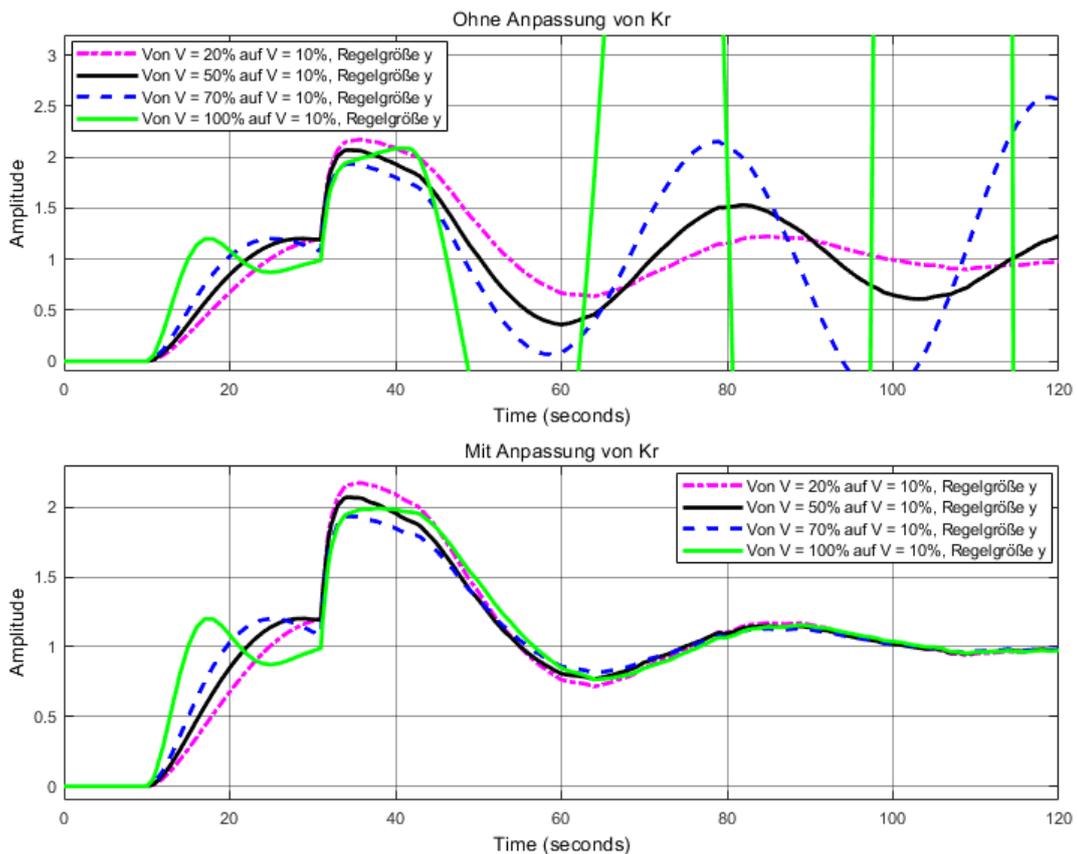


Abb. 4.31: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts

Wenn der Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung verringert und die Reglerverstärkung nicht angepasst wird, ergibt sich im Vergleich zu den Sprungantworten aus Abb. 4.29 ein vollständig anderes Bild. Die Nichtanpassung von K_r hat instabiles Verhalten des Regelkreises zur Folge. Die Sprungantworten schwingen sich im Laufe der Simulationszeit immer mehr auf. Die Nichtanpassung des Reglers bedeutet, dass die Werte von K_r beim Runterstellen von V nicht korrigiert werden und die jeweiligen Regler folglich viel zu hohe Werte von K_r haben. Das hat in Kombination mit dem Einsetzen der Störgröße bei $t = 30s$ einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis. Die Sprungantworten sind in allen der im oberen Graphen von Abb. 4.31 simulierten Fälle nicht akzeptabel. Alle Verläufe haben ein deutliches Nachschwingen und ab $V = 70\% \rightarrow V = 10\%$ instabiles Verhalten. Eine Anpassung ist also zwingend notwendig.

Werden die Werte von K_r automatisch und zum Zeitpunkt der Verstärkungsänderung entsprechend korrigiert, wird jegliches instabiles Verhalten vermieden. Alle Sprungantworten sind stabil und haben einen akzeptablen Verlauf. Das im oberen Graphen dargestellte aufschwingende Verhalten ist auch bei den Sprungantworten der Smith-Prädiktor-Schaltung in der folgenden Abbildung wiederzufinden.

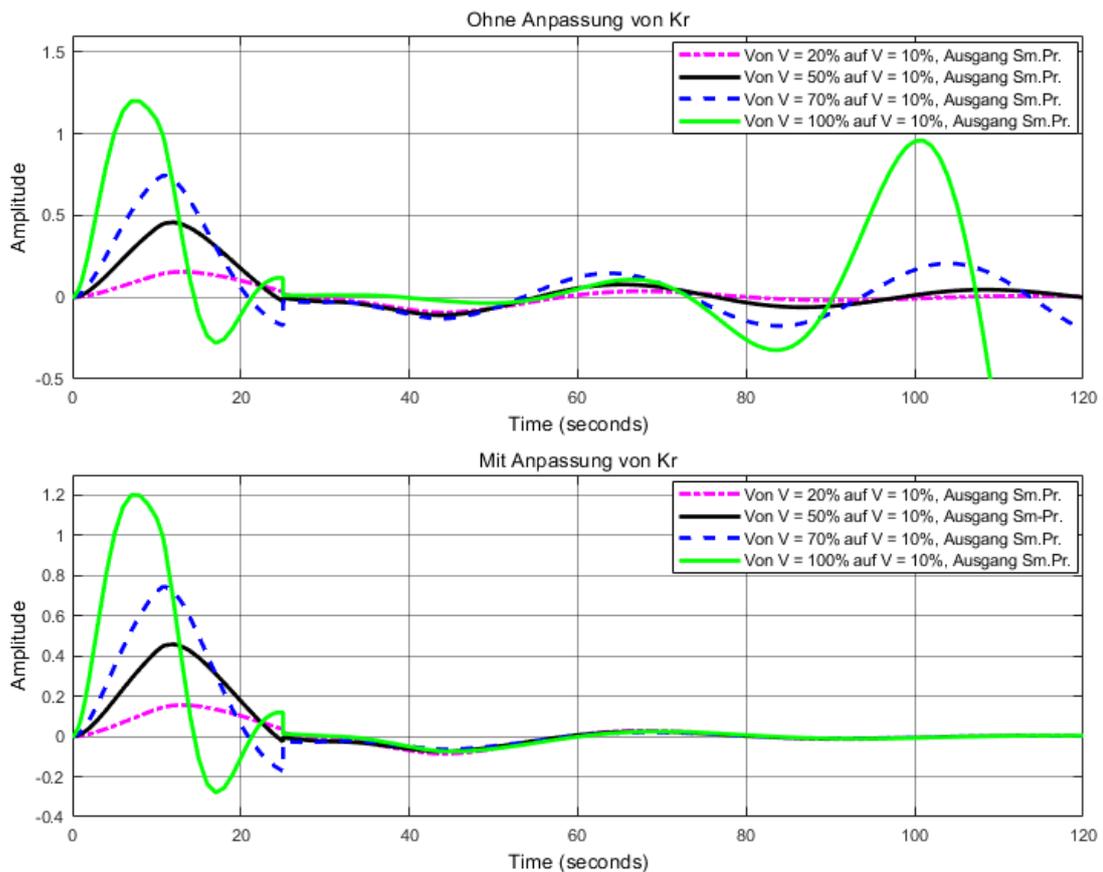


Abb. 4.32: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts

Bei großen Verstärkungsänderungen der Smith-Prädiktor-Schaltung wird der Regelkreis instabil, wenn K_r nicht angepasst wird. Die grüne Sprungantwort ($V = 100\% \rightarrow V = 10\%$) schwingt sich im oberen Graphen immer mehr auf, da die Abweichungen innerhalb des Regelkreises ausreichen, um die Stabilitätsgrenze zu überschreiten. Dieses instabile Verhalten kann durch die situationsbedingte Anpassung von K_r vollständig verhindert werden. Der verwendete Regler hat bei einer Anpassung der Parameter immer die optimale Einstellung und verhindert damit unerwünschtes Verhalten des Regelkreises.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Verstärkung des Smith-Prädiktors im Störungsfall im einschwingenden Zustand nach oben oder unten verstellt werden kann, wenn der Regler immer angepasst wird. Es ist eine automatische und situationsbedingte Anpassung zwingend notwendig, um instabiles Verhalten zu vermeiden. Die Verstärkung kann sowohl vor dem Störgrößentritt als auch danach problemlos verstellt werden, solange sich die Reglerparameter anpassen. Die Korrektur von K_r ist beim Hochstellen der Verstärkung nicht zwingend notwendig, da hier keinerlei instabiles Verhalten auftritt. Die Anpassung ermöglicht aber wesentlich bessere Regelungsergebnisse und ist deswegen empfehlenswert. Beim Absenken der Verstärkung V des Smith-Prädiktors hingegen ist die Anpassung von K_r zwingend notwendig, da sonst aufgrund der viel zu stark eingestellten Regler instabiles Verhalten auftritt.

4.6.3 Störung im ausgeschwungenen Zustand ohne Verstärkungsänderung

Das Einsetzen einer Störung kann jederzeit erfolgen, ob im Einschwingvorgang oder im ausgeschwungenen Zustand. Der Einfluss einer einsetzenden Störung im einschwingenden Zustand wurde mit und ohne Verstärkungsänderung in den vorherigen zwei Abschnitten 4.6.1 und 4.6.2 betrachtet. Dabei wurde festgestellt, dass die Implementierung eines Smith-Prädiktors auch Vorteile im Störungsfall mit sich bringt. In diesem Abschnitt wird das Einsetzen im ausgeschwungenen Zustand ohne Veränderung des Einflussgrades des Smith-Prädiktors simuliert. Die Störung setzt zum Zeitpunkt $t = 150s$ ein und hat die in Abschnitt 4.1 beschriebene Form.

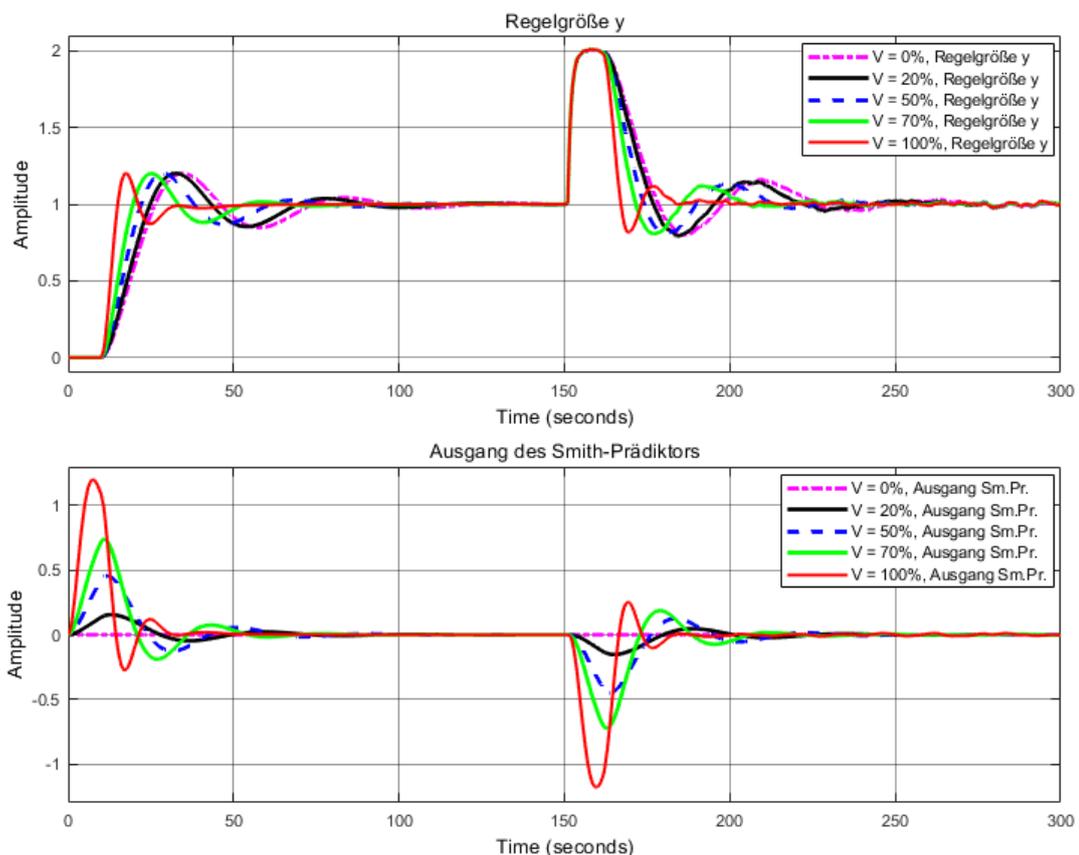


Abb. 4.33: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Störungsfall

In Abb. 4.33 sind die Sprungantworten der Regelgröße und vom Ausgang des Smith-Prädiktors mit unterschiedlichen Verstärkungsgraden der Prädiktor-Schaltung zu erkennen. Wie bei einer einsetzenden Störung im einschwingenden Zustand haben auch hier die Regelkreise mit hohen Verstärkungen bessere Regelungsergebnisse, weil innerhalb dieser Regelkreise die Regler stärker eingestellt wurden. Die hohen Reglerverstärkungen bei großen Verstärkungen ermöglichen bessere Regelungsergebnisse und damit schnellere Sprungantworten. Der Sollwert wird von den Sprungantworten der Regelkreise mit stark eingestellten Reglern schneller erreicht, als die Regelkreise mit niedrig eingestellten Reglern.

Je kleiner die eingestellte Anfangsverstärkung ist, desto länger dauert es, bis der Regelgrößensprung den Sollwert von 1 wieder erreicht. Die Störung besteht dabei aus der Addition einer Step-Function und einer stochastischen Größe, die auf die Störstrecke in Form eines PT_1 -Gliedes mit einer Zeitkonstante von $T_D = 1s$ geleitet werden.

Die Sprungantworten der Regelgröße und des Ausgangs des Smith-Prädiktors weisen im ersten Verlauf der Simulationszeit das schon in Abschnitt 4.1 erläuterte Verhalten auf. Dabei sind die Sprungantworten umso schneller, je höher der Einflussgrad des Prädiktors eingestellt wurde. Eine Überschwingweite von 20% wurde als Einstellkriterium für den Regler festgelegt. Der PI-Regler wurde anhand des Führungsverhaltens und nicht anhand des Störverhaltens eingestellt. Die vorhandene Störung wird hier nicht kompensiert, da der Smith-Prädiktor nur für die aggressivere Einstellung und die damit verbundene Verbesserung der Regelungsergebnisse implementiert wurde. Wenn der Störgrößeneinfluss minimiert werden soll, müssen wenn möglich zusätzliche Schaltungen z.B. Störgrößenschaltungen (SGAs) eingefügt werden.

Das Vorhandensein der Störung hat auch Einfluss auf die Smith-Prädiktor-Schaltung selbst. Sie hat beim Ausregeln des Führungsgrößensprung und beim Einsetzen der Störung eine hohe „Aktivität“. Diese ist umso größer, je höher der Einfluss des Smith-Prädiktors ist. Auffällig ist, dass die Verläufe der Sprungantworten im untern Graphen von Abb. 4.33 von $t = 0s$ bis $t = 75s$ und $t = 150s$ bis $t = 225s$ einander sehr ähnlich sind, mit dem Unterschied, dass der Verlauf ab $t = 150s$ vertikal gespiegelt ist. Die Smith-Prädiktor-Schaltung reagiert somit annähernd gleich auf das Ausregeln der Führungsgröße und das Ausregeln der Störung. Es ist zu beachten, dass dieses Verhalten nur bei der Verwendung der gewählten Störstrecke und Regelstrecke auftritt. Bei anderen Regelstrecken oder Störgrößen bzw. Störstrecken kann dieses Verhalten vollständig anders sein.

Abschließend lässt sich feststellen, dass auch beim Einsetzen einer Störung im ausgeschwungenen Zustand die Implementierung eines Smith-Prädiktors die Regelungsergebnisse verbessert. Dabei hat die Höhe der definierten Verstärkung Einfluss auf die Verbesserung des Verlaufs der Sprungantwort. Je höher der Einflussgrad V der Prädiktor-Schaltung gewählt wird, umso höher ist die Reglerverstärkung und umso schneller die resultierenden Sprungantworten.

4.6.4 Störung im ausgeschwungenen Zustand mit Verstärkungsänderung

Eine Störung im ausgeschwungenen Zustand beeinflusst den Regelkreis sichtbar. Wenn ein Smith-Prädiktor implementiert, der Einflussgrad der Schaltung eingestellt und im Laufe der Simulationszeit nicht verstellt wird und eine Störung eintritt, werden die Verläufe der Sprungantworten der Regelgröße verändert. Sie werden aufgrund der höheren Reglerverstärkungen umso schneller, je höher der Einflussgrad der Prädiktor-Schaltung ist. Wird die Verstärkung des Prädiktors jedoch im Störungsfall verstellt und die Reglerparameter nicht angepasst, so wird der Regelkreis negativ beeinflusst. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse bei einer Verstellung der Verstärkung V mit eintretender Störung d im ausgeschwungenen Zustand dargestellt. Die Störung setzt zum Zeitpunkt $t = 205s$ ein und die Verstellung des Einflussgrades der Prädiktor-Schaltung erfolgt bei $t = 200s$.

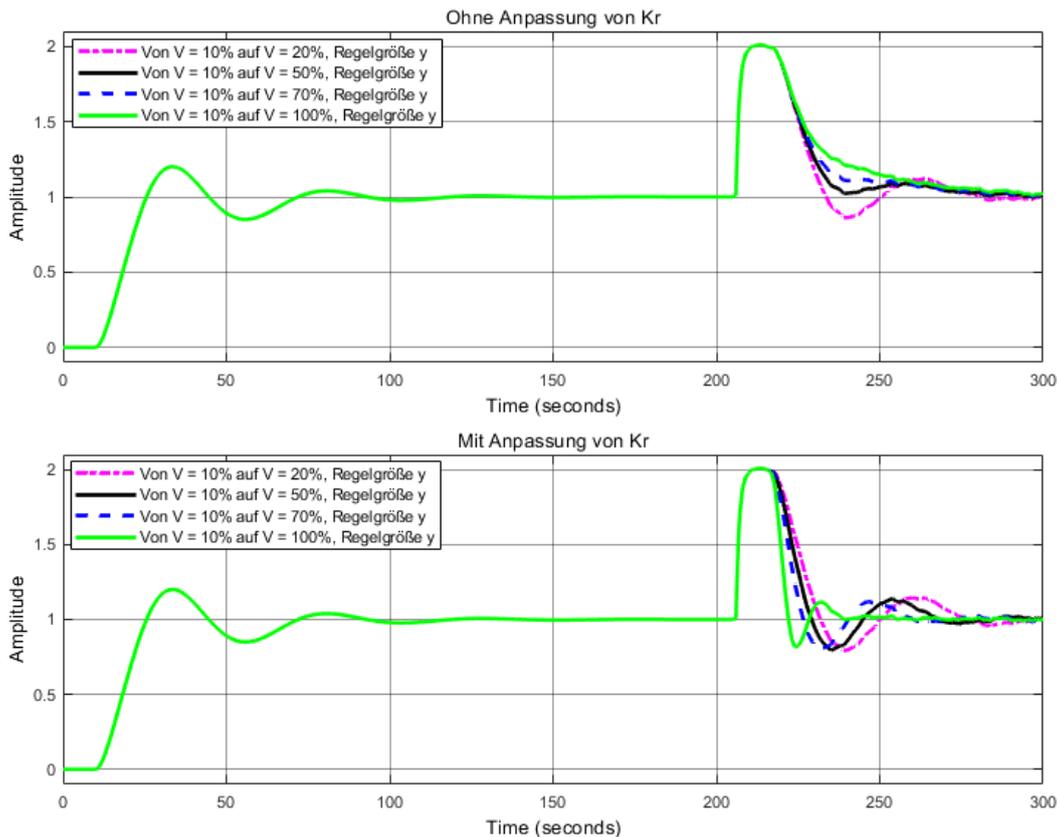


Abb. 4.34: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts

In Abb. 4.34 ist der Einfluss der Störung bei $t = 205s$ deutlich zu erkennen. Zunächst gibt es aber keine Veränderungen der Sprungantwort bei einer Verstärkungsänderung bei $t = 200s$, wobei der Ausgang des Smith-Prädiktors auf dem Wert von 0 liegt und eine Umstellung des Prädiktors nahezu keinen Einfluss auf den Regelkreis hat. Das Hochstellen der Verstärkung mit einer Nichtanpassung von K_r bedeutet, dass der Einfluss des Smith-Prädiktors unterschiedlich stark eingestellt aber die Reglerverstärkung auf einem Wert von $K_r = 0,823$ ($V = 10\%$) gehalten wurde. Die Folge sind langsame Sprungantworten bei hohen Verstärkungen V . Diese „gutmütige“ Einstellung des Reglers hat akzeptable Sprungantworten zur Folge, die aber anhand einer Anpassung von K_r deutlich verbessert werden können. Eine Anpassung ist hier nicht zwingend notwendig aber empfehlenswert.

Werden die Regler automatisch anhand der Implementierten Lookup-Table angepasst, resultieren die im unteren Graphen in Abb. 4.34 dargestellten Sprungantworten. Werden diese mit den Verläufen aus dem oberen Graphen verglichen, zeigt sich, dass die jeweiligen Sprungantworten schneller und die Schwingungsdauer kürzer werden. Der Regler hat im unteren Graphen immer die optimale Einstellung der Reglerparameter und ermöglicht damit die bestmöglichen Regelungsergebnisse. Der Ausregelvorgang der Störung wird mit höheren Verstärkungen und einer Anpassung von K_r deutlich kürzer und die Sprungantwort der Regelgröße erreicht den vorgegebenen Sollwert von 1 schneller. Auch die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors zeigen deutliche Unterschiede (siehe Abb. 4.35), wenn die Verläufe mit angepassten und nicht angepassten Reglern verglichen werden.

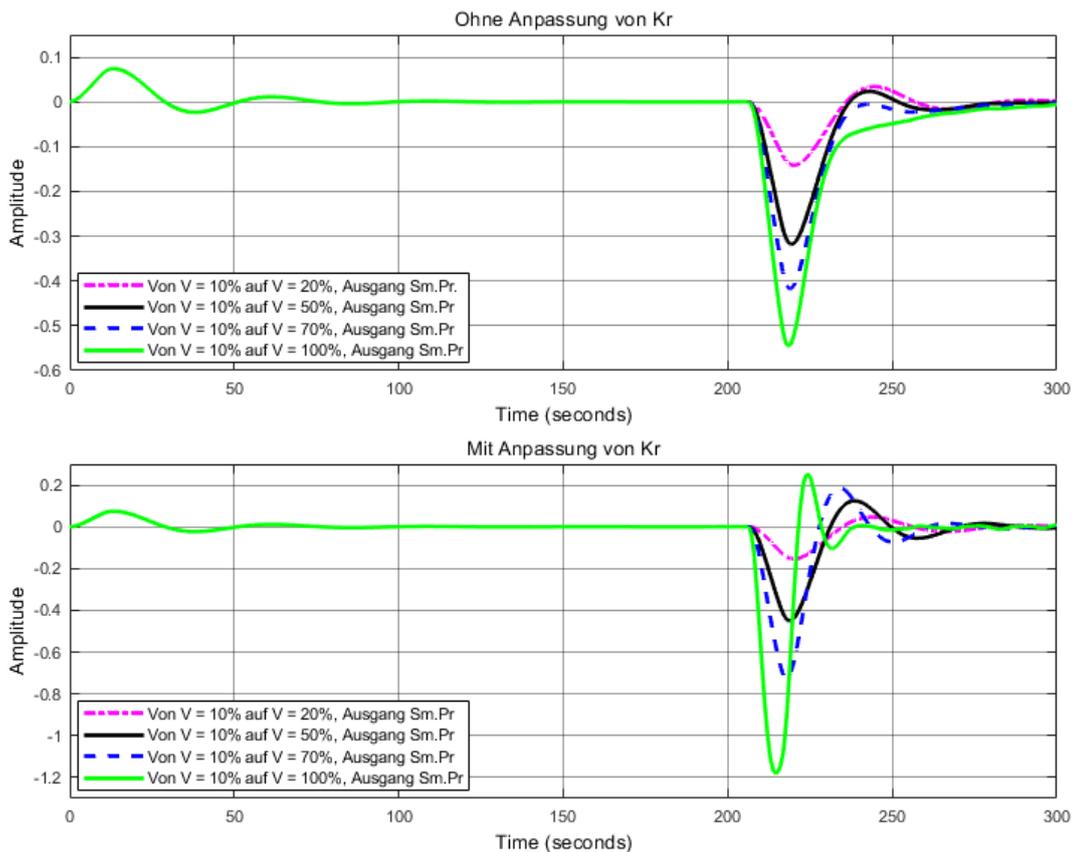


Abb. 4.35: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen aufwärts

Im oberen Graphen von Abb. 4.35 sind die Sprungantworten bei einer Nichtanpassung von K_r dargestellt. Die Verläufe haben einen langsamen Verlauf, aber keinerlei instabiles oder aufschwingendes Verhalten. Somit ist eine Anpassung nicht zwingend notwendig aber empfehlenswert, wenn die Sprungantworten im unteren Graphen der Abbildung vergleichend betrachtet werden. Hier sind die Sprungantworten deutlich schneller, weil der Regler der Verstärkungseinstellung angepasst wurde.

Bei einer Änderung von V beispielsweise von $V = 10\% \rightarrow V = 100\%$ wird der Wert bei $t = 200\text{s}$ von $K_r = 0,823$ auf $K_r = 4,81$ verändert und damit der vorliegenden Situation angepasst. Das Resultat sind schnellere Sprungantworten. In dem Fall der „gutmütigen“ Einstellung des Reglers resultiert kein unerwünschtes Verhalten, obwohl der Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung verstellt wird und zusätzlich eine Störung einsetzt. Das dargestellte Verhalten bezieht sich dabei auf die verwendete Regelstrecke und Totzeit und kann bei anderen Strecken und Totzeiten anders sein.

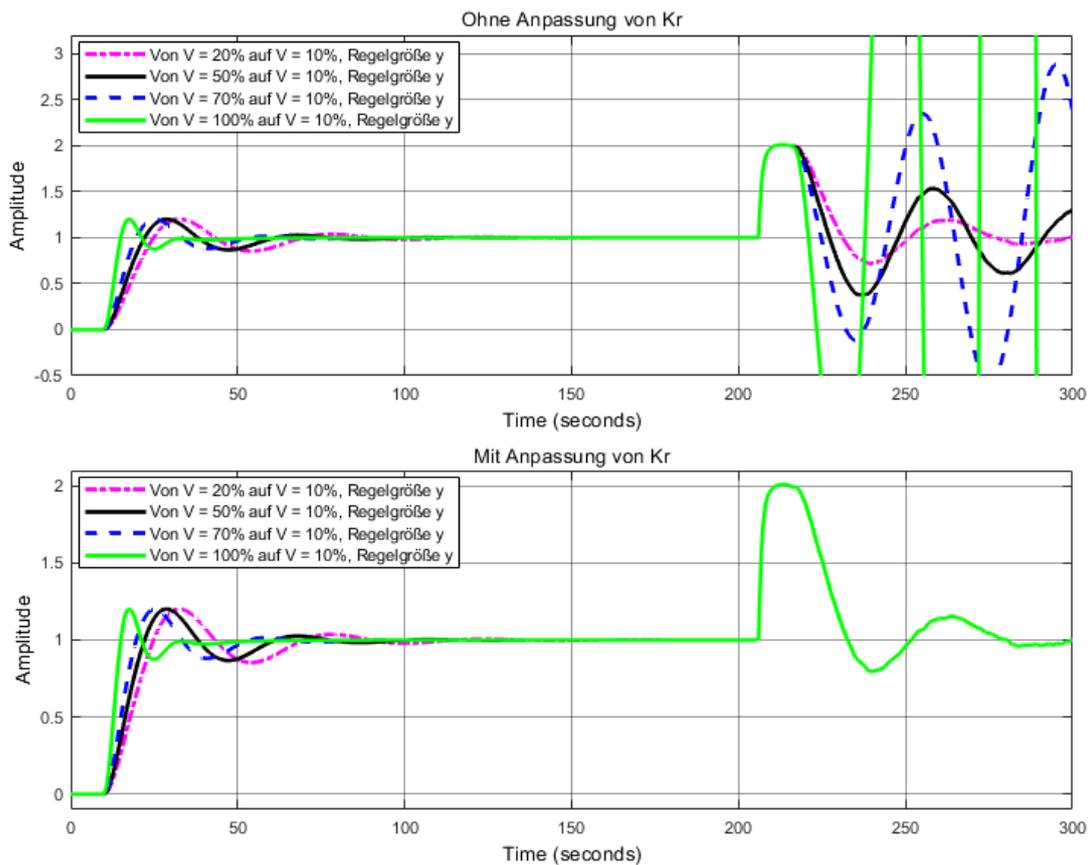


Abb. 4.36: Regelgröße, Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts

Ein vollkommen anderes Bild ergibt sich beim Absenken der Verstärkung ohne Anpassung der Reglerverstärkung. Der Regler wurde am Anfang stark eingestellt und der Einfluss des Smith-Prädiktors bei $t = 200s$ verringert. Die Werte von K_r werden dabei nicht mitangepasst und haben einen von der anfangs eingestellten Verstärkung V abhängigen errechneten Wert. Das hat einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis. Hier tritt aufgrund der falsch eingestellten Regler ein deutlich instabiles und aufschwingendes Verhalten auf. Das ist umso stärker, je größer die Verstärkungsänderung ist. Dabei schwingt sich das System immer weiter auf und hat sehr schlechte und nicht akzeptable Regelungsergebnisse zu Folge.

Die zwingend notwendige Anpassung der Reglerparameter verhindert das instabile Verhalten. Alle Sprungantworten im unteren Graphen von Abb. 4.36 haben einen identischen Verlauf. Der Grund hierfür ist, dass alle Regelkreise die gleichen Voraussetzungen nach der Verstärkungsumstellung haben. Alle Regler haben eine Reglerverstärkung von $K_r = 0,823$ und resultierend identische Sprungantworten. Diese sind stabil und zeigen keinerlei instabiles oder aufschwingendes Verhalten. Eine Anpassung muss beim Absenken vom Einflussrad der Prädiktor-Schaltung unbedingt vorgenommen werden, damit der Regelkreis stabil gehalten werden kann. Das zeigen auch die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors (siehe Abb. 4.37).

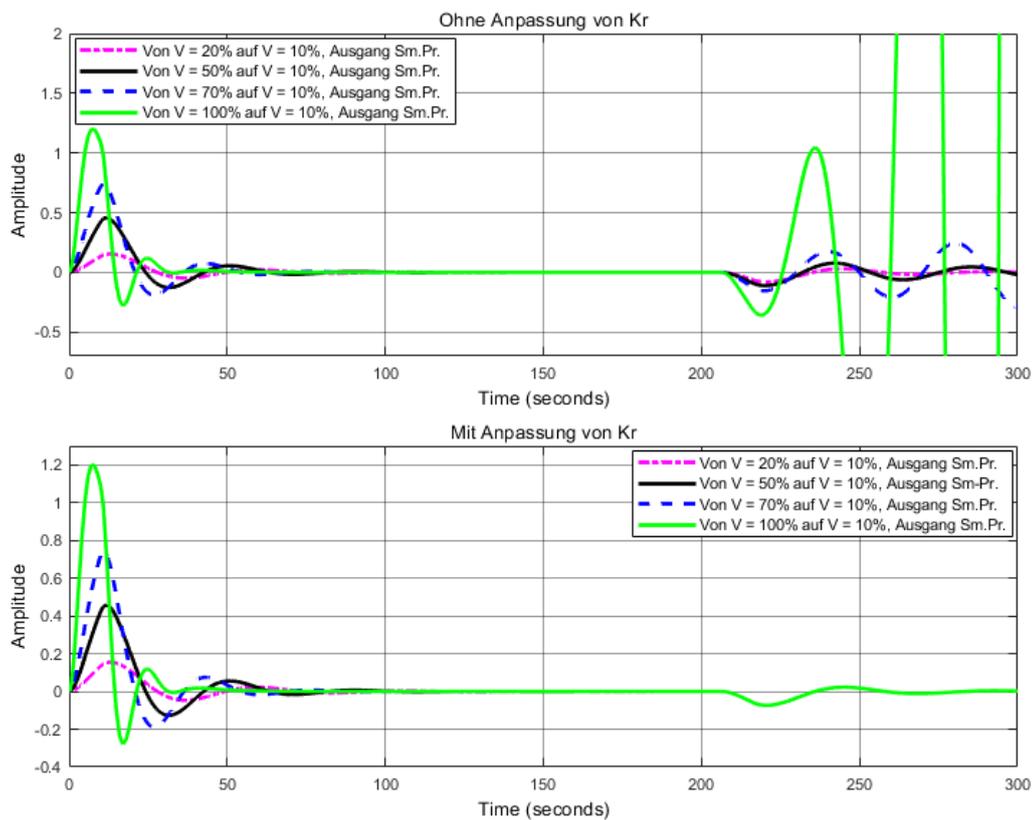


Abb. 4.37: Ausgang Sm.Pr., Störungsfall, Verstärkungsänderungen abwärts

Das instabile Verhalten ist ebenfalls anhand der Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors zu erkennen (oberer Graph). Die Sprungantworten zeigen auch hier bei großen Verstärkungsänderungen einen instabilen und sich aufschwingenden Verlauf. Selbst der schwarze Verlauf der Sprungantwort von $V = 50\% \rightarrow V = 10\%$ ist nicht mehr akzeptabel, da auch hier ein deutlich schwingendes Verhalten erkennbar ist. Wird der Wert von K_r im Zeitpunkt der Verstärkungsänderung der entsprechenden Situation angepasst, können die Regelungsergebnisse deutlich verbessert werden (unterer Graph). Alle Sprungantworten haben ab $t = 150s$ im unteren Graphen einen identischen Verlauf, weil alle Regler dieselben Reglerparameter besitzen. Wird das Einsetzen der Störgröße vor der Verstärkungsänderung eingestellt, ergibt sich ein sehr ähnliches Bild. Dabei wurde der Störgrößeneinsatz auf $t = 195s$ und die Verstärkungsänderung auf $t = 200s$ gestellt. Bei einer Nichtanpassung der Reglerverstärkung verhält sich das System genau wie im vorherigen Verlauf beschrieben. Es tritt starkes Schwingen und instabiles Verhalten auf. Die automatische und situationsbedingte Anpassung kompensiert auch hier dieses unerwünschte Verhalten.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Verstärkung des Smith-Prädiktors im Störungsfall im ausgeschwungenen Zustand nach oben oder unten verstellt werden kann und der Regelkreis dabei stabil gehalten werden kann. Dabei ist aber eine automatische und situationsbedingte Anpassung zwingend notwendig, um instabiles Verhalten zu vermeiden. Die Verstärkung kann sowohl vor dem Störgrößentritt als auch danach problemlos verstellt werden, solange die Reglerparameter angepasst werden.

4.7 Vollständiges Ausschalten des Smith-Prädiktors

4.7.1 Ausschalten im einschwingenden Zustand

Der Einfluss eines im Einschwingvorgang ausschaltenden Smith-Prädiktors kann den gesamten Regelkreis destabilisieren, wenn die verwendete Regeleinrichtung nicht entsprechend der gegebenen Situation optimal angepasst wird. Für die Anpassung der Reglerparameter wird wiederum eine Lookup-Table verwendet, die beim Umstellen des Einflussgrades der Smith-Prädiktor-Schaltung den Wert von K_r korrigiert. Der Ausschaltzeitpunkt des Prädiktors wurde auf $t = 25s$ festgelegt und das Verhalten des Regelkreises mit und ohne Anpassung der Reglerparameter untersucht.

Die Frage, warum der Prädiktor überhaupt im ausgeschwungenen Zustand ausgeschaltet werden kann, wenn die Sprungantwort den Sollwert von 1 und die Smith-Prädiktor-Schaltung ihren Endwert von 0 längst erreicht hat, lässt sich folgendermaßen beantworten. Wenn der Smith-Prädiktor erstmals implementiert werden soll, muss zunächst ein gutes Modell der Regelstrecke vorliegen. Nach der Identifizierung der vorliegenden Regelstrecke muss das Prädiktor-Modell anschließend an die vorliegende reale Regelstrecke angepasst und die möglichst genau erfasste Totzeit ebenfalls in das Prädiktor-Modell eingefügt werden. Die richtige Erfassung des vorliegenden Prozessmodells benötigt eine Vielzahl an Versuchen. Mehrere Fehlversuche in Form von Fehlanpassungen und falscher Erfassung der realen Regelstrecke lassen sich da nicht ausschließen. Es ist von Vorteil, wenn die Möglichkeit des langsamen Rein oder Rausnehmens des Prädiktors besteht, um einerseits die Abweichungen innerhalb des Regelkreises so gering wie möglich zu halten und andererseits das Smith-Prädiktor-Modell möglichst optimal anpassen zu können. Es ist wichtig, den Prädiktor umgehend wieder aus dem Regelkreis entfernen bzw. abschalten zu können, wenn plötzlich deutliche Verschlechterungen innerhalb des Regelkreises auftreten. Werden die Abweichungen innerhalb des geschlossenen Regelkreises zu groß, wird die Stabilitätsgrenze überschritten und der Regelkreis wird instabil.

In der Praxis sind die vorliegenden zu identifizierenden Strecken nicht ideal und können sich im Laufe der Zeit verändern. Ist das der Fall, muss auch die Strecke im Smith-Prädiktor-Modell entsprechend angepasst werden, da sonst Modellabweichungen zu instabilem Verhalten führen könnten. Bei sich verändernden Regelstrecken muss eine Nachjustierung des Prädiktors umgehend erfolgen, die aber auch im Notfall abgebrochen werden kann. Der Notfall tritt ein, wenn sich die Regelungsergebnisse deutlich verschlechtern und der Regelkreis droht instabil zu werden. Das vollständige Herausnehmen ist eine Möglichkeit, um den Regelkreis wieder unter Kontrolle zu bekommen. Wichtig ist, dass bei Rausnehmen des Prädiktors die Reglerparameter unbedingt angepasst werden müssen, sonst führt es nicht zu einer Verbesserung, sondern zu einer deutlichen Verschlechterung der Regelung. Der Smith-Prädiktor kann aber muss nicht rausgenommen werden. Aber wenn sich die Regelstrecke z.B. durch Änderungen im Produkt oder Edukt ändert, muss der Prädiktor angepasst werden und die Möglichkeit vorhanden sein, diesen vollständig aus der Regelung rauszunehmen. Anschließend wird das Prädiktor-Modell angepasst und wieder langsam reingenommen, bis das Modell möglichst optimal angepasst ist. Für die Inbetriebnahme des Regelkreises ist das vollständige Herausnehmen der Prädiktor-Schaltung eine wichtige zur Verfügung stehende Möglichkeit.

Es können ungewollte Abweichungen oder das im schlimmsten Fall auftretende aufschwingende instabile Verhalten verhindert werden. Warum eine sofortige automatische Anpassung der Reglerparameter erfolgen muss, wenn der Einflussgrad des Smith-Prädiktors verändert bzw. vollständig ausgeschaltet wird, zeigen die Werte in der folgenden Tab. 4.9.

Tab. 4.9: Werte des Regelkreises, Ausschalten des Sm.Pr.

V [%]	Ohne Anpassung von K_r			Mit Anpassung von K_r		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
20 → 0	0,9	24,8	104,2	0,76	24,8	67,2
50 → 0	1,27	22,1	428,9	0,76	22,1	63,2
70 → 0	1,815	19,6	n.v.	0,76	19,6	59,2
100 → 0	4,81	15	n.v.	0,76	15	58,8

Das Ausschalten des Prädiktors hat einen sehr negativen Einfluss auf die Ausregelzeiten. Diese sind bei einer Nichtanpassung der Reglerparameter sehr lang und bei großen Verstärkungsänderungen ab $V > 50\% \rightarrow V = 0\%$ wird der Regelkreis aufgrund der großen Abweichungen innerhalb des Regelkreises instabil. Der gesamte Regelkreis schwingt sich auf und ermöglicht keine Ausregelzeiten mehr. Das liegt an den viel zu hohen Reglerverstärkungen, die bei voller Verstärkung über das fünffache zu groß sind. Eine situationsbedingte und automatische Anpassung des Reglers ist daher zwingend notwendig, um ungewünschtes Nachschwingen und instabiles Verhalten zu vermeiden. Für die Nichtanpassung der Regler wurde die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) verwendet. Das gilt ebenfalls für die Untersuchungen aus Abschnitt 4.7.2 bis 4.7.4. Bei einer Anpassung von K_r wurde die entsprechende Lookup-Table korrigiert und die Werte der Reglerverstärkung an die vorliegende Situation angepasst.

Die Anregelzeiten sind in der oberen Tab. 4.9 bei einer Nichtanpassung und Anpassung des Reglers gleich, da das Ausschalten des Prädiktors erst bei $t = 25s$ erfolgt und zu diesem Zeitpunkt alle Sprungantworten bereits den Sollwert von 1 erstmals erreicht haben. Auf der linken Seite der Tabelle sind die Reglerverstärkungen zu erkennen, die ohne Anpassung auf dem entsprechenden Wert abhängig von der eingestellten Anfangsverstärkung gelassen wurden. Wird der Smith-Prädiktor ausgeschaltet und der PI-Regler angepasst, wird der Wert von K_r bei allen Reglern auf $K_r = 0,76$ ($V = 0\%$) korrigiert. Diese Korrektur ermöglicht die besten Regelungsergebnisse und verbessert die Ausregelzeiten deutlich. Auch das instabile, sich aufschwingende Verhalten des Regelkreises wird vollständig behoben und alle Sprungantworten haben einen stabilen Verlauf. In der folgenden Abbildung 4.38 sind die Sprungantworten der Regelgröße mit und ohne Anpassung von K_r dargestellt.

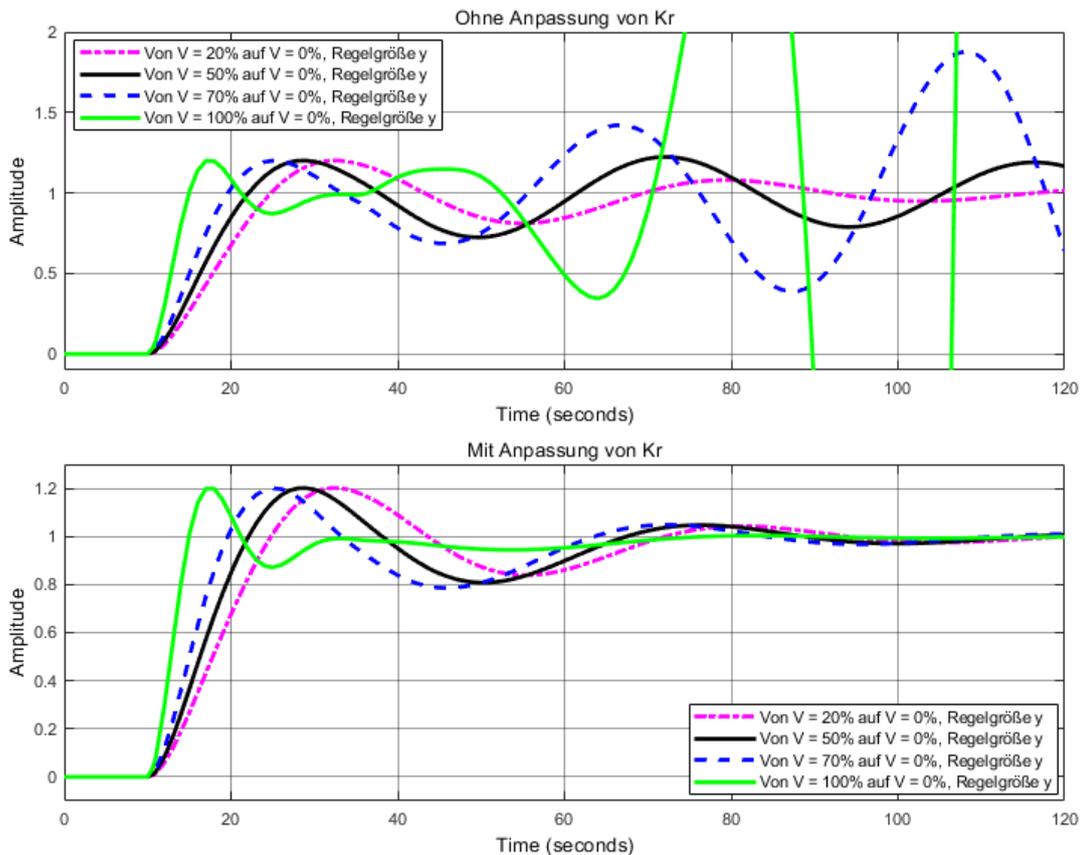


Abb. 4.38: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im einchw. Zustand

Das Ausschalten des Prädiktors hat bereits bei mittleren Anfangsverstärkungen und darauffolgendem Ausschalten einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis. Der Prädiktor wird schlagartig bei $t = 25\text{s}$ auf 0 gestellt und hat ab diesem Zeitpunkt keinerlei Einfluss mehr auf den geschlossenen Regelkreis. Die Reglerparameter wurden im oberen Graphen von Abb. 4.38 nicht angepasst und haben den Wert der entsprechend anfangs eingestellten Verstärkung V . Das instabile Verhalten ist deutlich zu erkennen, das bereits bei mittleren Anfangsverstärkungen auftritt, wenn der Prädiktor ausgeschaltet wird (oberer Graph). Die Sprungantworten schwingen sich immer weiter auf und der gesamte Regelkreis wird instabil. Das Aufschwingen ist nicht bei den Sprungantworten des Smith-Prädiktor-Ausgangs zu finden, da die Schaltung nach dem vollständigen Ausstellen keinen Einfluss auf den Regelungsprozess mehr hat.

Die zwingend notwendige Anpassung der Reglerparameter verhindert das instabile Verhalten des Regelkreises und die Sprungantworten schwingen sich nicht mehr auf und sind stabil. Alle Verläufe haben im unteren Graphen von Abb. 4.38 einen akzeptablen Verlauf und zeigen, dass der Smith-Prädiktor im Einschwingvorgang rausgenommen werden kann, ohne dass deutliche Einbußen bzgl. der Regelungsperformance gemacht werden müssen. Die Grundvoraussetzung dafür ist aber ein gutes Modell der Regelstrecke und die situationsbedingte Anpassung des verwendeten Reglers.

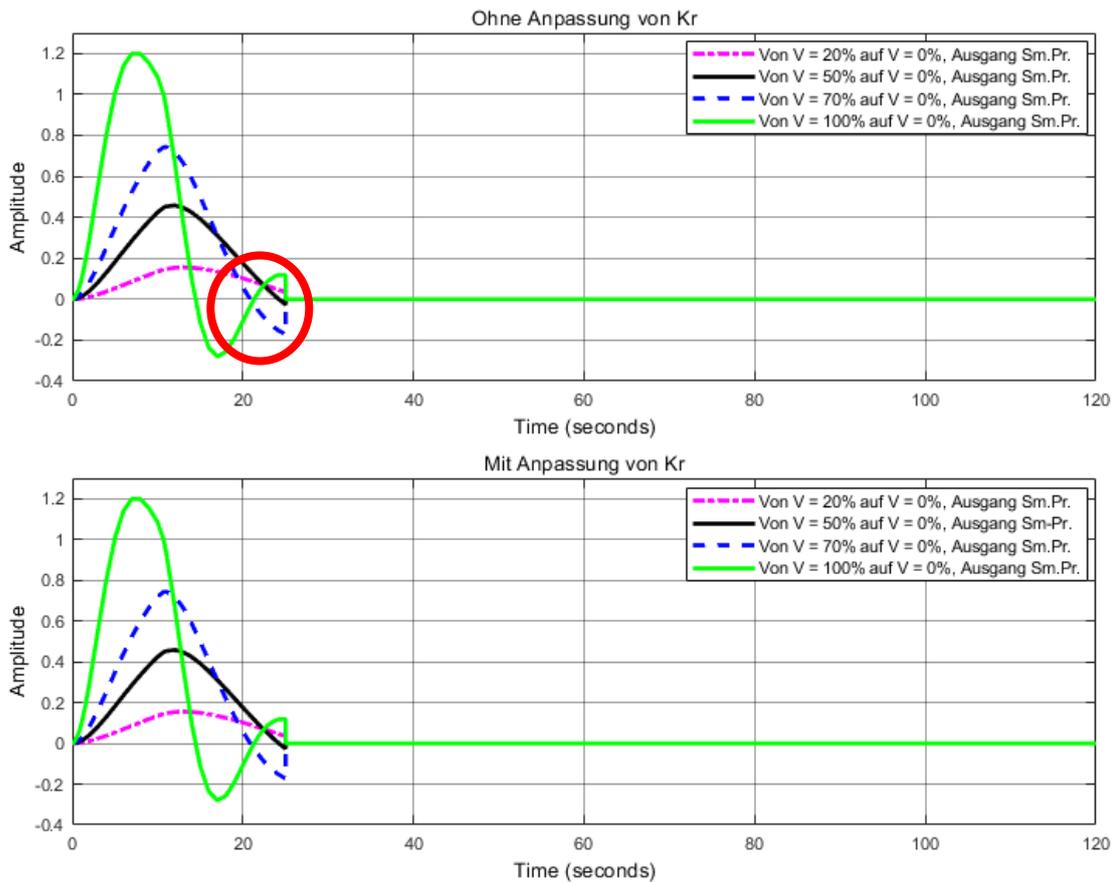


Abb. 4.39: Ausgang Sm.Pr., Ausschalten des Sm.Pr. im einchw. Zustand

Die beiden in Abb. 4.38 dargestellten Graphen zeigen sehr unterschiedliche Sprungantworten zwischen einer Anpassung und Nichtanpassung von K_r . Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Sprungantworten vom Ausgang des Prädiktors bei einer Anpassung und Nichtanpassung nicht. Der Prädiktor wird bei $t = 25s$ (rot hervorgehobener Bereich) vollständig ausgeschaltet und hat keinen Einfluss mehr auf den Regelkreis, unabhängig davon, ob K_r angepasst wird oder nicht. Die Sprungantworten sind im oberen und unteren Graphen von Abb. 4.39 identisch und verändern sich auch im Laufe der Simulationszeit nicht. Die Amplitude der Sprungantworten hängt wiederum von der Anfangsverstärkung ab. Je höher diese gewählt wurde, desto größer die Amplitude der Sprungantwort.

Abschließend lässt sich feststellen, dass der Smith-Prädiktor im Einschwingvorgang vollständig ausgestellt werden kann, wenn eine Anpassung der Reglerparameter erfolgt. Damit wird unerwünschtes instabiles Verhalten des Regelkreises vermieden und die bestmöglichen Regelungsergebnisse erzielt. Wird der Prädiktor ausgestellt, sollte dieser den Wert von $V = 0\%$ und die Reglerverstärkung den entsprechenden definierten Wert von $V = 0\%$ schlagartig annehmen. Der Wert von K_r bei $V = 0\%$ wurde experimentell ermittelt, mit der Vorschrift, dass der Regelgrößensprung eine Überschwingweite von genau 20% aufweisen sollte.

4.7.2 Ausschalten mit Störung im einschwingenden Zustand

Das Ausschalten des Smith-Prädiktors im Einschwingvorgang ohne Störung wurde bereits in Abschnitt 4.7.1 untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine Nichtanpassung der Regleparameter zu instabilem Verhalten führt und die Regelungsergebnisse erheblich verschlechtert. Im Folgenden werden die Untersuchungen wiederholt mit dem Unterschied, dass jetzt eine Störung bei $t = 30s$ einsetzt und der Smith-Prädiktor wie im letzten Abschnitt bei $t = 25s$ ausgeschaltet wird. Es werden die Sprungantworten der Regelgröße und vom Ausgang des Smith-Prädiktors bei einer Nichtanpassung und Anpassung der Reglerverstärkung aufgenommen, analysiert und anschließend bewertet. Im Folgenden sind die Werte der Anregel-, Ausregelzeiten und Reglerverstärkungen tabellarisch dargestellt.

Tab. 4.10: Werte des Regelkreises, Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand

V [%]	Ohne Anpassung von K_r			Mit Anpassung von K_r		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
20 → 0	0,9	24,8	161,2	0,76	24,8	116,4
50 → 0	1,27	22,1	770,4	0,76	22,1	109,2
70 → 0	1,815	19,6	n.v.	0,76	19,6	98
100 → 0	4,81	15	n.v.	0,76	15	101,1

Ohne Anpassung der Reglerverstärkung tritt ab $V > 50\% \rightarrow V = 0\%$ instabiles Verhalten auf und verhindert sämtliche Ausregelzeiten (siehe Tab. 4.10). Das System schwingt sich immer weiter auf und destabilisiert den geschlossenen Regelkreis. Die Ausregelzeiten sind ohne Anpassung sehr groß, beispielsweise bei $V = 50\% \rightarrow V = 0\%$ dauert es $t_{aus} = 770,4s$, bis die Sprungantwort den Zielkorridor von $\pm 5\%$ vom Sollwert nicht mehr verlässt. Der Grund hierfür ist das Einsetzen der Störung bei $t = 30s$, die den Ausregelvorgang erheblich verzögert. Die viel zu stark eingestellten Regler verschlechtern das Regelungsergebnis zusätzlich, da eine viel zu hohe Reglerverstärkung K_r den gesamten Regelkreis negativ beeinflusst.

Wird der Regler automatisch mithilfe der implementierten Lookup-Table angepasst, verbessern sich die Ausregelzeiten deutlich und sind auch vor allem bei hohen Verstärkungsänderungen z.B. $V = 100\% \rightarrow V = 0\%$ vorhanden, wobei das instabile und aufschwingende Verhalten vollständig verhindert werden kann. Alle Sprungantworten weisen nach der Anpassung von K_r einen stabilen und akzeptablen Verlauf auf. Die Ausregelzeiten sind wesentlich länger als im vorherigen Abschnitt, weil zusätzlich zur Verstärkungsänderung der Prädiktor-Schaltung eine Störung eintritt.

Die Regelungsergebnisse können entschieden verbessert werden, wenn der Regler situationsbedingt und automatisch angepasst wird zum Beispiel der Wert von t_{an} verändert sich bei $V = 50\% \rightarrow V = 0\%$ von $t_{an} = 770,4s$ auf $t_{an} = 109,2s$. Hier wird aufgrund der Parameteranpassung des PI-Reglers deutliches Nachschwingen vermieden und damit die Ausregelzeit stark verbessert.

Die Anregelzeiten sind bei einem angepassten und nichtangepassten Regler identisch, da das Abschalten des Prädiktors erst nach dem erstmaligen Erreichen des Sollwertes zum Zeitpunkt $t = 25s$ geschieht.

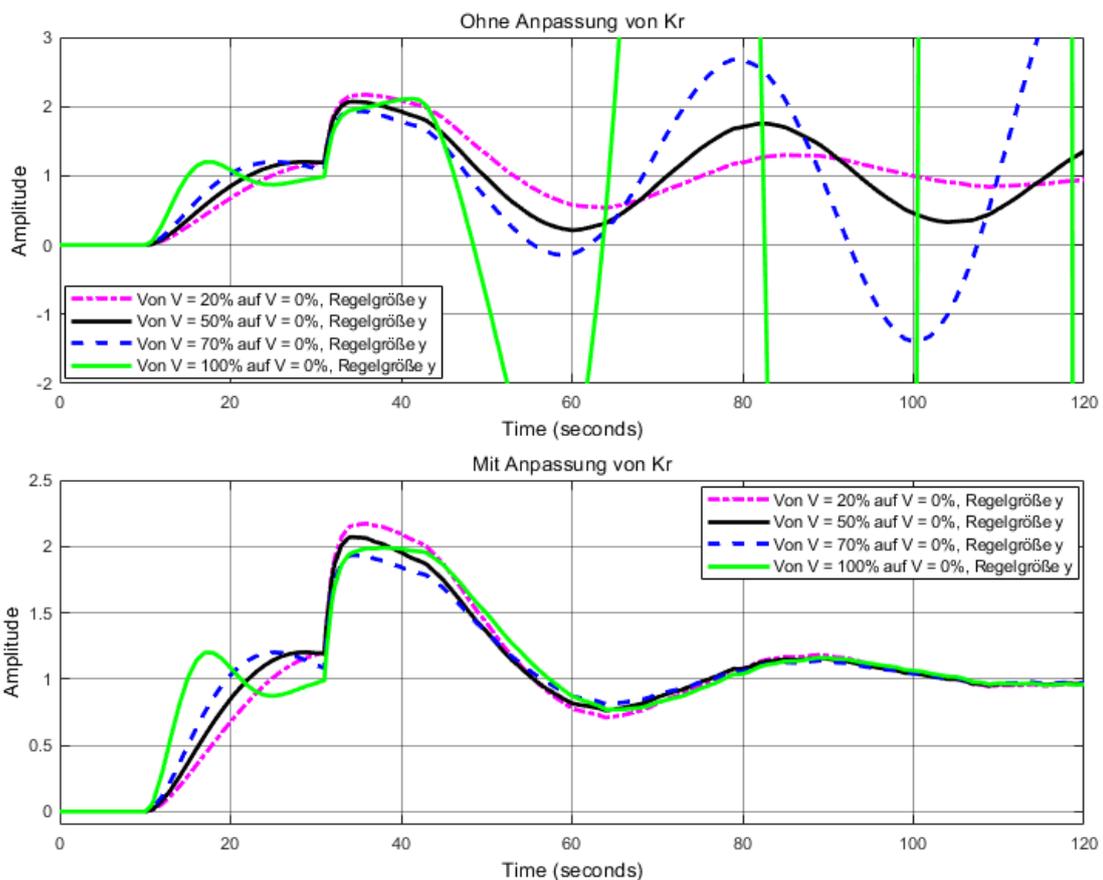


Abb. 4.40: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand, Störung

Abb. 4.40 zeigt die Sprungantworten der Regelgröße mit angepasster und nichtangepasster Reglerverstärkung. Das genannte instabile und sich aufschwingende Verhalten ist hier bei zwei von vier Sprungantworten im oberen Graphen zu erkennen. Die schwarze Sprungantwort ($V = 50\% \rightarrow V = 0\%$) zeigt auch ein sehr stark schwingendes Verhalten aber im Gegensatz zu der grünen ($V = 100\% \rightarrow V = 0\%$) und blauen ($V = 70\% \rightarrow V = 0\%$) Sprungantwort, schwingt sich das System hier nicht auf, sondern schwingt „nur“ sehr stark nach. Nach mehreren hundert Sekunden wird der Zielkorridor von $\pm 5\%$ vom Sollwert nicht mehr verlassen. Die schwarze sowie die grüne und blaue Sprungantwort sind nicht mehr akzeptabel, weil diese viel zu stark schwingen und teilweise instabil werden.

Je größer die anfangs eingestellte Verstärkung, desto instabiler wird der Regelkreis, wenn der Smith-Prädiktor ausgeschaltet wird. Eine Anpassung der Reglerparameter ist zwingend notwendig, um die Regelungsergebnisse und die Verläufe der Sprungantworten zu verbessern. Erfolgt eine automatische Korrektur von K_r , haben alle Sprungantworten im unteren Graphen von Abb. 4.40 einen stabilen Verlauf. Das Einsetzen der Störung bei $t = 30s$ und das vorherige Ausschalten destabilisiert den Regelkreis nicht mehr, wenn der verwendete Regler optimal der Situation angepasst wird.

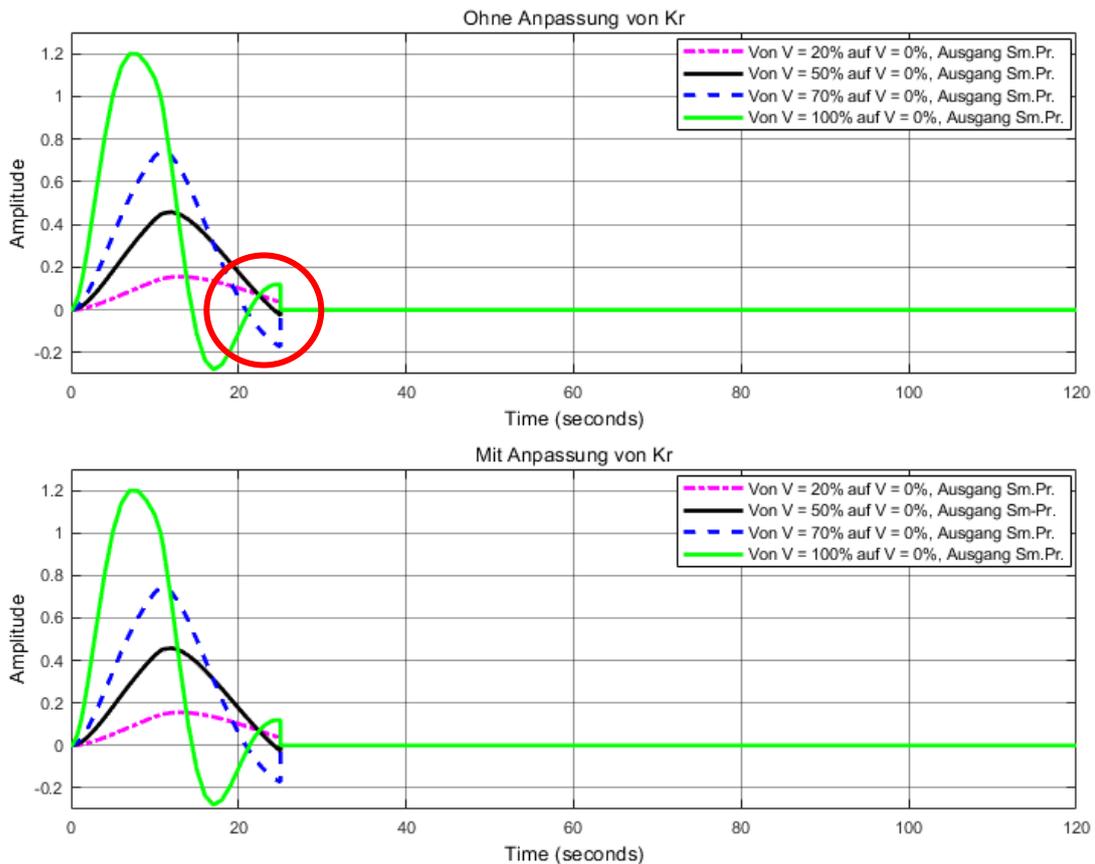


Abb. 4.41: Ausgang Sm.Pr., Ausschalten des Sm.Pr. im einschw. Zustand, Störung

Die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors zeigen keinerlei Unterschiede, wenn der verwendete PI-Regler angepasst oder nichtangepasst wird. Die Schaltung wird bei $t = 25\text{s}$ vollständig ausgeschaltet (siehe rot hervorgehobener Bereich) und hat ab diesem Zeitpunkt keinen Einfluss mehr auf den geschlossenen Regelkreis. Unabhängig davon, ob sich das gesamte System aufschwingt und instabil wird, die Smith-Prädiktor-Schaltung wird nicht beeinflusst. Die Amplituden der Sprungantworten hängen wiederum von der eingestellten Anfangsverstärkung ab. Je größer diese gewählt wurde, umso höher ist der Einflussgrad des Smith-Prädiktors und damit auch die Amplitude der jeweiligen Sprungantwort. Ab $t \geq 30\text{s}$ haben alle Sprungantworten bis zum Ende der Simulationszeit einem Wert von 0.

Abschließend lässt sich feststellen, dass der Smith-Prädiktor im Einschwingvorgang vollständig ausgestellt werden kann, falls die zwingend notwendige Anpassung der Reglerparameter erfolgt. Damit wird ungewünschtes Verhalten des Regelkreises vermieden und die besten Regelungsergebnisse erzielt. Im Störungsfall ist die Korrektur von K_r von entscheidender Bedeutung, weil eine Störung das instabile Verhalten bei einer Nichtanpassung von K_r verstärken kann. Das Ausschalten vor oder nach dem Einsetzen der Störgröße ist möglich, wenn der Regler automatisch anpasst wird.

4.7.3 Ausschalten im ausgeschwungenen Zustand

Das Ausschalten des Smith-Prädiktors im ausgeschwungenen Zustand sollte einen minimalen Einfluss auf den Regelkreis haben, weil die Smith-Prädiktor-Schaltung bereits auf dem Wert von 0 liegt und der Sollwert von 1 vom Regelgrößenprung längst erreicht wurde. Ein nicht sichtbarer Einfluss ist nur bei einer Anpassung der Reglerparameter vorhanden. Werden die Werte von K_r nicht automatisch angepasst, ergibt sich ein vollständig anderes Bild.

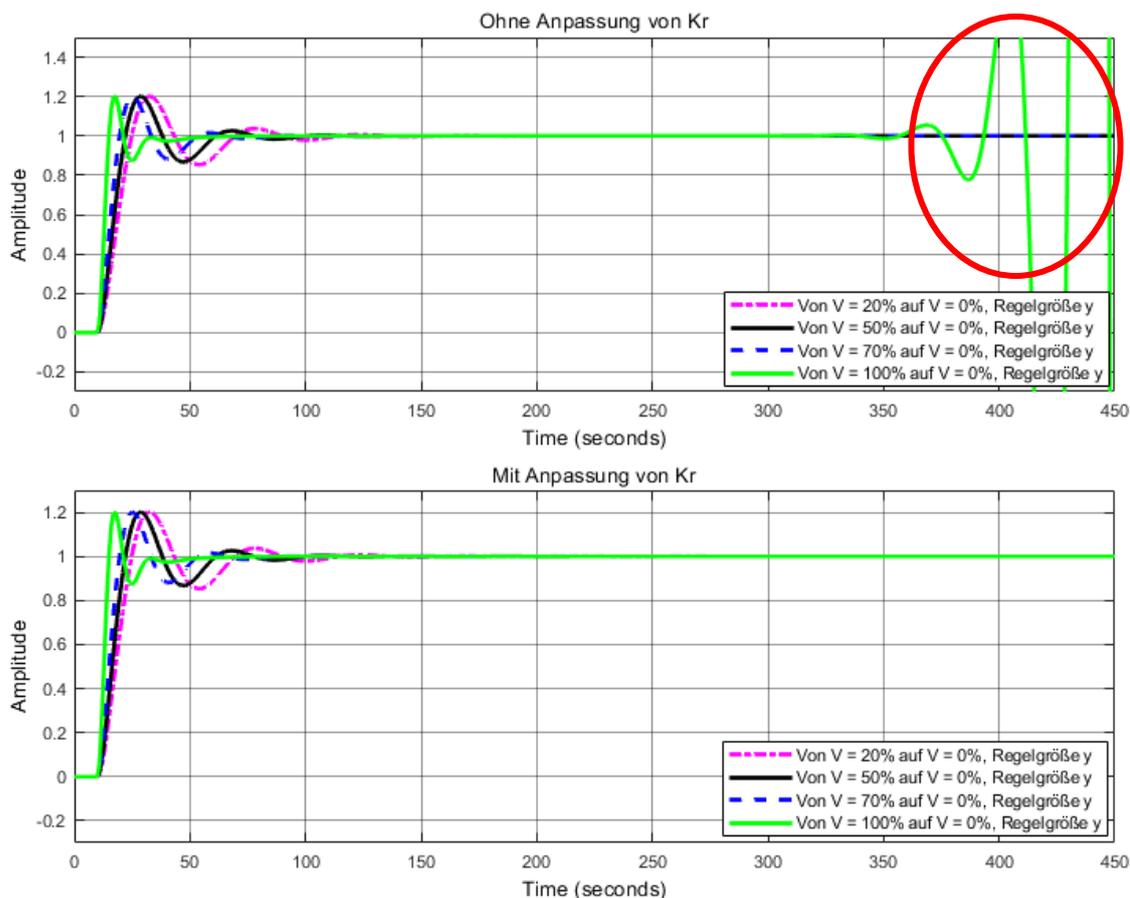


Abb. 4.42: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im ausgeschw. Zustand

Zunächst hat das Ausstellen des Prädiktors bei $t = 200s$ keinerlei Einfluss auf den Regelkreis. Erst bei einer Simulationszeit von $t = 325s$ ist eine Veränderung der grünen Sprungantwort im oberen Graphen zu erkennen. Obwohl der Smith-Prädiktor-Ausgang ab $t = 200s$ einen Wert von 0 hat, hat das Umstellen der Verstärkung auf $V = 0\%$ einen negativen Einfluss auf den Regelkreis.

Der Grund für das auftretende instabile Verhalten sind mathematische Abweichungen innerhalb des Systems. Die Abweichungen innerhalb des Regelkreises sind aufgrund der viel zu hoch eingestellten Regler bei einer Nichtanpassung sehr groß. Kleinste numerische Abweichungen reichen aus, damit sich das System über die Zeit immer mehr aufschwingt. Der Regelkreis wird bei viel zu großem Wert von K_r und Abschalten der Prädiktor-Schaltung instabil ohne Smith-Prädiktor mit einer Einstellung für Smith-Prädiktor.

Ohne zusätzliche Anregungen beispielsweise durch eine Störung reichen die kleinen vorliegenden Abweichungen innerhalb des Regelkreises aus, damit sich das System im Laufe der Zeit aufschwingen kann. In der Mathematik werden die Abweichungen mit der Größe Epsilon bezeichnet. Diese Größe geht gegen den Wert von 0. Damit sind die Abweichungen immer groß genug, damit der Regelkreis instabil werden kann. In der Praxis sind die Abweichungen stets größer 0, weil beispielsweise Messrauschen vorhanden ist. Eine Nichtanpassung der Reglerparameter könnte das System viel schneller destabilisieren, da die Abweichungen von vornerein größer sind. Daher tritt das Aufschwingen wesentlich früher ein.

Eine Anpassung der Reglerparameter ist zwingend notwendig, um die Abweichungen innerhalb des Regelkreises so klein wie möglich zu halten. Erfolgt die automatische Korrektur der Reglerverstärkung, indem der Wert beim vollständigen Ausschalten auf $K_r = 0,76$ gestellt wird, haben alle Sprungantworten einen stabilen Verlauf (siehe unterer Graph von Abb. 4.42). Auch im Laufe der Simulationszeit schwingt sich keine der Sprungantworten auf und sie haben damit den gewünschten Verlauf. Das instabile Verhalten tritt erst bei großen Verstärkungsänderungen auf. Bei $V \geq 90\% \rightarrow V = 0\%$ und einer Nichtanpassung wird der Regelkreis instabil, weil die Abweichungen innerhalb des Regelkreises groß genug sind, um die Stabilitätsgrenze zu überschreiten und sich das System folglich aufschwingen kann. Die Smith-Prädiktor-Schaltung wird zum Zeitpunkt $t = 200s$ ausgeschaltet. Die Sprungantworten vom Ausgang der Prädiktor-Schaltung verlassen ab diesem Zeitpunkt den Wert von 0 nicht mehr, unabhängig davon, ob eine Anpassung der Reglerparameter erfolgt oder nicht. Die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors haben denselben Verlauf wie die aus Abb. 4.44.

Die Anpassung der Reglerparameter sollte bei sämtlichen Verstärkungsänderungen erfolgen, unabhängig davon, wie hoch die Anfangsverstärkung definiert wurde. Zusätzliche Anregungen z.B. durch eine Störung können auch schon bei mittleren Anfangsverstärkungen den Regelkreis destabilisieren, wenn der Prädiktor vollständig ausgeschaltet wird und keine Anpassung des PI-Reglers erfolgt.

4.7.4 Ausschalten mit Störung im ausgeschwungenen Zustand

Das vollständige Ausstellen des Smith-Prädiktors ist dank der stufenlosen Implementierung mithilfe der Lookup-Table jederzeit möglich. Die Reglerparameter passen sich der eingestellten Verstärkung des Smith-Prädiktors automatisch und umgehend an. Wird keine Anpassung der Reglerverstärkung durchgeführt, kann das sehr negative Folgen für den Regelkreis haben. Abschnitte 4.7.1 bis 4.7.3 haben gezeigt, dass viel zu stark eingestellte Regler bei einer Verstärkungsänderung auf $V = 0\%$ und nicht automatischer Anpassung von K_r instabiles Verhalten im Regelkreis verursachen. Das ist auch der Fall, wenn eine Störung zum Zeitpunkt von $t = 205s$ im ausgeschwungenen Zustand eintritt und der Prädiktor bei $t = 200s$ ausgeschaltet wird.

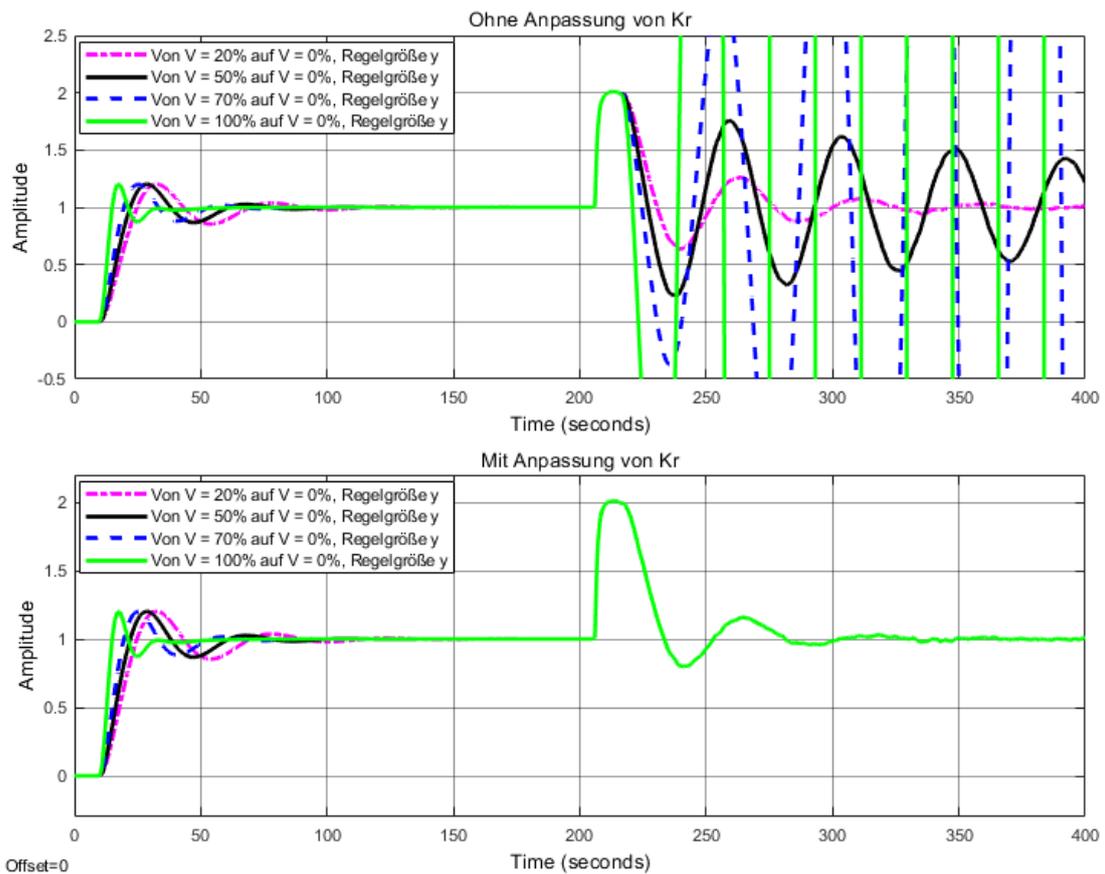


Abb. 4.43: Regelgröße, Ausschalten des Sm.Pr. im ausgeschw. Zustand, Störung

Das Einsetzen der Störung ist in Abb. 4.43 deutlich ab $t = 205s$ zu erkennen. Der Regelgrößenprung steigt bei $t = 205s$ auf einen Wert von 2 und wird abhängig vom gewählten Regelkreis ausgeregelt oder nicht (oberer Graph). Die Regelkreise mit nichtangepassten Reglerverstärkungen verursachen instabiles Verhalten und das bereits bei mittleren Anfangsverstärkungen, wenn der Smith-Prädiktor ausgeschaltet wird. Die blaue und grüne Sprungantwort schwingen sich im Laufe der Zeit immer mehr auf, weil die Abweichungen innerhalb des Regelkreises groß genug sind, um die Stabilitätsgrenze des Regelkreises zu überschreiten.

Auch mittlere Anfangsverstärkungen haben beim Ausschalten und Nichtanpassung von K_r einen negativen Einfluss (schwarze u. pinke Sprungantwort). Der jeweilige Regelkreis ist in diesen Fällen ($V = 20\% \rightarrow V = 0\%$, $V = 50\% \rightarrow V = 0\%$) nicht instabil, schwingt aber sehr stark nach. Eine Anpassung der Reglerparameter ist beim Ausschalten der Prädiktor-Schaltung zwingend notwendig, unabhängig davon, wie hoch die Anfangsverstärkung gewählt wurde. Bis auf die pinke Sprungantwort haben alle Sprungantworten aus dem oberen Graphen nicht akzeptable Verläufe, da die jeweiligen Regler viel zu stark eingestellt wurden.

Im unteren Graphen wurden alle Regelkreise automatisch mithilfe der implementierten Lookup-Table angepasst. Alle PI-Regler haben ab dem Zeitpunkt von $t = 205s$ eine Reglerverstärkung von $K_r = 0,76$ und damit die gleichen Voraussetzungen. Das Resultat sind identische Sprungantworten ab $t = 205s$ im unteren Graphen von Abb. 4.43. Eine Anpassung kann das instabile Verhalten vollständig verhindern und ist aus diesem Grund immer notwendig.

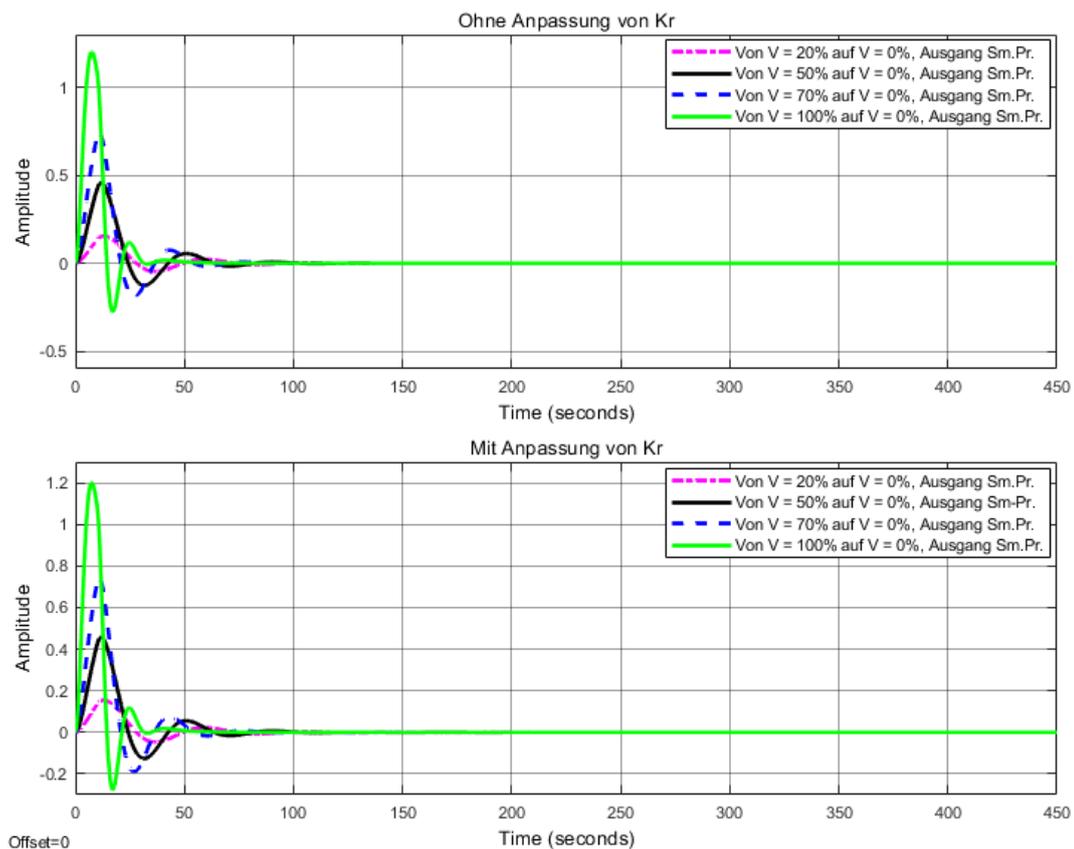


Abb. 4.44: Ausgang Sm.Pr., Ausschalten des Sm.Pr., Störung

Die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors haben einen identischen Verlauf, unabhängig ob eine Anpassung der Reglerparameter erfolgt oder nicht. Der Grund ist, dass die Smith-Prädiktor-Schaltung bis $t = 200s$ ihren Endwert von 0 bereits erreicht hat und beim vollständigen Ausschalten diesen Wert nicht mehr verlässt.

Das bei einer Nichtanpassung auftretende instabile Verhalten hat keinerlei Einfluss auf den Smith-Prädiktor, da der Prädiktor aufgrund der Abschaltung der Schaltung ab $t = 200s$ keinen Einfluss mehr auf den Regelkreis hat. Die Amplituden der Sprungantworten von $t = 0s$ bis $t = 100s$ sind von der anfangs eingestellten Verstärkung des Prädiktors abhängig. Je höher der anfangs gewählte Einflussgrad des Smith-Prädiktors ist, desto größer die Amplitude der Sprungantwort.

Abschließend lässt sich feststellen, dass der Smith-Prädiktor auch im Störungsfall im ausgeschwungenen Zustand vollständig ausgeschaltet werden kann, wenn die verwendeten Regler automatisch angepasst werden. Eine Nichtanpassung führt zu einer Destabilisierung des gesamten Regelkreises und verschlechtert damit die Regelungsmöglichkeiten stark. Um das auftretende aufschwingende Verhalten unterbinden zu können, muss der Regler immer der vorliegenden Situation angepasst werden. Der Wert von $K_r = 0,76$ wurde für $V = 0\%$ gewählt, damit die Sprungantwort der Regelgröße beim Ausgeschalteten des Smith-Prädiktors eine Überschwingweite von genau 20% aufweist. Dieses Einstellungskriterium wurde auch für alle weiteren definierten Verstärkungen innerhalb der implementierten Lookup-Table verwendet.

4.8 Robustheit des Smith-Prädiktors gegenüber Modellabweichungen

4.8.1 Totzeitabweichungen

Die größte Schwachstelle einer Smith-Prädiktor-Schaltung sind Modellabweichungen. Sie können aufgrund von Differenzen zwischen der realen Prozessstrecke und der im Smith-Prädiktor implementierten Regelstrecke entstehen. Dabei können sich die jeweiligen Zeitkonstanten, Totzeiten oder sogar die Ordnung der Regelstrecken unterscheiden. In der Praxis ist es fast nicht möglich die reale Regelstrecke exakt zu definieren und eine übereinstimmende Regelstrecke in den Smith-Prädiktor zu implementieren. Welchen Einfluss Abweichungen innerhalb des geschlossenen Regelkreises haben, wird zunächst im Fall von unterschiedlichen Totzeiten untersucht. Dabei unterscheiden sich die Totzeiten in der realen Regelstrecke und im Smith-Prädiktor-Modell.

Die Vorteile des Smith-Prädiktors können am besten genutzt werden, wenn die im Prozess enthaltene Totzeit möglichst genau bekannt ist. Die exakte Bestimmung der Totzeit ist nur in den wenigsten Fällen möglich. Eine ungenaue Erfassung hat eine zulässige Änderung bzw. eine Unsicherheit der Totzeit zur Folge. Diese Unsicherheit lässt sich mit der folgenden Gleichung nach [5] beschreiben.

$$\frac{\Delta T_t}{T_t} = \frac{1}{\omega_b \cdot T_t} \quad (4.7)$$

Die in Gleichung (4.7) verwendete Größe ω_b ist die Bandbreite des Regelkreises ohne Totzeit. Das bedeutet, dass bei Reglern mit hohen Anforderungen an die Regelkreisdynamik $\omega_b \cdot T_t$ die Totzeit genau bekannt sein muss. Für eine ausreichende Robustheit ist es erforderlich, dass der Wert von $\omega_b \cdot T_t$ begrenzt werden muss. Dabei gilt die Faustregel, dass $\omega_b \cdot T_t$ kleiner 0,5 sein sollte. Wenn ein Smith-Prädiktor-Regler mit einem PID-Regler verglichen wird, ergibt sich, dass sich beim Smith-Prädiktor-Regler eine tendenziell bessere Regelgüte ergibt, wenn die Totzeit dominierend ist. Dominant bedeutet, eine normierte Totzeit von $\frac{T_t}{T_t + T_1} < 0,5$ und eine möglichst genau bekannte Totzeit.

Entstehen Abweichungen innerhalb des Systems, wird die Robustheit des gesamten geschlossenen Regelkreises beeinflusst. Eine Art von Abweichung sind Totzeitabweichungen. Für die folgenden Simulationen wurde dabei die Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell nach oben bzw. nach unten verändert. Die einzelnen Szenarien sind im Folgenden aufgelistet.

- $T_{t_Real} = T_{t_SmPr} \rightarrow T_{t_Real} = 10s, T_{t_SmPr} = 10s$
- $T_{t_Real} < T_{t_SmPr} \rightarrow T_{t_Real} = 10s, T_{t_SmPr} = 12s$
- $T_{t_Real} > T_{t_SmPr} \rightarrow T_{t_Real} = 10s, T_{t_SmPr} = 8s$

Zunächst wird die Totzeit im Modell der realen Regelstrecke T_{t_Real} und im Smith-Prädiktor-Modell T_{t_SmPr} auf $T_t = 10s$ gestellt.

Dieses Szenario verkörpert die exakte Erfassung der Totzeit und ermöglicht damit nahezu keine Abweichungen zwischen dem realen Prozessmodell und der Smith-Prädiktor-Schaltung. Für alle Simulationen wird nur die Totzeit im Totzeitglied verändert. Die reale Regelstrecke ohne Totzeit wurde dabei exakt erfasst und in die Smith-Prädiktor-Schaltung implementiert. Nur die Totzeit T_t stimmt in zwei Simulationsfällen ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$, $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$) nicht überein und wird entsprechend im Prädiktor verändert. Es wird nur die Totzeit im Smith-Prädiktor verstellt, weil die reale Regelstrecke als Prozess vorgegeben ist und nicht verändert werden kann. Zunächst wird die Totzeit zu klein gewählt. Dabei wird der Wert von T_t auf $T_t = 8s$ verstellt. Anschließend wird der Wert von T_t zu groß gewählt. Die zu große bzw. zu kleine Belegung von T_t beträgt hier jeweils 20%. Dabei ist die Totzeit T_{t_Real} die Totzeit des Modells der realen Regelstrecke und T_{t_SmPr} die Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell.

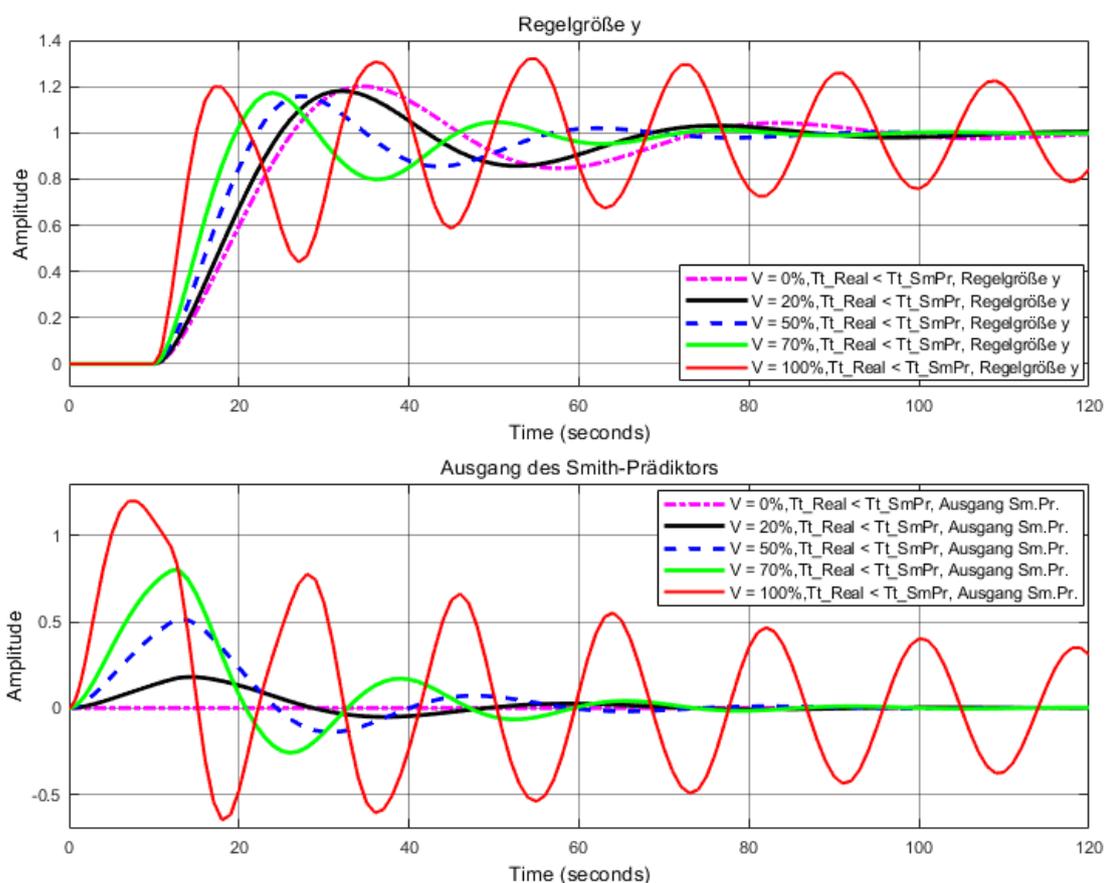


Abb. 4.45: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., größere Totzeit im Sm.Pr.

In Abb. 4.45 sind die Sprungantworten der Regelgröße für fünf verschiedene Verstärkungen mit einer größeren Totzeit von $T_t = 12s$ im Smith-Prädiktor-Modell dargestellt. Die Amplitude des Überschingers nimmt mit steigenden Verstärkungen stetig bis einschließlich $V = 70\%$ ab, da der Regler für jede Verstärkung, außer $V = 0\%$ zu schwach eingestellt wurde. Die Reglerverstärkung K_r wurde nicht angepasst und besitzt dieselben Werte wie die der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1). Die Sprungantworten sind bei den Verstärkungen bis $V = 70\%$ stabil und zeigen kein übermäßiges Nachschwingen. Im Gegensatz dazu ist ein sehr starkes Nachschwingen bei voller Verstärkung des Smith-Prädiktors zu erkennen.

Das Regelungsergebnis ist hier mit Abstand am schlechtesten und die zu große Belegung der Totzeit verursacht ein stark schwingendes Verhalten im Regelkreis. Im Laufe der Simulationszeit nimmt das schwingende Verhalten ab, aber der Wert des Sollwertes wird nicht innerhalb der gewählten Simulationszeit erreicht.

Die Anregel- und Ausregelzeit nehmen mit größer werdenden Verstärkungen ab, da der Smith-Prädiktor prozentual immer mehr Einfluss auf den Regelkreis ausübt. Wenn nur die betrachteten Größen als Vergleich genommen werden, verbessert sich das Regelungsergebnis bis zu einer Verstärkung von $V = 70\%$. Die Ausregel- und die Anregelzeiten verbessern sich, aber die Bedingung der Einhaltung einer Überschwingweite von 20% wird bei nicht angepassten Reglerverstärkungen nicht erfüllt.

Wird eine Verstärkung $V > 70\%$ eingestellt, verschlechtern sich die Regelungsergebnisse wieder deutlich. Das gesamte System fängt an stark nachzuschwingen und ermöglicht keine akzeptablen Verläufe der betrachteten Sprungantworten.

Eine sich verändernde Amplitude ist auch beim Ausgang des Smith-Prädiktors im unteren Graphen von Abb. 4.45 zu erkennen. Die Amplitude der Sprungantwort nimmt mit steigender Verstärkung zu und erreicht bei $V = 100\%$ die größte Amplitude von 1,2. Der Smith-Prädiktor klingt wiederum nach einer gewissen Zeit ab und erreicht seinen Endwert von 0, außer bei einer Verstärkung von $V = 100\%$. Hier wird der Endwert von 0 erst weit außerhalb der Simulationszeit von $t = 120s$ erreicht. Bei $V = 100\%$ ist ebenfalls ein sehr starkes Nachschwingen vorhanden, das mit zunehmender Simulationszeit abnimmt, aber keine akzeptablen Regelungsergebnisse ermöglicht.

Die Amplitude der Sprungantwort vom Ausgang des Smith-Prädiktors nimmt mit zunehmender Verstärkung zu, da der Einflussgrad des Smith-Prädiktors mit steigender Verstärkung immer größer auf den Regelkreis wird. Werden die Sprungantworten bis einschließlich $V = 70\%$ betrachtet, erfüllt der Prädiktor seine Funktion und ermöglicht höhere Reglerverstärkungen und bessere Regelungsergebnisse trotz Modellabweichungen. Bei voller Verstärkung hingegen verursacht das ausgeprägte Schwingen eine deutliche Verschlechterung der Regelungsergebnisse und hat ein stark schwingendes Verhalten zur Folge. Der Smith-Prädiktor sollte bei der vorliegenden Regelstrecke und Totzeitdifferenz nicht auf die Maximalverstärkung gestellt werden, sondern bis maximal $V = 70\%$.

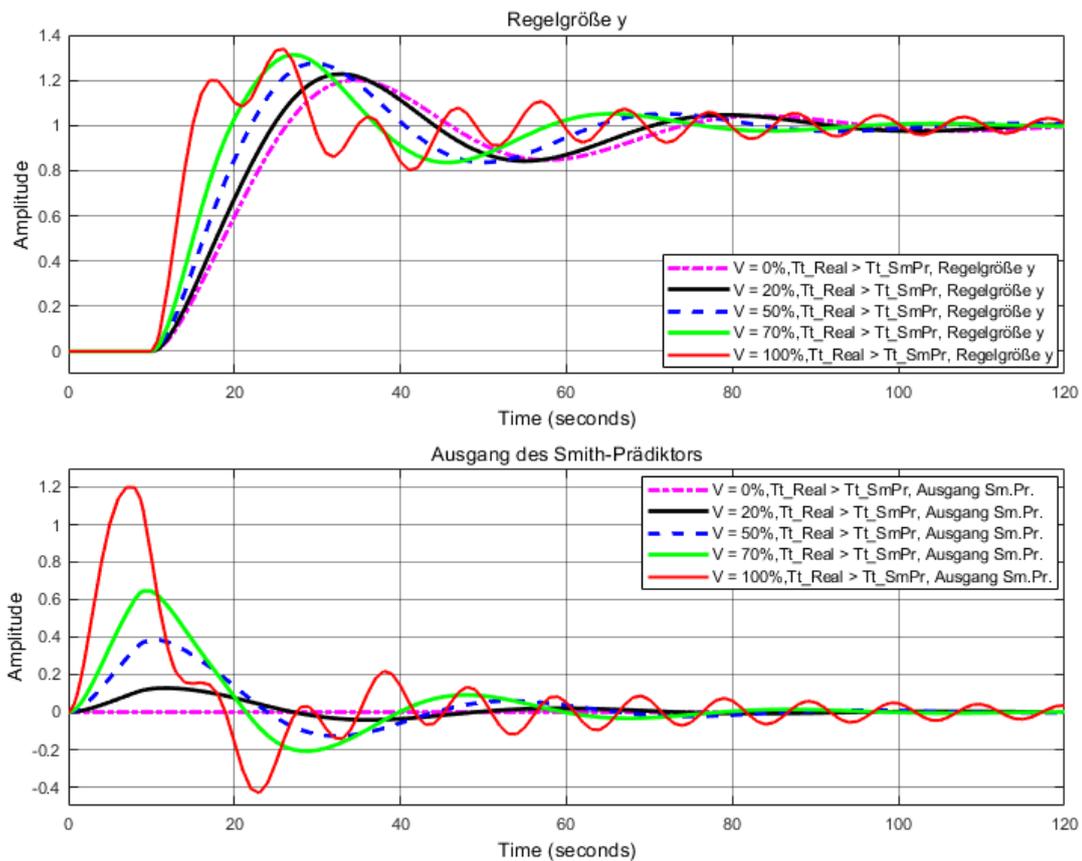


Abb. 4.46: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., kleinere Totzeit im Sm.Pr.

Wird eine kleinere Totzeit von $T_t = 8s$ im Smith-Prädiktor Modell implementiert, zeigt sich, dass im Gegensatz zu einer größeren Totzeit im Smith-Prädiktor die Amplitude der Sprungantwort mit steigender Verstärkung zunimmt. Die zu starke Einstellung des verwendeten PI-Reglers verursacht diesen Anstieg der Amplituden. Der Wert von K_r wurde hier nicht angepasst und besitzt dieselben Werte wie die der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1).

Die Amplituden vom Ausgang des Smith-Prädiktors nehmen ebenfalls mit höher werdenden Verstärkungen deutlich zu. Die größte Amplitude von 1,2 wird bei $V = 100\%$ erreicht. Wird der Zeitpunkt der maximalen Amplitude betrachtet, lässt sich feststellen, dass dieser mit höher werdenden Verstärkungen immer weiter nach links auf der Zeitachse wandert. Damit werden die Sprungantworten mit höheren Verstärkungen immer schneller und der Einflussgrad des Prädiktors größer. Es ist aber auch beim Ausgang des Smith-Prädiktors stark schwingendes Verhalten zu finden. Dieses tritt ebenfalls bei voller Verstärkung auf und ist durch starkes Nachschwingen gekennzeichnet (roter Verlauf). Die Amplituden der Schwingungen nehmen mit zunehmender Simulationszeit ab, aber der Endwert des Prädiktors von 0 wird nicht innerhalb der Simulationszeit von $t = 120s$ erreicht.

Der Idealfall einer deutlichen Verbesserung der Regelungsergebnisse wird bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ bei einer zu großen und zu kleinen Belegung von T_t verfehlt. Eine deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse ist nur bei kleinen bis mittleren Verstärkungen möglich. Ein Regelkreis mit unterschiedlichen Totzeiten und zu stark eingestelltem Regler führt bei größer werdenden Verstärkungen der Smith-Prädiktor-Schaltung zu einer Überschwingweite von $>20\%$ und ein zu niedriger eingestellter Regler zu einer Überschwingweite von $<20\%$.

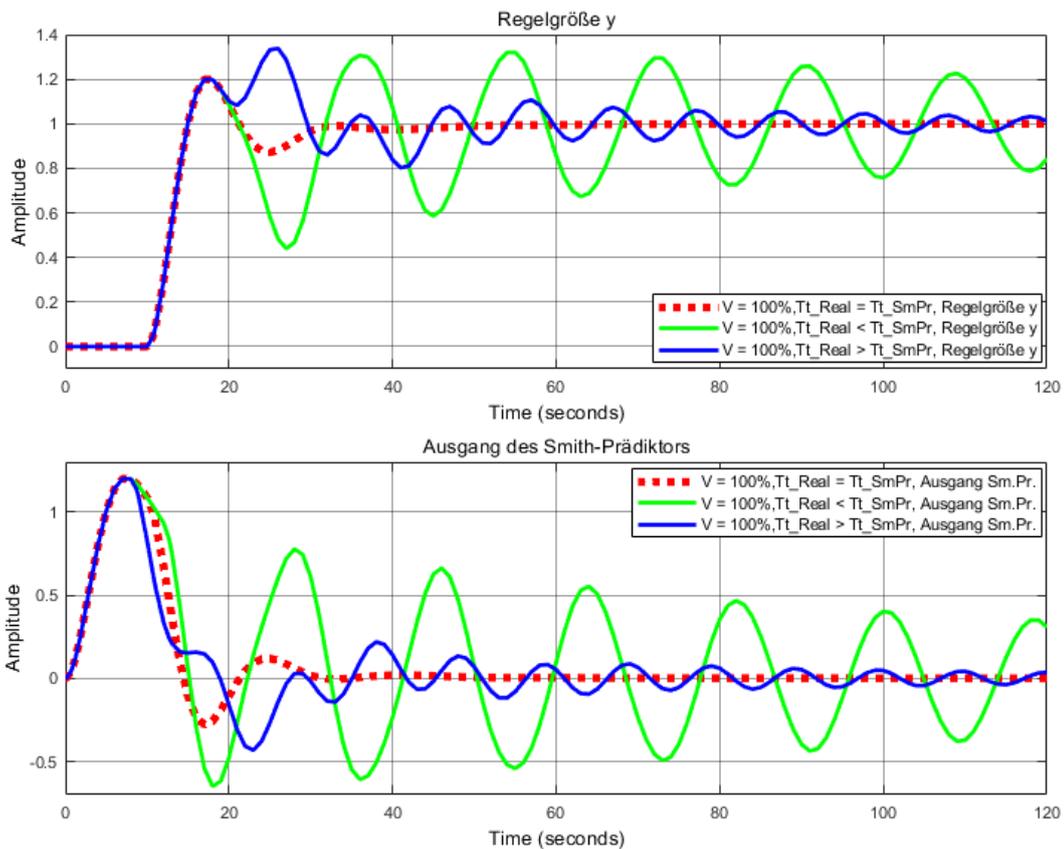


Abb. 4.47: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Totzeitabweichungen

Die im oberen Graphen von Abb. 4.47 dargestellten Sprungantworten der Regelgröße zeigen sehr deutliche Unterschiede zwischen einer zu großen und zu kleinen Belegung der Totzeit. Beide Fälle haben ein stark schwingendes Verhalten zur Folge. Es fällt auf, dass im Fall von $T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$ deutlich stärkeres Nachschwingen auftritt als bei $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$. Der Grund sind die Abweichungen innerhalb des geschlossenen Regelkreises, die in diesem Fall sehr groß sind.

Bei einer zu kleinen Belegung der Totzeit ist der Regler zu stark und bei einer zu großen Belegung zu schwach eingestellt und nicht situationsbedingt angepasst. Beide Szenarien verursachen einen Verlauf der Sprungantwort, der sich deutlich von dem des Idealfalls von $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$ (rot) unterscheidet. Dieser Verlauf hat im Gegensatz zu den beiden anderen einen Peak bei 1,2, einen stabilen Verlauf und erreicht den Endwert von 1 innerhalb der Simulationszeit. Er verzeichnet keinerlei übermäßiges Nachschwingen und ermöglicht die besten Regelungsergebnisse. Im Gegensatz zu den Verläufen der Regelgrößen haben alle drei Verläufe der Sprungantworten im unteren Graphen von Abb. 4.47 eine gleiche maximale Amplitude von 1,2. Der erste Verlauf der Sprungantworten bis $t = 10s$ ist nahezu identisch.

Erst nach dieser Simulationszeit ändern sich die Verläufe deutlich und das Nachschwingen der grünen und blauen Sprungantworten wird deutlich sichtbar. Dabei verursacht eine zu große Totzeit im Smith-Prädiktor ein wesentlich stärkeres Nachschwingen als eine zu kleine Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell. Beide Sprungantworten haben eine deutliche Verschlechterung der Regelungsergebnisse zur Folge.

Das lässt sich beim Vergleich der blauen und grünen Sprungantwort der Regelgröße mit dem Verlauf des Idealfalls von $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$ (rot) feststellen. Die rote Sprungantwort zeigt kein instabiles oder stark schwingendes Verhalten und ist über den gesamten Simulationszeitraum stabil. Die Ausregelzeit mit $t_{aus} = 29,1s$ ist mit Abstand am besten (grüne Sprungantwort $t_{aus} = 221,17s$, blaue Sprungantwort $t_{aus} = 47s$).

Eine zu große und zu kleine Belegung der Totzeit hat negative Auswirkungen auf das Regelungsergebnis und sollte bei der Implementierung möglichst verhindert werden. Der Idealfall einer exakten Übereinstimmung von T_t ist in der Praxis kaum erreichbar, da es hier auch in mehreren Fällen keine echte Totzeit gibt, sondern nur ein Verhalten, das dem einer Totzeit ähnelt. Bei nicht übereinstimmenden Totzeiten sollte der Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung nicht auf sein Maximum gestellt werden, da das stark nachschwingende Verhalten erst bei hohen Verstärkungen V auftrat. Das erfasste Verhalten liegt bei der verwendeten realen Regelstrecke vor und kann bei anderen Regelstrecken deutlich anders sein. Trotzdem sollte beachtet werden, die Totzeit so genau wie möglich zu ermitteln, damit die Abweichungen innerhalb des Regelkreises so minimal wie möglich gehalten werden können.

Eine Anpassung der Reglerverstärkung wurde bei der Erfassung der Simulationsergebnisse von Abb. 4.45 bis Abb. 4.47 nicht vorgenommen. Die Werte von K_r entsprachen den Werten der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1). Eine Anpassung der Reglerverstärkung ist bei kleinen bis mittleren Einflussgraden der Smith-Prädiktor-Schaltung nicht zwingend notwendig, da keiner der Verläufe weder stark nachschwingt noch instabil wird. Die Regelungsergebnisse werden trotz der Nichteinhaltung der Anpassungsvorschrift (Überschwingweite von 20%) deutlich verbessert. Abb. 4.45 und Abb. 4.46 haben gezeigt, dass der Regler entweder stark oder schwach eingestellt wurde und damit die Anpassungsvorschrift von einer Überschwingweite von 20% nur leicht verfehlt wurde.

Eine Anpassung entsprechend des vorliegenden Szenarios (kleinere oder größere Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell) ermöglichte in beiden Fällen ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$, $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$) das Einhalten einer Überschwingweite von 20% bis mittleren Einflussgrade. Die Amplituden der Sprungantworten der Regelgröße erreichten immer einen Wert von 1,2 bis $V = 95\%$. Ab dieser Verstärkung hatte die Anpassung von K_r nur eine bedingte Verbesserung der Verläufe zur Folge. Das ist anhand der im Folgenden dargestellten Sprungantworten von $T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$, $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$ mit einer Anpassung und Nichtanpassung von K_r zu erkennen.

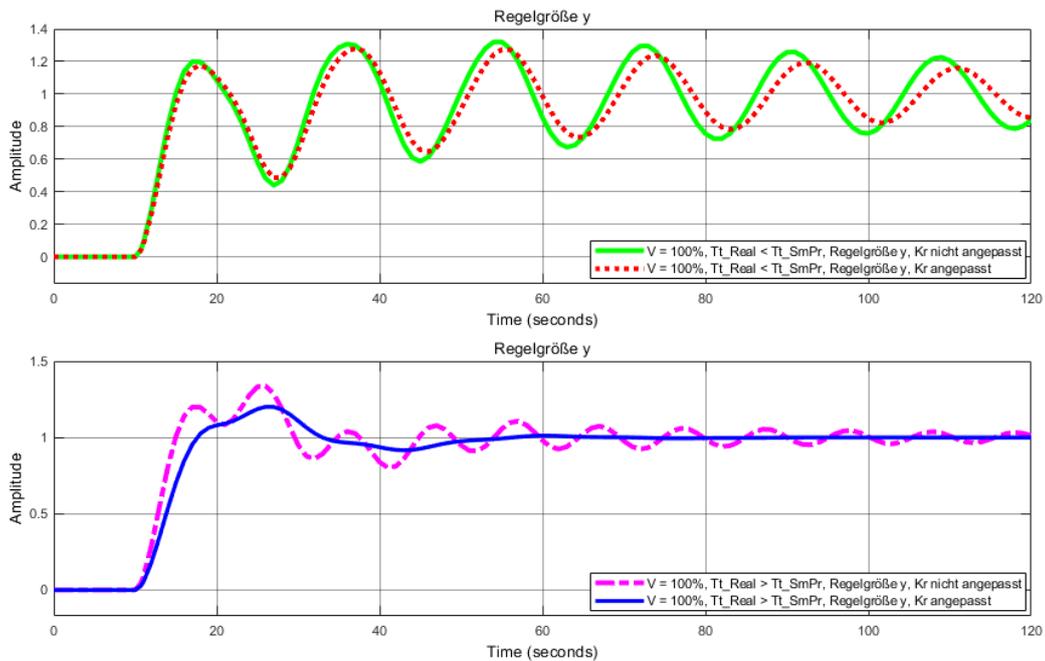


Abb. 4.48: Regelgröße, Totzeitabweichungen

Wenn die Größe K_r der Reglerverstärkung an das vorliegende Szenario angepasst wird, kann der Verlauf der Sprungantwort im Fall $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$ deutlich beeinflusst werden. Im unteren Graphen von Abb. 4.48 ist das zu erkennen. Hier wurde die Totzeit der Regelstrecke zu klein gewählt und eine Totzeit von $T_t = 8s$ statt $T_t = 10s$ in das Smith-Prädiktor-Modell übernommen. Die Folge, ein durch starkes Schwingen geprägtes Verhalten (siehe pinker Verlauf). Die Anpassung der Reglerverstärkung konnte den Verlauf stabilisieren und das Nachschwingen größtenteils kompensieren. Aufgrund der Korrektur der Reglerverstärkung bei $V = 100\%$ von $K_r = 4,81$ auf $K_r = 2,9$ wurde der Verlauf der Sprungantwort stabilisiert.

Die Anpassung ermöglichte aber im Fall von $T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$ bei $V = 100\%$ keine große Verbesserung des Verlaufs der Sprungantwort (siehe oberer Graph aus Abb. 4.48). Der Wert der Reglerverstärkung wurde von $K_r = 4,81$ auf $K_r = 4,3$ korrigiert. Das starke Nachschwingen wurde nur bedingt behoben, die Sprungantwort ist nach wie vor von starkem Schwingen geprägt. In diesem Fall ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$) sollte der Einflussgrad des Prädiktors nicht auf $V \geq 95\%$ gestellt werden, da auch eine Anpassung von K_r das auftretende starke Nachschwingen nicht verhindern kann. Bei hohen Verstärkungen bis $V < 95\%$ verbessern sich die Regelungsergebnisse deutlich, sind aber im Vergleich zum Idealfall wertetechnisch weit entfernt, beispielsweise bei $V = 80\%$ ($T_{t_Real} = T_{t_SmPr} : t_{an} = 17,9s, T_{t_Real} < T_{t_SmPr} : t_{an} = 18,6s, T_{t_Real} > T_{t_SmPr} : t_{an} = 20,2s$).

Die Bedingung einer Überschwingweite von 20% wurde in beiden betrachteten Fällen ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$ $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$) bis zu einer Verstärkung von $V < 95\%$ erreicht. Bei voller Verstärkung konnte die Bedingung nicht eingehalten werden, da das gesamte System deutliches Nachschwingen aufwies, das nicht mit der Korrektur der Reglerverstärkung behoben werden konnte.

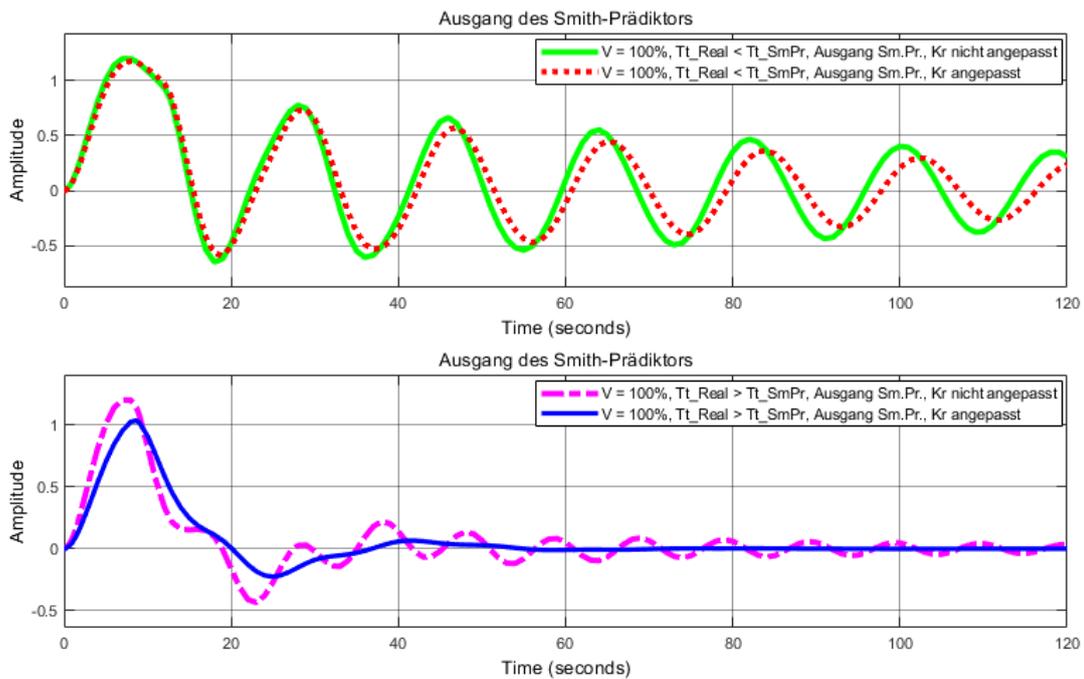


Abb. 4.49: Ausgang Sm.Pr., Totzeitabweichungen

Die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Sprungantworten der Regelgröße aus Abb. 4.48. Auch hier hat die Anpassung der Reglerverstärkung im Fall $T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$ (oberer Graph) nur einen geringen Einfluss auf die Verbesserung der Regelungsergebnisse. Die grüne und rote Sprungantwort haben am Anfang der Simulationszeit einen nahezu identischen schwingenden Verlauf auf, bis sich die rote Sprungantwort von der grünen leicht abhebt und minimal geringeres Schwingen aufweist. Korrigierte und damit angepasste Werte von K_r haben nur einen geringen Einfluss auf die Verbesserung der Regelungsergebnisse. In diesem Fall ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$) sollte das Einstellen des maximalen Einflussgrades der Smith-Prädiktor-Schaltung vermieden werden. Der Grund ist, dass dieses Verhalten erst ab $V \geq 95\%$ auftritt und bei kleineren Verstärkungen die Regelungsergebnisse deutlich besser sind, als die des Regelkreises ohne Smith-Prädiktor.

Im Fall von $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$ hatte die Anpassung von K_r einen großen Effekt auf den Verlauf der Sprungantwort. Das ist im unteren Graphen von Abb. 4.49 zu sehen. Die Regelungsergebnisse wurden genau wie beim Verlauf der Sprungantwort der Regelgröße verbessert und die Sprungantwort stabilisiert. Dabei wird zwar die Amplitude der Sprungantwort verringert und hat im Gegensatz zum Idealfall von $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$ eine geringere Amplitude ($T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$: Amplitude Ausgang Smith-Prädiktor: 1.2, $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$: Amplitude Ausgang Smith-Prädiktor: 1.0), aber der Vorteil des Prädiktors einer höheren Reglerverstärkung kann hier ausgenutzt werden. Die Verläufe sind akzeptabel und weisen keinerlei übermäßiges Nachschwingen mehr auf.

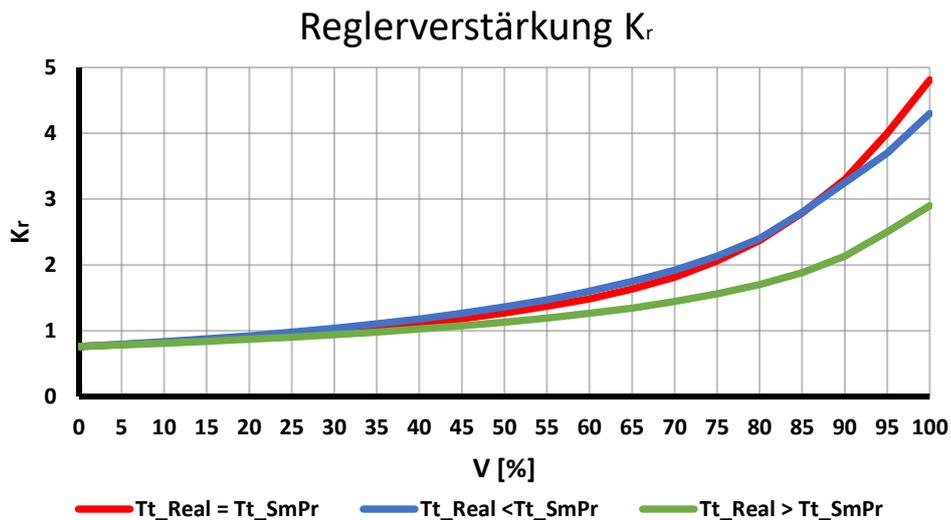


Abb. 4.50: Reglerverstärkungen, unterschiedliche Totzeitabweichungen

In Abb. 4.50 sind die verwendeten Reglerverstärkungen dargestellt. Die rote Linie ($T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$) stellt den Idealfall übereinstimmender Totzeiten dar. Die Werte von K_r (roter Verlauf) wurden für die vorherigen Untersuchungen verwendet, um zu zeigen, welchen Einfluss eine Nichtanpassung der Reglerverstärkung mit Abweichungen bzgl. der implementierten Totzeiten hat. Werden die Werte von K_r entsprechend der vorliegenden Situation angepasst, ergibt sich der blaue ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$) und grüne ($T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$) Verlauf. Die Werte der Reglerverstärkung wurden in 5%-Schritten anhand der Anpassungsvorschrift einer Überschwingweite von 20% experimentell ermittelt.

Wird der rote Verlauf mit den anderen Verläufen verglichen zeigt sich, dass hier die höchsten Reglerverstärkungen verwendet und der Regler am aggressivsten eingestellt werden kann. Weder der blaue noch der grüne Verlauf hat bei hohen Einflussgraden des Smith-Prädiktors höhere Reglerverstärkungen als der rote Verlauf. Im mittleren Verstärkungsbereich ermöglicht die größere Totzeitbelegung im Prädiktor höhere Reglerverstärkungen als $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$, mit dem Nachteil, dass bei voller Verstärkung ein schlechtes Regelungsergebnis aufgrund von starkem Schwingen auftritt.

Eine kleinere Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell benötigt weitaus kleinere Werte von K_r , um eine Überschwingweite von 20% zu erreichen. Aber auch hier ist bei voller Verstärkung starkes Nachschwingen zu verzeichnen. Es wird deutlich, dass ein Abweichen von nur 20% der Totzeiten einen großen Einfluss auf die Belegung der Reglerparameter hat. Die höchsten Reglerverstärkungen ermöglicht der Fall $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$ und erzielt damit die besten Regelungsergebnisse. Dies wird auch bei der Betrachtung der beiden folgenden Abbildungen deutlich. Die folgenden Abb. 4.51 und 4.52 zeigen die Anregel- und Ausregelzeiten mit angepassten Reglerverstärkungen, die wiederum in 5%-Schritten erfasst wurden.

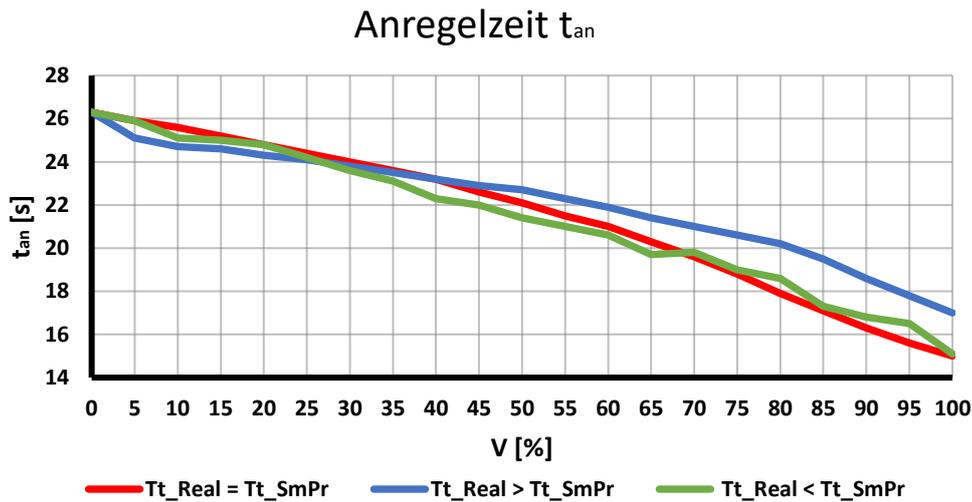


Abb. 4.51: Anregelzeiten, unterschiedliche Totzeitabweichungen

Die Anpassung der Reglerverstärkung kann bei unterschiedlichen Totzeiten in der realen Regelstrecke und im Smith-Prädiktor-Modell bessere Anregelzeiten ermöglichen, als der Idealfall ($T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$). Die kleinere Belegung der Totzeit im Smith-Prädiktor ermöglicht bessere Werte von t_{an} bis $V = 25\%$ als beide anderen Fälle. Im weiteren Verlauf hat die größere Belegung von T_t (grüner Verlauf) bis $V = 65\%$ bessere Anregelzeiten als beide anderen Verläufe. Ab einer Verstärkung von $V > 65\%$ hingegen hat der Idealfall $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$ die besten Werte.

Bei hohen Einflussgraden V des Smith-Prädiktors hat der blaue Verlauf die schlechtesten Ausregelzeiten, gefolgt vom grünen Verlauf, der sich bei $V = 100\%$ nahezu auf dem Niveau des Idealfalls bewegt ($T_{t_Real} = T_{t_SmPr} : t_{an} = 15s, T_{t_Real} < T_{t_SmPr} : t_{an} = 15,1s$). Eine höhere Reglerverstärkung bei identischen Totzeiten bringt nur bei hohen Verstärkungen V bessere Anregelzeiten mit sich. Wenn das vorliegende Prozessmodell exakt erfasst und die Totzeit genau ermittelt wurde, ermöglicht die Übereinstimmung der Totzeiten im Prädiktor-Modell und im Regelstreckenmodell insgesamt die besten Anregelzeiten.

Der große Vorteil von übereinstimmenden Totzeiten ist, dass über das gesamte Verstärkungsspektrum kein stark schwingendes Verhalten auftritt. In den beiden anderen Szenarien ($T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$, $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$) ist das nicht der Fall. Eine Anpassung der Reglerparameter ermöglicht in beiden Szenarien nur bedingt die erwünschten Regelungsergebnisse. Die Amplituden der Regelgröße weisen bei einer Anpassung von K_r eine Überschwingweite von 20% auf, aber bei hohen Verstärkungen verzeichnet das gesamte System ein sehr stark nachschwingendes Verhalten. Eine Anpassung von K_r konnte dieses Verhalten nicht kompensieren. Das zeigt sich auch bei der Betrachtung der Ausregelzeiten, die mit angepassten Reglerverstärkungen aufgenommen wurden.

Ausregelzeit t_{aus}

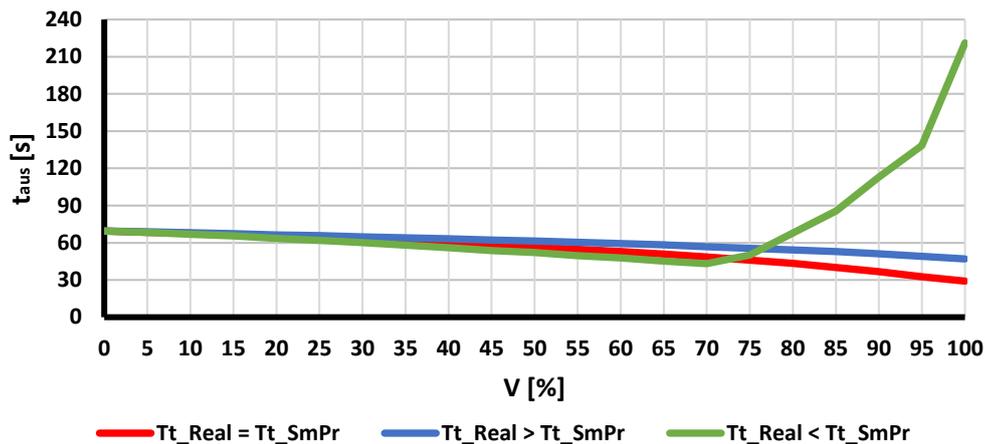


Abb. 4.52: Ausregelzeiten, unterschiedliche Totzeitabweichungen

In Abb. 4.52 ist erkennbar, dass die Ausregelzeiten bei kleinen Verstärkungen nahezu identisch sind und sich erst bei mittleren Verstärkungen des Smith-Prädiktors deutlich voneinander abheben. Dabei hat der Regelkreis mit $T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$ zunächst die besten Ausregelzeiten. Das ändert sich ab einer Verstärkung von $V = 70\%$ schlagartig, die Ausregelzeiten verschlechtern sich plötzlich um ein Vielfaches und erreichen bei $V = 100\%$ einen Höchstwert von $t_{aus} = 221,17s$. Der Grund für diese drastischen Verschlechterungen ist das zunehmende Schwingverhalten des Regelkreises. Das Schwingen nimmt ab $V = 70\%$ immer weiter zu, je höher die Verstärkung wird. Damit verschieben sich auch die Ausregelzeiten immer weiter nach hinten auf der Zeitachse, da der Zielkorridor von $\pm 5\%$ vom Sollwert von 1 laufend verlassen wird. Das lässt sich beim Vergleich der Werte der Ausregelzeiten bei verschiedenen Werten von V feststellen. Bei $V = 80\%$ hat die Ausregelzeit einen Wert von $t_{aus} = 67,9s$, bei $V = 90\%$ $t_{aus} = 112,8s$ und bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ einen Wert von $t_{aus} = 221,17$. Die Dauer des Ausregelvorgangs des Führungsgrößensprungs nimmt mit größer werdenden Verstärkungen deutlich zu.

Im Fall von $T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$ sind die Ausregelzeiten trotz hoher Reglerverstärkungen K_r am schlechtesten. Der Ausregelvorgang dauert hier bei nahezu sämtlichen Verstärkungen V am längsten und hat damit die schlechtesten Regelungsergebnisse. Der Idealfall von $T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$ hingegen hat die besten Ausregelzeiten bei hohen Verstärkungen des Smith-Prädiktors. Da dieser Regelkreis am wenigsten zu Nachschwingen neigt, erzielt er bei den betrachteten Größen überwiegend die besten Regelungsergebnisse. Dieser Regelkreis ist bei sämtlichen Verstärkungseinstellungen stabil und schwingt nicht übermäßig nach.

Im Anlage 5 sind alle ermittelten Werte der Größen K_r , t_{an} und t_{aus} dargestellt. Die Werte von K_r wurden in jeweils eine Lookup-Table implementiert, der Regelkreis simuliert und die dazugehörigen Werte der Anregel- und Ausregelzeiten ermittelt. Abschließend lässt sich feststellen, dass die exakte Kenntnis der Totzeit höhere Reglerverstärkungen, bessere Ausregel- und Anregelzeiten sowie ein insgesamt besseres Regelungsergebnis ermöglicht.

Eine zu große Belegung der Totzeit im Smith-Prädiktor führt zu einem von Schwingen geprägten Verhalten bei hohen Einflussgraden und damit zu einer deutlichen Verschlechterung der Ausregelzeiten. Eine zu kleine Belegung der Totzeit im Prädiktor-Modell führt zu kleineren Reglerverstärkungen und ebenfalls zu schwingendem Verhalten bei hohen Verstärkungen. Der Regelkreis schwingt in diesem Fall weniger nach, aber das starke Nachschwingen ermöglicht trotzdem bei hohen Einflussgraden der Smith-Prädiktor-Schaltung keine akzeptablen Regelgrößensprünge.

4.8.2 Abweichungen der Zeitkonstanten

Neben Totzeitabweichungen zwischen dem Modell der realen Regelstrecke und der im Smith-Prädiktor implementierten Regelstrecke gibt es weitere Formen von Modellabweichungen. Eine weitere Form sind Abweichungen der Zeitkonstanten T_D . Sie sind innerhalb der verwendeten PT_1 -Glieder im Nenner zu finden und haben im Modell der realen Regelstrecke einen Wert von jeweils $T_D = 5s$. Im Folgenden werden Szenarien vorgestellt, in denen die Zeitkonstanten innerhalb des Smith-Prädiktor-Modells abgeändert werden. Dazu wird in beiden PT_1 -Gliedern der Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ die Zeitkonstante T_D um jeweils eine Sekunde nach oben und anschließend nach unten gestellt. Insgesamt wird die Summe der Zeitkonstanten $\sum T_{D_SmPr}$ des Smith-Prädiktor um 20% nach oben bzw. unten verändert, um die Auswirkungen auf den Regelkreis zu untersuchen. Dabei werden die folgenden Szenarien durchlaufen.

- Übereinstimmende Zeitkonstanten ($\sum T_{D_Real} = \sum T_{D_SmPr}$):
Die Summe der Zeitkonstanten $\sum T_{D_Real}$ der realen Regelstrecke $G_s(s)$ stimmt mit der Summe $\sum T_{D_SmPr}$ der Zeitkonstanten der Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ im Smith-Prädiktor überein. Die zwei PT_1 -Glieder von $G_s(s)$ sowie $G'_{SM}(s)$ haben jeweils eine Zeitkonstante von $T_D = 5s$.
- Größere Zeitkonstanten im Smith-Prädiktor-Modell ($\sum T_{D_Real} < \sum T_{D_SmPr}$):
Die Summe der Zeitkonstanten $\sum T_{D_Real}$ der realen Regelstrecke $G_s(s)$ ist kleiner als die Summe der Zeitkonstanten $\sum T_{D_SmPr}$ der Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ im Smith-Prädiktor. Die zwei PT_1 -Glieder von $G_s(s)$ haben jeweils eine Zeitkonstante von $T_D = 5s$ und die zwei PT_1 -Glieder von $G'_{SM}(s)$ jeweils eine Zeitkonstante von $T_D = 6s$.
- Kleinere Zeitkonstanten im Smith-Prädiktor-Modell ($\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$):
Die Summe der Zeitkonstanten $\sum T_{D_Real}$ der realen Regelstrecke $G_s(s)$ ist größer als die Summe der Zeitkonstanten $\sum T_{D_SmPr}$ der Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ im Smith-Prädiktor. Die zwei PT_1 -Glieder von $G_s(s)$ haben jeweils eine Zeitkonstante von $T_D = 5s$ und die zwei PT_1 -Glieder von $G'_{SM}(s)$ jeweils eine Zeitkonstante von $T_D = 4s$.

Es werden nur die Zeitkonstanten im Smith-Prädiktor verändert, weil die reale Regelstrecke einen vorgegebenen Prozess darstellt, der mithilfe des Smith-Prädiktors angenähert und im Idealfall identisch erfasst werden soll.

Die Reglerverstärkung wurde für die folgenden zwei Abb. 4.53 und Abb. 4.54 nicht angepasst. Das bedeutet, dass die im geschlossenen Regelkreis implementierte Lookup-Table die Werte von K_r der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) besitzt. Zunächst werden die Sprungantworten der Regelgröße und vom Ausgang des Smith-Prädiktors der jeweiligen Szenarien aufgezeichnet, erläutert und schlussendlich mit den Sprungantworten mit angepasster Reglerverstärkung K_r verglichen und bewertet.

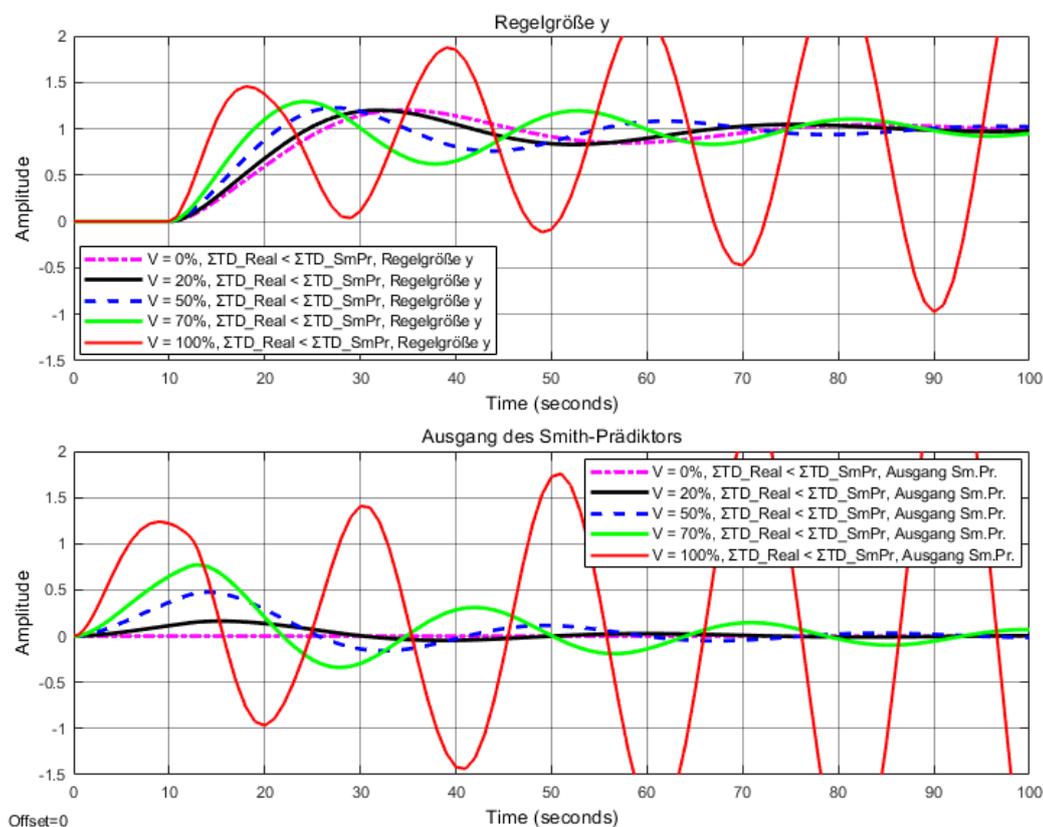


Abb. 4.53: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., größere Zeitkonstante im Prädiktor

In Abb. 4.53 sind die Sprungantworten der Regelgröße und vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung für fünf verschiedene Einflussgrade V des Prädiktors mit größeren Zeitkonstanten von $\sum T_{D_SmPr} = 12s$ im Prädiktor dargestellt. Die Amplitude des Überschwingers nimmt mit steigenden Verstärkungen konstant zu, weil der Regler nicht optimal eingestellt wurde. Die Anpassungsvorschrift einer Überschwingweite von 20% wurde bei sämtlichen Verstärkungen V nicht erreicht. Die implementierte Lookup-Table hat die Werte der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) und damit keine situationsbedingt angepassten optimalen Werte von K_r . Wird die Größe K_r nicht angepasst und liegen Abweichungen der Zeitkonstanten vor, nimmt bei steigender Verstärkung das Schwingen der Sprungantwort zu.

Das ist deutlich ab einer Verstärkung von $V = 50\%$ zu erkennen. Je höher der Einfluss des Smith-Prädiktors wird, desto stärker schwingt das System. Das wird vor allem bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ deutlich, weil sich hier die Sprungantwort immer weiter aufschwingt und der Regelkreis dadurch instabil wird. Eine Anpassung von K_r ist erst bei hohen Verstärkungen V des Smith-Prädiktors notwendig, da bei mittleren und kleinen Verstärkungen V die Sprungantworten stabil sind und einen akzeptablen Verlauf haben.

Die Regelungsergebnisse sind bei geringen Verstärkungen deutlich besser als bei hohen, aber die ermittelten Werte der Anregel- und Ausregelzeiten sind schlechter als die Werte des Regelkreises mit übereinstimmenden Zeitkonstanten (siehe Abb. 4.53).

Bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ ist das gleiche Verhalten beim Ausgang des Smith-Prädiktors zu finden wie beim Regelgrößensprung. Die Sprungantwort ist durch ein starkes Aufschwingen gekennzeichnet, das mit zunehmender Simulationszeit immer stärker wird. Dieses unerwünschte Verhalten destabilisiert den gesamten Regelkreis und führt zu einer Verschlechterung der Regelungsergebnisse. Dies ist bei geringeren Einflüssen des Smith-Prädiktors schwächer ausgeprägt und die Stabilitätsgrenze des Regelkreises wird hier noch nicht überschritten. Die Sprungantworten haben kein instabiles, sondern ein stark nachschwingendes Verhalten ($V = 20\%$ bis $V = 70\%$).

Die Amplituden der Sprungantworten aus Abb. 4.53 nehmen bis $V = 70\%$ stetig zu und der Ausgang des Smith-Prädiktors wird im Laufe der Simulationszeit wieder auf den Wert von 0 zurückgeführt. Dieser Prozess dauert in diesem Fall von $\sum T_{D_Real} < \sum T_{D_SmPr}$ länger, je größer die Verstärkung gewählt wurde. Der Grund ist, dass die Sprungantwort immer mehr Schwingen aufweist, je größer der Wert von V gewählt wurde. Bei einer Nichtanpassung der Reglerverstärkung ergibt sich das in Abb. 4.53 dargestellte Verhalten. Bei einer Nichtanpassung von K_r sollte der Einflussgrad des Prädiktors nicht auf $V = 100\%$ gestellt werden, weil das instabile Verhalten sämtliche Prozesse im Regelkreis äußerst negativ beeinflusst. Der Wert von V sollte laut Abb. 4.53 nur bis maximal $V = 50\%$ gestellt werden, weil ab $V > 50\%$ die Sprungantworten starkes Nachschwingen und bei hohen Verstärkungen instabiles Verhalten aufweisen.

Die Verwendung der Werte von K_r der Verstärkungsform Sprung und ungleichen Zeitkonstanten hat auch im Fall von $\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$ einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis. In der folgenden Abb. 4.54 wurde dieses Szenario dargestellt.

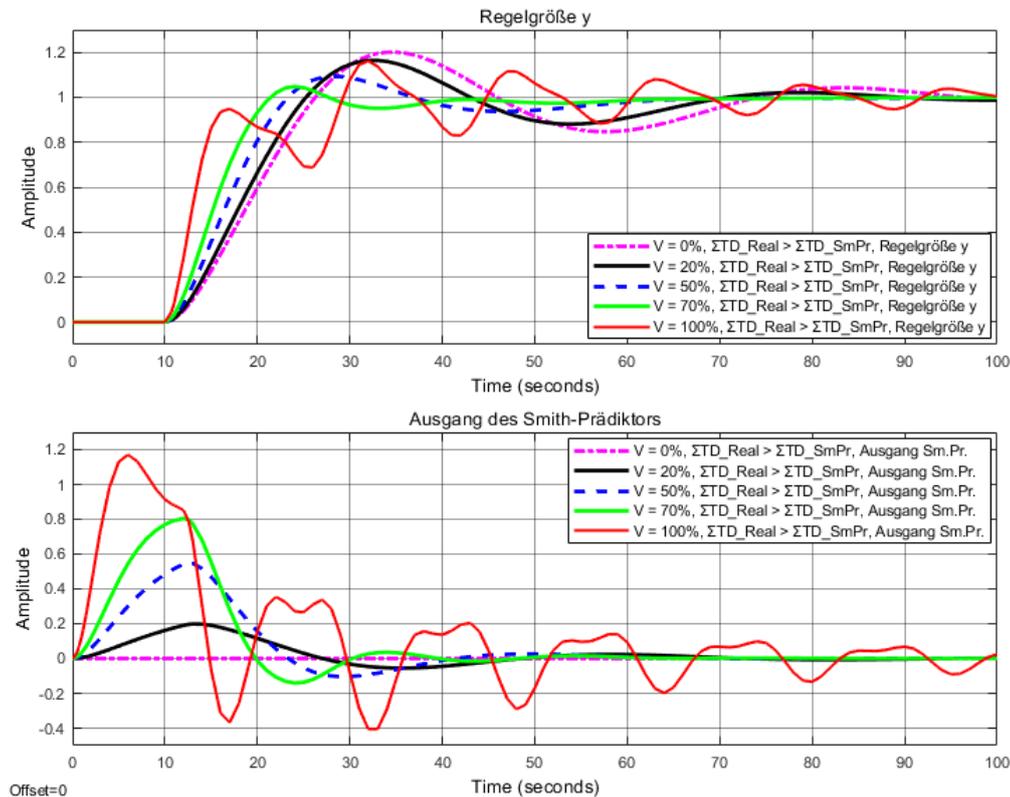


Abb. 4.54: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., kleinere Zeitkonstante im Prädiktor

Die Darstellung der Sprungantworten in Abb. 4.54 zeigt, dass auch hier die Nichtanpassung der Reglerverstärkung und Abweichungen der Zeitkonstanten einen negativen Einfluss auf die Regelungsergebnisse haben. Mit zunehmender Verstärkung nimmt die Amplitude des Ausregelvorgangs des Führungsgrößen­sprungs konstant ab. Die Bedingung einer Überschwingweite von 20% wird hier nur bei ausgeschaltetem Smith-Prädiktor gewährleistet. Der Regler ist für diesen Anwendungsfall zu schwach eingestellt und kann den Maximalwert der Sprungantworten des Regelgrößen­sprungs von 1,2 bei höheren Verstärkungen nicht erreichen. Das schwingende Verhalten nimmt beim Anstieg der Verstärkung bis $V = 70\%$ konstant ab und ermöglicht damit bessere Ausregelzeiten. Auch die Anregelzeiten verbessern sich mit höheren Einflussgraden des Smith-Prädiktors. Werden nur die betrachteten Größen t_{an} und t_{aus} für die Bewertung der Regelungsergebnisse herangezogen, lässt sich festhalten, dass das Regelungsergebnis bis zu einer Verstärkung von $V = 70\%$ immer besser wird.

Das ändert sich aber bei voller Verstärkung von $V = 100\%$. Hier hat die Sprungantwort einen ungewöhnlichen, durch starkes Nachschwingen geprägten Verlauf, der die Ausregelzeit deutlich verschlechtert ($V = 70\%: t_{aus} = 41,1s$, $V = 100\%: t_{aus} = 347,6s$). Die Amplitude von 1,2 wird vom Regelgrößen­sprung zu keinem Zeitpunkt erreicht. Dieser negative Einfluss auf die Regelgröße ist erst ab einer Verstärkung von $V = 85\%$ zu verzeichnen, davor ist der Verlauf der Sprungantwort wesentlich glatter und schwingt weniger.

Das ungewöhnliche Verhalten lässt sich auch bei der Sprungantwort vom Ausgang des Smith-Prädiktors (unterer Graph) bei $V = 100\%$ finden. Die rote Sprungantwort zeigt ein schlechtes Regelungsergebnis und damit einen unakzeptablen Verlauf der Sprungantwort, der von Peaks und Nachschwingen geprägt ist.

Die Folge ist, der Endwert von 0 wird nicht innerhalb der Simulationszeit von $t = 100s$, sondern erst nach über $t > 300s$ erreicht. Je kleiner die Verstärkung wird, desto geringer ist der Einfluss des Prädiktors auf den Regelkreis. Damit nehmen auch die Amplituden der Sprungantworten vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung ab.

Wenn das Szenario $\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$ vorliegt, sollten nur geringe bis mittlere Verstärkungen bis $V < 85\%$ bei nichtangepasster Reglerverstärkung und Zeitkonstantenabweichungen eingestellt werden, da größere Verstärkungen das schwingende Verhalten auslösen und die Abweichungen innerhalb des Regelkreises dadurch größer werden. Eine Anpassung der Reglerparameter ist bis $V = 80\%$ nicht zwingend notwendig, weil alle Sprungantworten stabil sind und einen akzeptablen Verlauf aufweisen. Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass auch eine Anpassung von K_r vor allem bei hohen Verstärkungen den Verlauf der Sprungantworten nicht in allen Szenarien deutlich verbessert. Werden alle drei Szenarien ($\sum T_{D_Real} = \sum T_{D_SmPr}$, $\sum T_{D_Real} < \sum T_{D_SmPr}$, $\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$) anhand einer Verstärkung von $V = 100\%$ und nichtangepassten PI-Reglern verglichen, ergeben sich die folgenden Sprungantworten.

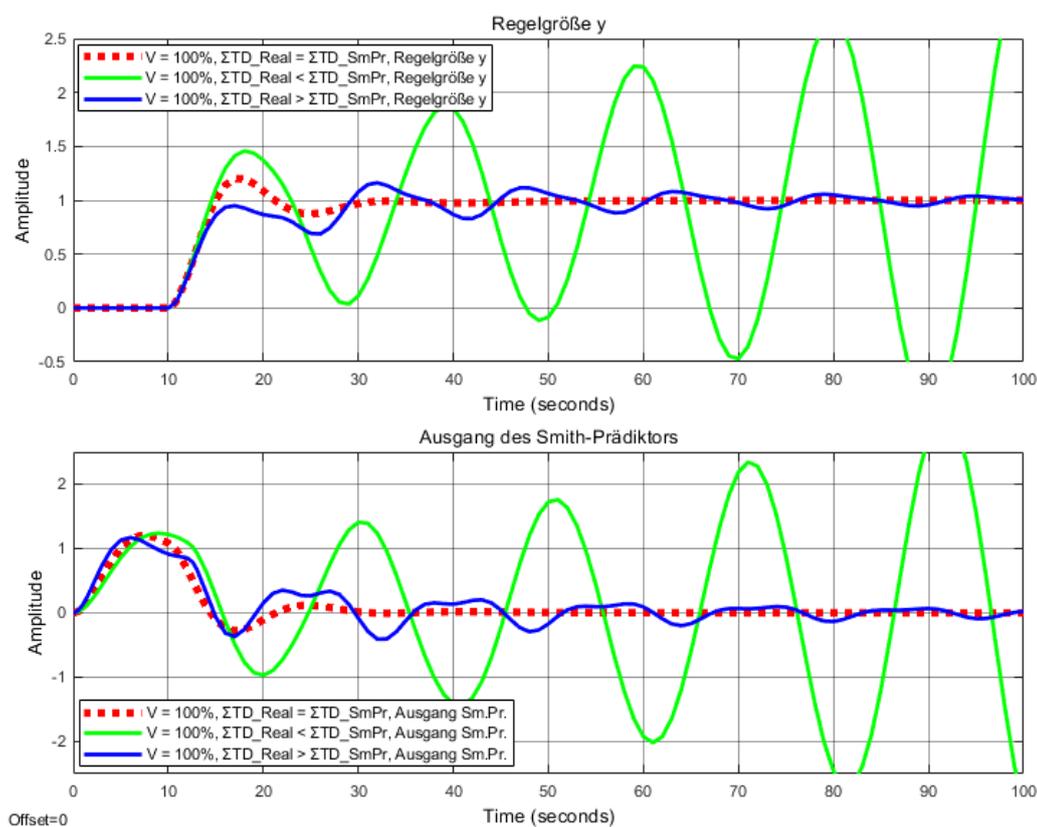


Abb. 4.55: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Zeitkonstanten

Die rote Sprungantwort stellt den Idealfall identischer Zeitkonstanten $\sum T_{D_Real} = \sum T_{D_SmPr}$ im Modell der realen Regelstrecke und im Smith-Prädiktor-Modell dar. Wird die Zeitkonstante im Prädiktor um 20% vergrößert, ist die Rückführung der Smith-Prädiktor-Schaltung aufgrund der größeren Verzögerungszeit zu langsam. Das hat einen deutlichen Einfluss auf das Regelungsergebnis, das anhand der grünen Sprungantwort zu erkennen ist.

Diese größere Belegung der Verzögerungszeit im Smith-Prädiktor im Fall $\sum T_{D_Real} < \sum T_{D_SmPr}$ führt zu instabilem Verhalten des Systems und ist gekennzeichnet durch ein aufschwingendes Verhalten der Sprungantworten. Auch die kleinere Belegung der Zeitkonstante von 20% im Fall $\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$ hat einen deutlich negativen Einfluss auf die Sprungantwort (blau). Hier ist die Rückführung des Smith-Prädiktors zu schnell und hat den blauen ungewöhnlichen Verlauf der Sprungantwort zur Folge. Auch hier ist ein schwingendes Verhalten zu erkennen, das aber im Gegensatz zur grünen Sprungantwort ungleichmäßiger ist. Bei den betrachteten Fällen ($V = 100\%$) der unterschiedlichen Zeitkonstanten ermöglicht eine Regleranpassung in Form der Neubelegung der Werte der Reglerverstärkung nur bedingt Verbesserungen der Sprungantworten.

Der Ausgang des Smith Prädiktors weist große Unterschied zwischen der blauen, grünen und roten Sprungantwort auf. Die rote Sprungantwort mit identischen Zeitkonstanten hat im Vergleich nur minimales Nachschwingen, während der blaue Verlauf nachschwingt und der grüne Verlauf sich im Laufe der Simulationszeit aufschwingt. Der Endwert von 0 wird bei identischen Totzeiten am schnellsten erreicht, die beide anderen Verläufe erreichen den Endwert nicht innerhalb der Simulationszeit von $t = 100s$.

Alle Sprungantworten in Abb. 4.53 bis 4.55 wurden mithilfe von Regelkreisen ohne Regleranpassung aufgenommen. Die Werte der Lookup-Table entsprachen denen der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1). Für die Tabelle mit sämtlichen aufgenommenen Werten siehe Anlage 6. Im Folgenden werden die Regler situationsbedingt mithilfe der Reglerverstärkung angepasst mit der Anforderung, dass der Regelgrößenprung eine Überschwingweite von 20% bei allen Verstärkungen haben soll. Die Anpassung des verwendeten PI-Regler hat aber nur bedingt eine Verbesserung der Regelungsergebnisse zur Folge. Das ist in Abb. 4.56 zu erkennen.

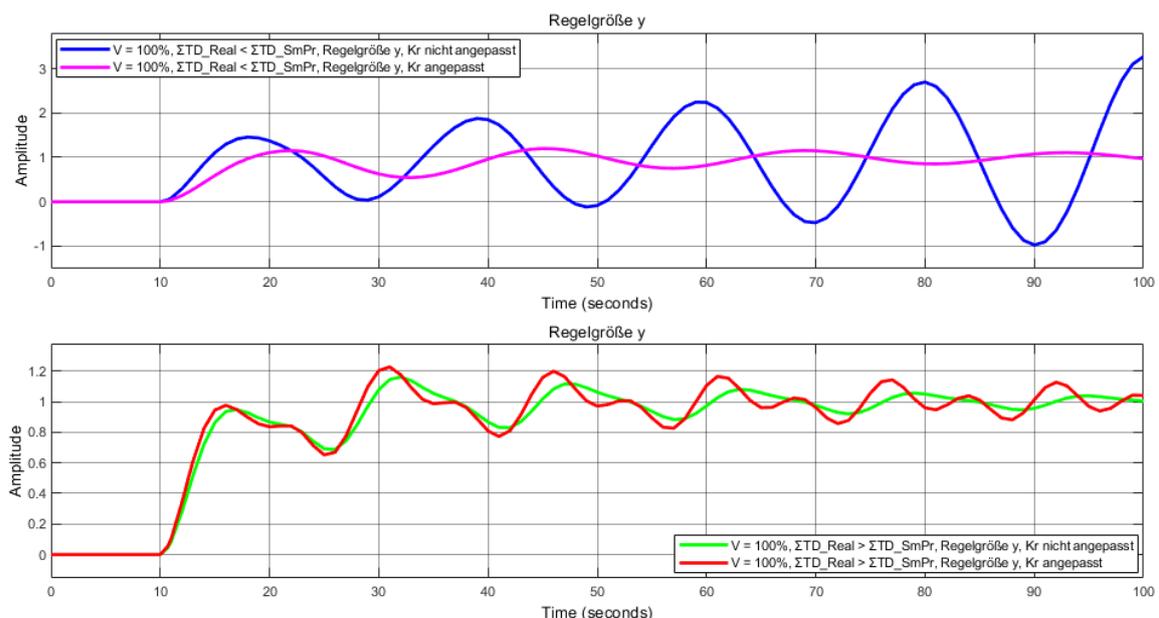


Abb. 4.56: Regelgröße, Abweichungen der Zeitkonstanten

Der Vergleich der Sprungantworten im oberen Graphen zeigt, dass die Anpassung der Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ (blauer Verlauf) auf $K_r = 2,22$ (pinker Verlauf) das zuvor vorhandene instabile Verhalten deutlich minimiert. Die Anpassung von K_r ermöglicht die annähernde Stabilisierung des Systems, das aber trotz nahezu halber Reglerverstärkung immer noch ein deutliches Nachschwingen aufweist. Die Amplitude der Schwingungen nehmen mit zunehmender Zeit ab, die Bedingung einer Überschwingweite von 20% wird hier zwar erfüllt, aber die Anregelzeit verschlechtert sich bei der Anpassung von K_r deutlich. Die Ausregelzeit hingegen verbessert sich von $t_{aus} = n.v.$ auf $t_{aus} = 120,6s$. Das instabile Verhalten ermöglichte keine Ausregelzeit bei $V = 100\%$. Die verbesserte Ausregelzeit von $t_{aus} = 120,6s$ ist aber von der Sprungantwort mit identischen Zeitkonstanten von $t_{aus} = 15s$ weit entfernt. Eine Anpassung von K_r ermöglicht im Fall $\sum T_{D_Real} < \sum T_{D_SmPr}$ eine deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse, aber der gewünschte stabile Verlauf mit möglichst geringem Nachschwingen wird hier nicht erreicht.

Auch die Anpassung von K_r im Fall von $\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$ erzielt nicht das gewünschte Ergebnis. Eine Anpassung der Reglerverstärkung bei $V = 100\%$ von $K_r = 4,81$ auf $K_r = 6$ verschlechtert das Regelungsergebnis sogar. Der Verlauf der Sprungantwort schwingt und zeigt einen ungewöhnlichen Verlauf. In diesem Fall ist ab einer Verstärkung von $V \geq 85\%$ das System kaum mehr regelbar und die Verläufe der Sprungantworten werden mit steigender Verstärkung zunehmend schlechter und schwingen deutlich mehr. Die Abweichungen innerhalb des Regelkreises können nicht durch eine Regleranpassung kompensiert werden. Der Einflussgrad des Smith-Prädiktors sollte auch bei angepassten Reglerverstärkungen nicht über $V \geq 85\%$ gestellt werden, weil das ungewöhnliche Verhalten sowohl bei den Regelkreisen mit als auch ohne Anpassung auftrat.

Die Belegung der Reglerverstärkung von $K_r = 6$ wurde ab $V \geq 85\%$ gewählt, weil eine weitere Korrektur ab $V \geq 85\%$ kaum Einfluss mehr auf das Regelungsergebnis hatte. Der Wert von $K_r = 6$ ermöglichte bei $V = 80\%$ eine akzeptable Sprungantwort mit einer Überschwingweite von maximal 20%. Wurden höhere Einflussgrade V des Smith-Prädiktors gewählt, hatte eine höhere Belegung von K_r nahezu keinen Einfluss mehr auf die Verbesserung der Regelung. Wenn das Regelungsergebnis verbessert werden soll, muss die Verstärkung im Fall $\sum T_{D_Real} > \sum T_{D_SmPr}$ möglichst im mittleren Verstärkungsbereich gehalten werden, damit unerwünschtes Verhalten und große Abweichungen innerhalb des Regelkreises vermieden werden können.

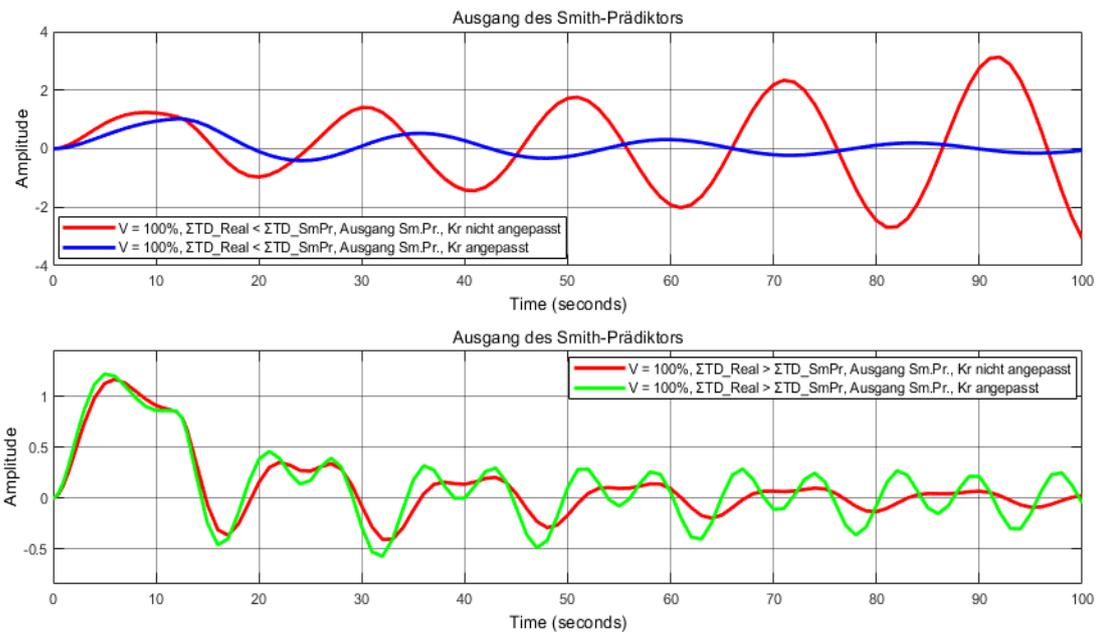


Abb. 4.57: Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Zeitkonstanten

Auch der Ausgang des Smith-Prädiktors verzeichnet eine Verschlechterung des Verlaufs der Sprungantwort im unteren Teil von Abb. 4.57. Die Erhöhung der Reglerverstärkung bewirkt keine Verbesserung, sondern das Gegenteil. Die grüne Sprungantwort weist wesentlich stärkeres Schwingverhalten auf, als die Sprungantwort mit einer Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ (rot). Der ungewöhnliche grüne Verlauf der Sprungantworten im unteren Teil der oberen Abbildung ist ebenfalls bei der Betrachtung der Regelgröße bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ in Abb. 4.57 zu finden (rote Sprungantwort).

Im Fall einer größeren Zeitkonstante im Smith-Prädiktor ist wie in Abb. 4.56 eine deutliche Verbesserung der Sprungantwort erkennbar, wenn die Reglerverstärkung situationsbedingt angepasst wird (oberer Graph aus Abb. 4.57). Der zunächst instabile Verlauf der roten Sprungantwort (oberer Graph aus Abb. 4.57) wird bei einer Korrektur von $K_r = 4,81$ auf $K_r = 2,22$ verbessert. Hier ist zwar wie bei der Sprungantwort der Regelgröße ein deutliches Nachschwingen erkennbar, das mit zunehmender Simulationszeit abnimmt, aber der blaue Verlauf ist viel stabiler als der rote Verlauf. Es lässt sich feststellen, dass die volle Verstärkung von $V = 100\%$ ohne Anpassung der Reglerparameter einen deutlich negativen Effekt auf die Regelungsergebnisse hat. Eine Anpassung von K_r hat aber nur im Fall von $\Sigma T_{D_Real} < \Sigma T_{D_SmPr}$ einen positiven Effekt, bei $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ hingegen führt eine höhere Reglerverstärkung zu einer Verschlechterung der Ergebnisse.

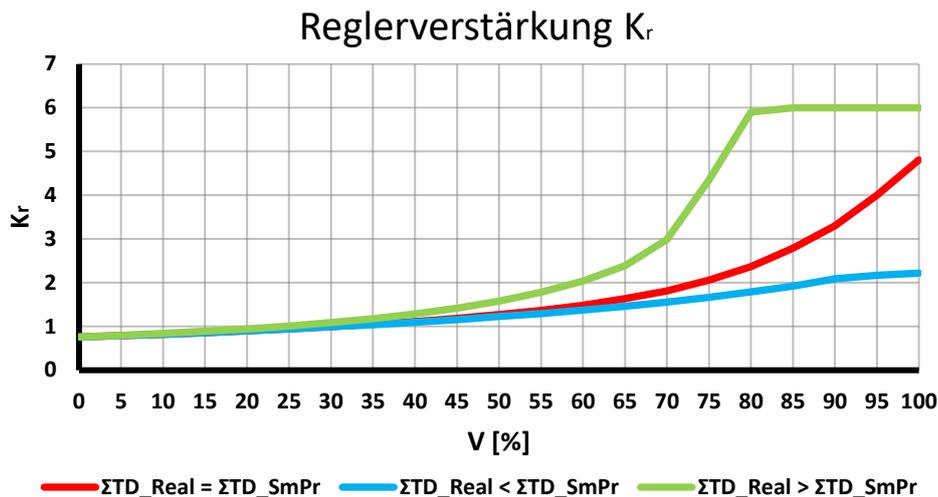


Abb. 4.58: Reglerverstärkungen, Abweichungen der Zeitkonstanten

In Abb. 4.58 sind die Verläufe der in 5%-Schritten ermittelten Werte von K_r dargestellt. Dabei wurde der verwendete PI-Regler anhand der Reglerverstärkung eingestellt. Es sollte eine Überschwingweite von 20% des Regelgrößensprungs bei allen in 5%-Schritten ermittelten Reglerverstärkungen erreicht werden, was aber nur bedingt möglich war.

Die Anpassung von K_r im Fall $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ (grüner Verlauf) erzielt nicht das gewünschte Ergebnis. Eine Anpassung ab einer Verstärkung von $V \geq 85\%$ war nicht mehr sinnvoll, weil das System kaum mehr regelbar war und die Verläufe der Sprungantworten zunehmend stärkeres Nachschwingen aufwiesen. Die Abweichungen innerhalb des Regelkreises konnten nicht durch eine Regleranpassung kompensiert werden. Der Einflussgrad des Smith-Prädiktors sollte im Fall $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ nicht über $V \geq 85\%$ gestellt werden, weil ab dieser Verstärkung das in Abb. 4.56 und 4.57 dargestellte Verhalten auftrat. Deswegen wurde die Reglerverstärkung ab $V \geq 85\%$ nicht mehr angepasst, weil die Anpassung kaum Einfluss auf die Verbesserung der Sprungantworten hatte. Insgesamt ist die höchste Belegung von K_r bei einer geringeren Zeitkonstante im Smith-Prädiktor-Modell möglich. Ab $V \geq 85\%$ hingegen sind die hohen Reglerverstärkungen aufgrund des starken Schwingens nahezu einflusslos.

Im Fall von $\Sigma T_{D_Real} < \Sigma T_{D_SmPr}$ konnten nur kleine Werte von K_r verwendet werden, um die Anpassungsvorschrift zu erfüllen. Aber auch hier weist der Regelkreis ein starkes Nachschwingen bei hohen Verstärkungen auf und weicht wie das Szenario von $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ stark vom Idealfall $\Sigma T_{D_Real} = \Sigma T_{D_SmPr}$ ab.

Die Sprungantwort der Regelgröße und vom Ausgang des Smith-Prädiktors schwingt immer mehr, je höher die Verstärkung eingestellt wurde. Die Anpassung der Reglerverstärkung minimiert das negative Verhalten nur bedingt und erzielt nicht die erhofften Ergebnisse. Das Anstreben des Idealfalls von $\Sigma T_{D_Real} = \Sigma T_{D_SmPr}$ ermöglicht die stabilsten Sprungantworten und damit die besten Regelungsergebnisse. Das ist auch in der folgenden Abbildung erkennbar.

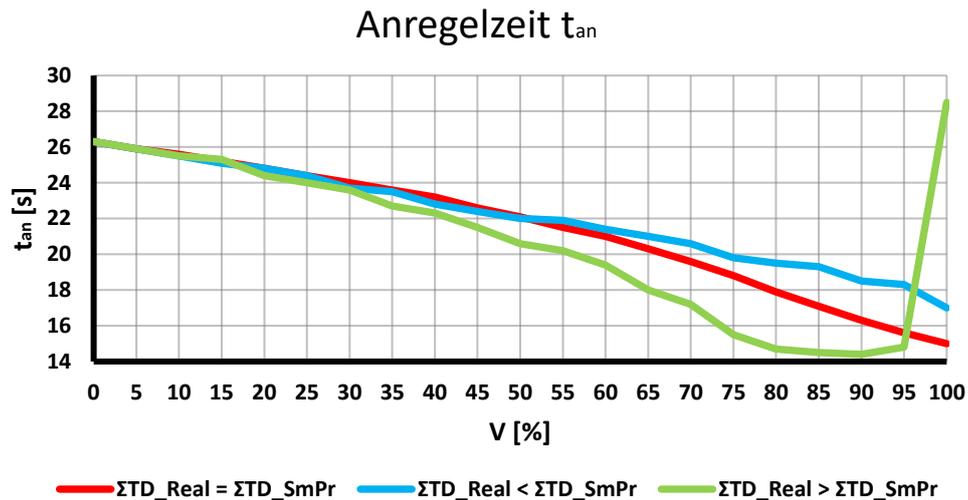


Abb. 4.59: Anregelzeiten, Abweichungen der Zeitkonstanten

Die Anregel- (Abb. 4,59) sowie Ausregelzeiten (Abb. 4.60) wurden mit den Regelkreisen mit angepassten Reglerverstärkungen aufgenommen. Es wurden wiederum alle drei Szenarien simuliert und die Werte erfasst.

Bei der Betrachtung der Anregelzeiten wird deutlich, dass kleinere Zeitkonstanten im Smith-Prädiktor (grüner Verlauf) zu kleineren Werten von t_{an} führen. Hier ist die Rückführung der Smith-Prädiktor-Schaltung aufgrund der kleineren Verzögerungszeit schneller als in den beiden anderen Fällen. Die Anregelzeit nimmt aber schlagartig beim Übergang von $V = 95\%$ auf $V = 100\%$ zu. Hier steigt der Wert aufgrund des von Schwingen gekennzeichneten Systems von $t_{an} = 14,8s$ auf $t_{an} = 28,5s$.

Der rote Verlauf des Idealfalls $\Sigma T_{D_Real} = \Sigma T_{D_SmPr}$ ist bei höher werdenden Verstärkungen konstant fallend und ermöglicht somit eine deutliche Verbesserung der Anregelzeiten, je höher die eingestellte Verstärkung gewählt wird. Bei kleinen Einflussgraden V ist zu erkennen, dass bei niedrigen Verstärkungen von $V = 0\%$ bis $V = 45\%$ auch eine größere Zeitkonstante im Smith-Prädiktor zu kürzeren Anregelzeiten führt. Dies ändert sich aber ab einer Verstärkung von $V \geq 50\%$, wo die Anregelzeiten der blauen Kurve im Vergleich zu den beiden anderen Verläufen die höchsten Werte bis $V = 95\%$ zeigt.

Wird ausschließlich die Anregelzeit betrachtet, ermöglichen beide Szenarien $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ und $\Sigma T_{D_Real} < \Sigma T_{D_SmPr}$ bis $V = 50\%$ bessere Anregelzeiten als eine identische Belegung der Zeitkonstanten. Erst bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ hat der Regelkreis mit identischen Zeitkonstanten die beste Anregelzeit. Der Nachteil der beiden Regelkreise mit einer Modellabweichung in Form einer zu großen oder zu kleinen Belegung der Zeitkonstanten ist das immer stärker werdende Nachschwingen, was zu schlechteren Ausregelzeiten führt. Dieses Nachschwingen lässt sich anhand der Ausregezeiten der Regelkreise aufzeigen.

Ausregelzeit t_{aus}

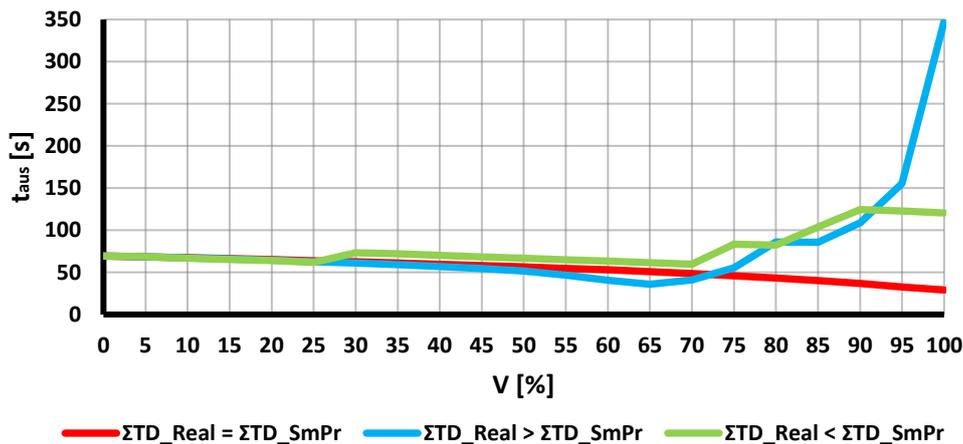


Abb. 4.60: Ausregelzeiten, Abweichungen der Zeitkonstanten

Die Ausregelzeiten werden im Fall größerer Zeitkonstanten im Smith-Prädiktor-Modell (grüner Verlauf) zunehmend schlechter, je höher die Verstärkung über $V \geq 70\%$ gestellt wird. Wegen des zunehmenden Schwingens verschiebt sich der Zeitpunkt, wo die Sprungantwort den Zielkorridor von $\pm 5\%$ vom Sollwert nicht mehr verlässt immer weiter nach rechts auf der Zeitachse. Damit verschlechtern sich die Werte von t_{aus} . Das schwingende Verhalten nimmt mit hohen Verstärkungen zu und konnte nicht durch eine Anpassung von K_r behoben werden. Die Abweichungen innerhalb des Regelkreises verursachen das Schwingen und können effektiv nur durch eine Korrektur der Werte der Zeitkonstanten verringert werden.

Im Fall von $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ sind die Ausregelzeiten zunächst besser als die beide anderen Verläufe. Das ändert sich deutlich ab einer Verstärkung von $V \geq 70\%$. Ab diesem Wert steigen die Ausregelzeiten stark an und erreichen bei $V = 100\%$ einen Höchstwert von $t_{aus} = 347,6s$. Damit dauert es $t = 318,5s$ länger, damit der Zielkorridor nicht mehr verlassen wird, als das beim Regelkreis mit identischen Zeitkonstanten ($t_{aus} = 29,1s$) der Fall ist.

Der Grund hierfür liegt wiederum beim sehr stark ausgeprägten Nachschwingen. Nur im Fall von identischen Zeitkonstanten ist eine kontinuierliche Verbesserung der Ausregelzeit feststellbar. Die Sprungantworten sind in diesem Fall über das gesamte Verstärkungsspektrum stabil und verzeichnen keinerlei starkes Nachschwingen.

Wenn die bestmöglichen Regelungsergebnisse erzielt werden sollen, ist die Annäherung des Idealfalls von $\Sigma T_{D_Real} = \Sigma T_{D_SmPr}$ erstrebenswert. Die Voraussetzung dafür ist, dass ein „gutes“ Modell der realen Prozessstrecke vorliegt, dass ein Smith-Prädiktor problemlos und ohne unerwünschte Nebeneffekte eingesetzt werden kann. Modellabweichungen zwischen der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell führen zu stark schwingendem und teilweise zu instabilem Verhalten.

Die betrachteten Größen werden bei Modellabweichungen negativ beeinflusst, was auch die Tabelle in Anlage 6 zeigt. Es wurden alle ermittelten Werte von K_r , t_{an} und t_{aus} für die drei Szenarien $\Sigma T_{D_Real} = \Sigma T_{D_SmPr}$, $\Sigma T_{D_Real} < \Sigma T_{D_SmPr}$ und $\Sigma T_{D_Real} > \Sigma T_{D_SmPr}$ aufgelistet. Diese Werte waren die Grundlage für das Erstellen von Abb. 4.58 bis Abb. 4.60.

Es ist erkennbar, dass der Idealfall $\sum T_{D_Real} = \sum T_{D_SmPr}$ die besten Regelungsergebnisse ermöglicht. Modellabweichungen führen zu einer Verschlechterung der betrachteten Größen. Das kann durch eine möglichst genaue Kenntnis der vorliegenden Prozessstrecke verhindert werden.

Neben Totzeitabweichungen und unterschiedlichen Zeitkonstanten gibt es weitere Formen von Modellabweichungen. Im folgenden Abschnitt 4.8.3 wird untersucht, was Regelstreckenabweichungen für Folgen auf den Regelkreis haben. Es wird die Ordnung der Regelstrecke im Smith-Prädiktor verändert und die Einflüsse auf den Regelkreis anhand von Sprungantworten untersucht und anschließend bewertet.

4.8.3 Abweichungen der Regelstreckenmodelle

Die in diesem Abschnitt betrachtete Form der Modellabweichungen zwischen der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell sind Abweichungen der Ordnung der Regelstrecken selbst. Der vorliegende Prozess wurde anhand von zwei PT_1 -Glieder mit jeweils einer Zeitkonstante von $T_D = 5s$ beschrieben. Bei einer ungenauen Erfassung der vorliegenden Strecke können deutliche Abweichungen innerhalb des geschlossenen Regelkreises entstehen. Es wurde das vorhandene Modell des Regelkreises verändert, indem die Strecke $G'_{SM}(s)$ abgeändert wurde. Das ist in der folgenden Abb. 4.61 im Smith-Prädiktor-Modell (Modell der Regelstrecke ohne T_t) zu erkennen.

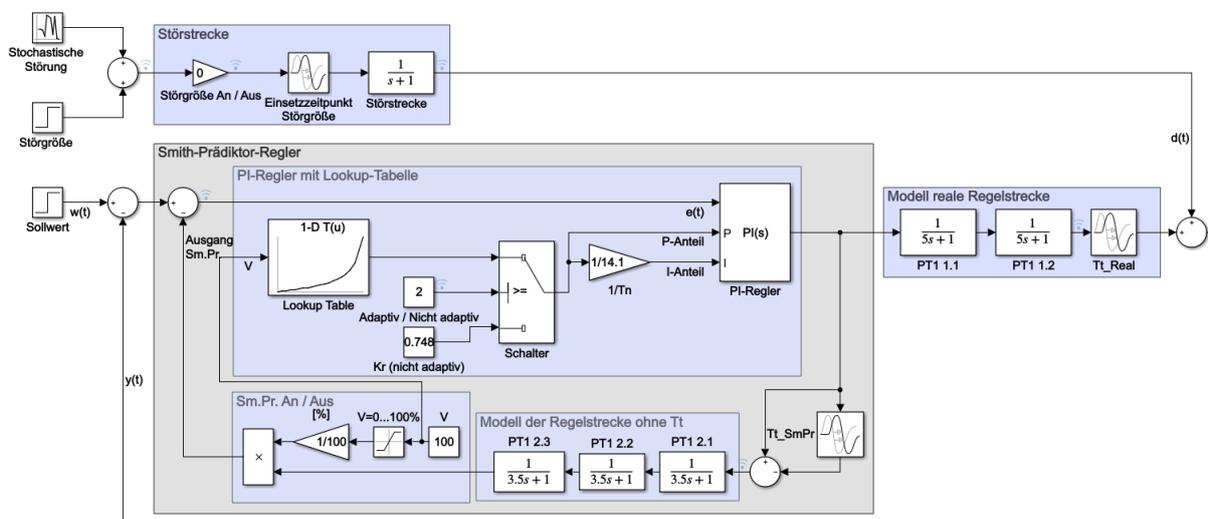


Abb. 4.61: Regelkreis mit Sm.Pr. und Abweichungen der Regelstreckenmodelle

Innerhalb des Regelkreises wurde die Regelstrecke im Smith-Prädiktor-Modell $G'_{SM}(s)$ neu aufgestellt. Es wurde angenommen, dass die vorliegende reale Regelstrecke nicht aus zwei, sondern aus drei PT_1 -Gliedern besteht. Dabei hat jedes dieser drei Verzögerungsglieder 1. Ordnung eine Zeitkonstante von $T_D = 3,5s$. Die Übertragungsfunktion $G_s(s)$ beschreibt das Modell der realen Regelstrecke und lässt sich anhand der folgenden Übertragungsfunktion beschreiben.

$$G_S(s) = G'_S(s) \cdot e^{-sT_t} \quad (4.8)$$

Gleichung (4.8) kombiniert die vorliegende Regelstrecke mit der dazugehörigen Totzeit. Wird allein die Übertragungsfunktion der realen Regelstrecke $G'_S(s)$ betrachtet, ergibt sich die folgende Gleichung.

$$G'_S(s) = \left(\frac{K_1}{(T_{D1} \cdot s + T_{s1})} \cdot \frac{K_2}{(T_{D2} \cdot s + T_{s2})} \right) \quad (4.9)$$

Werden die Größen der Verstärkung und der Zeitkonstanten in die Gleichung eingesetzt, ergibt sich das vorliegende Modell der Regelstrecke $G'_S(s)$.

$$G'_S(s) = \left(\frac{1}{(5s + 1)} \cdot \frac{1}{(5s + 1)} \right) \quad (4.10)$$

Wird die Übertragungsfunktion (4.8) der realen Regelstrecke mit Totzeit aufgestellt, folgt die Gleichung (4.11).

$$G_S(s) = \left(\frac{1}{(5s + 1)} \cdot \frac{1}{(5s + 1)} \right) \cdot e^{-10s} \quad (4.11)$$

Die Übertragungsfunktion des Smith-Prädiktor-Modells mit interner Rückführung lautet:

$$G_{SP,rück}(s) = G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_{tM}}) \quad (4.12)$$

Dabei ist $G'_{SM}(s)$ das Modell der totzeitfreien Regelstrecke und $e^{-sT_{tM}}$ das Modell der Totzeit. Es wurde das Modell der totzeitfreien Regelstrecke $G'_S(s)$ ungenau erfasst, aber die Totzeit wurde richtig eingeschätzt. Die Totzeiten der realen Regelstrecke und im Smith-Prädiktor-Modell stimmen überein und haben jeweils einen Wert von $T_t = 10s$. Nur die totzeitfreie Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ unterscheidet sich von der realen Regelstrecke $G(s)$. In der nachfolgenden Gleichung (4.13) wurde das „falsch“ erfasste Modell der totzeitfreien Regelstrecke aufgeführt.

$$G'_{SM}(s) = \left(\frac{K_1}{(T_{D1} \cdot s + T_{s1})} \cdot \frac{K_2}{(T_{D2} \cdot s + T_{s2})} \cdot \frac{K_3}{(T_{D3} \cdot s + T_{s3})} \right) \quad (4.13)$$

Werden die jeweiligen Verstärkungen und Zeitkonstanten eingesetzt, ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion:

$$G'_{SM}(s) = \left(\frac{1}{(3,5s + 1)} \cdot \frac{1}{(3,5s + 1)} \cdot \frac{1}{(3,5s + 1)} \right) \quad (4.14)$$

Die Übertragungsfunktion des Smith-Prädiktor-Modells mit interner Rückführung lautet dann:

$$G_{SP,rück}(s) = \left(\frac{1}{(3,5s + 1)} \cdot \frac{1}{(3,5s + 1)} \cdot \frac{1}{(3,5s + 1)} \right) \cdot (1 - e^{-10s}) \quad (4.15)$$

Die Zeitkonstanten wurden hier mit einem Wert von jeweils $T_D = 3,5s$ gewählt, damit der Verlauf des Systems annäherungsweise dem Verlauf der vorliegenden realen Regelstrecke $G'_S(s)$ entspricht. Die Modellabweichungen sind hier nicht nur die Summe der Zeitkonstanten der jeweiligen Regelstrecken, sondern auch die Ordnung der Regelstrecken selbst. Werden die beiden PT_1 -Glieder von $G'_S(s)$ zusammengefasst ergibt sich ein System 2. Ordnung. Die „falsch“ implementierte Regelstrecke $G'_{SM}(s)$ hat ein System 3. Ordnung. Beide Systeme haben unterschiedliche Zeitkonstanten und andere Verläufe der Sprungantworten. In der folgenden Abb. 4.62 ist das zu erkennen.

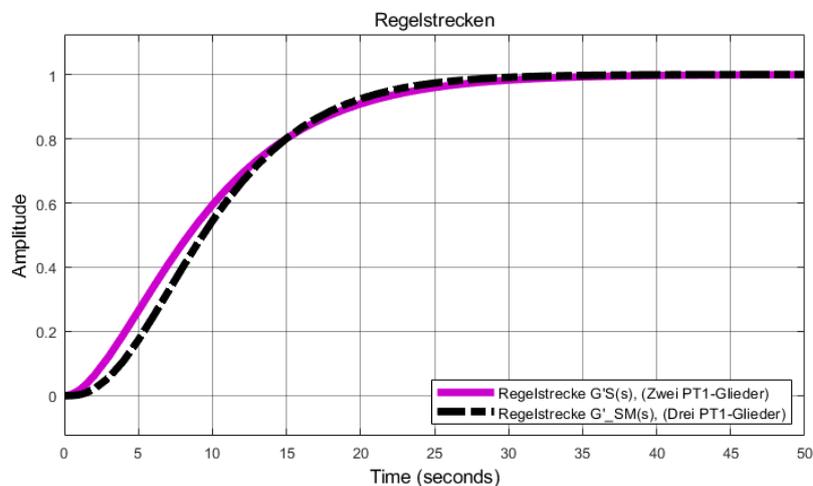


Abb. 4.62: Regelgröße, unterschiedliche Regelstreckenmodelle

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Verläufen erkennbar. Das System 3. Ordnung (schwarz) hat einen anfangs wegen der größeren Verzögerungszeit einen langsameren Verlauf als das System 2. Ordnung (lila). Ab einer Simulationszeit von $t = 17s$ werden die Unterschiede kleiner und beide Sprungantworten erreichen schlussendlich den Sollwert von 1. Die Summe der jeweiligen Zeitkonstanten unterscheiden sich nur minimal ($G'_S(s) : \sum T_{DG}(s) = 10s, G'_{SM}(s) : \sum T_{DG,SM}(s) = 10,5s$). Trotz dieser geringfügigen Differenz sind die Verläufe der beiden Regelstrecken unterschiedlich. Die vorhandene Regelstrecke in Form von zwei PT_1 -Gliedern ist von vornherein ein schwierig regelbares System. Wird ein weiteres Verzögerungsglied 1. Ordnung hinzugegeben und damit die Ordnung der Regelstrecke um Eins erhöht, erhöht sich die Schwierigkeit der Regelung. Eine Regelstrecke 3. Ordnung ist schwieriger zu regeln als Regelstrecken kleinerer Ordnung. Die „einfachste“ zu regelnde Regelstrecke ist die in Form eines PT_1 -Gliedes. Je höher die Ordnung der zu regelnden Strecke ist, desto schwieriger wird der Regelvorgang. Die unterschiedlichen Ordnungen und die damit auftretende Modellabweichung zwischen dem Modell der realen Regelstrecke und dem Modell des Smith-Prädiktors führen einerseits zu mathematischen Abweichungen und andererseits zu instabilem Verhalten. Das ist in der folgenden Abbildung zu erkennen.

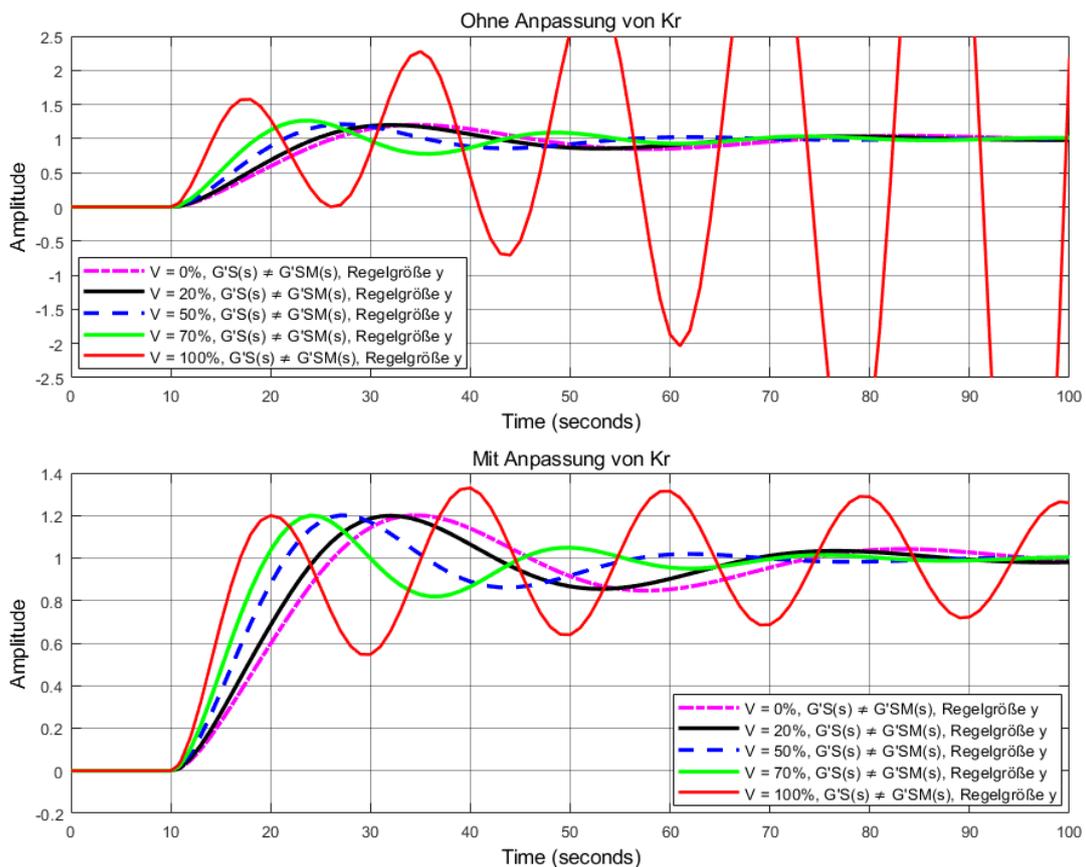


Abb. 4.63: Regelgröße, Abweichungen der Regelstrecken

Werden die Sprungantworten der Regelgröße bei unterschiedlichen Verstärkungen V und nichtangepassten Reglerverstärkungen betrachtet, fällt auf, dass bereits ab $V = 70\%$ ein stark schwingendes Verhalten auftritt. Es geht bei größeren Verstärkungen in ein instabiles, sich aufschwingendes Verhalten über. Werden die Reglerparameter nicht angepasst und in diesem Fall eine Reglerverstärkung von $K_r = 4,81$ verwendet ($V = 100\%$), schwingt sich das System immer weiter auf, je mehr Simulationszeit vergeht. Nichtanpassung bedeutet, dass die Werte der Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) verwendet wurden. Trotz der Nichtanpassung haben die Regelgrößensprünge bis $V = 50\%$ einen akzeptablen Verlauf und erfüllen die Anpassungsvorschrift (Überschwingweite von 20%) trotz Modellabweichungen. Bei voller Verstärkung hingegen wird der Regelkreis instabil und schwingt sich auf. Dieses Verhalten kann auch nicht vollständig mit einer Anpassung der Reglerparameter behoben werden. Im unteren Graphen schwingt sich die rote Sprungantwort ($V = 100\%$) nicht mehr auf, sie verzeichnet „nur“ ein sehr starkes Nachschwingen.

Der Regelkreis ist zwar stabil, aber das System schwingt sehr stark nach. Auch bei $V = 70\%$ konnte die Korrektur von K_r das schwingende Verhalten nicht kompensieren. Die Abweichungen zwischen der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell sind bei hohen Einflussgraden des Prädiktors so groß, dass die Regelungsergebnisse nicht akzeptabel sind. Die Anpassung von K_r stabilisiert den Regelkreis, aber die Sprungantworten haben bei hohen Verstärkungen trotzdem keinen akzeptablen Verlauf.

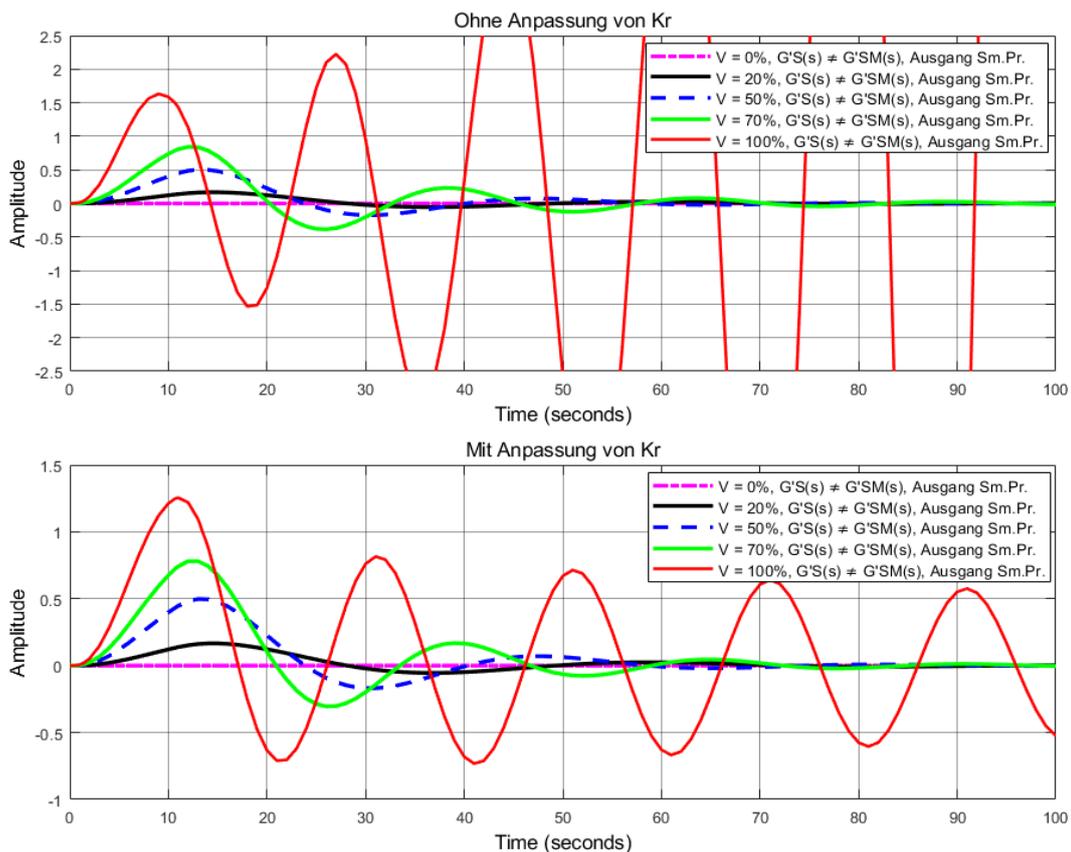


Abb. 4.64: Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Regelstrecken

Das vorher genannte instabile und sich aufschwingende Verhalten ist auch anhand der Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors zu sehen. Dieses tritt wie bei den Sprungantworten der Regelgröße bei einer Verstärkung von $V = 100\%$ auf. Die rote Sprungantwort schwingt sich im oberen Graphen von Abb. 4.64 immer stärker auf, je mehr Simulationszeit vergeht. Die Stabilitätsgrenze des Regelkreises wird in diesem Fall überschritten und hat schlechte Regelungsergebnisse zur Folge. Die Anpassung hat wie beim Regelgrößensprung nur eine bedingte Verbesserung zur Folge. Die rote Sprungantwort im unteren Graphen zeigt kein instabiles, sondern ein sehr stark nachschwingendes Verhalten. Die Stabilitätsgrenze des Regelkreises wird in diesem Fall von $V = 100\%$ im unteren Graphen nicht überschritten, aber die Sprungantwort hat dennoch einen nicht akzeptablen Verlauf.

Die vorliegenden Modellabweichungen zwischen der verwendeten Prozessstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell verursachen große Abweichungen innerhalb des geschlossenen Regelkreises. Der Einflussgrad des Smith-Prädiktors sollte hier nicht über $V = 50\%$ gestellt werden, weil ab dieser Verstärkung die Sprungantworten deutlich schlechter werden.

Unter $V = 50\%$ wurden die Sprungantworten sowie die Anregel- und Ausregelzeiten verbessert, wenn die Verläufe der Sprungantworten und die betrachteten Größen mit einem Regelkreis ohne Smith-Prädiktor verglichen werden. Um die bestmöglichen Regelungsergebnisse zu erzielen, ist eine möglichst genaue Kenntnis der vorliegenden Regelstrecke Grundvoraussetzung.

Die größte Schwachstelle des Smith-Prädiktors sind Modellabweichungen. Dies zeigt sich vor allem anhand der Simulationsergebnisse dieses Abschnittes. Wird die Ordnung der vorliegenden Regelstrecke „falsch“ erfasst, hat dies einen sehr negativen Einfluss auf den Regelkreis.

Deshalb ist es sehr wichtig, die vorliegende Regelstrecke so genau wie möglich zu erfassen, damit die besten Regelungsergebnisse erzielt werden können. Dabei hat eine Anpassung nicht immer den gewünschten Effekt, wie auch die nachfolgende Tabelle zeigt.

Tab. 4.11: Werte des Regelkreises mit unterschiedlichen Regelstreckenmodellen

V [%]	Ohne Anpassung von K_r			Mit Anpassung von K_r		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5
20	0,9	24,5	64,1	0,9	23,8	64
50	1,27	21,3	52,3	1,245	20,9	52,2
70	1,815	18,3	64,5	1,63	18,8	64,6
100	4,81	15,1	n.v.	2,5	16,1	194,9

Eine Anpassung der Reglerverstärkung K_r ermöglicht zwar bessere und stabilere Verläufe der Sprungantworten, aber nicht unbedingt bessere Werte der betrachteten Größen. Die Anregelzeit verschlechtert sich bei einer Anpassung ab $V = 70\%$ von K_r , da hier die Werte der Reglerverstärkung deutlich kleiner sind als die ohne Anpassung. Der Verlauf der Regelgröße wird zwar stabiler, aber die An- und Ausregelzeiten länger. Bei voller Verstärkung hingegen ermöglicht die Anpassung von K_r eine Ausregelzeit. Das war ohne Anpassung nicht möglich, weil das System ein aufschwingendes und instabiles Verhalten aufwies. Die nun vorhandene Ausregelzeit von $t_{aus} = 194,2s$ bei $V = 100\%$ hat nicht annäherungsweise den Wert des Regelkreises mit übereinstimmenden Regelstrecken. Stimmen die Totzeiten und die Regelstrecken $G'_s(s)$ und $G'_{SM}(s)$ überein, hat die Ausregelzeit bei voller Verstärkung des Prädiktors einen Wert von $t_{aus} = 29,1s$. Die Sprungantwort zeigt hier kein übermäßiges Nachschwingen und verlässt den Zielkorridor von $\pm 5\%$ bei $t = 165,1s$.

Die Anpassung von K_r ermöglicht im mittleren Verstärkungsbereich nur minimale Verbesserungen der betrachteten Größen und ist damit nicht zwingend notwendig. Hier kann die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung verwendet werden, mit der Bedingung, dass der Einflussgrad des Prädiktors laut Tab. 4.11 nicht über $V = 70\%$ gestellt wird. Die vorliegenden Modellabweichungen verursachen eine Instabilität des Regelkreises, die nur bedingt durch eine Anpassung der Reglerparameter behoben werden kann.

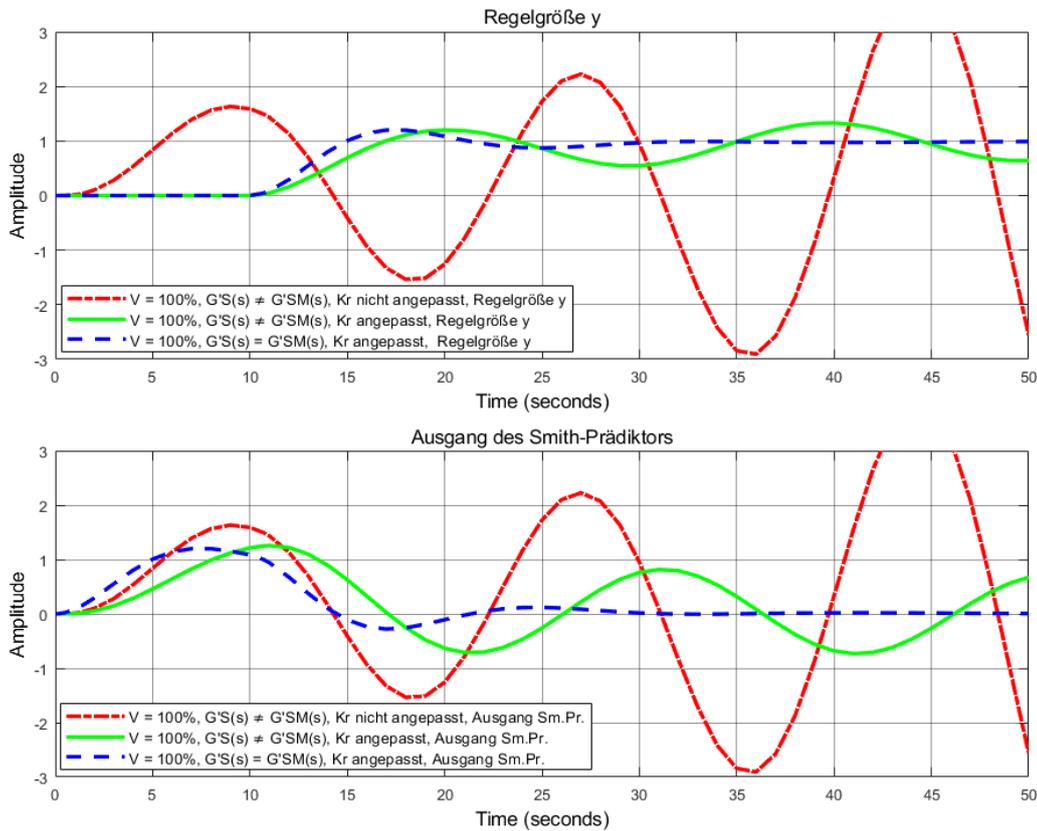


Abb. 4.65: Regelgröße u. Ausgang Sm.Pr., Abweichungen der Regelstrecken

Werden die Sprungantworten der Regelkreise mit Modellabweichungen von $G'_S(s)$ und $G'_{SM}(s)$ mit angepasster und nicht angepasster Reglerverstärkung mit dem Regelkreis „ohne“ Modellabweichungen verglichen, ergeben sich die in Abb. 4.65 dargestellten Graphen. Die blaue Sprungantwort stellt den Idealfall von $G'_S(s) = G'_{SM}(s)$ dar und hat im Vergleich zu den beiden anderen Verläufen den besten Verlauf. Es ist weder ein übermäßiges Nachschwingen noch instabiles Verhalten bei der Sprungantwort der Regelgröße (oberer Graph) und der vom Ausgang des Smith-Prädiktors (unterer Graph) erkennbar. Die Modellabweichungen und die numerischen Abweichungen sind innerhalb des geschlossenen Regelkreises minimal und ermöglichen damit die besten Regelungsergebnisse.

Im Gegensatz dazu haben der grüne und rote Verlauf im oberen sowie im unteren Graphen keinen akzeptablen Verlauf. Beide Regelkreise weisen große Modellabweichungen und große mathematische Abweichungen innerhalb des Regelkreises auf, was instabiles (rote Sprungantwort) oder stark nachschwingendes (grüne Sprungantwort) Verhalten zur Folge hat. Die Korrektur von K_r von $K_r = 4,81$ (rote Sprungantwort) auf $K_r = 2,5$ (blaue Sprungantwort) stabilisiert den Regelkreis, aber die Abweichungen innerhalb des Regelkreises bleiben bestehen. Das Anstreben des Idealfalls von $G'_S(s) = G'_{SM}(s)$ ist empfehlenswert, wenn gute Regelungsergebnisse auch bei großen Einflussgraden der Smith-Prädiktor-Schaltung gewährleistet werden sollen.

Reglerverstärkung K_r

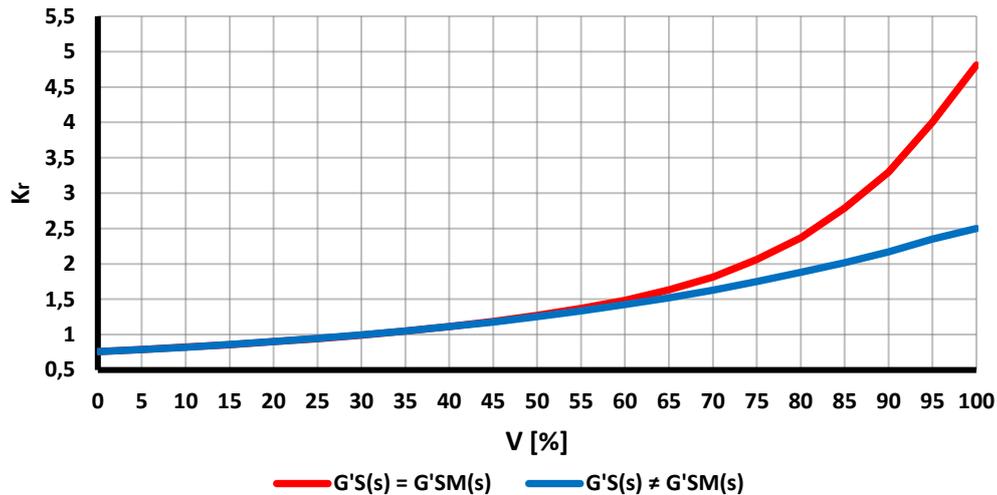


Abb. 4.66: Reglerverstärkungen, unterschiedliche Regelstreckenmodellen

In Abb. 4.66 sind die in 5%-Schritten experimentell ermittelten Reglerverstärkungen zu erkennen. Der rote Verlauf entspricht dem Verlauf der Reglerverstärkungen der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1). Der blaue Verlauf zeigt die ermittelten Werte von K_r für den vorliegenden Fall der Modellabweichungen zwischen $G'_S(s)$ und $G'_{SM}(s)$. Die Anpassungsvorschrift, die Einhaltung einer Überschwingweite von 20% des Regelgrößensprungs wurde für die Ermittlung der Werte von K_r als Grundlage verwendet. Im unteren Verstärkungsbereich bis $V = 55\%$ haben beide Lookup-Tables nahezu identische Reglerverstärkungen z.B. bei $V = 35\%$ (Regelkreis mit $G'_S(s) = G'_{SM}(s)$: $K_r = 1,05$, Regelkreis mit $G'_S(s) \neq G'_{SM}(s)$: $K_r = 1,048$). Erst bei hohen Einflussgraden des Smith-Prädiktors war eine umfangreiche Anpassung von K_r sinnvoll. Die Korrektur der Reglerverstärkung war zwingend notwendig, um das Regelungsverhalten zu verbessern und bei maximaler Verstärkung das instabile Verhalten zu minimieren. Starkes Nachschwingen bei hohen Verstärkungen hingegen verschlechtert das Regelungsergebnis zunehmend und eine alleinige Anpassung der Reglerparameter ermöglichte nicht die Kompensation oder Eindämmung des schwingenden Verhaltens.

Die Modellabweichungen sind in dem untersuchten Fall von $V = 100\%$ aus Abb. 4.65 zu groß und ermöglichen keine besseren Anregel- und Ausregelzeiten oder stabilere Verläufe der Sprungantworten. Wenn die vorliegende Prozessstrecke nicht exakt bestimmt werden kann, sollte entweder der Einflussgrad des Prädiktors nicht über einen bestimmten Wert gestellt werden oder zusätzliche Schaltungselemente z.B. Filter eingebaut werden. Der Wert, den die Verstärkung V nicht überschreiten sollte, damit kein instabiles oder stark nachschwingendes Verhalten auftritt ist von der vorliegenden Regelstrecke und den jeweiligen Modellabweichungen abhängig. In der Praxis kann z.B. Messrauschen zu größeren Abweichungen führen, was die Einstellung des verwendeten Reglers zunehmend erschwert.

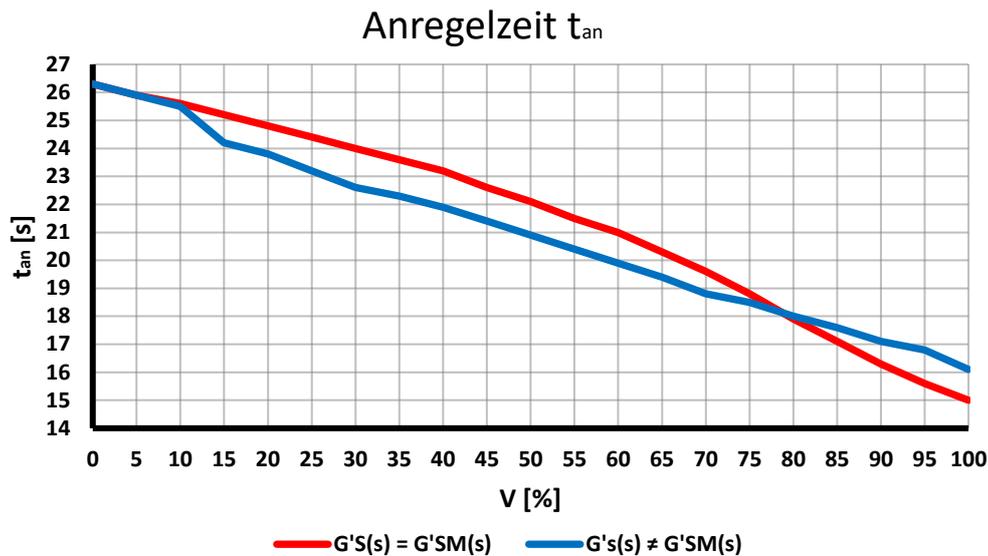


Abb. 4.67: Anregelzeiten, unterschiedliche Regelstreckenmodellen

Auch bei den Anregelzeiten aus Abb. 4.67 wird deutlich, dass ungleiche Regelstrecken einen negativen Einfluss auf den Anregelvorgang des Führungsgrößensprungs haben. Ab $V = 80\%$ hat der Regelkreis mit $G'_S(s) \neq G'_{SM}(s)$ deutlich längere Anregelzeiten, als der Regelkreis mit übereinstimmenden Regelstrecken $G'_S(s) = G'_{SM}(s)$. Im mittleren Verstärkungsbereich hingegen von $V = 10\%$ bis $V = 80\%$ ist der Anregelvorgang trotz geringerer Reglerverstärkungen im Vergleich zum Regelkreis mit $G'_S(s) = G'_{SM}(s)$ im Fall von $G'_S(s) \neq G'_{SM}(s)$ deutlich besser. Die Werte von t_{an} unterscheiden sich hier deutlich, zum Beispiel bei $V = 30\%$. Der Regelkreis mit übereinstimmenden Regelstrecken und nahezu keinen Modellabweichungen hat eine Anregelzeit von $t_{an} = 24s$ und der Regelkreis mit $G'_S(s) \neq G'_{SM}(s)$ hat eine Anregelzeit von $t_{an} = 22,6s$. Der Grund hierfür ist der Verlauf der Sprungantwort selbst. In Abb. 4.62 ist zu erkennen, dass die Regelstrecke mit drei PT_1 -Gliedern zwar eine größere Verzögerungszeit, aber eine höhere Anstiegsgeschwindigkeit besitzt. Deswegen wird der Sollwert von 1 schneller erreicht. Bei hohen Einflussgraden des Smith-Prädiktors kann dieser Vorteil nicht ausgenutzt werden, weil große Modellabweichungen bei hohen Werten von V instabiles Verhalten verursachen und damit den gesamten Regelkreis negativ beeinflussen.

Bei kleinen Verstärkungen bis $V = 15\%$ sind die Anregelzeiten nahezu identisch. Der rote und blaue Verlauf haben erst nach $V = 15\%$ sichtbare Unterschiede. Wird nur die Größe der Anregelzeit als Bewertungskriterium herangezogen, lässt sich feststellen, dass eine Regelstrecke höherer Ordnung im Smith-Prädiktor trotz Modellabweichungen bessere Regelungsergebnisse liefert, solange der Einflussgrad des Smith-Prädiktors nicht über $V = 80\%$ gestellt wird. Wird die Ausregelzeit als Bewertungskriterium hinzugenommen, ergibt sich ein anderes Bild. Das wird in der folgenden Abbildung sichtbar.

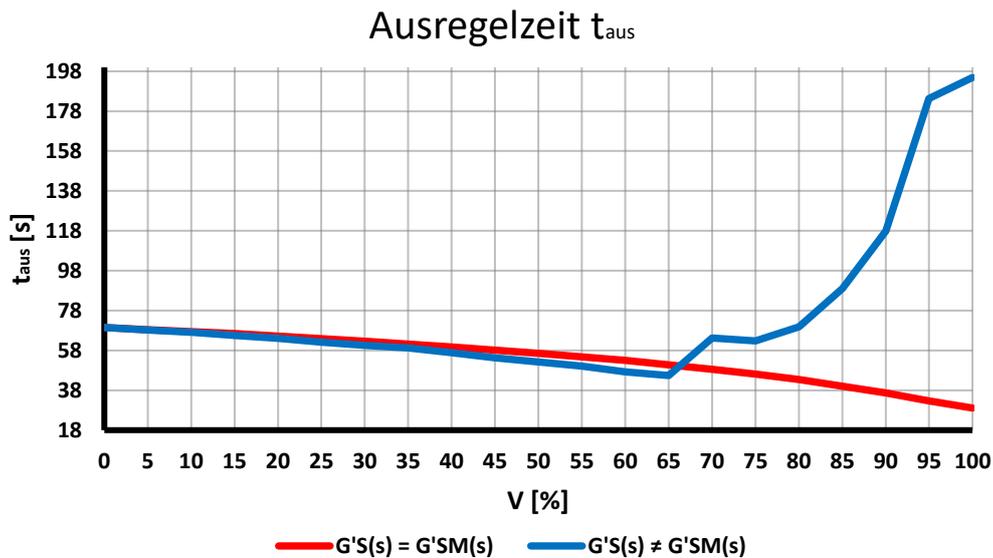


Abb. 4.68: Ausregelzeiten, unterschiedliche Regelstreckenmodellen

Bei kleinen Einflüssen des Prädiktors sind die Ausregelzeiten der beiden Verläufe in Abb. 4.68 nahezu identisch und separieren sich erst mit zunehmender Verstärkung. Dabei hat der Regelkreis mit der „falsch“ erfassten Regelstrecke bessere Ausregelzeiten, als der Regelkreis mit übereinstimmenden Regelstreckenmodellen. Das ändert sich ab einer Verstärkung von $V = 65\%$. Die Ausregelzeiten des blauen Verlaufs verschlechtern sich ab $V = 65\%$ deutlich und erreichen bei voller Verstärkung von $V = 100\%$ einen Höchstwert von $t_{aus} = 194,9s$. Diese starke Verschlechterung der Größe lässt sich auf das auftretende stark nachschwingende Verhalten des Regelkreises zurückführen. Die Modellabweichungen zwischen dem Modell der realen Regelstrecke und der implementierten Strecke im Smith-Prädiktor-Modell werden bei hohen Verstärkungen immer größer. Die Folge ist bei einer Nichtanpassung instabiles Verhalten und bei einer Anpassung „nur noch“ sehr starkes Nachschwingen. Aus diesem Grund sind die Ausregelzeiten bei hohen Verstärkungen schlechter als bei kleineren Einflüssen des Prädiktors. Die ermittelten Werte der Anregel- und Ausregelzeiten wurden anhand des Regelkreises mit angepasster Reglerverstärkung aufgenommen. Trotz der situationsbedingten Korrektur von K_r sind die Regelungsergebnisse deutlich schlechter als die des Regelkreises mit übereinstimmenden Regelstrecken.

Abschließend lässt sich feststellen, dass auch bei Modellabweichungen der Regelstrecken eine Verbesserung der Regelungsergebnisse möglich ist, wenn eine bestimmte Verstärkung V nicht überschritten wird. Wenn die genaue Erfassung der vorliegenden Regelstrecke nicht möglich ist, aber die Implementierung eines Smith-Prädiktors gewünscht wird, sollte dieser nicht auf die maximale Verstärkung gestellt werden, da sonst die Modellabweichungen zu groß werden. Ab einer Verstärkung von $V > 70\%$ wird der Regelkreis instabil und weist auch bei einer Anpassung der Reglerparameter unerwünschtes und nachschwingendes Verhalten auf. Das aufgenommene Verhalten bezieht sich dabei auf die vorliegende Regelstrecke und Modellabweichungen. Andere Regelstrecken können ein vollständig anderes Verhalten bei unterschiedlichen Einflussgraden der Smith-Prädiktor-Schaltung haben.

4.9 Annäherung der Totzeit im Smith-Prädiktor

Modellabweichungen lassen sich nicht nur bei unterschiedlichen Totzeiten im Modell der realen Regelstrecke und im Smith-Prädiktor-Modell finden, sondern auch bei der Implementierung der Totzeit selbst. In Prozessleitsystemen ist es in der Praxis meist nicht möglich, ein exaktes Prozessmodell zu erfassen und es in den Smith-Prädiktor zu implementieren. In Prozessleitsystemen ist die Realisierung von Totzeitgliedern schwer möglich, echte Totzeitglieder sind dabei kaum umsetzbar. Verzögerungen von einer Minute oder deutlich unter einer Minute sind realisierbar, aber wenn die betrachtete Strecke Totzeiten von mehreren Minuten besitzt, ist die einfache Implementierung mithilfe eines Totzeitgliedes nicht möglich. Dieses Problem wird anhand einer Annäherung durch Verzögerungsglieder 1. Ordnung „behoben“, indem eine bestimmte Anzahl dieser Glieder als „Totzeit“ in Reihe verschaltet werden. In der Implementierung dieser Methode im Prozessleitsystem werden nur ein paar Codezeilen benötigt und jede Programmzeile stellt ein Verzögerungsglied dar. Dabei kann die Verzögerungszeit auch problemlos als Parameter eingestellt werden.

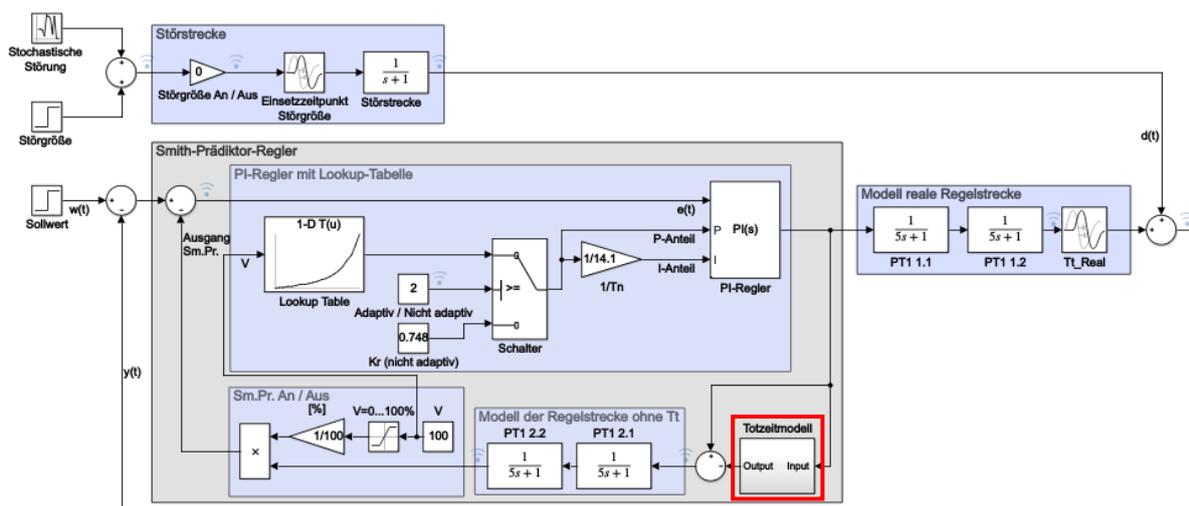


Abb. 4.69: Regelkreis mit Sm.Pr. und Totzeitannäherung im Sm.Pr.

Um eine Annäherung der Totzeit mit Verzögerungsgliedern 1. Ordnung umzusetzen, musste der Regelkreis mit Smith-Prädiktor modifiziert werden. In Abb. 4.69 ist der veränderte geschlossene Regelkreis zu erkennen, in dem das Totzeitglied durch eine multiplikative Reihenschaltung von zehn PT_1 -Gliedern im Subsystem „Totzeitmodell“ (rot hervorgehobener Bereich) ersetzt wurde. Die Reihenschaltung innerhalb des Subsystems ist in Anlage 7 zu finden. Der Grund für diese bestimmte Anzahl an Verzögerungsgliedern 1. Ordnung ist, dass bereits ab zehn PT_1 -Gliedern bei gleichen Zeitkonstanten eine gute Annäherung des verwendeten Totzeitgliedes mit $T_t = 10s$ erreicht werden kann [10]. Hier entstehen zwar Modellabweichungen im Vergleich zur Verwendung eines einfachen Totzeitgliedes, diese können aber mithilfe der Reglerverstärkung verringert werden.

Das neu erstellte Subsystem „Totzeitmodell“ besteht aus einer Reihenschaltung von zehn PT₁-Gliedern mit jeweils einer Zeitkonstante von $T_D = 1s$. Damit wird die vorhandene Totzeit von $T_t = 10s$ angenähert. Um das neu eingefügte Subsystem beschreiben zu können, werden zunächst die benötigten Formeln nach [10] betrachtet. Die Sprungantwort eines Totzeitmodells mit zehn PT₁-Gliedern verfügt über eine Modellzeitkonstante von:

$$T_{Modell} = \frac{T_t}{10} \quad (4.16)$$

Wird die Übertragungsfunktion des neu eingefügten Totzeitmodells betrachtet, ergibt sich folgende Gleichung:

$$G_{Modell}(s) = \frac{1}{(T_{Modell} \cdot s + 1)^n} \text{ mit } n \rightarrow \infty \quad (4.17)$$

Dabei steht die Größe n für die Anzahl der PT₁-Glieder. Der Regelkreis, der für alle Untersuchungen verwendet wurde verfügt über eine Totzeit von $T_t = 10s$ im Modell der realen Regelstrecke. Um diese Totzeit annähern zu können werden $n = 10$ PT₁-Glieder verwendet. Werden T_{Modell} und n in Gleichung (4.17) eingesetzt, folgt folgende Übertragungsfunktion:

$$G_{Modell}(s) = \frac{1}{\left(\frac{10}{10} \cdot s + 1\right)^{10}} = \frac{1}{(s + 1)^{10}} \quad (4.18)$$

Werden die Totzeitglieder mit Totzeitmodellen mit zehn Verzögerungsgliedern 1. Ordnung ersetzt, entsteht der in Abb. 4.69 dargestellte Regelkreis. Das Subsystem „Totzeitmodell“ ermöglicht eine Annäherung der vorliegenden Totzeit von $T_t = 10s$. Die Sprungantwort der Reihenschaltung weist keine exakte Totzeit von $T_t = 10s$ auf, sondern hat aufgrund der einzelnen Verzögerungszeiten der in Reihe geschalteten Verzögerungsgliedern „nur“ eine Verzögerung der Sprungantwort zur Folge. Die Summe der Zeitkonstanten der hintereinandergeschalteten PT₁-Glieder verlangsamen den Verlauf der Sprungantwort und ermöglichen damit eine Annäherung des Verlaufs der Sprungantwort mit Totzeitglied.

$$G_S(s) = G'_S(s) \cdot e^{-sT_t} \quad (4.19)$$

$$G'_S(s) = \left(\frac{1}{(5s + 1)} \cdot \frac{1}{(5s + 1)} \right) \quad (4.20)$$

Für die folgenden Ergebnisse wurde ein genau bekanntes Modell der totzeitfreien Regelstrecke angenommen. Das bedeutet, dass die totzeitfreie Regelstrecke $G'_S(s)$ aus Gleichung (4.20) exakt erfasst wurde und die Strecken $G'_S(s)$ und $G'_{SM}(s)$ übereinstimmen.

$$G_{SP,rück}(s) = G'_{SM}(s) \cdot (1 - e^{-sT_{tM}}) \quad (4.21)$$

Die vorliegende Totzeit T_{tM} wurde in Gleichung (4.21) nicht mit einem Totzeitglied, sondern mit einem Totzeitmodell (Reihenschaltung von zehn PT_1 -Glieder) implementiert. Die vorliegende Regelstrecke $G_S(s)$ wurde nicht verändert, weil es sich hierbei um eine vorliegende und vorgegebene Prozessstrecke handelt.

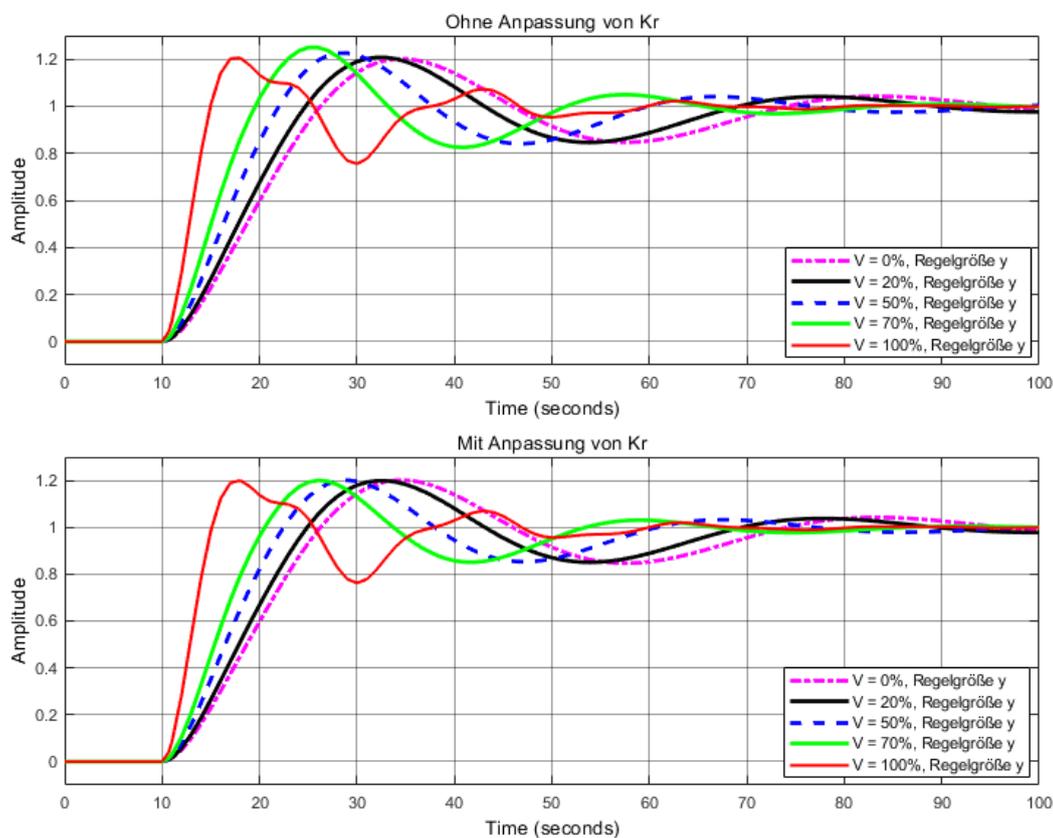


Abb. 4.70: Regelgröße, Totzeitannäherung im Sm.Pr.

Im oberen Graphen in Abb. 4.70 sind die Sprungantworten der Regelgröße mit nichtangepassten Reglerverstärkungen dargestellt. Es wurden fünf verschiedene Verstärkungen eingestellt und der entsprechende Regelkreis simuliert. Die Nichtanpassung von K_r bedeutet, dass die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) in den Regelkreis mit Totzeitannäherung implementiert wurde. Die angepassten Reglerverstärkungen wurden anhand der Anpassungsvorschrift (Überschwingweite von 20%) korrigiert.

Werden die Reglerparameter nicht angepasst und die Verstärkung auf einen hohen Wert z.B. $V = 70\%$ gestellt, wird die Amplitude von 1,2 der Sprungantwort beim Ausregelvorgang des Führungsgrößensprungs überschritten. Die Amplituden nehmen bis $V = 70\%$ zu, bei $V = 100\%$ hingegen wird die gewünschte Überschwingweite auch mit den „alten“ Reglerparametern erreicht.

Bei voller Verstärkung weist die Sprungantwort der Regelgröße einen ungewöhnlichen Verlauf auf. Dabei wird zwar die Amplitude von 1,2 nicht überschritten, aber der von Peaks und Schwingen geprägte Verlauf verschlechtert das Bild der dargestellten Sprungantwort der Regelgröße. Die Regelungsergebnisse werden aber trotz des ungewöhnlichen Verlaufs bei $V = 100\%$ besser und haben deutlich bessere Werte als der Regelkreis ohne Smith-Prädiktor ($V = 0\%$, lila Sprungantwort).

Die Anpassung der Reglerverstärkung ermöglicht das Einhalten der Anpassungsvorschrift bei allen betrachteten Verstärkungen. Es wurde bei allen dargestellten Sprungantworten im unteren Graphen von Abb. 4.70 eine Überschwingweite von 20% erreicht. Diese Anpassung ist nicht zwingend notwendig, da alle Sprungantworten im oberen Graphen kein instabiles, aufschwingendes oder stark nachschwingendes Verhalten aufweisen. Werden die verwendeten Reglerverstärkungen aus unteren Graphen mit den Reglerverstärkungen der Verstärkungsform Sprung verglichen, lässt sich feststellen, dass diese bei kleinen und sehr großen Einflussgraden sehr ähnlich sind. Der Wert von K_r ist z.B. bei $V = 100\%$ beim Regelkreis mit Totzeitglied im Smith-Prädiktor bei $K_r = 4,81$ und beim Regelkreis mit Totzeitmodell im Smith-Prädiktor bei $K_r = 4,65$. Die Werte von K_r unterscheiden sich nur im mittleren Verstärkungsbereich deutlich voneinander.

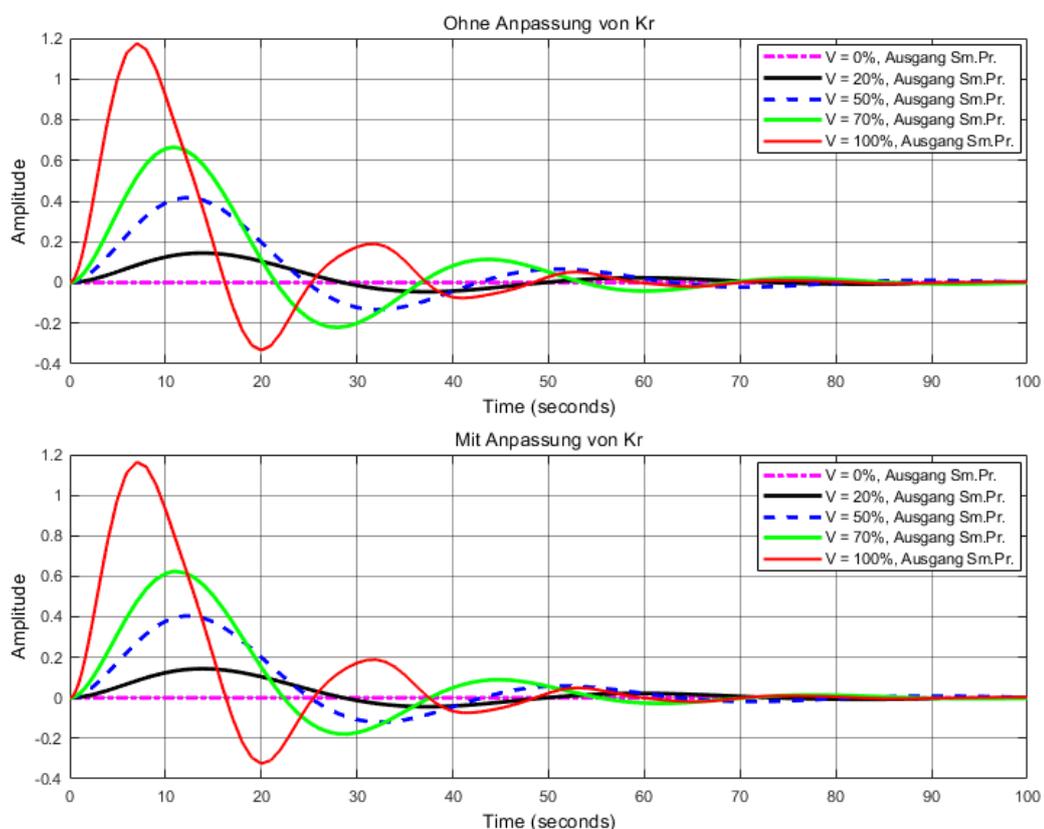


Abb. 4.71: Ausgang Sm.Pr., Totzeitannäherung im Sm.Pr.

Beim Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung sind nur sehr kleine Unterschiede der Sprungantworten bei einer Nichtanpassung (oberer Graph) und Anpassung (unterer Graph) in Abb. 4.71 zu erkennen. Die Amplituden z.B. bei $V = 100\%$ unterscheiden sich nur minimal. Im oberen Graphen hat die rote Sprungantwort bei $V = 100\%$ eine Amplitude von 1,197 und im unteren Graphen eine Amplitude von 1,195. Die Anpassung der Reglerverstärkung hat nur einen minimalen Einfluss auf die Sprungantworten vom Ausgang des Smith-Prädiktors.

Das ungewöhnliche Verhalten der Sprungantwort der Regelgröße bei $V = 100\%$ tritt nicht bei der Sprungantwort vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung auf. Alle aufgezeichneten Sprungantworten haben einen stabilen und akzeptablen Verlauf. Die einzelnen Amplituden sind von der eingestellten Anfangsverstärkung abhängig. Je größer diese gewählt wurde, umso größer die Amplitude der Sprungantwort.

Die Anpassung des verwendeten PI-Reglers ermöglicht die Einhaltung der Anpassungsvorschrift, sie ist aber nicht zwingend notwendig. Das bedeutet, dass die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) auch bei einer Annäherung der Totzeit mit zehn Verzögerungsgliedern 1. Ordnung verwendet werden kann und sich die Regelungsergebnisse auch hier dadurch deutlich verbessern. Um den ungewöhnlichen Verlauf der Sprungantwort der Regelgröße bei $V = 100\%$ zu vermeiden, sollte der Einflussgrad des Prädiktors laut Abb. 4.70 nicht auf $V > 70\%$ gestellt werden, unabhängig davon, ob die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung oder die Lookup-Table mit angepassten Reglerverstärkungen verwendet wird.

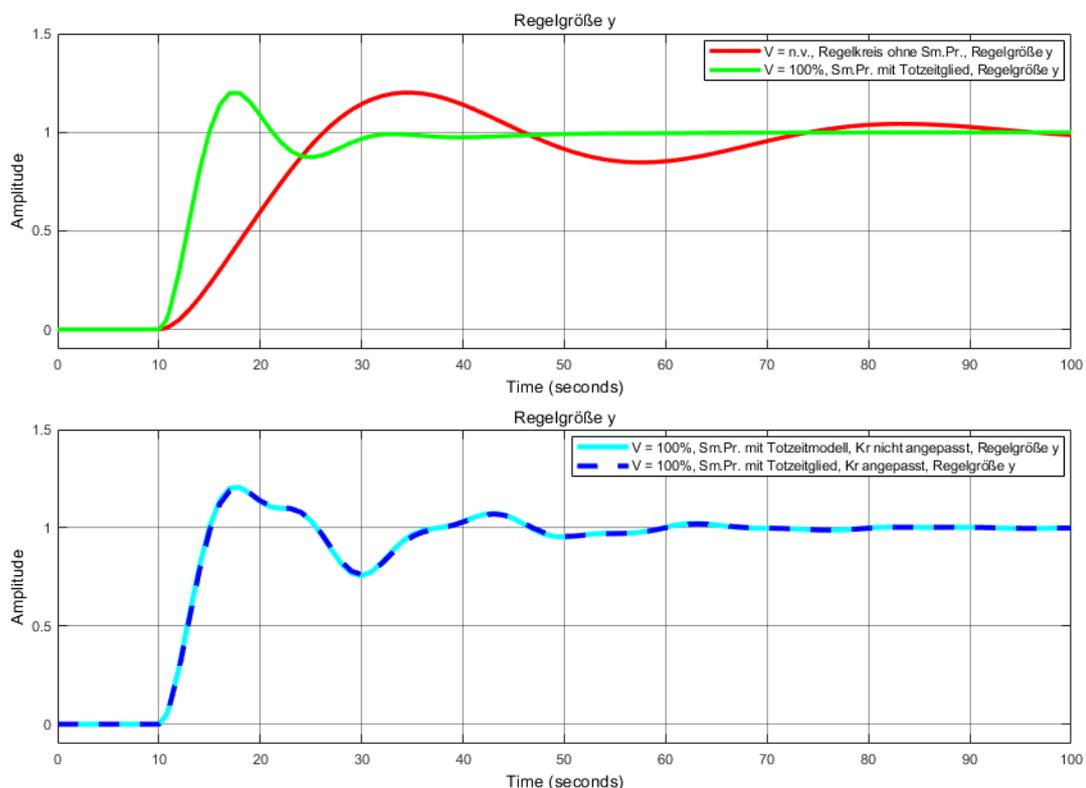


Abb. 4.72: Regelgröße, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung

Die Implementierung eines Smith-Prädiktors ermöglicht bessere Regelungsergebnisse und höhere Reglerverstärkungen. Abb. 4.72 zeigt im oberen Graphen, dass der Regelkreis mit Smith-Prädiktor und Totzeitglied im Prädiktor eine deutlich schnellere Sprungantwort (grüner Verlauf) ermöglicht, als ein Regelkreis ohne Smith-Prädiktor (rote Sprungantwort). Die Anregelzeit verbessert sich deutlich von $t_{an} = 26,3s$ auf $t_{an} = 15s$. Auch die Ausregelzeit verkürzt sich von $t_{aus} = 69,5s$ auf $t_{aus} = 29,1s$.

Die Implementierung einer echten Totzeit in Form eines Totzeitgliedes ist in der Praxis kaum möglich und deswegen wird eine Annäherung der Totzeit verwendet. Der Regelkreis mit zehn Verzögerungsgliedern 1. Ordnung als Totzeitannäherung im Smith-Prädiktor ermöglicht trotz nichtangepasster Reglerverstärkung K_r bessere Anregel- und Ausregelzeiten als der Regelkreis ohne Smith-Prädiktor. Das lässt sich anhand des Vergleichs der roten Sprungantwort im oberen Graphen von Abb. 4.72 und der hellblauen Sprungantwort im unteren Graphen feststellen. Der ungewöhnliche Verlauf der Sprungantwort verbessert trotzdem die Ausregelzeit beim maximalen Einflussgrad des Prädiktors von $t_{aus} = 69,5s$ auf $t_{aus} = 45,3s$. Die verwendete Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung (siehe Abschnitt 4.4.1) ermöglicht im Regelkreis mit Totzeitannäherung eine deutlich sichtbare Verbesserung der Regelungsergebnisse bei $V = 100\%$. Werden die Reglerverstärkungen angepasst, hat das bei $V = 100\%$ nahezu keinen Einfluss auf die Sprungantwort der Regelgröße. Im unteren Graphen von Abb. 4.72 haben die hellblaue und blaue Sprungantwort einen nahezu identischen Verlauf. Der Wert von K_r unterscheidet sich bei den beiden Regelkreisen bei $V = 100\%$ nicht deutlich, $K_r = 4,81$ (Regelkreis ohne Anpassung von K_r) und $K_r = 4,65$ (Regelkreis ohne Anpassung von K_r). Damit ist eine Anpassung von K_r nicht zwingend notwendig.

Eine Totzeitannäherung im Smith-Prädiktor ermöglicht trotz Modellabweichungen innerhalb des geschlossenen Regelkreises deutlich bessere Regelungsergebnisse als der Regelkreis ohne Smith-Prädiktor. Wie groß die Verbesserungen der Sprungantworten und der Regelungsergebnisse sind, hängt von der vorliegenden Regelstrecke und Totzeit sowie deren Kenntnis ab. Auch die Anpassung der Reglerparameter kann bei einer anderen vorliegenden Regelstrecke notwendig werden, weil z.B. instabiles Verhalten infolge von zu großen Modellabweichungen entsteht. Dann kann nicht die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung verwendet werden, sondern muss auf die vorliegende Prozessstrecke anhand einer Anpassungsvorschrift neu parametrisiert werden.

In dem in diesem Abschnitt untersuchten Fall ist keine zwingende Anpassung von K_r notwendig. Wird diese dennoch durchgeführt, hat das einen Einfluss auf die Regelungsergebnisse. Wie groß, zeigen die folgenden drei Abbildungen.

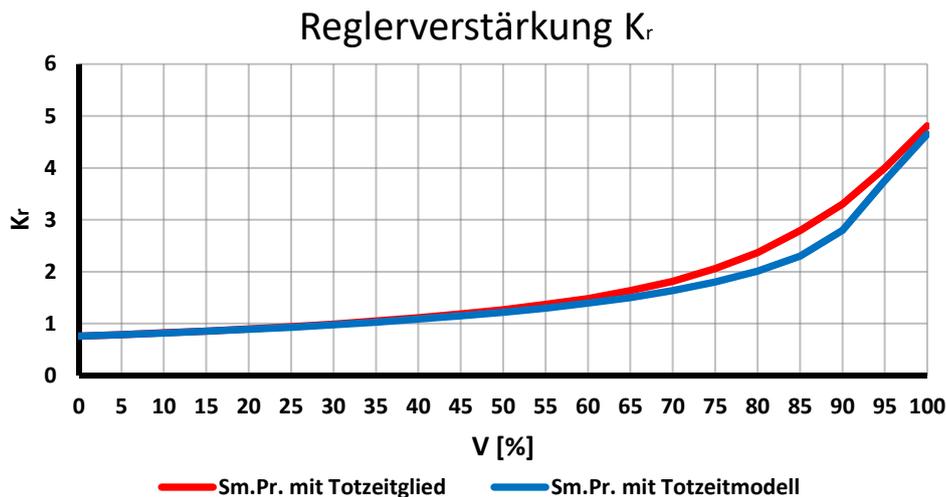


Abb. 4.73: Reglerverstärkungen, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung

In Abb. 4.73 sind die Verläufe der angepassten Reglerverstärkungen zu erkennen. Der rote Verlauf wurde mithilfe der Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung und mit einem Totzeitglied im Smith-Prädiktor aufgenommen. Das Modell der realen Regelstrecke mit $T_t = 10s$ stimmt in diesem Fall mit dem Modell der Regelstrecke und Totzeit von $T_t = 10s$ im Smith-Prädiktor überein. Der blaue Verlauf wurde wie der rote Verlauf anhand der Anpassungsvorschrift einer Überschwingweite von 20% der Sprungantwort der Regelgröße erstellt. Der Unterschied zum roten Verlauf ist, dass der Regelkreis des blauen Verlaufs nicht über ein Totzeitglied, sondern über eine Annäherung der Totzeit in Form einer Reihenschaltung von Verzögerungsgliedern 1. Ordnung verfügt.

Die Implementierung einer echten Totzeit in Form eines Totzeitgliedes ermöglicht im Vergleich der beiden Verläufe aus Abb. 4.73 die größten Reglerverstärkungen. Bei kleinen Einflussgraden V des Prädiktors sind die Werte von K_r sehr nahe beieinander, beispielsweise bei $V = 20\%$ hat der Regelkreis mit Totzeitglied im Prädiktor-Modell eine Reglerverstärkung von $K_r = 0,9$ und der Regelkreis mit angenäherter Totzeit im Prädiktor-Modell eine Reglerverstärkung von $K_r = 0,896$. Im mittleren Verstärkungsbereich werden die Unterschiede der beiden Regelkreise bzgl. der jeweiligen Reglerverstärkung größer. Der Regelkreis mit Totzeitglied hat z.B. bei $V = 80\%$ eine Reglerverstärkung von $K_r = 2,37$ und der Regelkreis mit Totzeitannäherung eine Reglerverstärkung von $K_r = 2,01$.

Eine echte Totzeit im Smith-Prädiktor ermöglicht die höchsten Werte von K_r über das gesamte Verstärkungsspektrum, aber auch eine Totzeitannäherung verbessert die Regelungsergebnisse deutlich, wenn diese mit einem Regelkreis ohne Smith-Prädiktor verglichen werden. Die Modellabweichungen innerhalb des Regelkreises mit Totzeitannäherung im Prädiktor ermöglichen keine besseren Reglerverstärkungen. Diese Abweichungen haben auch einen Einfluss auf die Anregel- und Ausregelzeiten, weil mit größer werdendem Einflussgrad des Prädiktors auch die Modellabweichungen zunehmen.

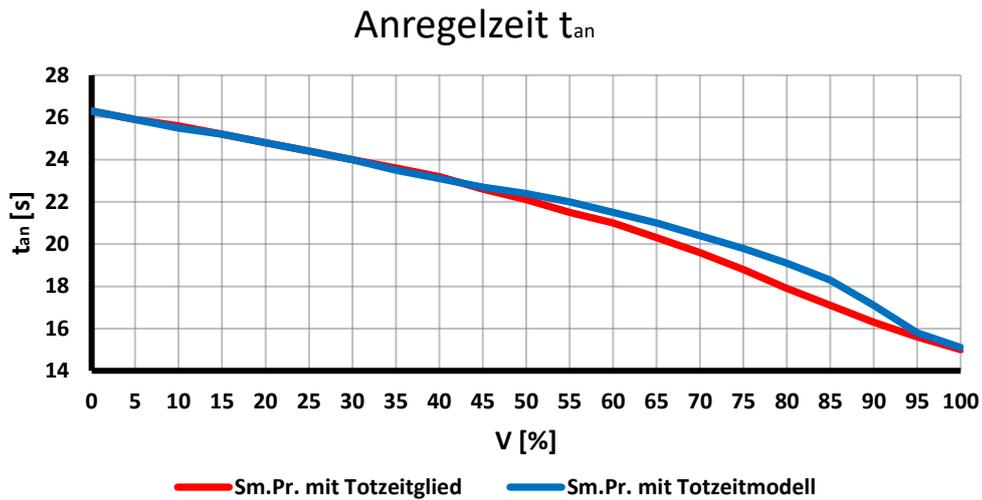


Abb. 4.74: Anregelzeiten, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung

Abb. 4.74 zeigt die Ausregelzeiten der Regelkreise mit angepassten Reglerverstärkungen. Das bedeutet, dass die implementierte Lookup-Table innerhalb des Regelkreises angepasst wurde und alle experimentell ermittelten Werte von K_r die Anpassungsvorschrift einer Überschwingweite von 20% der Regelgröße bei beiden Regelkreisen ermöglichen.

Im unteren Verstärkungsbereich von V unterscheiden sich die Anregelzeiten des Regelkreises mit Totzeitglied im Smith-Prädiktor und Totzeitmodell im Smith-Prädiktor kaum voneinander. Beispielsweise bei $V = 25\%$ hat die Sprungantwort der Regelgröße y des Regelkreises mit Totzeitglied im Prädiktor eine Anregelzeit von $t_{an} = 24,4s$ und die Sprungantwort von y beim Regelkreis mit Totzeitmodell im Prädiktor eine Anregelzeit von $t_{an} = 24,3s$.

Im mittleren Verstärkungsbereich ermöglicht das Totzeitglied im Smith-Prädiktor bessere Werte von t_{an} der Sprungantwort der Regelgröße, als der Regelkreis mit Totzeitannäherung. Zum Beispiel bei $V = 75\%$ hat die rote Sprungantwort einen Wert von $t_{an} = 18,8s$ und die blaue Sprungantwort einen Wert von $t_{an} = 18,3s$. Die Unterschiede der Ausregelzeiten der beiden Verläufe aus Abb. 4.74 unterscheiden sich wertetechnisch nicht groß voneinander. Auch der Regelkreis mit Modellabweichungen infolge einer Totzeitannäherung statt Totzeitglied im Smith-Prädiktor ermöglicht gute und akzeptable Anregelzeiten. Bei niedrigen Einflussgraden V des Prädiktors stimmen die Anregelzeiten nahezu mit denen des Regelkreises mit echter Totzeit im Smith-Prädiktor überein.

Bei den Ausregelzeiten der beiden Regelkreise lassen sich größere Unterschiede erkennen. Die Modellabweichungen, die mit größer werdenden Verstärkungen V immer größer werden haben einen deutlichen Einfluss auf die Dauer des Ausregelvorgangs des FührungsgrößenSprungs. Das ist in der folgenden Abb. 4.75 zu erkennen.

Ausregelzeit t_{aus}

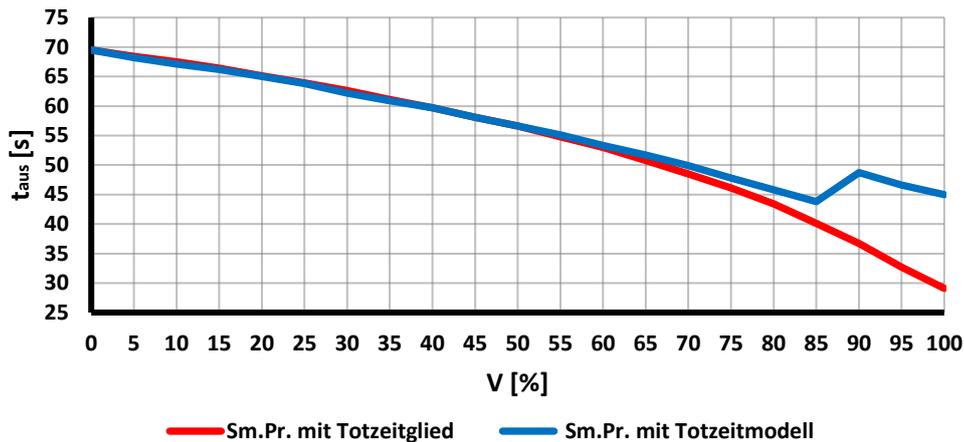


Abb. 4.75: Ausregelzeiten, Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung

Auch die Ausregelzeiten unterscheiden sich bei kleinen Verstärkungen V kaum. Die Unterschiede zwischen den beiden Verläufen sind erst ab einer Verstärkung von $V = 60\%$ des Smith-Prädiktors erkennbar. Die Modellabweichungen innerhalb des Regelkreises werden mit zunehmendem Einflussgrad des Prädiktors größer, weil die sich die echte Totzeit der vorliegenden Regelstrecke von der angenäherten Totzeit im Smith-Prädiktor unterscheidet. Wird die Verstärkung V vergrößert, werden auch die Unterschiede der realen Regelstrecke mit echter Totzeit und der Regelstrecke mit angenäherter Totzeit im Prädiktor größer. Das hat einen deutlichen Einfluss auf die Ausregelzeit des Führungsgrößenprung. Bei Verstärkungen von $V \leq 85\%$ entsteht der in Abb. 4.70 dargestellte ungewöhnliche Verlauf der Regelgröße. Dieser Verlauf verschlechtert die Ausregelzeiten trotz angepasster Reglerverstärkung deutlich, was in der oberen Abbildung im rechten Bereich anhand des blauen Verlaufs deutlich zu erkennen ist. Die Ausregelzeiten verschlechtern sich bei $V = 85\%$ von $t_{aus} = 43,8s$ auf $t_{aus} = 48,7s$ bei $V = 90\%$. Für die ermittelten Werte der betrachteten Größen siehe Anlage 8. Der Regelkreis mit echter Totzeit im Smith-Prädiktor ermöglicht im Vergleich der Verläufe deutlich bessere Ausregelzeiten bei hohen Verstärkungen. Dieser Regelkreis hat nur minimale Abweichungen, im Gegensatz zum Regelkreis mit Totzeitmodell im Smith-Prädiktor.

Es lässt sich feststellen, dass auch eine Annäherung der Totzeit im Smith-Prädiktor-Modell eine deutliche Verbesserung der Regelungsergebnisse ermöglicht. Bei hohen Verstärkungen hingegen entsteht aufgrund der mathematischen Abweichungen zwischen dem Modell der realen Regelstrecke und dem Smith-Prädiktor-Modell ein ungewöhnlicher Verlauf der Regelgröße y . Um den großen Nachteil von Modellabweichungen des Smith-Prädiktors umgehen zu können, sollte der Einflussgrad des Prädiktors nicht auf $V > 85\%$ gestellt werden. Die Empfehlung der maximalen Verstärkungseinstellung von $V = 85\%$ basiert auf den Simulationsergebnissen dieses Abschnittes und der verwendeten realen Regelstrecke. Das festgestellte ungewöhnliche Verhalten des Regelkreises bei hohen Verstärkungen V kann bei anderen Regelstrecken und Totzeiten deutlich anders sein.

4.10 Bewertung der Praxistauglichkeit des untersuchten Smith-Prädiktors

4.10.1 Experteninterview

Die Praxistauglichkeit der untersuchten stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktor-Schaltung wurde anhand eines Experteninterviews mit Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Trümper bewertet. Herr Dr.-Ing. Trümper arbeitet seit 1996 im Bereich der Prozessautomation und ist seit über 15 Jahren bei DOW Chemicals als Process Automation Manager tätig. Das vollständige Interview ist in Anlage 9 zu finden. Im Folgenden wurden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

Zunächst ist es in der Praxis schwierig, die vorliegende Prozesstrecke genau zu identifizieren. Sie kann meist zu etwa 80% erfasst werden, das bedeutet, dass eine Fehleinschätzung von 20% vorliegt. Die Modellabweichungen infolge einer Fehleinschätzung können bei Abweichungen durch Nichtlinearitäten z.B. Sättigungen oder Anschläge von Ventilen entstehen. Die Identifizierung der Ordnung der vorliegenden Regelstrecke kann ebenfalls Modellabweichungen verursachen, z.B. wenn eine Prozesstrecke 1. Ordnung angenommen wird, aber die tatsächlich vorliegende Prozesstrecke ein Modell höherer Ordnung z.B. 3. Ordnung hat. Abweichungen sind die Schwachstelle des Smith-Prädiktors und haben im schlimmsten Fall einen instabilen Regelkreis zur Folge. Auch bei einem Wechsel des Arbeitspunktes bzw. der Betriebsweise der Anlage kann der Smith-Prädiktor zum Risiko werden. Der verwendete Regler wurde aufgrund des Smith-Prädiktors viel stärker eingestellt und im Fall von nicht gut zueinanderpassenden Modellen (Prozesstrecke und Regelstrecke im Smith-Prädiktor-Modell) kann die Regelung deutlich schlechter werden. Dieses Risiko kann aber durch die stufenlose Verstellung des Einflussgrades der Smith-Prädiktor-Schaltung reduziert werden, indem der Einflussgrad bei einer schlechteren Regelung runtergestellt wird.

Die stufenlose Verstellung des Einflussgrades des Smith-Prädiktors ist vor allem für die Inbetriebnahme des Prädiktors sehr wichtig. Wenn die vorliegende Prozesstrecke identifiziert wurde und nicht genau feststeht, wie gut das erfasste Modell tatsächlich ist, ist es essentiell, den Prädiktor im Notfall auch wieder rausnehmen zu können. Der Notfall äußert sich in einer deutlichen Verschlechterung des Regelverhaltens. Im Fall von Veränderungen des Arbeitspunktes kann der implementierte Prädiktor schlechtere Regelungsergebnisse als zuvor verursachen. Der Smith-Prädiktor muss ausgeblendet werden, die Modelle angepasst und anschließend stufenlos reingetuned werden, um die Regelungsergebnisse wieder zu verbessern. Dies kann nur stufenlos erfolgen, da sonst Effekte auftreten, die nicht mehr ausgeglichen werden können.

Neben dem Smith-Prädiktor gibt es noch andere Möglichkeiten den negativen Einfluss der Totzeit entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit ist das Finden eines neuen Messortes z.B. bei Totzeiten die durch Transportwege entstehen. Das Messen an einer anderen Stelle hat den Vorteil, dass die Änderung der Regelgrößen früher erfasst werden kann. Mit der entsprechenden Verzögerung bzw. Dynamik kann der Einsatz einer Feed-Forward-Control (Störgrößenaufschaltung) eine gute Kompensation ermöglichen.

Wenn der entsprechende Messort gefunden wurde, ist die Verwendung einer Störgrößenaufschaltung vorteilhafter als die Verwendung eines Smith-Prädiktors. Obwohl beide Schaltungen zu einer Verbesserung des Regelvorgangs beitragen können werden Feed-Forward-Control-Schaltungen und Smith-Prädiktor-Schaltungen in der Praxis nur selten eingesetzt.

Die Anforderungen an die Smith-Prädiktor-Schaltung, eine Verbesserung des Regelfalls, eine aggressivere Einstellung des Reglers, die Verbesserung des Führungsverhaltens und ein besseres Störverhalten, können nur durch einen stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktor erfüllt werden. Zunächst muss für die Implementierung des Prädiktors ein akutes Problem vorliegen was gelöst werden muss. Außerdem sollte die Aussicht bestehen, das Regelverhalten durch das Einfügen des Prädiktors deutlich zu verbessern. Die Implementierung sollte auch zu einem Nutzen führen z.B. in Form von einem höheren Produktdurchsatz, einer höheren Produktqualität oder die Einsparung von Energie. Dann kann die Implementierung eines Smith-Prädiktor sinnvoll sein. Dabei sollte der Prädiktor stufenlos einblendbar sein, was z.B. anhand einer Lookup-Table stufenlos in einem Prozessleitsystem möglich ist.

Lookup-Table-Blöcke gehören zum Standard in Prozessleitsystemen und werden in der Praxis häufig eingesetzt. Sie werden bei nahezu allen Arten von Linearisierungen z.B. bei der Linearisierung von Messgrößen eingesetzt. Auch beim Linearisieren von Stellgrößen kommen diese Tabellen zum Einsatz z.B. bei einer nichtlinear vorliegenden Kennlinie eines Ventils. Der nichtlineare Zusammenhang beim Regeln des Ventils kann durch eine Lookup-Table linearisiert werden und stellt einen typischen Anwendungsfall dar. Hier ist es von Vorteil, wenn die Berechnungen der Lookup-Table in beide Richtungen verwendet werden kann. Wenn ein Ventil angesteuert wird, wird eine lineare Abhängigkeit zum Kv-Wert gewünscht (Vorwärts-Linearisierung). Der Kv-Wert entspricht dem Wasserdurchfluss durch ein Ventil (in m^3/h) bei einer Druckdifferenz von etwa einem Bar. Es wird aber auch die Berechnung rückwärts benötigt, z.B. wenn das Ventil in den Handmodus geschaltet wird. Das Zurückinformieren des verwendeten Reglers, was für ein Kv-Wert manuell am Ventil eingestellt wurde ist dann entscheidend, damit eine stufenlose Umschaltung des Reglers ermöglicht wird.

Um eine Lookup-Table erstellen zu können ist das Definieren einer Anpassungsvorschrift für die Ermittlung der Werte für die Lookup-Table wichtig. Das experimentelle Ermitteln der Werte der Reglerverstärkungen K_r für die einzelnen Einflussgrade des Smith-Prädiktor anhand einer Überschwingweite von 20% kann auch in der Praxis als Einstellungskriterium verwendet werden. Um die Werte der jeweiligen Reglerverstärkungen ermitteln zu können, ist eine Schrittweite von 5%-Schritten von V (V = Verstärkung bzw. der Einflussgrad des Smith-Prädiktors) ausreichend. Wenn ein automatisiertes Skript verwendet wird, kann auch eine Schrittweite von 1%-Schritten ermöglicht werden.

Um die Smith-Prädiktor-Schaltung implementieren zu können müssen das vorliegende Streckenverhalten und die Totzeit zunächst identifiziert werden. Im Rahmen einer Softwareänderung kann der Smith-Prädiktor in das vorhandene Programm eingebunden und anschließend langsam reingetuned werden. Vor dem Einbinden der Schaltung sollte die Schrittweite und die Anpassungsvorschrift festgelegt werden. Dann muss die Applikationssoftware so verändert werden, dass der Smith-Prädiktor implementiert werden kann. Falls notwendig kann mithilfe der stufenlosen Implementierung der Prädiktor wieder aus dem Regelvorgang herausgenommen werden, um Korrekturen an der Lookup-Table oder an der Smith-Prädiktor-Schaltung durchzuführen.

Bei der verwendeten Darstellungsform des Smith-Prädiktors mit innerer Rückführung wird der Endwert der Smith-Prädiktor-Schaltung auf 0 zurückgeführt. Das stellt kein Problem dar, ist aber dennoch keine ideale Situation, weil der Regler als Regelgröße nicht mehr die eigentliche Prozessgröße, sondern die modifizierte Prozessgröße als Information zurückgeleitet bekommt.

Das ist ein Nachteil aus Sicht der Operator bzw. der Anlagenfahrer, die mit dem Regelkreis in Kontakt kommen. Eine Möglichkeit, diese nicht ideale Situation zu verbessern ist ein komplexeres Reglermodul zu entwerfen, das den Smith-Prädiktor enthält. Im Faceplate könnte dann die richtige Regelgröße angezeigt werden. Idealerweise würde der Smith-Prädiktor mit dem Standard-Reglermodul in ein neues Modul eingesetzt bzw. ein neues Modul erstellt und dieses mit einem neuen Faceplate verbunden werden. Das Design des neu erstellten Faceplates kann auf das schon vorhandene Design angepasst werden, mit dem Unterschied, dass auf den implementierten Smith-Prädiktor hingewiesen wird. Der große Vorteil dieser Lösung ist, dass der Operator wie zuvor die echte Regelgröße sehen würde. Die Umsetzung ist aber mit den heute vorliegenden Standardmitteln leider nicht möglich.

Trotz des Anzeigens der modifizierten Regelgröße ist der in dieser Arbeit untersuchte stufenlos einblendbarer Smith-Prädiktor laut Herrn Dr.-Ing. Trümper praxistauglich. Für weiterführende Untersuchungen könnte der Einsatz eines Smith-Prädiktors für Regelstrecken untersucht werden, die nicht direkt Totzeitstrecken sind, sondern Strecken mit Verzögerungen höherer Ordnung. Die Realisierung eines Zustandreglers könnte damit erreicht werden. Auf Basis dieser zusätzlichen Untersuchungen könnte die Entscheidung getroffen werden, ob es sinnvoll ist, das Themengebiet weiter zu untersuchen.

4.10.2 Schritte zur Implementierung des Smith-Prädiktors

Im der folgenden Tab. 4.12 sind die Schritte zur Erstellung und Implementierung des stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktors in chronologischer Reihenfolge aufgelistet. Alle Schritte wurden auf die in dieser Arbeit verwendete Regelstrecke und die vorliegende Totzeit, die ausgewählte Anpassungsvorschrift, die festgelegte Schrittweite und das verwendete Simulationsprogramm MATLAB angepasst.

Tab. 4.12: Schritte zur Implementierung des Sm.Pr.

Schritt	Beschreibung	MATLAB	Anlage
1.	Ermittlung der vorliegenden Regelstrecke mit Totzeit <ul style="list-style-type: none"> ➤ Modell der realen Regelstrecke erfassen ➤ Vorliegende Totzeit T_t erfassen 		✓
2.	Geschlossenen Regelkreis in einem Simulationsprogramm entwerfen <ul style="list-style-type: none"> ➤ MATLAB Simulink starten und den Regelkreis entwerfen ➤ Modell der realen Regelstrecke mit Totzeit einfügen ➤ Regelkreis noch nicht simulieren 	✓	
3.	Reglerparameter für die vorliegende Prozesstrecke ermitteln <ul style="list-style-type: none"> ➤ Berechnung bzw. Ermittlung von K_r ➤ Berechnung von T_n (Nachstellzeit) 	✓	
4.	Simulation des Regelkreises mit eingestelltem PI-Regler ohne Smith-Prädiktor	✓	
5.	Nachjustieren der Parametrisierung des Reglers falls die Regelungsergebnisse nicht den Anforderungen entsprechen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Korrektur von K_r ➤ Überprüfung der Berechnung von T_n ➤ Erster Wert von K_r für die Lookup-Table bei $V = 0\%$ 	✓	
6.	Auswahl der Darstellungsform des Smith-Prädiktors (IMC, FSP, innerer Rückführung) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Auswahl des Smith-Prädiktors mit innerer Rückführung, weil die stufenlose Implementierung in MATLAB mit Gain-Elementen nur in dieser Darstellungsform problemlos möglich ist (siehe Abschnitt 2.4.2) 	✓	
7.	Anpassungsvorschrift für die Ermittlung der Werte von K_r bei unterschiedlichen Einflussgraden V des Smith-Prädiktors festlegen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Überschwingweite von 20% bei allen ermittelten Werten von K_r 	✓	

Tab. 4.12: (Fortsetzung)

Schritt	Beschreibung	MATLAB	Anlage
8.	Smith-Prädiktor-Schaltung in den Regelkreis implementieren, Prädiktor noch nicht einschalten ($V = 0\%$) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Gewählte Darstellungsform (Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung) in den geschlossenen Regelkreis implementieren ➤ Modell der realen Regelstrecke in die Smith-Prädiktor-Schaltung implementieren ➤ Totzeit als Totzeitglied oder Totzeitmodell (Annäherung der Totzeit z.B. durch eine Reihenschaltung von Verzögerungsgliedern 1. Ordnung) in die Smith-Prädiktor-Schaltung implementieren 	✓	
9.	Vorliegende Regelstrecke überprüfen falls Veränderungen auftraten <ul style="list-style-type: none"> ➤ Modell der realen Regelstrecke überprüfen und falls notwendig, den Regelkreis in MATLAB Simulink entsprechend anpassen ➤ Vorliegende Totzeit überprüfen und falls notwendig, den Regelkreis in MATLAB Simulink entsprechend anpassen 	✓	✓
10.	Smith-Prädiktor-Schaltung an die vorliegende Prozesstrecke anpassen, Prädiktor noch nicht einschalten bzw. reintonen ($V = 0\%$) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Modell der realen Regelstrecke in den Smith-Prädiktor implementieren ➤ Totzeit als Totzeitglied oder Totzeitannäherung in den Smith-Prädiktor implementieren 	✓	
11.	Schrittweite festlegen, in welchen %-Schritten die Werte von K_r ermittelt werden sollen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Auswahl einer Schrittweite von 5%-Schritten ➤ Falls ein automatisiertes Skript vorliegt, besteht auch die Möglichkeit, eine kleinere Schrittweite zu wählen 	✓	
12.	Erstellung einer Lookup-Table, für die stufenlose Verstellung des Smith-Prädiktors <ul style="list-style-type: none"> ➤ Implementierung der Lookup-Table in den Regelkreis ➤ Einfügen des ersten Wertes (K_r und V) aus Schritt 4. 	✓	✓
13.	Smith-Prädiktor langsam reintonen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Anfangs mit kleinen Einflussgraden V beginnen ➤ Falls zu große Abweichungen oder eine deutliche Verschlechterung der Regelung auftreten, Smith-Prädiktor wieder rausnehmen bzw. ausschalten ➤ Die Werte von K_r anhand der gewählten Anpassungsvorschrift aufnehmen und in die Lookup-Table laufend einfügen ➤ Alle Werte von K_r ermitteln, von $V = 0\%$ bis $V = 100\%$ anhand der selbst gewählten Schrittweite in % 	✓	

Tab. 4.12: (Fortsetzung)

Schritt	Beschreibung	MATLAB	Anlage
14.	<p>Überprüfung der Simulationsergebnisse anhand von Sprungantworten (Sprungantwort der Regelgröße, Ausgang des Smith-Prädiktors)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Die Werte der Lookup-Table anhand von unterschiedlichen Verstärkungen überprüfen ➤ Stufenlose Anpassung des Reglers anhand von unterschiedlichen Verstärkungsänderungen überprüfen ➤ Falls Unstimmigkeiten oder eine starke Verschlechterung der Regelungsergebnisse beim Reintunen des Smith-Prädiktors auftreten, die Werte in der Lookup-Table entsprechend korrigieren ➤ Wenn Modellabweichungen aufgrund von Totzeitabweichungen, Abweichungen der Zeitkonstanten etc. auftreten, Überprüfung der im Smith-Prädiktor implementierten Regelstrecke und Totzeit 	✓	
15.	Smith-Prädiktor-Schaltung und Lookup-Table in das Prozessleitsystem implementieren		✓
16.	<p>Smith-Prädiktor langsam reintunen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Anfangs mit kleinen Einflussgraden V beginnen ➤ Durchführung von mehreren Verstärkungsänderungen ➤ Falls zu große Abweichungen oder eine deutliche Verschlechterung der Regelung auftreten, Smith-Prädiktor wieder rausnehmen ➤ Die Werte von K_r anhand der gewählten Anpassungsvorschrift einfügen und falls notwendig korrigieren ➤ Wenn Modellabweichungen aufgrund von Totzeitabweichungen, Abweichungen der Zeitkonstanten etc. auftreten, Überprüfung der im Smith-Prädiktor implementierten Regelstrecke und Totzeit ➤ Anschließend die ermittelten Werte in der Lookup-Table entsprechend korrigieren ➤ Stufenlose Anpassung des Reglers anhand von unterschiedlichen Verstärkungsänderungen überprüfen 		✓
17.	<p>Falls sich die Regelstrecke im Laufe der Zeit ändert, Anpassung der Smith-Prädiktor-Schaltung</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Überprüfung und falls notwendig Korrektur des Modells der Regelstrecke innerhalb der Smith-Prädiktor-Schaltung ➤ Überprüfung und falls notwendig Korrektur des Totzeitmodells im Smith-Prädiktor ➤ Überprüfung und falls notwendig Korrektur der Werte der Lookup-Table ➤ Nach der Korrektur der Lookup-Table, stufenlose Anpassung des Reglers anhand von unterschiedlichen Verstärkungsänderungen überprüfen und falls notwendig, die Werte der Lookup-Table abermals korrigieren 		✓

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zum Einsatz von Smith-Prädiktoren in der Prozessautomation vorgestellt. Dazu wurden zunächst die Grundlagen des Regelkreises sowie des P-, I-, D-Gliedes, des Smith-Prädiktors und der Totzeit erläutert. Es sollte ein Smith-Prädiktor entworfen werden, der stufenlos in den Regelkreis eingeblendet werden kann. Dazu wurde aus den vorliegenden Darstellungsformen der Smith-Prädiktor mit innerer Rückführung für den Entwurf ausgewählt, weil diese Darstellungsform im Gegensatz zur IMC-Struktur und FSP-Struktur mithilfe von einem Gain-Element die stufenlose Verstellung des Einflussgrades der Prädiktor-Schaltung problemlos realisieren konnte.

Für den Smith-Prädiktor wurde ein Regelkreis mit einer realen Regelstrecke in Form von zwei PT_1 -Gliedern und einer Totzeit von $T_t = 10s$ verwendet, um die Eigenschaften der später eingefügten Smith-Prädiktor-Schaltung zu untersuchen. Es wurde das Simulationsprogramm MATLAB Simulink verwendet und neben dem Regelkreis auch eine graphische Bedienoberfläche für die Simulation des Regelkreises unter verschiedenen Rahmenbedingungen erstellt.

Für die Untersuchung der Performance des Smith-Prädiktors unter verschiedenen Rahmenbedingungen wurde zunächst eine Verstärkungsform für die Einstellung des Einflussgrades V des Smith-Prädiktors ausgewählt. Eine rampenförmige Verstärkungsänderung ergab nicht die gewünschten Ergebnisse, da sich aufgrund der Steigung von $m = 1$ noch Verstärkungsänderungen im ausgeschwungenen Zustand ergaben. Auch eine kurvenförmige Verstärkungsänderung in Form eines PT_1 -Gliedes lieferte nur bedingt zufriedenstellende Regelungsergebnisse, obwohl die Werte der Reglerverstärkungen sehr hoch definiert werden konnten. Die sprunghafte Verstärkungsänderung hatte im Vergleich zu den beiden anderen Verstärkungsformen die höchsten Reglerverstärkungen, die besten Anregel- und die besten Ausregelzeiten bei mittleren bis hohen Einflussgraden V des Prädiktors und wurde deswegen für die folgenden Untersuchungen ausgewählt.

Der Vergleich des Regelkreises mit und ohne Smith-Prädiktor ergab, dass die Implementierung einer Smith-Prädiktor-Schaltung deutlich bessere Regelungsergebnisse ermöglicht. Aufgrund der aggressiveren Einstellung der Regeleinrichtung wurden die Sprungantworten viel schneller, die Anregel- und Ausregelzeiten kürzer und damit alle betrachteten Größen deutlich besser. Wichtig hierbei war die richtige Parametrisierung des Reglers. Wenn zu kleine Reglerparameter verwendet wurden, konnte der Vorteil des Smith-Prädiktors nicht ausgenutzt werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden Verstärkungsänderungen der Smith-Prädiktor-Schaltung mit und ohne automatische Anpassung des Reglers simuliert. Die Ergebnisse in Form von Sprungantworten der Regelgröße und vom Ausgang der Smith-Prädiktor-Schaltung haben gezeigt, dass eine automatische situationsbedingte Anpassung der Reglerparameter zwingend notwendig ist. Für die Anpassung wurde eine Lookup-Table verwendet, die mithilfe der linearen Interpolation die stufenlose Verstellung ermöglichte. Für die Ermittlung der Werte der Lookup-Table wurde eine Anpassungsvorschrift festgelegt. Sie beinhaltete, dass bei allen in 5%-Schritten ermittelten Reglerverstärkungen eine Überschwingweite von 20% der Sprungantwort der Regelgröße garantieren sollte.

Der verwendete PI-Regler wurde mithilfe der Reglerverstärkung K_r eingestellt. Vor der Einstellung des Reglers wurde die Nachstellzeit mithilfe des Einstellverfahrens nach Chien Hrones & Reswick berechnet und als Faktor $1/T_n$ in den I-Anteil des PI-Reglers eingefügt. Bei der Anpassung der Reglerverstärkung wurde der optimale Wert von K_r mithilfe der Lookup-Table berechnet, damit die festgelegte Anpassungsvorschrift bei sämtlichen eingestellten Verstärkungen V erfüllt werden konnte. Bei einer Nichtanpassung wurde der Wert von K_r auf dem anfangs eingestellten Wert belassen, der von der anfangs eingestellten Verstärkung V des Smith-Prädiktors abhing. Die Nichtanpassung und Veränderung der Verstärkung hatte instabiles und aufschwingendes Verhalten zur Folge, was mit einer Anpassung von K_r nahezu vollständig kompensiert bzw. verhindert werden konnte.

Auch im Fall einer Störung hatte die Anpassung der Reglerparameter große Vorteile. Das Störverhalten konnte mit hohen Einflussgraden des Smith-Prädiktors verbessert werden, weil die verwendeten Regler hohe Reglerverstärkungen besaßen. Eine Verstärkungsumstellung im einschwingenden sowie ausgeschwungenen Zustand ohne Anpassung des Reglers hatte bei hohen Einflussgraden der Smith-Prädiktor-Schaltung instabiles Verhalten zur Folge. Die Anpassung der Reglerparameter war auch hier zwingend notwendig, um die bestmöglichen Regelungsergebnisse zu erzielen und instabiles aufschwingendes Verhalten zu vermeiden. Mit der Anpassung der Reglerparameter konnten gute Regelungsergebnisse erzielt werden, die deutlich besser waren, als der Regelkreis ohne Smith-Prädiktor. Je höher der Einflussgrad des Smith-Prädiktors gewählt wurde, desto besser und schneller waren die aufgenommenen Sprungantworten der Regelgröße.

Neben der Störanfälligkeit der Prädiktor-Schaltung wurde auch das vollständige Ausschalten des Prädiktors im einschwingenden Zustand sowie ausgeschwungenen Zustand mit und ohne Störgrößeneinsatz untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass auch hier die automatische situationsbedingte Anpassung der Reglerparameter zwingend notwendig war, um instabiles aufschwingendes Verhalten zu vermeiden. Erfolgte die Anpassung, waren gute Regelungsergebnisse bei sämtlichen Verstärkungseinstellungen möglich. Im Störungsfall nach dem Abschalten des Prädiktors trat instabiles Verhalten auf, wenn die Werte von K_r nicht angepasst wurden. Die automatische Anpassung verhinderte auch hier aufschwingendes Verhalten des Regelkreises.

Die Robustheit des Smith-Prädiktors gegenüber Modellabweichungen wurde anhand von Totzeitabweichungen, Abweichungen der Zeitkonstanten und Abweichungen der Streckenmodelle untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl Totzeitabweichungen als auch Abweichungen der Zeitkonstanten einen sehr negativen Effekt auf den Regelkreis hatten, vor allem bei hohen Einflussgraden der Smith-Prädiktor-Schaltung. Zunächst wurde die Lookup-Table der Verstärkungsform Sprung verwendet und anschließend anhand der festgelegten Anpassungsvorschrift angepasst.

Der Vergleich der Sprungantworten mit nichtangepasster und angepasster Lookup-Table hat gezeigt, dass auch die Anpassung die mathematischen Abweichungen innerhalb des Regelkreises nur bedingt beeinflusste, weil die Modellabweichungen bei hohen Einflussgraden des Smith-Prädiktors einfach zu groß waren und keine akzeptablen Regelungsergebnisse erzielt werden konnten. Unterschiedliche Totzeiten verursachten sehr starkes Nachschwingen des Regelgrößensprungs bei hohen Verstärkungen, was auch mit einer Anpassung der Lookup-Table nicht deutlich verbessert werden konnten.

Unterschiedliche Zeitkonstanten hatten instabiles Verhalten zur Folge. Auch hier war dieses Verhalten vor allem bei hohen Verstärkungseinflüssen V des Prädiktors zu finden. Eine Anpassung der Reglerverstärkung erzielte nicht das gewünschte Ergebnis. Der Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung sollte bei Totzeitabweichungen sowie Abweichungen der Zeitkonstanten nicht auf die volle Verstärkung von $V = 100\%$ gestellt werden, sondern bis maximal $V = 85\%$, damit auch bei vorliegenden Modellabweichungen akzeptable Regelungsergebnisse erzielt werden können. Die Regelungsergebnisse des Regelkreises mit unterschiedlichen Totzeiten und unterschiedlichen Zeitkonstanten hatte bis zu einer Verstärkung von $V = 85\%$ bessere Regelungsergebnisse als der Regelkreis ohne Smith-Prädiktor, obwohl Modellabweichungen vorlagen.

Im Fall von unterschiedlichen Streckenmodellen verursachten die großen mathematischen Abweichungen innerhalb des Regelkreises instabiles Verhalten bei nichtangepasster Reglerverstärkung und sehr stark nachschwingendes Verhalten mit angepasster Reglerverstärkung bei hohen Einflussgraden V des Prädiktors. Trotz der situationsbedingten Anpassung der Regeleinrichtung waren die Regelungsergebnisse bei hohen Verstärkungen V nicht akzeptabel. Auch hier sollte der Einflussgrad V des Smith-Prädiktors nicht über $V = 85\%$ gestellt werden, damit der Regelkreis stabil gehalten werden kann und die besten Regelungsergebnisse erzielt werden können. Auch die Totzeitannäherung in Form einer Reihenschaltung von PT_1 -Gliedern im Smith-Prädiktor-Modell ermöglichte bessere Regelungsergebnisse als der Regelkreis ohne Smith-Prädiktor, wenn der verwendete PI-Regler automatisch angepasst wurde.

Die Bewertung der Praxistauglichkeit wurde anhand eines Experteninterviews mit Dr.-Ing. Wolfgang Trümper festgestellt. Laut Herrn Dr.-Ing. Trümper ist der untersuchte stufenlos einblendbare Smith-Prädiktor mit der festgelegten Anpassungsvorschrift (Überschwingweite von 20% bei allen Verstärkungen V) und der gewählten Schrittweite von 5%-Schritten praxistauglich. Für die Implementierung müssen mehrere Schritte durchlaufen werden. Diese Schritte wurden im letzten Abschnitt 4.10.2. in chronologischer Reihenfolge aufgelistet. Die Identifizierung der Regelstrecke und der Totzeit im ersten Schritt ermöglicht die folgenden Schritte der Festlegung der Anpassungsvorschrift, die Auswahl der Darstellungsform des Smith-Prädiktors, die Erstellung der Lookup-Table, die Implementierung der Prädiktor-Schaltung, langsames Reintunen der Prädiktor-Schaltung und die Korrektur der implementierten Schaltung falls notwendig. Abschließend lässt sich feststellen, dass die Implementierung eines stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktors deutlich bessere Regelungsergebnisse ermöglicht als ein Regelkreis ohne Smith-Prädiktor und totzeitbehafteter Regelstrecke.

Die Vorhersage der Regelgröße ermöglichte beim Verwenden der Prädiktor-Schaltung bessere Anregel- sowie Ausregelzeiten, schnellere Sprungantworten sowie wesentlich höhere Reglerverstärkungen. Die größte Schwachstelle des Prädiktors in Form von Modellabweichungen kann umgangen werden, wenn das Modell der vorliegenden Prozesstrecke und die Totzeit so genau wie möglich erfasst werden. Da das ist in der Praxis kaum möglich ist, können auch bessere Regelungsergebnisse mit vorliegenden Modellabweichungen erzielt werden, wenn der Einflussgrad V des Prädiktors einen bestimmten Wert nicht überschreitet. Dieser Wert sowie der Verlauf der Funktion der Lookup-Table hängen dabei von der vorliegenden Regelstrecke und Totzeit ab.

5.2 Ausblick

Bei der Erweiterung der Untersuchungen des stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktors könnte für die Ermittlung der Reglerparameter ein automatisiertes Skript verwendet werden. Die Verwendung eines Skripts ermöglicht eine schnellere Erfassung bzw. Berechnung der Reglerparameter und bietet Erweiterungsmöglichkeiten. Zum Beispiel, wenn die Anpassungsvorschrift oder das Modell der Regelstrecke im Prädiktor-Modell verändert wurde, muss nur das Skript angepasst werden und nicht jeder Wert der Reglerverstärkung separat neu ermittelt werden. Das Skript ermittelt abhängig von der definierten Schrittweite in Prozent auf Knopfdruck alle Werte der Reglerparameter.

Für zukünftige Untersuchungen könnte der systematische Zusammenhang zwischen der Reglerverstärkung K_r und dem Einflussgrad V des Smith-Prädiktors ermittelt werden. Dazu sollten verschiedene Regelstrecken verwendet werden um herauszufinden, wie sich die Lookup-Table gestaltet und ob es überhaupt eine Systematik gibt. Dazu könnten verschiedene Typen von Regelstrecken z.B. 3., 4. oder 5. Ordnung mit unterschiedlichen Verhältnissen zwischen den Verzögerungszeiten verwendet werden. Die Generierung des Zusammenhangs sollte anhand dieser Streckenmodelle erfolgen mit dem Ziel, eine Lookup-Table oder ein automatisiertes Skript zu entwerfen, die im Idealfall für alle Regelstrecken einsetzbar sind. Dazu muss aber zunächst der systematische Zusammenhang zwischen der Reglerverstärkung und dem Einflussgrad V der Smith-Prädiktor-Schaltung gefunden werden. Er ist, wie die Untersuchungen im ersten Teil dieser Arbeit gezeigt haben nicht linear oder quadratisch, sondern eher kubisch oder exponentiell. Wenn es einen systematischen Zusammenhang zwischen K_r und V gibt, könnte dieser anhand einer Gleichung beschrieben und in das automatisierte Skript eingefügt werden, um die Ermittlung der Reglerparameter so einfach wie möglich zu gestalten.

Eine weitere Erweiterungsmöglichkeit der Untersuchungen ist der Einsatz von Regelstrecken, die nicht direkt Totzeitstrecken sind, sondern Strecken mit Verzögerungen höherer Ordnung. Innerhalb der Untersuchungen könnte ein Zustandsregler ermöglicht werden und auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen die Entscheidung getroffen werden, ob das Themengebiet des stufenlosen Smith-Prädiktors weiter untersucht werden soll. Insgesamt ist damit zu rechnen, dass sich die Qualität der Regelungen bei der Implementierung eines stufenlos einblendbaren Smith-Prädiktors weiter verbessern wird, wenn die Untersuchungen vor allem im Bezug auf den systematischen Zusammenhang von K_r und V fortgeführt werden.

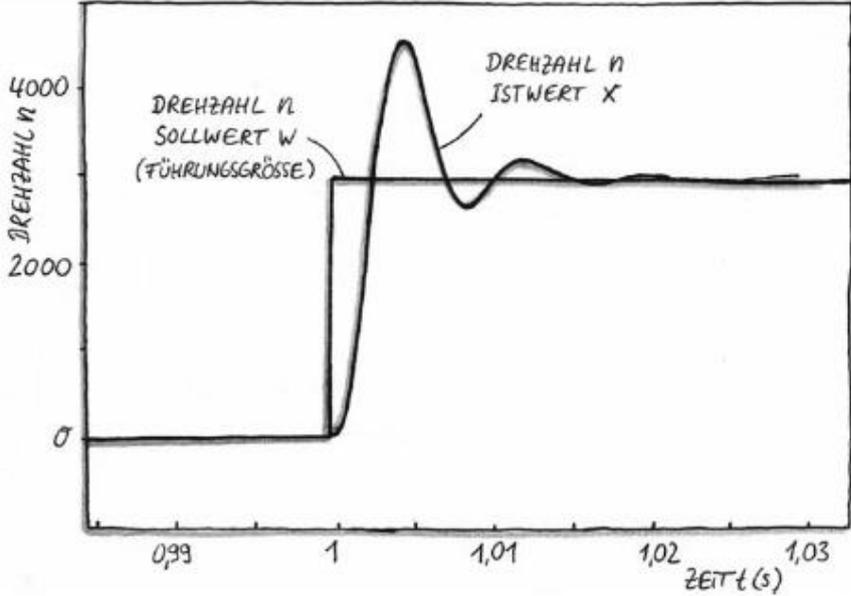
VI. Literaturverzeichnis

- [1] J. Lunze, *Regelungstechnik 1*, 12. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2020.
- [2] H. Unbehauen, *Regelungstechnik 1*, 15. Auflage, Braunschweig/ Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 2007.
- [3] K.D. Tieste und O. Romberg, *Keine Panik vor Regelungstechnik!*, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2012.
- [4] L. Desborough und R. Miller, *Increasing customer value of industrial control performance monitoring – Honeywell's experience*, 6th International Conference on Chemical Process Control, New York, AIChE Symp., Series 326.
- [5] R. Dittmar, *Advanced Process Control*, Oldenburg: De Gruyter Verlag, 2017.
- [6] W. Schneider und B. Heinrich, *Praktische Regelungstechnik*, 4. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2017.
- [7] J. Unger, *Einführung in die Regelungstechnik, Grundlagen mit Anwendungen aus Ingenieurs- und Wirtschaftswissenschaften*, 3. Auflage, Braunschweig/ Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 2004.
- [8] S. Zacher und M. Reuter, *Regelungstechnik für Ingenieure*, 15. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2017.
- [9] R. Chang und C. Chen, *Using Microgripper in Development of Automatic Adhesive Glue Transferring and Binding Microassembly System*, Volume 2 Nummer 1, Scientific Reseacher Publishing Inc., 2010.
- [10] J.E. Normey-Rico und E.F. Camacho, *Control of Dead time Processes*, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [11] B.M. Lima und D.M. Lima und J.E. Normey-Rico, *A robust predictor for dead-time systems based on the Kalman filter*, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Seiten 24-29, Januar 2018.
- [12] D. Abel, *Umdruck zur Vorlesung Regelungstechnik und Ergänzungen (Höhere Regelungstechnik)*, 33. Auflage, Aachen: Verlaghaus Mainz, 2009.

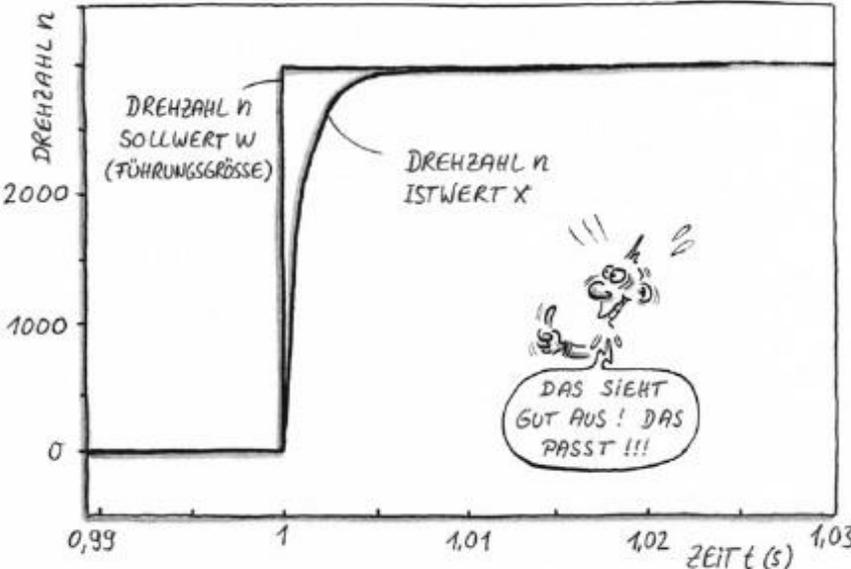
VII. Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Sprungantwort von einem CD-Regelkreis mit PI-Regler (Quelle:/3, S.147/)	163 -
Anlage 2: Sprungantwort von einem CD-Regelkreis mit PID-Regler (Quelle:/3, S.147/)	163 -
Anlage 3: Subsystem zur Berechnung der betrachteten Größen	164 -
Anlage 4: Ermittelte Werte für die Verstärkungsformen Sprung, Rampe u. PT_1 -Glied	164 -
Anlage 5: Ermittelte Werte der Regelkreise mit und ohne Totzeitabweichungen	165 -
Anlage 6: Ermittelte Werte der Regelkreise mit und ohne Zeitkonstantenabweichungen	166 -
Anlage 7: Subsystem des Totzeitmodells mit Reihenschaltung von PT_1 -Gliedern	166 -
Anlage 8: Ermittelte Werte der Regelkreise mit und ohne Totzeitannäherung	167 -
Anlage 9: Skript des Experteninterviews mit Dr.-Ing. Wolfgang Trümper	168 -
Anlage 10: Stufenlose Implementierung anhand von quadratischen Funktionen	175 -

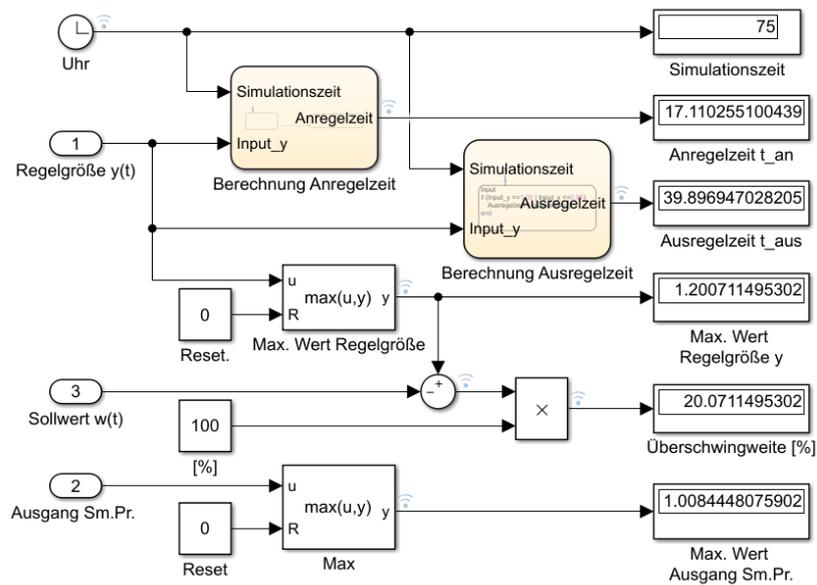
**Anlage 1: Sprungantwort von einem CD-Regelkreis mit PI-Regler
(Quelle:/3, S.147/)**



**Anlage 2: Sprungantwort von einem CD-Regelkreis mit PID-Regler
(Quelle:/3, S.147/)**



Anlage 3: Subsystem zur Berechnung der betrachteten Größen



Anlage 4: Ermittelte Werte für die Verstärkungsformen Sprung, Rampe u. PT₁-Glied

V [%]	Sprung			PT ₁ -Glied			Rampe		
	K _r	t _{an} [s]	t _{aus} [s]	K _r	t _{an} [s]	t _{aus} [s]	K _r	t _{an} [s]	t _{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5
5	0,79	25,9	68,4	0,79	25	68,4	0,81	24,8	67,8
10	0,823	25,6	67,5	0,823	24,7	67,5	0,85	24,7	66,8
15	0,857	25,2	66,4	0,857	24,4	66,2	0,865	24,7	66,1
20	0,9	24,8	65,1	0,9	24	65	0,9	24,7	65,9
25	0,943	24,4	63,9	0,943	23,6	64,1	0,95	24,7	64,9
30	0,992	24	62,6	0,992	23,2	62,7	0,992	24,7	64,3
35	1,05	23,6	61,1	1,047	23	61,4	1,05	24,7	63,6
40	1,112	23,2	59,7	1,11	22,3	59,8	1,112	24,7	62,3
45	1,185	22,6	58,1	1,185	21,8	58,1	1,112	24,7	62,3
50	1,27	22,1	56,6	1,265	21,3	56,8	1,112	24,7	62,3
55	1,37	21,5	54,8	1,36	21	54,8	1,112	24,7	62,3
60	1,485	21	53	1,485	20,3	52,9	1,112	24,7	62,3
65	1,635	20,3	50,8	1,625	19,7	50,9	1,112	24,7	62,3
70	1,815	19,6	48,5	1,81	19	48,6	1,112	24,7	62,3
75	2,06	18,8	46,1	2,045	18,3	46	1,112	24,7	62,3
80	2,37	17,9	43,4	2,357	17,5	43,1	1,112	24,7	62,3
85	2,79	17,1	40,1	2,76	16,7	40,2	1,112	24,7	62,3
90	3,3	16,3	36,7	3,215	16	36,6	1,112	24,7	62,3
95	4	15,6	32,7	3,825	15,3	33	1,112	24,7	62,3
100	4,81	15	29,1	4,47	14,8	29,8	1,112	24,7	62,3

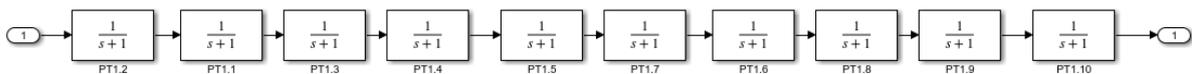
Anlage 5: Ermittelte Werte der Regelkreise mit und ohne Totzeit- abweichungen

V [%]	$T_{t_Real} = T_{t_SmPr}$			$T_{t_Real} > T_{t_SmPr}$			$T_{t_Real} < T_{t_SmPr}$		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5
5	0,79	25,9	68,4	0,783	25,1	68,9	0,795	25,9	68,5
10	0,823	25,6	67,5	0,81	24,7	^^	0,833	25,1	66,8
15	0,857	25,2	66,4	0,84	24,6	67,3	0,875	25	65,6
20	0,9	24,8	65,1	0,87	24,3	66,4	0,922	24,8	63,6
25	0,943	24,4	63,9	0,902	24,1	65,7	0,977	24,2	61,9
30	0,992	24	62,6	0,94	23,8	64,8	1,037	23,6	60,2
35	1,05	23,6	61,1	0,979	23,5	64,1	1,105	23,1	58,1
40	1,112	23,2	59,7	1,025	23,2	63,2	1,18	22,3	55,9
45	1,185	22,6	58,1	1,075	22,9	62,3	1,265	22	53,8
50	1,27	22,1	56,6	1,13	22,7	61,5	1,361	21,4	52,1
55	1,37	21,5	54,8	1,19	22,3	60,3	1,47	21	49,7
60	1,485	21	53	1,265	21,9	59,3	1,6	20,6	47,9
65	1,635	20,3	50,8	1,345	21,4	58,4	1,75	19,7	45,3
70	1,815	19,6	48,5	1,445	21	56,8	1,92	19,8	43,2
75	2,06	18,8	46,1	1,56	20,6	55,6	2,135	19	50
80	2,37	17,9	43,4	1,7	20,2	54,2	2,4	18,6	67,9
85	2,79	17,1	40,1	1,88	19,5	52,9	2,8	17,3	85,7
90	3,3	16,3	36,7	2,135	18,6	51,2	3,25	16,8	112,8
95	4	15,6	32,7	2,5	17,8	49,1	3,7	16,5	138,5
100	4,81	15	29,1	2,9	17	47	4,3	15,1	221,17

Anlage 6: Ermittelte Werte der Regelkreise mit und ohne Zeitkonstantenabweichungen

V [%]	$T_{D_Real} = T_{D_SmPr}$			$T_{D_Real} > T_{D_SmPr}$			$T_{D_Real} < T_{D_SmPr}$		
	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]	K_r	t_{an} [s]	t_{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5
5	0,79	25,9	68,4	0,797	25,9	68,5	0,79	25,9	68,5
10	0,823	25,6	67,5	0,842	25,5	67,3	0,823	25,5	66,9
15	0,857	25,2	66,4	0,89	25,3	66,2	0,86	25,1	65,2
20	0,9	24,8	65,1	0,945	24,4	64,5	0,9	24,8	64
25	0,943	24,4	63,9	1,009	24	62,7	0,943	24,4	61,9
30	0,992	24	62,6	1,0895	23,6	61	0,992	23,7	73,4
35	1,05	23,6	61,1	1,18	22,7	59,3	1,04	23,5	72,1
40	1,112	23,2	59,7	1,285	22,3	56,8	1,095	22,8	70
45	1,185	22,6	58,1	1,42	21,5	54,6	1,159	22,4	68,3
50	1,27	22,1	56,6	1,58	20,6	51,7	1,227	22	66,6
55	1,37	21,5	54,8	1,785	20,2	46,6	1,297	21,9	64,8
60	1,485	21	53	2,04	19,4	40,6	1,375	21,4	63,2
65	1,635	20,3	50,8	2,39	18	35,9	1,465	21	61,5
70	1,815	19,6	48,5	2,99	17,2	41,1	1,56	20,6	59,7
75	2,06	18,8	46,1	4,35	15,5	55,5	1,67	19,8	83,6
80	2,37	17,9	43,4	5,9	14,7	86,1	1,79	19,5	82,3
85	2,79	17,1	40,1	6	14,5	85,7	1,92	19,3	104
90	3,3	16,3	36,7	6	14,4	108,7	2,09	18,5	124,5
95	4	15,6	32,7	6	14,8	155,5	2,17	18,3	122,8
100	4,81	15	29,1	6	28,5	347,6	2,22	18	120,6

Anlage 7: Subsystem des Totzeitmodells mit Reihenschaltung von PT_1 -Gliedern



Anlage 8: Ermittelte Werte der Regelkreise mit und ohne Totzeit- annäherung

Sm.Pr. mit Totzeitglied Sm.Pr. mit Totzeitmodell						
V [%]	K _r	t _{an} [s]	t _{aus} [s]	K _r	t _{an} [s]	t _{aus} [s]
0	0,76	26,3	69,5	0,76	26,3	69,5
5	0,79	25,9	68,4	0,787	25,9	68,2
10	0,823	25,6	67,5	0,821	25,5	67,1
15	0,857	25,2	66,4	0,854	25,2	66,2
20	0,9	24,8	65,1	0,89	24,8	65
25	0,943	24,4	63,9	0,932	24,4	63,8
30	0,992	24	62,6	0,979	24	62,2
35	1,05	23,6	61,1	1,028	23,5	60,9
40	1,112	23,2	59,7	1,086	23,1	59,7
45	1,185	22,6	58,1	1,15	22,7	58,1
50	1,27	22,1	56,6	1,22	22,4	56,6
55	1,37	21,5	54,8	1,3	22	55,1
60	1,485	21	53	1,395	21,5	53,3
65	1,635	20,3	50,8	1,5	21	51,7
70	1,815	19,6	48,5	1,635	20,4	49,9
75	2,06	18,8	46,1	1,8	19,8	47,8
80	2,37	17,9	43,4	2,01	19,1	45,8
85	2,79	17,1	40,1	2,3	18,3	43,8
90	3,3	16,3	36,7	2,8	17,1	48,7
95	4	15,6	32,7	3,75	15,8	46,6
100	4,81	15	29,1	4,65	15,1	45

Anlage 9: Skript des Experteninterviews mit Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Experteninterview (ausformulierte Mitschrift) mit Dr.-Ing. Wolfgang Trümper 15. Juni 2022

- Christian Baldus Die exakte Ermittlung der vorliegenden Prozessstrecke ist in der Praxis kaum möglich, wie nahe kommt man an das tatsächlich vorliegende Modell heran?
- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Man kommt ca. 80% an die vorliegende Prozessstrecke heran. 80% bedeutet, wenn man das erfasste Modell verwendet um eine Vorhersage der Regelgröße zu machen, dann liegt man um ca. 20% daneben.
- Christian Baldus Welche Art von Modellabweichungen treten in der Praxis bei der Regelung von Prozessen am häufigsten auf?
- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Am häufigsten kommen Abweichungen durch Nichtlinearitäten vor z.B. Sättigungen oder Anschläge bzw. scharfe Begrenzungen vor. Sättigungen lassen sich beispielsweise beim Öffnen eines Ventils finden. Wird das Ventil geöffnet, erhöht sich der Druck bzw. der Fluss des Mediums was geregelt wird aber im Laufe der Zeit kommt man in den Bereich des Versorgungsdruckes und dann wird der Bereich der Sättigung erreicht.
Vor allem Anschläge haben einen sehr negativen Effekt. Wenn das zu regelnde Ventil vollständig geöffnet ist und nicht weiter aufgemacht werden kann, ist plötzlich Schluss. Es kommt auch häufiger vor, dass die Modellordnung nicht stimmt. Es wird beispielsweise eine Prozessstrecke erster oder zweiter Ordnung angenommen, aber die tatsächlich vorliegende Prozessstrecke hat ein Modell höherer Ordnung z.B. dritter Ordnung.
- Christian Baldus Gibt es auch andere Möglichkeiten als den Smith-Prädiktor die vorliegende Totzeit zu „kompensieren“?
- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Ja, es gibt weitere Möglichkeiten. Es kann versucht werden, einen anderen Messort zu finden z.B. bei Totzeiten die durch Transportwege auftreten.

Das Messen an einer anderen Stelle hat den Vorteil, dass die Änderung der Regelgrößen früher erfasst werden kann. Mit der entsprechenden Verzögerung bzw. Dynamik könnte eine Feed-Forward-Control, eine Störgrößenaufschaltung verwendet werden um eine gute Kompensation zu erreichen. Wenn der entsprechende Messort gefunden wird, ist die Verwendung einer Störgrößenaufschaltung sogar besser, als die Verwendung eines Smith-Prädiktors. Die Verwendung einer Feed-Forward-Control ist nicht immer möglich.

Christian Baldus

Werden Smith-Prädiktoren oft eingesetzt?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Das kommt auf das vorliegende System an. Smith-Prädiktoren werden wie Feed-Forward-Controls sehr selten eingesetzt. Es wird eher ein Standard-Regler verwendet und die resultierenden Ergebnisse in Kauf genommen. Nur wenn die Regelgüte schlecht bzw. nicht gut genug ist, weil durch mangelnde Qualität zusätzliche Kosten verursacht werden oder eine Gefahr aufgrund der schlechten Regelung besteht, dann wird ein Smith-Prädiktor eingesetzt.

Christian Baldus

Gibt es Lookup-Table-Blöcke in Prozessleitsystemen?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Ja, es gibt Lookup-Table-Blöcke in Prozessleitsystemen. Es gibt vielleicht auch ein Prozessleitsystem wo diese Art von Blöcken nicht enthalten sind, aber Lookup-Table-Blöcke gehören eigentlich zum Standard.

In meiner Firma „Dow Chemicals“ werden Lookup-Tables verwendet die linear interpolieren. Sie werden auch „piecewise linear function“ genannt. Wenn dieser Zusammenhang eineindeutig ist, dann funktioniert die Lookup-Table in beide Richtungen. Das bedeutet, es kann der X-Wert eingegeben werden und der Y-Wert wird berechnet, oder umgekehrt. Wenn der Zusammenhang nicht eineindeutig ist und die Lookup-Table in beide Richtungen verwendet wird, ist das Ergebnis nicht wirklich zu gebrauchen. Solange die Stützstellen so gesetzt werden, dass es einen in beide Richtungen eineindeutigen Zusammenhang gibt, kann die Lookup-Table in beide Richtungen verwendet werden.

Christian Baldus

Wo werden Lookup-Table-Blöcke typischerweise eingesetzt?

- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Sie werden bei nahezu allen Arten von Linearisierungen eingesetzt. Die Verwendung einer Lookup-Table bei Linearisierungen ist häufig zu finden. Dabei können z.B. Messgrößen linearisiert werden, wenn die gemessene Größe in einem nichtlinearen Zusammenhang mit der zu regelnden Größe steht.
- Es können auch Stellgrößen linearisiert werden. Ein Beispiel ist eine nichtlinear vorliegende Kennlinie eines Ventils. Es wird aber ein linear regelbarer Zusammenhang beim Ventil gewünscht. Das ist ein ganz typischer Anwendungsfall einer Lookup-Table. In diesem Anwendungsfall ist es von Vorteil, wenn die Berechnungen der Lookup-Table in beide Richtungen verwendet werden können. Wenn ein Ventil angesteuert wird, will man eine lineare Abhängigkeit zu dem Kv-Wert haben. Das ist die Vorwärtsberechnung bzw. die Vorwärts-Linearisierung. Man benötigt die Berechnung aber auch rückwärts. Zum Beispiel, wenn das Ventil in den Handmodus geschaltet wird, dann muss der verwendete Regler zurückinformiert werden, was für ein Kv-Wert manuell am Ventil eingestellt wurde. Das ist wichtig, damit eine stufenlose Umschaltung des Reglers ermöglicht wird. Diese Kennlinien sind immer in beide Richtungen eindeutig. Der Kv-Wert entspricht dem Wasserdurchfluss durch ein Ventil (in m³/h) bei einer Druckdifferenz von etwa einem Bar.
- Ein weiterer Anwendungsfall sind Sollwert-Linearisierungen. Beispielsweise bei Umrechnungen der Füllstandshöhe auf das Volumen bei Behältern. Behälter haben öfters keinen gleichbleibenden Querschnitt und deswegen ist eine einfache proportionale Umrechnung eher die Ausnahme. Es wird kein analytischer Zusammenhang, sondern eine Lookup-Table verwendet.
- Christian Baldus Ist die stufenlose Implementierung mithilfe einer Lookup-Table in einem Prozessleitsystem möglich?
- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Ja, die stufenlose Implementierung anhand einer Lookup-Table ist möglich und wird auch in der Praxis häufig eingesetzt.
- Christian Baldus Ist die Wahl einer Überschwingweite von 20% beim Ausregelvorgang des Führungsgrößensprungs in Ihren Augen ein gutes Einstellungskriterium?

- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Ja, die gewählte Anpassungsvorschrift anhand einer Überschwingweite von 20% ist ein gutes Kriterium. Die Überschwingweite von 20% wird für die Ermittlung der entsprechenden Werte von K_r verwendet.
- Christian Baldus Welche Schritte müssten erfolgen, damit die Implementierung am effektivsten vonstattengeht?
- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Meistens ist schon ein Regler vorhanden und es wird bereits geregelt. Wenn die Regelgüte nicht ausreichend bzw. schlecht ist und eine Totzeit vorliegt, könnte ein Smith-Prädiktor eingesetzt werden.
Zunächst muss die vorliegende Totzeit und das Streckenverhalten identifiziert werden und anschließend muss eine Softwareänderung vorgenommen werden. Wurde die Prozessstrecke identifiziert, müssen die einzelnen Reglerverstärkungen für die einzelnen Einflussgrade der Smith-Prädiktor-Schaltung ermittelt werden. Die Applikationssoftware muss dann so verändert werden, dass der Smith-Prädiktor implementiert werden kann. Dann sollte der Smith-Prädiktor langsam reingetuned werden und falls notwendig Korrekturen an der Lookup-Table oder an der Smith-Prädiktor-Schaltung vorgenommen werden.
- Christian Baldus Stellt der Endwert der Smith-Prädiktor-Schaltung von 0 ein Problem für die Implementierung da?
- Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Der Smith-Prädiktor kann als eine Ergänzung zum Standard-Regler angesehen werden. Die Regelgröße wird mithilfe des Prädiktors verändert und der Regler sieht eine modifizierte bzw. vorhergesagte Regelgröße.
In meinen Augen ist der Endwert von 0 nicht wirklich ein Problem aber nicht ideal, weil der Regler als Regelgröße nicht mehr die eigentliche Prozessgröße, sondern die modifizierte Prozessgröße als Information zurückgeleitet bekommt. Das ist ein Nachteil aus Sicht der Operator bzw. der Anlagenfahrer, die mit dem Regelkreis umgehen müssen. Aber ich denke, diesen Nachteil lässt sich nicht ohne weiteres umgehen.
In der Visualisierung müsste der tatsächliche Messwert angezeigt werden und dann im Regler-Faceplate eine Warneinrichtung oder einen Hinweis eingefügt werden, dass

der angezeigte Wert nur ein Rechenwert und keine real gemessene Größe ist.

Wenn ein komplexeres Reglermodul vorhanden ist, das den Smith-Prädiktor bereits enthält, dann könnte der natürlich auch in seinem Faceplate die richtige Regelgröße anzeigen und nicht die modifizierte Regelgröße. Das wäre von Vorteil aber mit den jetzt vorliegenden Standardmitteln ist das leider nicht möglich. Idealerweise würde man den Smith-Prädiktor mit dem Standard-Reglermodul in ein neues Modul einsetzen bzw. ein neues Modul erstellen. Dieses neue Modul würde auch ein neues Faceplate bekommen und enthielt einen Standard-Regler und die Smith-Prädiktor-Struktur. Dann könnte ein neues Faceplate zur Verfügung gestellt werden, das genauso aussieht wie das schon vorhandene Faceplate mit dem Unterschied, dass auf die Smith-Prädiktor-Schaltung hingewiesen wird. Der Vorteil wäre, dass der Operator wie zuvor die echte Regelgröße sehen würde.

Christian Baldus

Welche Anforderungen haben Sie als Ingenieur an die Implementierung des Smith-Prädiktors?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Der Smith-Prädiktor sollte eine Verbesserung des Regelfalls ermöglichen. Die Implementierung des Smith-Prädiktors sollte das aggressivere Tunen des verwendeten Reglers und damit wird ein besseres Führungsverhalten ermöglichen. Außerdem sollte ein besseres Störverhalten erzielt werden.

Christian Baldus

Warum ist in ihren Augen eine stufenlose Verstellung des Einflussrades der Smith-Prädiktor-Schaltung wichtig?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Eine stufenlose Verstellung der Smith-Prädiktor-Schaltung ist für die Inbetriebnahme sehr wichtig.
Wenn die vorliegende Prozesstrecke identifiziert wurde und nicht genau feststeht, wie gut die identifizierte Strecke zu der tatsächlichen Prozesstrecke passt und man auch nicht weiß, wie gut der Smith-Prädiktor arbeitet ist es essentiell, den Prädiktor im Notfall auch wieder rausnehmen zu können. Außerdem kann es vorkommen, dass das erfasste Modell der vorliegenden Regelstrecke ungenau erfasst wurde und nachgebessert werden muss.

Außerdem liegen immer verschiedene Arbeitspunkte vor z.B. beim Hochfahren der Anlage, beim Produktwechsel oder bei einer Änderung des Durchsatzes der Anlage vor. Wenn der Prädiktor in einer bestimmten Situation gut funktioniert kann es vorkommen, dass der Prädiktor im Laufe der Zeit aufgrund von Veränderungen des Arbeitspunktes nicht mehr die gewünschten Ergebnisse liefert, weil Modellabweichungen der Streckenmodelle entstehen. Dann muss man in der Lage sein, den Smith-Prädiktor stufenlos zu verstellen, z.B. wenn die Regelung trotz Smith-Prädiktor plötzlich schlechter ist als vorher ohne Smith-Prädiktor. Dann muss der Smith-Prädiktor rausgenommen und die Modelle angepasst werden und anschließend stufenlos reingetuned werden, um die Regelungsergebnisse wieder zu verbessern.

Außerdem kann die Anlage nicht für die Implementierung abgestellt werden, nur um den Smith-Prädiktor einzufügen. Die Implementierung muss im laufenden Betrieb erfolgen. Die stufenlose Verstellung des Smith-Prädiktors ist sehr wichtig, weil wenn die neu eingefügte Schaltung nur 100% ein oder vollständig ausschalten kann, weiß man vorher nicht, wie gut die Wirkung des Prädiktors wirklich ist. Wenn der Prädiktor einfach zu 100% in die Regelung eingebunden wird, können Effekte auftreten, die nicht mehr ausgegelt werden können.

Christian Baldus

Welche Schrittweite würden Sie für Ermittlung der jeweiligen Werte von K_r bezogen auf die eingestellte Verstärkung V auswählen?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Eine Schrittweite von 5% ist vorteilhaft. Wenn zur Ermittlung der entsprechenden Reglerverstärkungen, die abhängig vom eingestellten Einflussgrad der Smith-Prädiktor-Schaltung ist ein automatisiertes Skript verwendet wird, können auch 1%-Schritte sinnvoll sein.

Christian Baldus

Welche Risiken sehen Sie bei einem stufenlosen Smith-Prädiktor?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper

Wenn große Modellabweichungen innerhalb des Regelkreises vorliegen kann es vorkommen, dass die Regelung mit Smith-Prädiktor schlechter ist als zuvor ohne Smith-Prädiktor.

Auch bei einem Wechsel des Arbeitspunktes bzw. der Betriebsweise der Anlage kann es sein, dass der Smith-Prädiktor nicht mehr gut funktioniert. Der Regler ist mit Smith-Prädiktor viel aggressiver eingestellt und wenn die Modelle nicht mehr zueinander passen, kann das die Regelung deutlich verschlechtern. Dieses Risiko kann aber mit der stufenlosen Verstellung des Einflussgrades der Smith-Prädiktor-Schaltung reduziert werden, indem der Einflussgrad bei einer schlechteren Regelung runtergestellt werden kann. Dann wird wieder ein Zustand erreicht, wo die Regelung vorher typischerweise schon länger funktioniert.

Christian Baldus Welche Voraussetzungen müssen ihrer Meinung nach vorliegen, damit eine stufenlose Implementierung des Smith-Prädiktors sinnvoll ist?

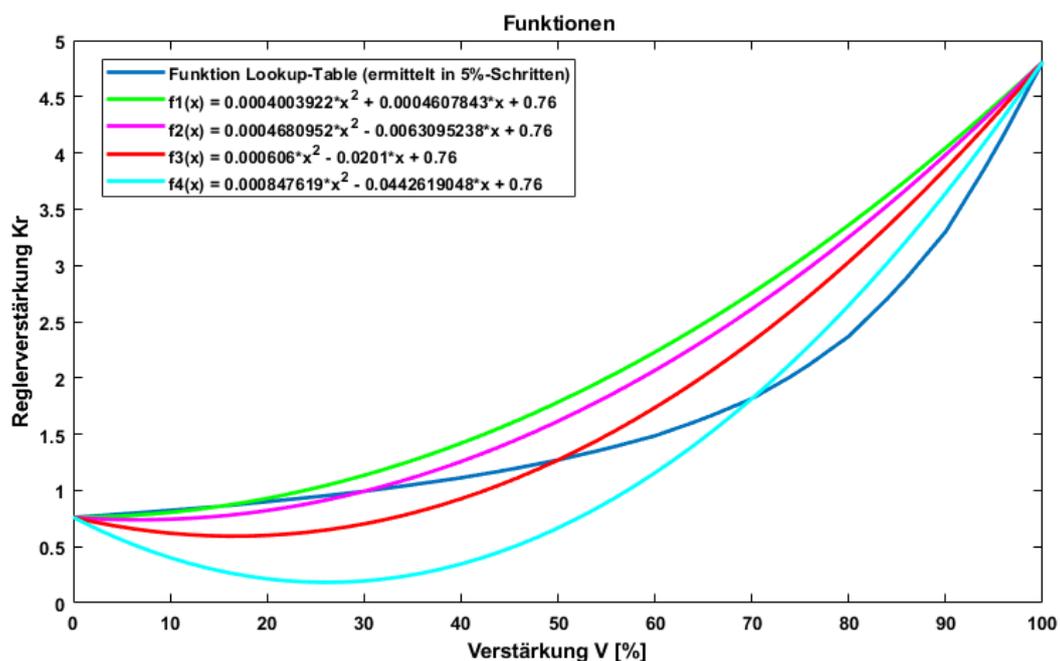
Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Zunächst muss ein Problem vorliegen was gelöst werden muss. Es muss die Aussicht bestehen, dass das Regelverhalten durch die Implementierung von zusätzlichen Schaltungen verbessert werden kann. Außerdem sollte die Implementierung zu irgendeinem Nutzen führen, beispielsweise durch einen höheren Produktdurchsatz, eine höhere Produktqualität oder durch Einsparung von Energie.

Christian Baldus Ist der in dieser Arbeit untersuchte stufenlos einblendbarer Smith-Prädiktor praxistauglich und gibt es für zukünftige Untersuchungen Erweiterungsmöglichkeiten?

Dr.-Ing. Wolfgang Trümper Der untersuchte stufenlos einblendbarer Smith-Prädiktor ist praxistauglich. Für zukünftige Untersuchungen könnte der Einsatz eines Smith-Prädiktors für Regelstrecken untersucht werden, die nicht direkt Totzeitstrecken sind, sondern Strecken mit Verzögerungen höherer Ordnung. Vielleicht wird innerhalb der Untersuchungen ein Zustandsregler ermöglicht. Auf Basis dieser zusätzlichen Untersuchungen könnte entschieden werden, ob es sinnvoll ist, das Themengebiet weiter zu untersuchen.

Anlage 10: Stufenlose Implementierung anhand von quadratischen Funktionen

Ermittlung von quadratischen Funktionen anhand von drei Punkten. Zwei Punkte, die Punkte P_1 (0 | 0,76) und P_3 (100 | 4,81) wurden von allen Funktionen geschnitten. P_1 ist der Anfangspunkt bei ausgeschalteten ($V = 0\%$) und P_3 der Punkt bei vollständig angestelltem Prädiktor ($V = 100\%$). Beide Punkte wurden für alle betrachteten Funktionen verwendet und der dritte Punkt jeweils variiert. Die jeweiligen Y-Werte sind die dazugehörenden und experimentell ermittelten Reglerverstärkungen. Der Punkt P_2 , der zwischen den Punkten P_1 und P_3 liegt, wurde variiert, um die möglichst „ideale“ Funktion zu erhalten. Diese Funktion sollte möglichst der Funktion der Lookup-Table (blaue Kurve in der unteren Abbildung) ähneln.



Zwei Funktionen hatten die „geringsten“ Abweichungen zur Funktion der Lookup-Table. Die erste anhand der Punkte P_1 (0 | 0,76) P_2 (30 | 0,992) und P_3 (100 | 4,81) ermittelte Funktion lautet:

$$f(x) = 0,0004680952 \cdot x^2 - 0,0063095238 \cdot x + 0,76 \quad (\text{A.1})$$

Die zweite anhand der Punkte P_1 (0 | 0,76) P_2 (50 | 1,27) und P_3 (100 | 4,81) ermittelte Funktion lautet:

$$f(x) = 0,000606 \cdot x^2 - 0,0201 \cdot x + 0,76 \quad (\text{A.2})$$

Die beiden ermittelten Funktionen (A.1) (pink) und (A.2) (rot) haben einen in bestimmten Bereichen ähnlichen aber auch teilweise deutlich abweichenden Verlauf, wenn beide Funktionen mit der blauen Sprungantwort der Lookup-Table verglichen werden. Die X-Achse ist die Verstärkung V des Smith-Prädiktors und die Y-Achse die dazugehörige Reglerverstärkungen K_r . Der gesuchte quadratische Zusammenhang zwischen V und K_r ermöglicht nur eine bedingte Beschreibung der Funktion der Lookup-Table.

Der pinke Verlauf der Funktion der Gleichung (A.1) hat anfangs bis $t = 35s$ einen sehr ähnlichen Verlauf wie die blaue Sprungantwort. Im weiteren Verlauf entstehen aber deutliche Differenzen der Reglerverstärkungen zwischen diesen beiden Kurven. Auch die rote Sprungantwort der Gleichung (A.2) hat einen anderen Verlauf, als die blaue Sprungantwort.

Werden beide Gleichungen in einem Regelkreis implementiert und anhand von unterschiedlichen Verstärkungen verglichen konnte festgestellt werden, dass zwar das Regelungsergebnis deutlich verbessert wird, aber die Einhaltung der Toleranzgrenze der Amplitude von $1,2 \pm 5\%$ nur bedingt eingehalten werden konnte.

Im Bereich von $V = 0\%$ bis $V = 40\%$ hatte die pinke Sprungantwort bessere Regelungsergebnisse als die rote Funktion, die erst ab $V > 40\%$ eine gute Regelung ermöglicht. Die besten Regelungsergebnisse hatte der Regelkreis mit implementierter Lookup-Table. Der Versuch, die stufenlose Implementierung anhand von quadratischen Funktionen zu realisieren erzielte nicht die gewünschten Ergebnisse. Deswegen wurde die Implementierung anhand der Lookup-Table gewählt.

Die Berechnungen der quadratischen Funktionen erfolgte mit „Mathematica“. Die Berechnung der Funktion (A.1) und (A.2) ist im Folgenden zu finden.

Eingabe der drei Punkte (x1 | y1), (x2 | y2) und (x3 | y3) :

```
In[20]:= x1 = 0  
x2 = 30  
x3 = 100  
y1 = 0.76  
y2 = 0.992  
y3 = 4.81
```

```
Out[20]= 0
```

```
Out[21]= 30
```

```
Out[22]= 100
```

```
Out[23]= 0.76
```

```
Out[24]= 0.992
```

```
Out[25]= 4.81
```

Berechnung der Parameter der quadratischen Funktion :

```
In[26]:= Solve[{a x1^2 + b x1 + c == y1 && a x2^2 + b x2 + c == y2 && a x3^2 + b x3 + c == y3}, {a, b, c}]  
|löse
```

```
Out[26]= {{a -> 0.000468095, b -> -0.00630952, c -> 0.76}}
```

```
In[28]:= a = 0.00046809523809523805`  
b = -0.006309523809523805`  
c = 0.76`
```

```
Out[28]= 0.000468095
```

```
Out[29]= -0.00630952
```

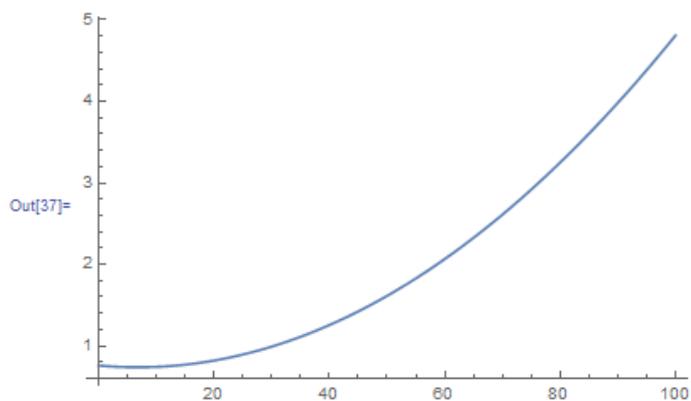
```
Out[30]= 0.76
```

```
In[31]:= f(x) = a*x^2 + b*x + c
```

```
Out[31]= 0.76 - 0.00630952 x + 0.000468095 x^2
```

Grafische Darstellung der Funktion :

```
In[37]:= Plot[0.76 - 0.00630952 x + 0.000468095 x^2, {x, 0, 100}]  
|stelle Funktion graphisch dar
```



Eingabe der drei Punkte (x1 | y1), (x2 | y2) und (x3 | y3):

```
In[12]:= x1 = 0  
         x2 = 50  
         x3 = 100  
         y1 = 0.76  
         y2 = 1.27  
         y3 = 4.81
```

```
Out[12]= 0
```

```
Out[13]= 50
```

```
Out[14]= 100
```

```
Out[15]= 0.76
```

```
Out[16]= 1.27
```

```
Out[17]= 4.81
```

Berechnung der Parameter der quadratischen Funktion :

```
In[18]:= Solve[{a x1^2 + b x1 + c == y1 && a x2^2 + b x2 + c == y2 && a x3^2 + b x3 + c == y3}, {a, b, c}]  
         |löse
```

```
Out[18]= {{a -> 0.000606, b -> -0.0201, c -> 0.76}}
```

```
In[38]:= a = 0.000606`  
         b = -0.0201`  
         c = 0.76`
```

```
Out[38]= 0.000606
```

```
Out[39]= -0.0201
```

```
Out[40]= 0.76
```

```
In[41]:= f(x) = a*x^2 + b*x + c
```

```
Out[41]= 0.76 - 0.0201 x + 0.000606 x^2
```

Grafische Darstellung der Funktion :

```
In[43]:= Plot[0.76 - 0.0201 x + 0.000606 x^2, {x, 0, 100}]  
         |stelle Funktion graphisch dar
```

