Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Technik

Reglerdimensionierung mittels Phasengangmethode

Fachbericht

23. Mai 2015

Studiengang	EIT
Modul	Projekt 2
Team	4
Auftraggeber	Peter Niklaus
Fachcoaches	Peter Niklaus, Richard Gut, Pascal Buchschacher, Anita Gertiser
Autoren	Anita Rosenberger, Benjamin Müller, Manuel Suter, Florian Alber, Raphael Frey
Version	`Entwurf`

Abstract

Im Gebiet der Regelungstechnik ist das Dimensionieren von Regler eine zentrale Aufgabe, da mit der korrekten Einstellung der Regler stabil und die Differenz zwischen Ist und Soll-Wert möglichst klein ist.
Die Phasengangmethode ist eine ursprünglich eine graphische Berechnungsart, welche anhand der Schrittantwort die Reglerwerte berechnet. Die Aufgabe der Implementierung dieser Methode in Java war die Hauptaufgabe.

Die Ziel dieses Projektes war, ein benutzerfreundliches Softwaretool, das heisst auch für ein ungeübter Regelungstechniker benutzen kann, zu entwickeln, welches anhand der Phasengangmethode die Dimensionierung eines PI und PID Reglers durchführt. Die Ausgabe des Tools soll anhand der Eingabe der Schrittantwortwerte die numerische wie auch die graphische Lösung ausgeben.

Die Phasengangmethode und die als Vergleich angewendete Faustformeln wurden in Matlab geschrieben und mit Referenzdaten getestet. Die Implementierung in Java war ein zweistufiger Prozess, in welchem zuerst die matlabtypischen Berechungsfunktionen ausprogrammiert und im zweiten Schritt die Regeldimensionierung implementiert wurden.

Das Softwaretool besitzt eine graphische Benutzeroberfläche, über welche auf der linken Seite die Werte der Schrittantwort eingelesen und die numerserischen Lösungen des Reglers ausgegeben und über die rechte Seite die graphischen Lösungen dargestellt werden.

Das Zentrale an der Lösung ist die Berechungungseschwindigkeit mit welcher das Tool arbeitet. Dies ermöglicht eine Ëchtzeit"Dimensionierung des Reglers. Das Neue an dieser Lösung ist das Einbinden der Phasengangmethode in ein Reglerdimensionierungstool.

Projekt P2 - Aufgabenstellung vom Auftraggeber (FS_2015)

Reglerdimensionierung mit Hilfe der Schrittantwort

1. Einleitung

In der Praxis werden die klassischen Regler (PI, PID, PD, …) oft mit sog. Faustformeln dimensioniert. Dazu benötigt man bestimmte Informationen der zu regelnden Strecke. Handelt es sich dabei um „langsame Strecken“ mit Zeitkonstanten im Bereich von Sekunden bis Minuten, so ist das Bestimmen und Ausmessen der Schrittantwort oft die einzige Möglichkeit zur Identifikation der Strecke. Typische Beispiele dafür sind Temperaturheizstrecken, welche meistens mit einem PTn-Verhalten modelliert werden können (Kaffeemaschine, Boiler, Raumheizungen, Lötkolben, Warmluftfön, usw.).
Die Schrittanwort wird mit Hilfe einer Wendetangente vermessen und die Kenngrössen Streckenbeiwert (K_s), Verzugszeit (T_u) und Anstiegszeit (T_g) werden bestimmt. Dies kann sowohl von Hand (grafisch) oder auch automatisiert durchgeführt werden, falls die Messdaten elektronisch vorliegen. Mit diesen drei Kenngrössen können mit Hilfe sog. Faustformeln PI- und PID-Regler dimensioniert werden (Ziegler/Nichols, Chien/Hrones/Reswick, Oppelt, Rosenberg). Die Faustformeln liefern zwar sehr schnell die Reglerdaten, aber die Schrittantworten der entspr. Regelungen sind teilweise weit vom "Optimum" entfernt und der Regelkreis kann sogar instabil werden. In der Praxis muss man diese "Startwerte" häufig nachoptimieren, damit die Schrittantwort der Regelung die Anforderungen erfüllt.

Die sog. "Phasengangmethode zur Reglerdimensionierung" wurde von Jakob Zellweger (FHNW) entwickelt und liefert Reglerdaten, welche näher am "Optimum" sind und für die Praxis direkt verwendet werden können. Dabei kann das Überschwingen der Schrittantwort vorgegeben werden (z.B. 20%, 10%, 2%, oder aperiodisch). Bei dieser Methode kann also das für viele Anwendungen wichtige Verhalten der Schrittantwort beeinflusst werden. Um die Phasengangmethode anwenden zu können, muss der Frequenzgang der Strecke bekannt sein (analytisch oder numerisch gemessen). Mit Hilfe der Hudzovik-Approximation (oder anderer ähnlicher Verfahren) wird dieses Problem gelöst, in dem vorgängig aus den Kenngrössen der Schrittantwort (K_s, T_u,T_g) eine PTn-Approximation der Strecke erzeugt wird. Mit dem Frequenzgang der PTn-Approximation können dann die Regler dimensioniert werden (I, PI, PID). Die Phasengangmethode war ursprünglich eine grafische Methode, basierend auf dem Bodediagramm der Strecke. Aktuell soll die Methode direkt numerisch im Rechner durchgeführt werden.

In dieser Arbeit geht es um die Entwicklung und Realisierung eines Tools zur **Reglerdimensionierung mit der Phasengangmethode**. Ausgehend von der PTn-Schrittantwort der Strecke sollen "optimale Regler" (PI, PID-T1) dimensioniert werden, wobei das Überschwingen der Regelgrösse vorgegeben werden kann. Zum Vergleich sollen die Regler auch mit den üblichen Faustformeln dimensioniert werden. Wünschenswert wäre auch eine Simulation der Schrittantwort des geschlossenen Regelkreises, so dass die Dimensionierung kontrolliert und evtl. noch "verbessert" werden könnte.

2. Aufgaben/Anforderungen an Tool

Entwerfen und realisieren Sie ein benutzerfreundliches Tool/Programm/GUI/usw. mit welchem PI- und PID-Regler mit der Phasengangmethode dimensioniert werden können. Dabei sind folgende Anforderungen und Randbedingungen vorgegeben:

- Die zu regelnden Strecken sind PTn-Strecken, wobei entweder die Schrittantwort grafisch vorliegt oder die Kenngrössen K_s, T_u und T_g schon bekannt sind
- Die Bestimmung einer PTn-Approximation wird vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und muss entsprechend angepasst und eingebunden werden (Matlab zu Java)
- Das Überschwingen der Regelgrösse (Schrittantwort) soll gewählt werden können
- Zum Vergleich sind die Regler auch mit den üblichen Faustformeln zu dimensionieren.
- Das dynamische Verhalten des geschlossenen Regelkreises soll auch berechnet und visualisiert werden (Schrittantwort)

3. Bemerkungen

Die Software und das GUI sind in enger Absprache mit dem Auftraggeber zu entwickeln. Der Auftraggeber steht als Testbenutzer zu Verfügung und soll bei der Evaluation des GUI eingebunden werden. Alle verwendeten Formeln, Algorithmen und Berechnungen sind zu verifizieren, eine vorgängige oder parallele Programmierung in Matlab ist zu empfehlen. Zum Thema der Regelungstechnik und speziell zur Reglerdimensionierung mit der Phasengangmethode werden Fachinputs durchgeführt (Fachcoach).

Literatur

[1] J. Zellweger, *Regelkreise und Regelungen*, Vorlesungsskript.

[2] J. Zellweger, *Phasengang-Methode*, Kapitel aus Vorlesungsskript.

[3] H. Unbehauen, *Regelungstechnik I*, Vieweg Teubner, 2008.

[4] W. Schumacher, W. Leonhard, *Grundlagen der Regelungstechnik*, Vorlesungsskript, TU Braunschweig, 2003.

[5] B. Bate, *PID-Einstellregeln*, Projektbericht, FH Dortmund, 2009.

16.02.2015
Peter Niklaus

Inhaltsverzeichnis

Versionsgeschichte

04.05.2015: `Version 0.01`
06.05.2015: `Version 0.02`

1 Einleitung

referenz script Zellweger

Im Rahmen des Projektes soll ein Tool entwickelt werden, welches einen PI- respektive einen PID-Regler mittels der von Prof. Jakob Zellweger entwickelten Phasengangmethode dimensioniert. Zum Vergleich soll der entsprechende Regler ebenfalls mittels verschiedenen Faustformeln berechnet werden.

Die Phasengangmethode ist eine graphische Methode, die bis anhin mit Stift und Papier durchgeführt wurde. Folglich ist die Ausführung zeitaufwändig, speziell wenn Schrittantworten mit unterschiedlichen Parameterwerten durchgespielt werden sollen. Das Tool soll ausgehend von drei Parametern aus der Schrittantwort der Strecke (Verstärkung K_s, Anstiegszeit T_g, Verzögerungszeit T_u) mittels der Phasengangmethode möglichst ideale Regelparameter berechnen sowie die Schrittantwort des darauf basierenden geschlossenen Regelkreises graphisch darstellen. Die Benutzeroberfläche der Software soll intuitiv sein, sodass sich auch mit dem Thema nicht eingehend vertraute Regelungstechniker einfach zurechtfinden.

mehr/anderer Inhalt?

Die erforderlichen Algorithmen wurden zuerst in Matlab als Prototypen implementiert und anschliessend vollständig in Javakonvertiert. Die graphische Benutzeroberfläche baut ganz auf Java. Um optimale Wartbarkeit, Übersichtlichkeit und Modularität des Codes zu gewährleisten, ist die Software gemäss Model-View-Controllern-Pattern aufgebaut.

Nach der Implementierung in Matlab wurde klar, dass die Berechnung durch die hohe Rechenleistung sehr schnell durchgeführt werden kann und somit eine Dimensionierung des geschlossenen Regelkreises anhand dieser Methode von Herrn Zellweger möglich ist.

Der Bericht gliederte sich in zwei Teile: Der ersten Teil erläutert die theoretischen Grundlagen und darauf aufbauend stellt der zweite Teil der Aufbau der Software dar.

2 Fachlicher Hintergrund

Das Kernstück dieser Arbeit und des zugehörigen Softwaretools stellt die so genannte "Phasengang-Methode zur Reglerdimensionierung" von Jakob Zellweger dar [1]. Diese wurde ursprünglich als vereinfachte grafische Methode zur Approximation der -20dB/Dek Methode erarbeitet und im Rahmen dieses Projektes in einem Java-Tool automatisiert. Als Vergleich wertet die Software ebenfalls einige der gängigen Faustformeln aus.

Das Tool führt grob vereinfacht folgende Schritte aus:

- Bestimmung des Frequenzgangs der Regelstrecke aus Verzögerungszeit T_u, Anstiegszeit T_g und Verstärkung K_s (Abschnitt 2.2)
- Dimensionierung des Reglers mittels Faustformeln (Abschnitt 2.3)
- Dimensionierung des Reglers durch Phasengangmethode (Abschnitte 2.4 und 2.5)
- Umrechung der Regler-Darstellung zwischen bodekonformer und reglerkonformer Darstellung (Abschnitt 2.6)
- Berechnung der Schrittantwort des geschlossenen Regelkreises (Abschnitt **??**)

Im folgenden Kapitel wird auf diese Punkte genauer eingegangen und das Vorgehen anhand eines konkreten Beispiels rechnerisch und grafisch erläutert. Die Durchrechnung der Phasengangmethode orientiert sich an den Rezepten, welche im fachlichen Teil des Pflichtenheftes dieses Projektes zu finden sind [2]. Genauere Hintergrundinformationen zur Phasengangmethode selbst sind dem Skript [1] zu entnehmen.

Das Überschwingverhalten des Regelkreises soll für dieses Projekt in drei Stufen berechnet werden. Verwendet wird dazu folgende Abstufung:

Ist diese Einteilung des Überschwingens noch aktuell oder wurde das in der Auftragserweiterung angepasst?

- wenig Überschwingen (ca. 0%)
- mittleres Überschwingen (ca. 16%)
- starkes Überschwingen (ca. 23%)

2.1 Grundlagen

Abschnitt verfassen

2.2 Frequenzgang der Regelstrecke

Als Ausgangspunkt der Reglerdimensionierung dient die Schrittantwort der Strecke, aus welcher die Vertsärkung K_s der Strecke, die Verzögerungszeit T_u und die Anstiegszeit T_g abgelesen werden. Bei unserem Tool werden diese Werte als Eingabeparameter verwendet.

Wir werden in diesem Bericht folgende Strecke als Beispiel nehmen:

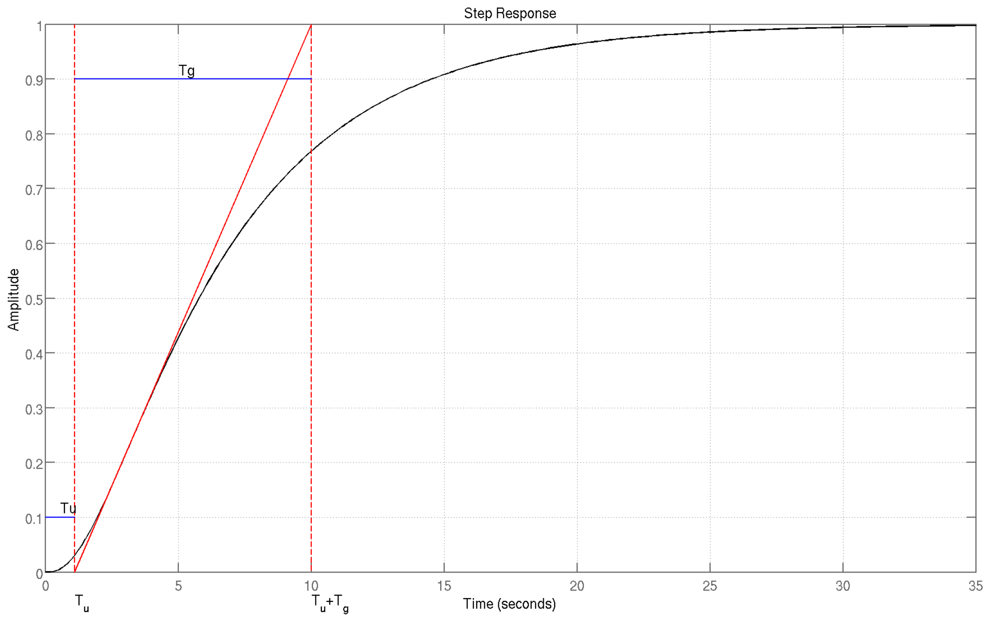

Abbildung 1: Schrittantwort der Beispielstrecke (schwarz), Wendetangende (rot), T_u und T_g (blau)

Der geschlossene Regelkreis soll schlussendlich maximal etwa 16.3% überschwingen.

Ausmessen der Schrittantwort ergibt:

- $K_s = 2\,\mathrm{s}$
- $T_u = 1.1\,\mathrm{s}$
- $T_g = 8.9\,\mathrm{s}$

Da die Reglerdimensionierung vom *Frequenzgang* einer Strecke ausgeht und nicht von deren Schrittantwort, besteht der nächste Schritt nun darin, aus den obigen Werten den Frequenzgang der Strecke zu bestimmen. Dies erledigt die Methode `p_sani`[1], welche uns die Werte für die Übertragungsfunktion der Strecke liefert. In unserem Fall ergibt dies folgendes Polynom:

Allenfalls Verweis auf Software-teil für Erklärungen zu sani-Methode.

$$
\begin{aligned}
H_s(s) &= K_s \cdot \frac{1}{1+s\cdot T_1} \cdot \frac{1}{1+s\cdot T_2} \cdot \frac{1}{1+s\cdot T_2} \\
&= 2 \cdot \frac{1}{1+s\cdot 0.4134\,\mathrm{s}} \cdot \frac{1}{1+s\cdot 1.4894\,\mathrm{s}} \cdot \frac{1}{1+s\cdot 5.3655\,\mathrm{s}}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Mit einem geeigneten Tool kann man sich den dazugehörigen Plot erstellen lassen.

Somit ist der Frequenzgang der Strecke bekannt und man kann mit einer geeigneten Methode den Regler dimensionieren.

[1] Die Methode `p_sani` wurde zu Beginn des Projektes in einer Matlab-Implementation zur Verfügung gestellt und anschliessend für unser Tool in Java übersetzt.

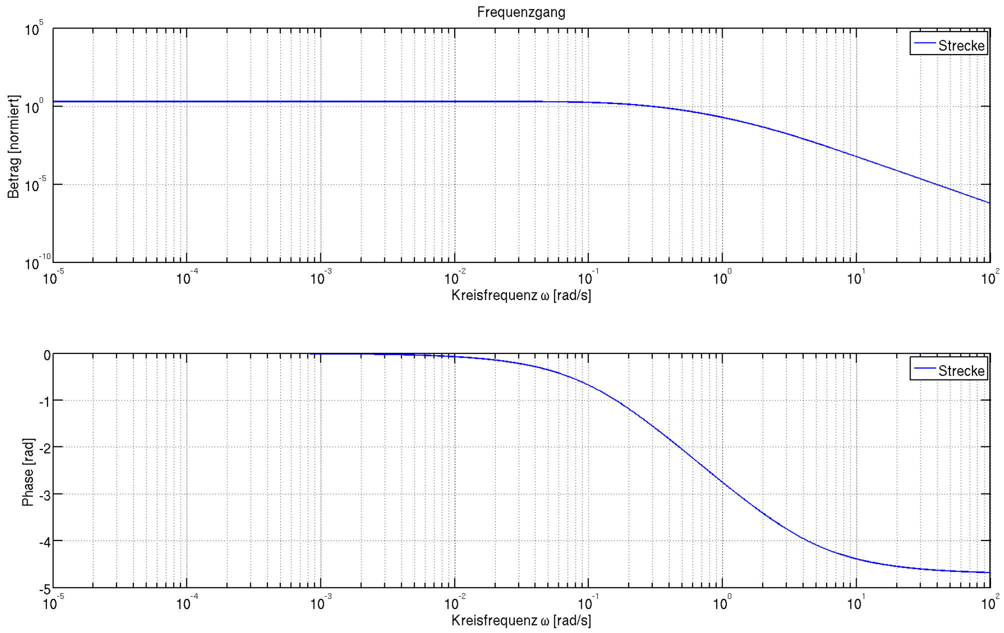

Abbildung 2: Frequenzgang der Strecke

2.3 Reglerdimensionierung mittels Faustformeln

Im Praxiseinsatz stehen für die Dimensieung der Regler einfache Berechnungsformeln für die Einstellwerte der Regler anhand von T_u, T_g und K_s zur Verfügung. An dieser Stelle wird daher unsere Beispielstrecke zuerst mit einigen der gängigen Faustformeln dimensioniert, um das Ergebnis anschliessend mit dem Resultat der Phasengangmethode vergleichen zu können.

Faustformel	PI-Regler		PID-T1-Regler		
	T_n	K_p	T_n	T_v	K_p
Chiens, Hrones, Reswick **(0% Überschwingen)** [3], [4]	$1.2 \cdot T_g$	$\frac{0.35}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	T_g	$0.5 \cdot T_u$	$\frac{0.6}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
Chiens, Hrones, Reswick **(20% Überschwingen)** [3], [4]	T_g	$\frac{0.6}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$1.35 \cdot T_g$	$0.47 \cdot T_u$	$\frac{0.95}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
Oppelt [5]	$3 \cdot T_u$	$\frac{0.8}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$2 \cdot T_u$	$0.42 \cdot T_u$	$\frac{1.2}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
Rosenberg [5]	$3.3 \cdot T_u$	$\frac{0.91}{K_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$2 \cdot T_u$	$0.45 \cdot T_u$	$\frac{1.2}{T_s} \cdot \frac{T_g}{T_u}$

Tabelle 1: Faustformeln zur Reglerdimensionierung

Setzt man die Werte für K_s, T_u, T_g in diese Formeln ein, ergibt sich Folgendes:

Faustformel	PI-Regler		PID-T1-Regler		
	T_n	K_p	T_n	T_v	K_p
Chiens, Hrones, Reswick **(0% Überschwingen)** [3], [4]	10.68 s	1.42	8.9 s	0.55 s	2.43
Chiens, Hrones, Reswick **(20% Überschwingen)** [3], [4]	8.9 s	2.43	12.02 s	52 s	3.84
Oppelt [5]	3.3 s	3.24	2.2 s	0.46 s	4.85
Rosenberg [5]	3.63 s	3.68	2.2 s	0.50 s	4.85

Tabelle 2: Reglerparameter bestimmt mit Faustformeln aus Tabelle 1

2.4 Reglerdimensionierung mittels Phasengangmethode: PI-Regler

Es werden nun anhand der Phasengangmethode sowohl ein PI- wie auch ein PID-Regler für die in Abschnitt 2.2 ausgemessene Strecke dimensioniert (siehe nächster Abschnitt für PID-Regler).

Folgende Begriff werden dabei häufig verwendet und sind daher in Tabelle 3 übersichtlich zusammengefasst.

$H_s(j\omega)$	Übertragungsfunktion der Regelstrecke
$A_s(j\omega) = \lvert H_s(j\omega)\rvert$	Amplitudengang der Regelstrecke
$\varphi_s(j\omega) = arg(H_s(j\omega))$	Phasengang der Regelstrecke
$H_r(j\omega)$	Übertragungsfunktion des Reglers
$A_r(j\omega) = \lvert H_r(j\omega)\rvert$	Amplitudengang des Reglers
$\varphi_r(j\omega) = arg(H_r(j\omega))$	Phasengang des Reglers
$H_o(j\omega) = H_s \cdot H_r(j\omega)$	Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises
$A_o(j\omega) = \lvert H_o(j\omega)\rvert$	Amplitudengang des offenen Regelkreises
$\varphi_o(j\omega) = arg(H_o(j\omega)) = \varphi_s(j\omega) + \varphi_r(j\omega)$	Phasengang des offenen Regelkreises
$H_{rpid} = K_{rk}\left[\frac{(1+sT_{nk})(1+sT_{vk})}{sT_{nk}}\right]$	Übertragungsfunktion des PID-Reglers
$H_{rpi} = K_{rk}\left[1 + \frac{1}{sT_{nk}}\right]$	Übertragungsfunktion des PI-Reglers

Tabelle 3: Die wichtigsten Begriffsdefinitionen

Ziel

Das Ziel ist die Bestimmung der Parameter K_{rk} und T_{nk} in der Gleichung:

$$H_{rpi} = K_{rk} \cdot \left[1 + \frac{1}{s \cdot T_{nk}}\right] \tag{2}$$

1 Bestimmung der Reglerfrequenz ω_{pi}

Zuerst wird im Phasengang der Strecke die Frequenz ω_{pi} bestimmt, für welche die Phase der Strecke $-90°$ beträgt[1].

$$\varphi_s(\omega_{pi}) = -90° \tag{3}$$

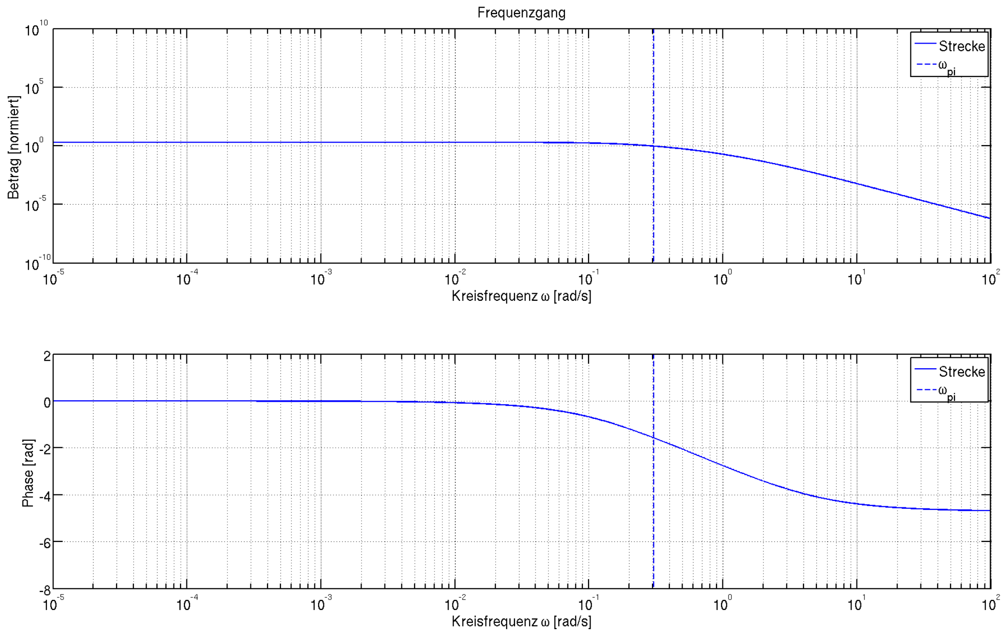

Abbildung 3: ω_{pi} eingetragen (vertikale gestrichelte Linie).

Wie man aus Abbildung 3 ablesen kann, liegt dieser Wert für ω_{pi} in unserem Beispiel bei ungefähr $0.3\,\mathrm{s}^{-1}$. Die Kontrollrechnung mittels Matlab ergibt:

$$\omega_{pi} = 0.3039\,\mathrm{s}^{-1} \tag{4}$$

[1] Der Winkel stellt keinen endgültigen Wert dar. Dieser wurde von Jakob Zellweger fixiert, um eine grafische Evaluation überhaupt zu ermöglichen. Durch Anpassung dieses Wertes kann je nach Regelstrecke das Regelverhalten weiter optimiert werden.

2 Bestimmung von T_{nk}

Damit kann nun T_{nk} direkt bestimmt werden[2]:

$$T_{nk} = \frac{1}{\omega_{pi}} = \frac{1}{0.3039\,\mathrm{s}^{-1}} = 3.2902\,\mathrm{s} \tag{5}$$

3 Bestimmung der Durchtrittsfrequenz ω_d

Als Nächstes soll die Durchtrittsfrequenz ω_d bestimmt werden. Dazu wird der für T_{nk} erhaltene Wert in Gleichung 6 eingesetzt. Da K_{rk} noch unbekannt ist, wird vorerst $K_{rk} = 1$ gesetzt.

$$\begin{aligned} H_{rpi} &= K_{rk} \cdot \left[1 + \frac{1}{s \cdot T_{nk}}\right] \\ &= 1 \cdot \left[1 + \frac{1}{s \cdot 3.2902\,\mathrm{s}}\right] \end{aligned} \tag{6}$$

Daraus kann nun der Frequenzgang des *offenen Regelkreises* (Übertragungsfunktion H_o, Amplitudengang A_o, Phasengang φ_o) bestimmt werden.

$$\begin{aligned} H_o(s) &= H_{rpi}(s) \cdot H_s(s) \\ &= \left(K_{rk} \cdot \left[1 + \frac{1}{s \cdot T_{nk}}\right]\right) \cdot K_s \cdot \left(\frac{1}{1 + s \cdot T_1} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_2}\right) \\ &= \left(1 \cdot \left[1 + \frac{1}{s \cdot 3.2902\,\mathrm{s}}\right]\right) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{1 + s \cdot 0.4134\,\mathrm{s}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot 1.4894\,\mathrm{s}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot 5.3655\,\mathrm{s}}\right) \end{aligned} \tag{7}$$

Von besonderem Interesse ist der Phasengang $\varphi_o(j\omega)$ dieser Übertragungsfunktion (siehe Tabelle 3). Wie Anfangs spezifiziert, soll ein maximals Überschwingen von ca. 16.3% angestrebt werden. Dazu muss gemäss Tabelle 4 die Durchtrittsfrequenz ω_d gefunden werden, an welcher der offene Regelkreis eine Phase von $-128.5°$ aufweist (Gleichung 8).

$$\varphi_o(\omega_d) = \varphi_s. \tag{8}$$

Überschwingen	0%	16.3%	23.3%
φ_s	$-103.7°$	$-128.5°$	$-135°$

Tabelle 4: Werte für φ_s

Dies ergibt:

$$\omega_d = 0.2329\,\mathrm{s}^{-1} \tag{9}$$

[2] Um die Akkumulation von Ungenauigkeiten zu minimieren werden bei diesen Berechnungen die genauen Werte aus Matlab verwendet und nicht die gerundeten Zwischenresultate, was zu Abweichungen zu den von Hand berechneten Ergebnissen führen kann.

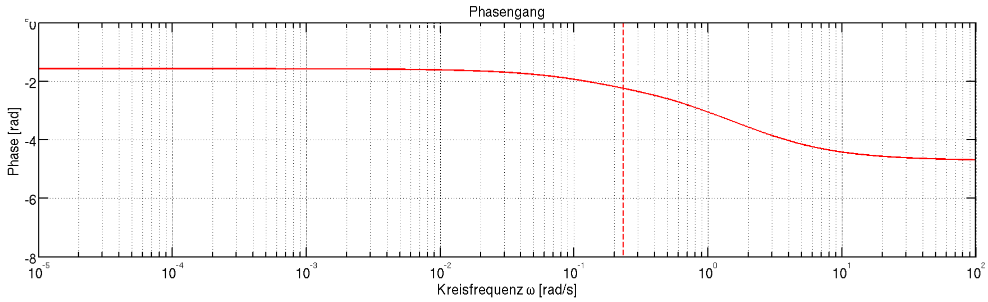

Abbildung 4: Phasengang $\varphi_o(j\omega)$ des offenen Regelkreises mit eingetragener Durchtrittsfrequenz ω_d (vertikale gestrichelte Linie). Wie man verifizieren kann, weist der offene Regelkreis unseres Beispiels bei dieser Kreisfrequenz eine Phase von $-128.5°$ auf (etwa $-2.24\,\mathrm{rad}$).

4 Bestimmung der Reglerverstärkung K_{rk}

In einem letzten Schritt wird nun die Durchtrittsfrequenz benutzt, um die benötigte Verstärkung K_{rk} des Reglers zu bestimmen. Dazu wird ω_d in Gleichung 7 eingesetzt und $|H_o(j\omega)| = 1$ gesetzt (Durchtrittsfrequenz: Frequenz, bei der die Amplitude $0\,\mathrm{dB} = 1$ ist).

$$\begin{aligned} A_o &= |H_o(j\omega_d)| \\ &= \left| \left(K_{rk} \cdot \left[1 + \frac{1}{j \cdot \omega_d \cdot T_{nk}} \right] \right) \cdot K_s \cdot \left(\frac{1}{1 + j \cdot \omega_d \cdot T_1} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \omega_d \cdot T_2} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \omega_d \cdot T_2} \right) \right| \\ &= 1 \end{aligned} \tag{10}$$

Mit den Werten

$$\begin{aligned} K_s &= 2 \\ T_{nk} &= 3.2902\,\mathrm{s} \\ T_1 &= 0.4134\,\mathrm{s} \\ T_2 &= 1.4894\,\mathrm{s} \\ T_3 &= 5.3655\,\mathrm{s} \\ \omega_d &= 0.2329\,\mathrm{rad\,s^{-1}} \end{aligned} \tag{11}$$

löst man Gleichung 10 nun nach K_{rk} auf und erhält:

$$K_{rk} = 0.517577 \tag{12}$$

5 Resultat

Somit ist der PI-Regler vollständig bestimmt und hat folgende Form:

$$H_{rpi} = 0.518 \cdot \left[1 + \frac{1}{s \cdot 3.29\,\mathrm{s}}\right] \tag{13}$$

Zum Vergleich das Bode-Diagramm mit allen relevanten Kurven und Werten:

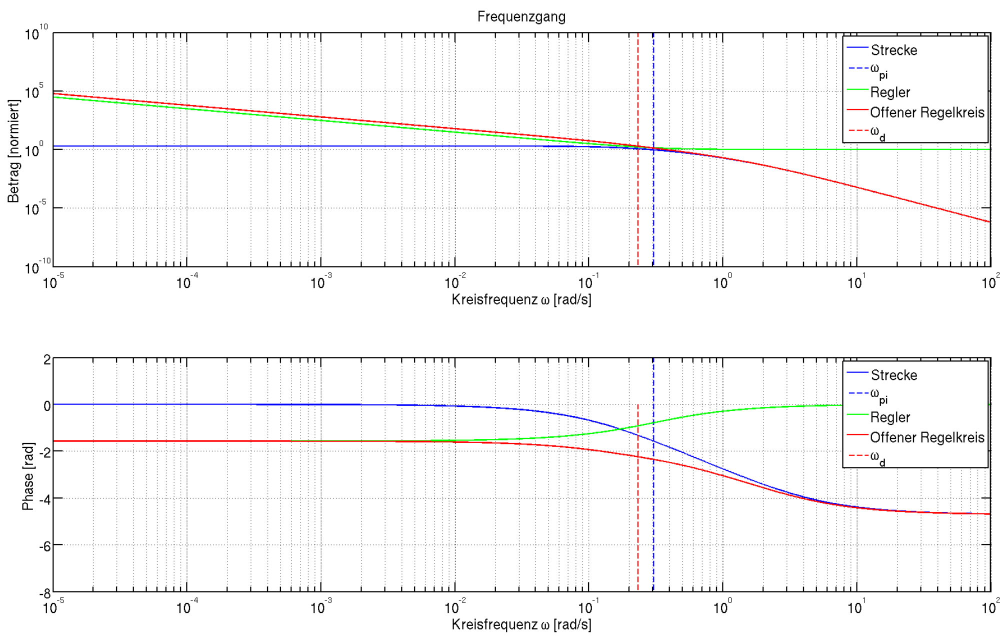

Abbildung 5: Frequenzgang des Reglers (grün), der Strecke (blau) und des offenen Regelkreises (rot).

Fix vertical line ω_d

2.5 Reglerdimensionierung mittels Phasengangmethode: PID-Regler

Ziel

Das Ziel ist die Bestimmung der Parameter K_{rk}, T_{nk} und T_{vk} in der Gleichung:

$$H_{rpid} = K_{rk} \cdot \left[\frac{(1 + s \cdot T_{nk}) \cdot (1 + s \cdot T_{vk})}{s \cdot T_{nk}}\right] \tag{14}$$

1 Bestimmung der Reglerfrequenz ω_{pid}

Analog zum PI-Regler wird zuerst im Phasengang der Strecke die Frequenz ω_{pid} bestimmt, für welche die Phase der Strecke einen bestimmten Wert aufweist, nur wird hier $-135°$ benutzt:

$$\varphi_s(\omega_{pid}) = -135° \tag{15}$$

In unserem Beispiel ergibt dies:

$$\omega_{pid} = 0.6714\,\mathrm{s}^{-1} \tag{16}$$

2 Steigung des Phasengangs bei der Reglerfrequenz

Anschliessend wird die Steigung des Phasengangs φ_s der Strecke bei der Frequenz ω_{pid} bestimmt. Ausgangspunkt dafür ist die von `p_sani` bestimmte Übertragungsfunktion der Strecke (siehe Gleichung 1).

$$\left.\frac{d\varphi_s}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_{pid}} = \left.\frac{d(arg(H_s(j\omega)))}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_{pid}} = -1.5124\,\mathrm{s} \tag{17}$$

Einheit überprüfen

3 Hilfsparameter β

Zwischen den Steigungen der Phasen des offenen Regelkreises (φ_o), der Strecke (φ_s) und des Reglers (φ_r) gilt gemäss Tabelle 3 folgende Beziehung:

$$\varphi_o = \varphi_s + \varphi_r \tag{18}$$

Da die Ableitung eine lineare Funktion ist, gilt somit auch:

$$\frac{d\varphi_o}{d\omega} = \frac{d\varphi_s}{d\omega} + \frac{d\varphi_r}{d\omega} \tag{19}$$

Diese Beziehungen können auch gut in Abbildung 6 von Hand überprüft werden.

Es soll nun gelten:

$$\left.\frac{d\varphi_o}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_{pid}} = -\frac{1}{2} \tag{20}$$

Da $\frac{d\varphi_s}{d\omega}$ durch die Strecke gegeben und somit unveränderlich ist, kann lediglich der Wert von $\frac{d\varphi_r}{d\omega}$ angepasst werden, damit $\frac{d\varphi_o}{d\omega}$ Gleichung 20 erfüllt.

Dazu führt man den Hilfsparameter β ein, für den gilt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{vk}} &= \frac{\omega_{pid}}{\beta} \\ \frac{1}{T_{nk}} &= \omega_{pid} \cdot \beta \\ 0 < \beta &\leq 1 \end{aligned} \tag{21}$$

Die beiden Frequenzen $\frac{1}{T_{vk}}$ und $\frac{1}{T_{nk}}$ sind also symmetrisch um den Faktor β grösser bzw. kleiner als die Frequenz ω_{pid}, gut ersichtlich in Abbildung 6. Will man β von Hand bestimmen, trifft man zuerst eine "vernünftige" Annahme, zum Beispiel:

$$\beta = 0.5 \tag{22}$$

Mit diesem Startwert bestimmt man nun T_{nk} und T_{vk}. Die somit erhaltenen Werte setzt man in Gleichung 14 ein, zusammen mit dem Wert für ω_{pid} aus Gleichung 16:

$$
\begin{aligned}
T_{vk} &= \frac{\beta}{\omega_{pid}} = \frac{0.5}{0.6714\,\mathrm{s}^{-1}} = 0.7447\,\mathrm{s} \\
T_{nk} &= \frac{1}{\omega_{pid} \cdot \beta} = \frac{1}{0.6714\,\mathrm{s}^{-1} \cdot 0.5} = 2.9789\,\mathrm{s}
\end{aligned} \tag{23}
$$

Eingesetzt in die Reglergleichung, vorerst mit $K_{rk} = 1$:

$$
\begin{aligned}
H_{rpid} &= K_{rk} \cdot \left[\frac{(1 + j\omega \cdot T_{nk}) \cdot (1 + j\omega \cdot T_{vk})}{j\omega \cdot T_{nk}} \right] \\
&= 1 \cdot \left[\frac{(1 + j\omega \cdot 2.9789\,\mathrm{s}) \cdot (1 + j\omega \cdot 0.7447\,\mathrm{s})}{j\omega \cdot 2.9789\,\mathrm{s}} \right]
\end{aligned} \tag{24}
$$

Von dieser Gleichung bestimmt man nun den Phasengang und wertet danach dessen Ableitung an der Stelle $\omega = \omega_{pid}$ aus. Die zugehörige Rechnung kann in Anhang A gefunden werden.

$$
\begin{aligned}
\varphi_r(j\omega) &= arg(H_{rpid}(j\omega)) \\
\left. \frac{d\varphi_r}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{pid}} &= 1.1920\,\mathrm{s}
\end{aligned} \tag{25}
$$

Die zugehörige Rechnung ist lange und mühsam, allenfalls in Anhang? Ebenfalls: Einheit kontrollieren

Setzt man dies in Gleichung 18 ein, erhält man:

$$
\begin{aligned}
\left. \frac{d\varphi_o}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{pid},\beta=0.5} &= \left. \frac{d\varphi_s}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{pid}} + \left. \frac{d\varphi_r}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_{pid},\beta=0.5} \\
&= -1.5124\,\mathrm{s} + 1.1920\,\mathrm{s} \\
&= -0.3204\,\mathrm{s} \\
&> -\frac{1}{2}
\end{aligned} \tag{26}
$$

Mit $\beta = 0.5$ erhält man also eine zu hohe Steigung des offenen Regelkreises an der Stelle ω_{pid}, folglich muss β *verkleinert* werden. Diese Berechnungen werden nun mit jeweils neuen Werten für β solange wiederholt, bis die Steigung des offenen Regelkreises die gewünschte Nähe zu $-\frac{1}{2}$ aufweist.

Da die manuelle Iterierung dieses Prozesses enorm viel Zeit in Anspruch nimmt, bietet sich hier eine Automatisierung an. Die Berechnung mittels eines geeigneten Algorithmus in Matlab liefert schlussendlich folgendes Ergebnis:

Allenfalls Matlab-Algo in Anhang und Verweis

$$
\begin{aligned}
\beta &= 0.2776 \\
T_{vk} &= \frac{\beta}{\omega_{pid}} = 0.4134\,\mathrm{s} \\
T_{nk} &= \frac{1}{\omega_{pid} \cdot \beta} = 5.3656\,\mathrm{s}
\end{aligned} \tag{27}
$$

Wie kann dies egtl. passieren?

Sollte man für β einen komplexen Wert erhalten, wird $\beta = 1$ gesetzt.

4 Durchtrittsfrequenz ω_d

Diese Werte setzt man nun in Gleichung 14 ein. K_{rk} wird wie bei der Bestimmung von β vorerst noch auf 1 gesetzt.

$$H_{rpid} = K_{rk} \cdot \left[\frac{(1 + s \cdot T_{nk}) \cdot (1 + s \cdot T_{vk})}{s \cdot T_{nk}}\right] = 1 \cdot \left[\frac{(1 + s \cdot 5.3656\,\mathrm{s}) \cdot (1 + s \cdot 0.4134\,\mathrm{s})}{s \cdot 5.3656\,\mathrm{s}}\right] \tag{28}$$

Zur Bestimmung von K_{rk} wird nun der Frequenzgang des offenen Regelkreises betrachtet. Dazu multipliziert man wie gehabt die Übertragungsfunktion der Strecke (siehe Gleichung 1) mit der soeben bestimmten provisorischen Übertragungsfunktion des Reglers (Gleichung 28).

$$H_o(j\omega) = H_{rpid}(j\omega) \cdot H_s(j\omega) \tag{29}$$

Nun wird die Durchtrittsfrequenz ω_d bestimmt, an welcher der offene Regelkreis eine Verstärkung von $0\,\mathrm{dB} = 1$ aufweisen soll. Wie auch beim PI-Regler werden wir hier ein Überschwingen von 16.3% anstreben, womit gemäss Tabelle 4gilt:

$$\varphi_s(\omega_d) = \varphi_s = -128.5^\circ \tag{30}$$

Dieser Wert wird analog zum PI-Regler aus dem Phasengang des offenen Regelkreises abgelesen. Eine Nachrechnung mittels Matlab ergibt: siehe Plot

$$\omega_d = 0.5341\,\mathrm{s}^{-1} \tag{31}$$

5 Bestimmung der Reglerverstärkung K_{rk}

In einem letzten Schritt wird nun der Amplitudengang des offenen Regelkreises an der Stelle ω_d gleich 1 gesetzt und diese Gleichung nach K_{rk} aufgelöst:

$$\begin{aligned} A_o(j\omega_d) &= |H_o(j\omega_d)| \\ &= |H_{rpid}(j\omega_d) \cdot H_s(j\omega_d)| \\ &= \left|K_{rk} \cdot \left[\frac{(1 + j\omega_d \cdot T_{nk}) \cdot (1 + j\omega_d \cdot T_{vk})}{j\omega_d \cdot T_{nk}}\right]\right| \\ &\cdot \left|K_s \cdot \frac{1}{1 + j\omega_d \cdot T_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega_d \cdot T_2} \cdot \frac{1}{1 + j\omega_d \cdot T_2}\right| \\ &= 1 \end{aligned} \tag{32}$$

Mit den gegebenen und berechneten Werten:

$$\begin{aligned} K_s &= 2 \\ T_1 &= 0.4134\,\mathrm{s} \\ T_2 &= 1.4894\,\mathrm{s} \\ T_3 &= 5.3655\,\mathrm{s} \\ T_{nk} &= 5.3656\,\mathrm{s} \\ T_{vk} &= 0.4134\,\mathrm{s} \\ \omega_d &= 0.5341\,\mathrm{s}^{-1} \end{aligned} \tag{33}$$

Dies liefert:

$$K_{rk} = 1.83084 \tag{34}$$

6 Resultat

Somit ist der Regler vollständig bestimmt und hat folgende Übertragungsfunktion:

$$H_{rpid}(s) = 1.83084 \cdot \left[\frac{(1 + s \cdot 5.3656\,\mathrm{s}) \cdot (1 + s \cdot 0.4134\,\mathrm{s})}{s \cdot 5.3656\,\mathrm{s}}\right] \tag{35}$$

Die Frequenzgänge der Strecke, des Reglers und des offenen Regelkreises:

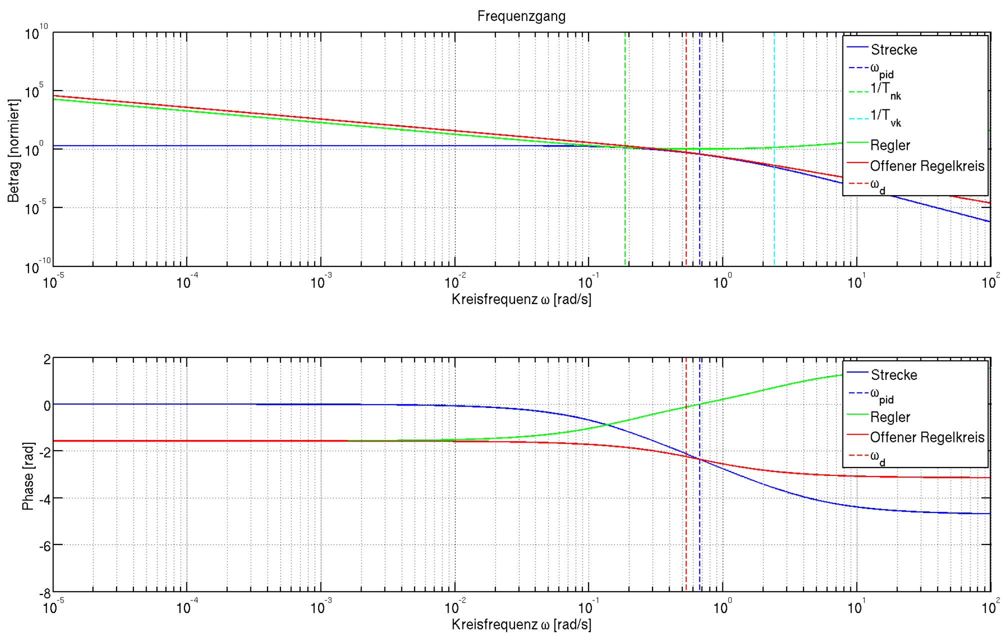

Abbildung 6: Frequenzgang der Strecke (blau), des Reglers (grün) und des offenen Regelkreises (rot). Ebenfalls eingetragen sind die Reglerfrequenz ω_{pid}, die beiden Frequenzen $\frac{1}{T_{vk}}$ und $\frac{1}{T_{nk}}$ sowie die Durchtrittsfrequenz ω_d.

2.6 Umrechnung zwischen bodekonformer und reglerkonformer Darstellung

Die Formeln in Tabelle 5 dienen zur Umrechnung zwischen der bodekonformen Darstellung und der reglerkonformen Darstellung. Nähere Informationen zu den verschiedenen Darstellungsarten können der Quelle [6] entnommen werden.

Allenfalls noch ein paar kurze Sätze zum Sinn dieser Übung? Sonst wird nirgends darauf wirklich Bezug genommen, Abschnitt ist ein wenig ohne Kontext in der Landschaft.

	bodekonform → reglerkonform	reglerkonform → bodekonform
PI	$T_n = T_{nk}$	$K_{rk} = K_r$
PID	$T_n = T_{nk} + T_{vk} - T_p$	$T_{nk} = 0.5 \cdot (T_n + T_p) \cdot (1 + \epsilon)$
	$T_v = \frac{T_{nk} \cdot T_{vk}}{T_{nk} + T_{vk} - T_p} - T_p$	$T_{vk} = 0.5 \cdot (T_n + t_p) \cdot (1 - \epsilon)$
	$K_r = K_{rk} \cdot (1 + \frac{T_{vk} - T_p}{T_{nk}})$	$K_{rk} = 0.5 \cdot K_r \cdot (1 + \frac{T_p}{T_{nk}}) \cdot (1 + \epsilon)$
	wobei $\epsilon^2 = 1 - (4 \cdot T_n \cdot \frac{T_v - T_p}{(T_n + T_p)^2})$	

Tabelle 5: Formeln zur Umrechung zwischen bode- zu reglerkonformer Darstellung [6], [7]

Für die Berechnungen in diesem Projekt wird, wenn nicht anders angegeben, mit $T_p = \frac{1}{10} \cdot T_v$ gerechnet.

2.7 Schrittantwort des geschlossenen Regelkreises

Die Aufgabe eines geschlossenen Regelkreises (Abbildung 7) ist es, einen vorgegeben Sollwert zu erreichen und diesen auch bei Störungen aufrecht zu erhalten. Dabei sollen die unten genannten dynamischen Anforderungen eingehalten werden, damit die Stabilität des Regelsystems garaniert ist. Die wichtigste Bedingung für die Schrittantwort ein geschlossenen Regelkreis heisst, dass der Regelfehler, die Differenz zwischen Ist-und Sollwert, gleich Null oder möglichst klein ist.

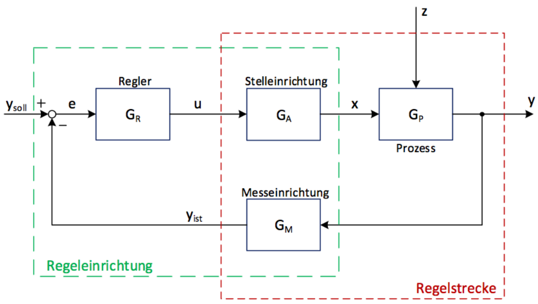

Abbildung 7: Geschlossener Regelkreis

- y_soll bezeichnet den Sollwert der Regelgrösse.
- e Regelabweichung (Regelfehler)
- u Steuergrösse
- x Stellgrösse
- y Regelgrösse
- z Störgrösse
- y_ist ist der Ist-Wert der Regelgrösse und wird auch als die Schrittantwort des Regelkreis bezeichnet.

Bild Schrittantworten passend zu Aufzählung unten

Grundsätzlich können fünf Anforderungen für einen geschlossenen Regelkreis und deren Schrittantworten zusammengefasst werden:

1. Der Regelkreis muss stabil sein:
   - Das heisst für die Schrittantwort, dass nach dem Erreichen des eingeschwungenen Zustand kein erneutes Überschwingen stattfinden darf.
   - Für das Regelsystem heisst stabil, dass es in seinen Gleichgewichtszustand zurückgeführt werden kann.
2. Der Regelkreis muss genügend gedämpft sein:
   Die Dämpfung der Schrittantwort soll so stark sein, dass der eingeschwungene Zustand möglichst rasch erreicht wird ohne dass das Überschwingen des Systems zu stark wird.
3. Der Regelkreis muss eine bestimmte stationäre Genauigkeit aufweisen: Das bedeutet, der Regelfehler e(t) soll für t-> oo gegen Null gehen. Für die Schrittantwort heisst das, dass die Schrittantwort gleich $y_s oll$ sein muss.
4. Der Regelkreis muss hinreichend schnell sein: Die Schnelligkeit des Einschwingvorganges der Schrittantwort ist stark von der Dämpfung abhängig. Ist die Dämpfung zu stark oder zu schwach, braucht der Einschwingvorgang mehr Zeit. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die spezifischen Anforderungen an das Regelsystem eingehalten werden.
5. Der Regelkreis muss robust sein: Der Regelkreis muss so ausgelegt werden, dass das Regelsystem auch im schlimmsten Fall (je nach Regelsystem situationsabhängig) in der Lage ist, das System zurück in den stabilen Zustand (vgl. 1.) zu regeln.

3 Software

Verweis auf Klassendiagramm

Zweck der Applikation ist die Dimensionierung eines Reglers ausgehend von einer Strecke und der zugehörigen Schrittantwort. Abschliessend werden die numerischen Parameter des dimensionierten Reglers ausgegeben sowie die Schrittantwort des geschlossenen Regelkreises grafisch dargestellt.

Erklärung geschlossener Regelkreis, kurz

Die Software ist im bekannten *Model-View-Controller*-Pattern aufgebaut. Die *View* ist verantwortlich für den Aufbau der Benutzeroberfläche sowie .

sonstige Aufgaben der View

Der *Controller* fungiert als Schnittstelle zwischen *View* und *Model*, kontrolliert Benutzereingaben und gibt diese an das *Model* weiter.

Im *Model* werden sämtliche Berechnungen ausgeführt. Diese beinhalten die Bestimmung der gesuchten Regelparameter sowie die Aufbereitung der Daten, die zur grafischen Darstellung des geschlossenen Regelkreises notwendig sind.

3.1 View

Die *View* ist aus zwei übergeordneten Panels aufgebaut. Im linken Panel befinden sich Ein- und Ausgabefelder für numerische Werte, im rechten Panel werden die zugehörigen Plots dargestellt.

Image Gesamt-GUI

Image Panel Schrittantwort vermessen

Im Bereich 1 werden die Parameter der vermessenen Strecke eingegeben. Darunter befinden sich die Schaltflächen zur Wahl zwischen der Dimensionierung eines PI- respektive eines PID-T1-Reglers.

Image Referenzen

Image Butttons PI-, PID-T1-Regler

Das Panel *Reglerwerte* dient hauptsächlich der Ausgabe der berechneten Reglerwerte mittels der verschiedenen Berechnungsmethoden. Ebenfalls kann für die Phasengangmethode die Zeitkonstante T_p spezifiziert werden.

Check: korrekter Begriff

Image Panel Phasengangmethode

Der obere Bereich des rechten Panels beinhaltet zwei Slider zur Eingabe des gewünschten Überschwingens respektive des Phasenrands.

Image Panel rechts

Im unteren Bereich werden die Plots der mittels Faustformeln und Phasengangmethode errechneten Resultate ausgegeben. Zu jeder Faustformel wird die zugehörige Schrittantwort abgebildet. Die Resultate der Phasengangmethode werden durch drei Kurven dargestellt. Eine Kurve benutzt den Standardwert des Phasenrands gemäss Zellweger , die beiden anderen Kurven basieren auf Benutzereingaben für einen oberen und unteren Offset des Phasenrandes im Bereich von $-45°$ bis $+45°$.

Einfügen Wert, Referenz

3.2 Controller

GUIControl Bezeichnung

Leserführung Controller. Ausschnitt Klassendiagramm, Verweis auf gesamtes Diagramm.

3.3 Model

Leserführung Model. Ausschnitt Klassendiagramm, Verweis auf gesamtes Diagramm.

3.4 Benutzungs-Beispiel (Use-Case)

Leserführung Use-Case. Ausschnitt Klassendiagramm, Verweis auf gesamtes Diagramm.

4 Tests

5 Schlussfolgerungen

Ehrlichkeitserklärung

Mit der Unterschrift bestätigt der Unterzeichnende (Projektleiterin), dass das Dokument selbst geschrieben worden ist und alle Quellen sauber und korrekt deklariert worden sind.

Anita Rosenberger: ____

Ort, Datum: _________________________, ____________________

A Manuelle Berechnung des Hilfsparameteres β

Der erste Iterationsschtitt der in Abschnitt 2.5 erwähnten manuellen Berechnung des Hilfsparameteres β ist hier im Detail ausgeführt.

Zur Rekapitulation eine kurze Wiederholung der Ausgangslage:

$$
\begin{aligned}
\omega_{pid} &= 0.6714\,\mathrm{s}^{-1} \\
T_{vk} &= \frac{\beta}{\omega_{pid}} = \frac{0.5}{0.6714\,\mathrm{s}^{-1}} = 0.7447\,\mathrm{s} \\
T_{nk} &= \frac{1}{\omega_{pid}\cdot\beta} = \frac{1}{0.6714\,\mathrm{s}^{-1}\cdot 0.5} = 2.9789\,\mathrm{s} \\
K_{rk} &= 1
\end{aligned}
\tag{36}
$$

Diese Werte eingesetzt in Gleichung 14 ergeben:

$$
\begin{aligned}
H_{rpid}(j\omega) &= K_{rk}\cdot\left[\frac{(1+s\cdot T_{nk})(1+s\cdot T_{vk})}{s\cdot T_{nk}}\right] \\
&= 1\cdot\left[\frac{(1+j\omega\cdot 0.7447\,\mathrm{s})(1+j\omega\cdot 2.9789\,\mathrm{s})}{j\omega\cdot 2.9789\,\mathrm{s}}\right] \\
&= \frac{1+j\omega\cdot(2.9789\,\mathrm{s}+0.7447\,\mathrm{s})-\omega^2\cdot 0.7447\,\mathrm{s}\cdot 2.9789\,\mathrm{s}}{j\omega\cdot 2.9789\,\mathrm{s}} \\
&= \frac{1-2.2184\,\mathrm{s}^2\cdot\omega^2+j\omega\cdot 3.7236\,\mathrm{s}}{j\omega\cdot 2.9789\,\mathrm{s}} \\
&= \frac{-\omega\cdot 3.7236\,\mathrm{s}+j(1-\omega^2\cdot 2.2184\,\mathrm{s}^2)}{\omega\cdot 2.9789\,\mathrm{s}} \\
&= -1.250+j\cdot(\omega^{-1}\cdot 0.3357\,\mathrm{s}^{-1}-\omega\cdot 0.7450\,\mathrm{s})
\end{aligned}
\tag{37}
$$

Von dieser Zahl gilt es nun, das Argument zu bestimmen und abzuleiten. $H_{rpid}(j\omega)$ ist eine komplexe Zahl in der linken Halbebene ($Re < 0$), somit kommen folgende Formeln zur Berechnung des Arguments in Frage:

$$
\begin{aligned}
\varphi(Re+j\cdot Im) &= atan\left(\frac{Im}{Re}\right)+\pi \qquad Re<0\wedge Im\geq 0 \\
\varphi(Re+j\cdot Im) &= atan\left(\frac{Im}{Re}\right)-\pi \qquad Re<0\wedge Im<0
\end{aligned}
\tag{38}
$$

Da aber in diesem Fall lediglich die *Ableitung* von φ benötigt wird, fällt der Summand $\pm\pi$ weg und welche Formel für die Berechnung des Arguments verwendet wird, ist ohne Konsequenz.

$$
\begin{aligned}
\varphi(H_{rpid}(j\omega)) &= atan\left(\frac{\omega^{-1}\cdot 0.3357\,\mathrm{s}^{-1}-\omega\cdot 0.7450\,\mathrm{s}}{-1.250}\right)\pm\pi \\
&= atan\left(\omega^{-1}\cdot -0.2686\,\mathrm{s}^{-1}-\omega\cdot 0.5960\,\mathrm{s}\right)\pm\pi
\end{aligned}
\tag{39}
$$

Die Ableitung des Arkustangens ist:

$$\frac{d}{dx} atan(x) = \frac{1}{1+x^2} \tag{40}$$

mit

$$x(j\omega) = \omega^{-1} \cdot -0.2686\,\mathrm{s}^{-1} - \omega \cdot 0.5960\,\mathrm{s} \tag{41}$$

folgt

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\omega}\varphi(H_{rpid}(j\omega)) &= \frac{d}{dx} atan(x(j\omega)) \cdot \frac{d}{d\omega} x(j\omega) \\ &= \frac{0.5960 + \omega^{-2} \cdot 0.2686\,\mathrm{s}^2}{1 + (\omega \cdot 0.5960\,\mathrm{s} - \omega^{-1} \cdot 0.2686\,\mathrm{s}^{-1})^2} \\ &\approx 1.1920 \end{aligned} \tag{42}$$

Literatur

[1] J. Zellweger, „Phasengang-Methode," Kapitel aus Vorlesungsskript.

[2] A. Rosengerger, B. Müller, M. Suter, F. Alber, und R. Frey, „Projekt 2: Pflichtenheft – Fachlicher Teil," April 2015.

[3] (2011, März) Reglereinstellung nach Chiens, Hrones, Reswick. [Online]. Verfügbar: http://mathematik.tsn.at/content/files1/CHR_mit_ohne_Ausgleich1344.pdf [Stand: 23. März 2015].

[4] (2015, März) Faustformelverfahren (Automatisierungstechnik). [Online]. Verfügbar: http://de.wikipedia.org/wiki/Faustformelverfahren_(Automatisierungstechnik) [Stand: 23. März 2015].

[5] (1999, Jan) Anpassung eines Reglers an eine Regelstrecke – Einstellregeln. [Online]. Verfügbar: http://techni.chemie.uni-leipzig.de/reg/parcalchelp.html [Stand: 23. März 2015].

[6] J. Zellweger, „Regelkreise und Regelungen," Vorlesungsskript.

[7] W. Schumacher und W. Leonhard, „Grundlagen der Regelungstechnik," 2001, Vorlesungsskript.