

PROJEKT 2

FACHBERICHT

TEAM 1

10.06.2015

AUFTRAGGEBER: PETER NIKLAUS

BETREUER: PASCAL BUCHSCHACHER, ANITA GERTISER

EXPERTEN: PETER NIKLAUS, RICHARD GUT

TEAM: ALEXANDER STOCKER
CLAUDIUS JÖRG
DENIS STAMPFLI
MARTIN MOSER
RETO FREIVOGEL
YOHANNES MEASHO

STUDIENGANG: ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

Abstract

Regler werden heutzutage oft mit grosszügigen Faustformeln dimensioniert. Für stabilere Regelungen kann die aufwändige Phasengangmethode angewendet werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es mit einem Programm die Phasengangmethode stark zu vereinfachen. Die Vereinfachung besteht aus der Eingabe von Werten der identifizierten Strecke und gibt dimensionierte Werte aus. Zusätzlich kann das Programm die Resultate mit verschiedenen Faustformeln vergleichen. Der Fachbericht setzt sich zusammen aus einem mathematischen und einem programmtechnischen Teil. Der mathematische Abschnitt behandelt die Streckenanalyse, die Phasengangmethode und ihr Ablauf, die Übertragungsfunktion der Regler, die Schrittantwort der Regelung und die Optimierungsmöglichkeiten. Er geht auch auf die Dimensionierung mit Faustformeln ein. Der programmtechnische Bericht erläutert die Software, die Benutzerschnittstelle und die Anwendung von Model-View-Controller.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Streckenanalyse	6
2.2	Phasengangmethode	7
2.2.1	Grundlagen	7
2.2.2	Ablauf der Phasengangmethode	10
2.3	Übertragungsfunktion der Regler	10
2.4	Dimensionierung mit Faustformeln	11
2.5	Schrittantwort der Regelung	12
2.5.1	Berechnung	12
2.5.2	Optimierungsmöglichkeiten	13
3	Java Software	14
3.1	Klassendiagramm	14
3.2	Beschreibung der Software	14
3.3	Benutzerschnittstelle	14
3.4	Klassen	14
3.4.1	GUI Klassen	14
3.4.2	Model Klassen	14
3.4.3	View Klassen	14
3.4.4	Controller Klassen	14
4	Schlusswort	15
5	Literaturverzeichnis	16

1 Einleitung

Klassische Regler werden heutzutage oft über die gängigen Faustformeln dimensioniert. Leider erhält man durch die Anwendung von Faustformeln oft unbrauchbare Reglerparameter. Aus diesem Grund müssen Regler oft nachoptimiert werden. Eine andere Dimensionierungsmöglichkeit ist die Phasengangmethode von Jakob Zellweger. Diese Methode ist zwar aufwändiger, liefert jedoch stabilere Werte für die Regler. Wie der Name der Methode bereits verrät, werden die Reglerwerte über den Phasengang der Strecke ermittelt. Es handelt sich hierbei um eine Dimensionierung, die von Hand auf logarithmischen Papier erarbeitet wird. Dies ist sehr aufwändig und erfordert viel Arbeit. Unsere Aufgabe in diesem Projekt ist es, diese Methode mit Hilfe einer Software zu automatisieren.

Ziel ist es ein GUI (Graphical User Interface) zu erstellen, bei welchem die Streckenparameter eingegeben werden können. Die Software soll die Eingaben mit der Phasengangmethode weiterverarbeiten. Daraus resultieren die Reglerparameter. Ein weiteres Ziel wird die Schrittantwort der gesamten Regelung sein. Die Software simuliert die Schrittantwort und stellt diese graphisch dar. Die Bedienung des GUI soll übersichtlich und einfach in der Handhabung sein.

Als Ausgangslage ist die Schrittantwort der Strecke gegeben, womit die Streckenparameter herausgelesen werden können. Diese Werte sind in die Software einzugeben. Resultierend daraus erhält der Anwender die Reglerparameter sowie die Schrittantwort davon. Dieser Prozess kann in sechs Bereiche unterteilt werden. Beginnend mit der Streckenidentifikation. Die Übertragungsfunktion der Strecke wird über die Sani-Approximation ermittelt und berechnet. Als nächstes kann der Frequenzgang berechnet werden und mit der Phasengangmethode die Reglerwerte ermittelt werden. Somit sind die Reglerparameter bereits bestimmt und die Übertragungsfunktion des Reglers berechnet. Doch die Schrittantwort der Regelung fehlt zu diesem Zeitpunkt noch. Mit der Faltung können die beiden Übertragungsfunktionen, Regler und Strecke, zusammengerechnet werden. Für die Berechnung der Schrittantwort werden zuerst die Residuen der Übertragungsfunktion berechnet. Die Residuen werden benötigt, um mittels der inversen Laplace Transformation die Impulsantwort zu bilden. Abschliessend müssen die Impulsantworten aufsummiert werden, sodass die Schrittantwort der Regelung entsteht.

Die Software ist im bekannten MVC-Pattern gehalten. Die View implementiert die graphische Oberfläche der Software. Sie fungiert als Benutzerschnittstelle und ermöglicht die Eingabe der Streckenparameter. Der Controller steuert die Berechnungen der Applikation. Er leitet die Aufgaben dem Model weiter. Im Model werden die Berechnungen der entsprechenden Regler getätigt. Unter Verwendung der Klasse Polynome, Transferfunction und Schrittantwort werden die Regler berechnet. Die Daten werden über die Klasse Observer dem View zurückgegeben und dort aktualisiert.

Der nachfolgende Bericht ist in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste Teil beinhaltet die Grundlage der Phasengangmethode sowie deren wichtigste Formeln. Im zweiten Teil wird auf die Programmierung eingegangen, die auf dem MVC-Pattern beruht. Am Ende wird die Funktionalität der wichtigsten Methoden geklärt. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das MVC-Pattern.

2 Theoretische Grundlagen

Eine Regelung besteht, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, aus einem Regler und einer Regelstrecke. Beispiele einer Regelung sind Raumheizungen, LötKolben oder Geschwindigkeitsregelungen.

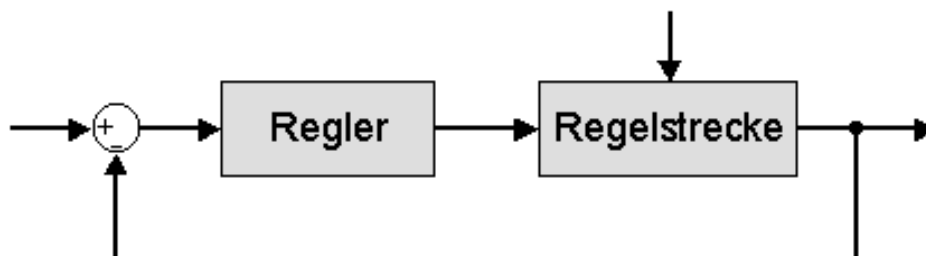


Abbildung 1: Regelung bestehend aus Regler und Regelstrecke [1]

Ist eine Regelstrecke gegeben, im Falle eines LötKolbens wäre dies die Distanz vom Heizelement bis zur Lötspitze, so muss ein dazu passender Regler dimensioniert werden. Reglerdimensionierungen können über das Auswerten der Schrittantwort der Regelstrecke durchgeführt werden. Um die Schrittantwort zu erhalten wird das Verhalten der Strecke aufgrund eines Schrittes der Eingangsgrösse gemessen. Für die Berechnungen werden die aus der Schrittantwort der Strecke ausgelesenen Kenngrössen Verzugszeit (T_u), Anstiegszeit (T_g) und Streckenbeiwert (K_s) verwendet. Zur Dimensionierung eines passenden Reglers existieren verschiedenste Methoden. Im Folgenden werden nun zwei Möglichkeiten genauer erläutert, wobei das Hauptaugenmerk auf der ersten Methode, der Phasengangmethode, liegt und die zweite, die Dimensionierung mittels gängigen Faustformeln, lediglich zum Vergleich durchgeführt wird.

Die Kurve in Abbildung 2 stellt die Schrittantwort einer Regelstrecke dar. Daran angelegt ist die Wendetangente, die benötigt wird, um die Verzugs- und die Anstiegszeit messen zu können.

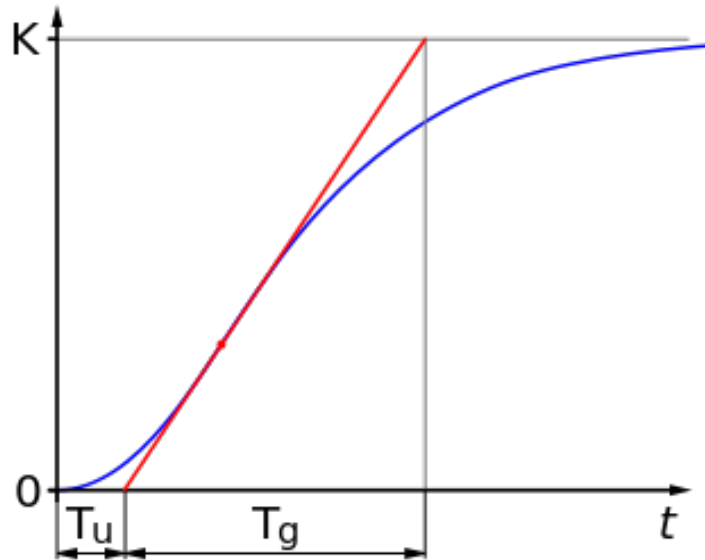


Abbildung 2: Schrittantwort einer Regelstrecke [2]

Ziel ist es, PI- sowie PID-Regler zu dimensionieren, das heisst deren Kennwerte zu berechnen. Der PI-Regler hat die Kennwerte Nachstellzeit (T_n) und Reglerverstärkung (K_R), beim PID-Regler kommt noch die Vorhaltezeit (T_v) hinzu.

2.1 Streckenanalyse

Aus den gegebenen Kennwerten der Schrittantwort soll nun die Übertragungsfunktion der Strecke berechnet werden, das heisst die Strecke muss identifiziert werden. Die Streckenidentifikation, wird mittels der Sani-Methode durchgeführt. Aus dem Verhältnis von T_u und T_g werden die Ordnung der Strecke (n) und die dazugehörigen Zeitkonstanten (T_1, T_2, \dots, T_n) berechnet, die benötigt werden, um die Übertragungsfunktion der Regelstrecke darzustellen. Die Übertragungsfunktion der Strecke ist gemäss Formel 1 definiert: [2]

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(1 + sT_1)(1 + sT_2) \dots (1 + sT_n)} \quad (1)$$

2.2 Phasengangmethode

Bei der Phasengangmethode handelt es sich eigentlich um eine grafische Dimensionierungsmethode, welche früher noch von Hand mit logarithmischem Papier durchgeführt wurde. Anstelle der grafischen Dimensionierung wird die Methode in diesem Fall komplett rechnerisch gelöst. Um die Methode zu verstehen wird ein theoretisches Grundwissen benötigt, welches in folgenden Unterkapiteln erklärt wird.

2.2.1 Grundlagen

Durch Ersetzen von s durch $j\omega$ in der Übertragungsfunktion der Strecke erhält man den Frequenzgang. Damit die Phasengangmethode angewendet werden kann, wird der Amplitudengang sowie der Phasengang der Strecke benötigt (Formeln 2, 3 und 4).

$$A_S(\omega) = \text{abs}(G_S(j\omega)) \quad (2)$$

$$\varphi_S(\omega) = \text{arg}(G_S(j\omega)) \quad (3)$$

$$\varphi_S(\omega) = -\arctan(\omega T_1) - \arctan(\omega T_2) \dots - \arctan(\omega T_n) \quad (4)$$

Die Zeitkonstanten des zu dimensionierenden Reglers stehen in direktem Zusammenhang mit dessen Amplitudengang. In den Abbildungen 3 und 4 sind die Amplitudengänge eines PI- und eines PID-Reglers dargestellt, wobei die x-Achsen logarithmisch skaliert sind. Wie die Kreisfrequenzen an den Knickstellen mit den Reglerparametern zusammenhängen sollen, ist in Tabelle 1 ersichtlich.

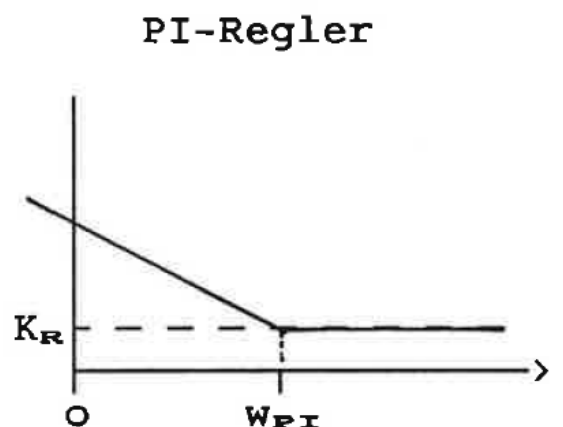


Abbildung 3: Amplitudengang PI-Regler $\text{Amp}(\omega)$ (log. Darstellung) [3]

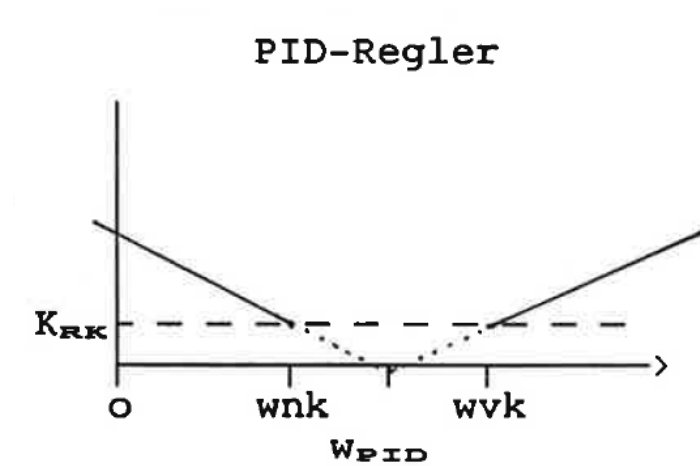


Abbildung 4: Amplitudengang PID-Regler $\text{Amp}(\omega)$ (log. Darstellung) [3]

PI-Regler	PID-Regler	
$\omega_{PI} = \frac{1}{T_n}$	$\omega_{nk} = \frac{1}{T_{nk}} = \beta * \omega_{PID}$	$\omega_{vk} = \frac{1}{T_{vk}} = \frac{\omega_{PID}}{\beta}$

Tabelle 1: Amplitudengänge Regler und Zusammenhänge mit Knickkreisfrequenzen

Diese Knickkreisfrequenzen (ω_{PI} in Abb. 3 und ω_{PID} in Abb. 4) werden mithilfe des Phasengangs der Strecke berechnet. Je nachdem welcher Reglertyp dimensioniert werden soll, müssen andere Punkte im Phasengang gesucht werden (Tabelle 2).

Regler	Phasengang der Strecke φ_s	Knickkreisfrequenz
PI	$-\frac{\pi}{2} = -90^\circ$	$\omega_{PI} = \frac{1}{T_n}$
PID	$-\frac{3\pi}{4} = -135^\circ$	$\omega_{PID} = \frac{1}{\sqrt{T_{nk}T_{vk}}}$

Tabelle 2: Gesuchte Punkte im Phasengang je nach Regler

Der PI-Regler kann anhand dieser Dimensionierungskriterien bereits dimensioniert werden. Beim PID-Regler muss allerdings noch ein Parameter mehr bestimmt werden. Es handelt sich um den Faktor β welcher benötigt wird um die Knickkreisfrequenzen des PID-Reglers berechnen zu können. Dieser Faktor β hängt mit der Tangentensteigung des Phasengangs der offenen Regelung im Punkt -135° zusammen.

Ein Dimensionierungskriterium der Phasengangmethode lautet, dass die Steigung des Phasengangs der gesamten, offenen Regelung bei der Knickkreisfrequenz $\frac{-0.5}{\omega_{PID}}$ betragen soll. Dies hat damit zu tun, dass eine Steigung von -20dB/Dekade angestrebt wird. Die genaue Herleitung von β befindet sich im Anhang. Es gilt die folgende Beziehung:

$$\frac{2\beta}{1+\beta^2} + \omega_{PID} \frac{d\varphi_{Strecke}(\omega_{PID})}{d\omega} = -0.5 \quad (5)$$

Da der Phasengang der Strecke und somit dessen Ableitung gegeben ist, kann durch Auflösen nach β nun auch dieser Parameter ermittelt werden. Ergibt sich ein Wert grösser als eins oder imaginär, so wird β als eins angenommen.

Die Verstärkung des Reglers wird mit Hilfe des Phasenrands bestimmt. Der Phasenrand ist die Differenz der Streckenphase zu -180° . Bei unterschiedlichem Phasenrand ergeben sich unterschiedliche Verstärkungsfaktoren, was auch auf das Überschwingen des Reglers Einfluss hat. Tabelle 3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem gewählten Phasenrand und dem daraus resultierenden Überschwingen der Regelung.

Phasenrand φ_R	Streckenphase φ_S	Überschwingen
45°	-135°	23%
51.8°	-128.5°	16.3%
65.5°	-114.6°	4.6%
76.3°	-103.7°	0%

Tabelle 3: Zusammenhang Phasenrand und Überschwingen

Zur Berechnung der Verstärkung werden nun die Amplitudengänge der Strecke, sowie des Reglers benötigt. Dazu wird im Phasengang der offenen Regelung φ_S der Phasenrand abgetragen. Dies liefert die Kreisfrequenz ω_D . Die beiden Amplituden bei der Kreisfrequenz ω_D , werden miteinander multipliziert. Gemäss Phasengangmethode soll die Verstärkung an dieser Stelle eins sein. Dies führt zur Formel 6. $Go(\omega_D)$ entspricht dem Amplitudengang der offenen Regelung an der Stelle ω_D .

$$K_R = \frac{1}{|Go(\omega_D)|} \quad (6)$$

2.2.2 Ablauf der Phasengangmethode

Die Phasengangmethode der Strecke φ_S wird nach dem folgenden Ablauf durchgeführt. Die Punkte 2. und 3. werden nur für PID-Regler benötigt. Eine numerische Beispielrechnung für einen PI-Regler ist im Anhang angefügt.

1. Im Phasengang der Strecke φ_S werden die Kreisfrequenzen in bestimmten Punkten gesucht.
2. Der Faktor β wird bestimmt.
3. Mithilfe von β werden die Zeiten T_{nk} und T_{vk} ermittelt.
4. Der Phasengang der offenen Regelung φ_{go} wird berechnet (Phasengang Strecke + Phasengang Regler)
5. Die Kreisfrequenz ω_D beim gewählten Phasenrand wird berechnet.
6. Die Amplitudengänge der Strecke sowie des Reglers bei ω_D werden miteinander multipliziert. Damit wird die Reglerverstärkung K_R festgelegt.

Besondere Vorsicht ist bei den erhaltenen Kenngrößen des dimensionierten Reglers geboten. Es wird zwischen Regler- und Bodekonform unterschieden. Bodekonform bedeutet, dass die Parameter kaskadiert sind und die logarithmische Rechnung somit vereinfacht wird. Standardmässig wird in der Fachliteratur meist reglerkonform gerechnet. Die Parameter des PI-Reglers sind reglerkonform und können somit direkt weiterverwendet werden. Die Parameter des PID-Reglers, welche wir bei der Dimensionierung mittels Phasengangmethode erhalten, sind bodekonform. Sie können jedoch in die reglerkonforme Darstellung umgerechnet werden. Für die Umrechnung wurden die Formeln 7, 8 und 9 für PID-Regler hergeleitet (siehe Anhang): [3]

$$K_R = K_{rk} \left(1 + \frac{T_{vk}}{T_{nk}} - \frac{T_p}{T_{nk}} \right) \quad (7)$$

$$T_n = T_{nk} + T_{vk} - T_p \quad (8)$$

$$T_v = \frac{T_{nk}T_{vk}}{T_{nk} + T_{vk} - T_p} - T_p \quad (9)$$

T_p steht für die parasitäre Zeitkonstante. Diese wird benötigt, da ein idealer PID-Regler in der Praxis nicht umsetzbar ist. Der Index k in der bodekonformen Darstellung steht für Kaskadierung.

2.3 Übertragungsfunktion der Regler

Um schlussendlich die Schrittantwort der geschlossenen Regelung berechnen zu können, wird die Übertragungsfunktion des dimensionierten Reglers benötigt. Diese lässt sich mit den aus der Phasengangmethode erhaltenen Parametern aufstellen (Tabelle 4).

Beschreibung	Darstellung
PI-Regler bodekonform	$G_R(s) = K_R \frac{(1+sT_n)}{sT_n}$
PI-Regler reglerkonform	$G_R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{sT_n}\right)$
PID-Regler bodekonform	$G_R(s) = K_{rk} \frac{(1+sT_{nk})(1+sT_{vk})}{sT_{nk}(1+sT_p)}$
PID-Regler reglerkonform	$G_R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{sT_n} + \frac{sT_v}{1+sT_p}\right)$

Tabelle 4: Übertragungsfunktionen Regler [4]

2.4 Dimensionierung mit Faustformeln

Die Dimensionierung mittels Faustformeln wird durchgeführt, um die Dimensionierungsergebnisse der Phasengangmethode am Schluss zu vergleichen und auszuwerten. Es gibt etliche verschiedene Faustformeln von unterschiedlichen Personen. Die bekanntesten und gängigsten Dimensionierungsformeln sind in den folgenden Tabellen aufgelistet und werden im Programm implementiert.

Formeltyp	Regler	K_R	T_n	T_v
Ziegler/Nichols	P	$\frac{T_g}{K_s T_u}$		
	PI	$\frac{0.9 * T_g}{K_s T_u}$	$3.3 * T_u$	
	PID	$\frac{0.9 * T_g}{K_s T_u}$	$2 * T_u$	$0.42 * T_t$
Oppelt	P	$\frac{T_g}{K_s T_u}$		
	PI	$\frac{0.8 * T_g}{K_s T_u}$	$3 * T_u$	
	PID	$\frac{1.2 * T_g}{K_s T_u}$	$2 * T_u$	$0.42 * T_t$
Rosenberg	P	$\frac{T_g}{K_s T_u}$		
	PI	$\frac{0.91 * T_g}{K_s T_u}$	$3.3 * T_u$	
	PID	$\frac{1.2 * T_g}{K_s T_u}$	$2 * T_u$	$0.44 * T_t$

Tabelle 5: Faustformeln Ziegler/Nichols, Oppelt und Rosenberg [5]

Reglertyp	aperiodischer Einschwingvorgang		Einschwingvorgang mit 20% Überspringen	
	Führung	Störung	Führung	Störung
P	$K_R = \frac{0.3 \cdot T_g}{K_s T_u}$	$K_R = \frac{0.3 \cdot T_g}{K_s T_u}$	$K_R = \frac{0.7 \cdot T_g}{K_s T_u}$	$K_R = \frac{0.7 \cdot T_g}{K_s T_u}$
PI	$K_R = \frac{0.35 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = 1.2 \cdot T_g$	$K_R = \frac{0.6 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = 4 \cdot T_u$	$K_R = \frac{0.6 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = T_g$	$K_R = \frac{0.7 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = 2.3 \cdot T_u$
PID	$K_R = \frac{0.6 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = T_g$ $T_v = 0.5 \cdot T_u$	$K_R = \frac{0.95 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = 2.4 \cdot T_u$ $T_v = 0.42 \cdot T_u$	$K_R = \frac{0.95 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = 1.35 \cdot T_g$ $T_v = 0.47 \cdot T_u$	$K_R = \frac{1.2 \cdot T_g}{K_s T_u}$ $T_n = 2.3 \cdot T_u$ $T_v = 0.42 \cdot T_u$

Tabelle 6: Chien/Hrones und Reswick [5]

2.5 Schrittantwort der Regelung

2.5.1 Berechnung

evtl. Analyse genauer beschreiben

Um die Schrittantwort der geschlossenen Regelung berechnen zu können, wird die Übertragungsfunktion der Regelung benötigt. Diese wird aus den Übertragungsfunktionen des Reglers und der Strecke gemässe Formel 10 berechnet.

$$G(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} \quad (10)$$

Die Berechnung der Schrittantwort wird mittels Residuenrechnung durchgeführt. Erstes Teilziel ist es die Übertragungsfunktion in die Form von Formel 11 zu bringen, wo $B(s)$ das Zählerpolynom der Übertragungsfunktion, $A(s)$ das Nennerpolynom, $R(n)$ die Residuen, $P(n)$ die Polstellen und K den Direktterm darstellen.

$$\frac{B(s)}{A(s)} = \frac{R(1)}{s - P(1)} + \frac{R(2)}{s - P(2)} + \dots + K \quad (11)$$

Dafür werden als erstes die Polstellen der Übertragungsfunktion gesucht. Die geschieht mit Hilfe des Laguerresolvers, der in Java bereits vorhanden ist. Die Residuen erhält man durch die Partialbruchzerlegung mittels Residuenkalkül gemäss Formel 12.

$$R(n) = \lim_{s \rightarrow P(n)} (s - P(n)) \frac{B(s)}{A(s)} \quad (12)$$

Durch die inverse Laplactransformation, unter Verwendung der Korrespondenztabelle erhält man die Impulsantwort $h(t)$ (Formel 13 mit $t \geq 0$).

$$h(t) = K\delta(t) + \sum_{k=0}^n R(k) * e^{P(k)t} \quad (13)$$

Aus der erhaltenen Implusantwort muss nun noch die Schrittantwort berechnet werden, was mittels Integration gemacht wird. Beachtung muss hier der richtigen Wahl der Integrationskonstanten geschenkt werden.

Die Schrittantwort wird zusätzlich noch analysiert. Folgende Werte werden ausgewertet:

- Anregelzeit T_{an} : Die Zeit, welche die Strecke benötigt bis der Sollwert das erste mal erreicht wird.
- Ausregelzeit T_{aus} : Die zeit, welche die Strecke benötigt bis die Strecke in einem gewissen Toleranzbereich einmündet, und diesen nicht wieder verlässt.
- Max. Überschwingen Y_{max} : Der Wert an der Stelle, wo die Schrittantwort an meisten vom Sollwert abweicht.

2.5.2 Optimierungsmöglichkeiten

Falls die berechnete und dargestellte Schrittantwort der Regelung nicht der Vorstellung und den Ansprüchen des Nutzers entspricht, soll dieser die Möglichkeiten haben, die Schrittantwort nach seinen Anforderungen zu optimieren. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Einerseits kann der Regler durch seine Eigenschaften K_R , T_n und T_v modifiziert werden. Eine Schrittantwort durch die Veränderung dieser drei Eigenschaften zu optimieren ist äusserst schwierig. Dies erfordert grosses Wissen und viel Erfahrung in der Regelungstechnik, was einem weniger erfahrenen Nutzer die Optimierung nahezu verunmöglicht.

Es besteht jedoch die Möglichkeit die Optimierungen durch Verändern gewisser Parameter in der Phasengangmethode durchzuführen. So ist es aus der Theorie ersichtlich [Kapitel Grundlagen Phasengangmethode], dass das der gewählte Phasenrand auf das Überschwingen Einfluss hat. Die Berechnung kann also mittels gewählttem Phasenrand solange optimiert werden, bis das Überschwingen der Schrittantwort den Anforderungen entspricht.

3 Java Software

3.1 Klassendiagramm

3.2 Beschreibung der Software

3.3 Benutzerschnittstelle

3.4 Klassen

3.4.1 GUI Klassen

3.4.2 Model Klassen

3.4.3 View Klassen

3.4.4 Controller Klassen

4 Schlusswort

5 Literaturverzeichnis

Quellen
auf Fehler
überprüfen,
korrigieren

Literatur

- [1] RN-Wissen. Regelungstechnik. <http://rn-wissen.de/wiki/index.php/Datei:Regelkreis4.png> (08.05.2015).
- [2] D. Solenicki and Y. Bürgi, “Mathematisches Labor mlab - Systemidentifikation mit Hilfe der Schrittantwort,” November 2013, FHNW.
- [3] J. Zellweger, “Phasengang-Methode,” FHNW.
- [4] —, “Regelkreise und Regelungen,” FHNW.
- [5] B. Bate, “Spezialgebiete der Steuer- und Regelungstechnik,” 2009.