

# 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

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
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
2.6	Optimierungsmöglichkeiten . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Java Software</b>	<b>13</b>
3.1	Klassendiagramm . . . . .	13
3.2	Beschreibung der Software . . . . .	13
3.3	Benutzerschnittstelle . . . . .	13
3.4	Klassen . . . . .	13
3.4.1	GUI Klassen . . . . .	13
3.4.2	Model Klassen . . . . .	13
3.4.3	View Klassen . . . . .	13
3.4.4	Controller Klassen . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Test Matlabs</b>	<b>14</b>
4.1	Schrittantwort . . . . .	14
4.1.1	Übertragungsfunktion . . . . .	14
4.1.2	Wendetangent . . . . .	14
4.2	Dimensionierung mit Faustformeln . . . . .	14
4.3	Dimensionierung mit Phasengangmethode . . . . .	14
4.3.1	Amplitudengang der Strecke . . . . .	14
4.3.2	Phasengang der Strecke . . . . .	14

<b>5</b>	<b>Schlusswort</b>	<b>15</b>
5.1	Schrittantwort . . . . .	15
5.1.1	Übertragungsfunktion . . . . .	15
5.1.2	Wendetangent . . . . .	15
5.2	Dimensionierung mit Faustformeln . . . . .	15
5.3	Dimensionierung mit Phasengangmethode . . . . .	15
5.3.1	Amplitudengang der Strecke . . . . .	15
5.3.2	Phasengang der Strecke . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>16</b>

## **1 Einleitung**

## 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.

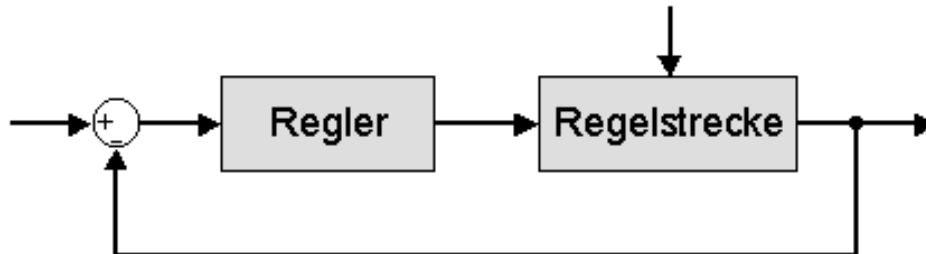


Abbildung 1: Regelung bestehend aus Regler und Regelstrecke

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.

Quelle ein-  
fügen

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.

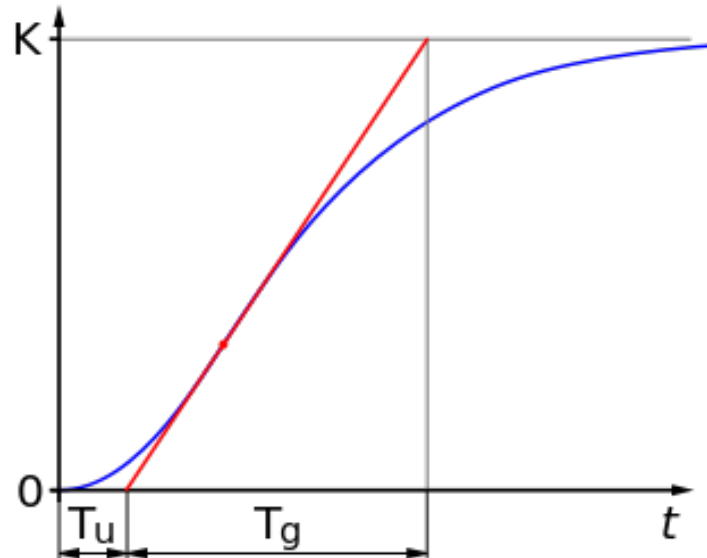


Abbildung 2: Schrittantwort einer Regelstrecke

Quelle einfügen

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:

Quelle einfügen

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

## 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.

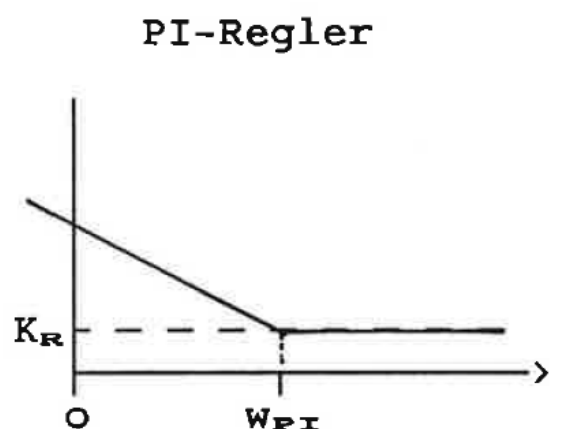


Abbildung 3: Amplitudengang PI-Regler  $\text{Amp}(\omega)$  (log. Darstellung)

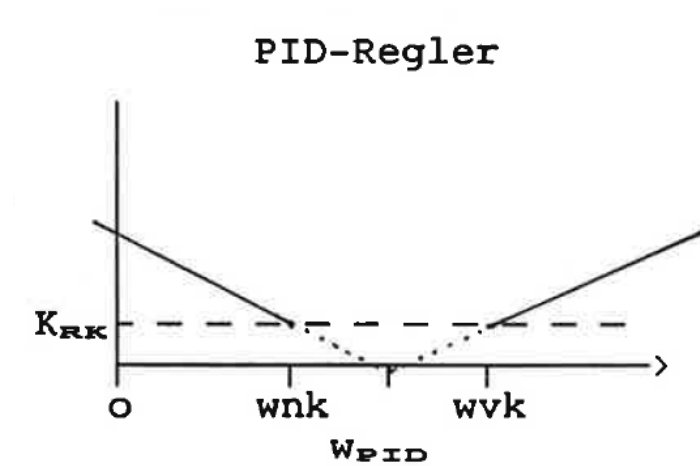


Abbildung 4: Amplitudengang PID-Regler  $\text{Amp}(\omega)$  (log. Darstellung)

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 ( $\omega_{PI}$  in Abb. 3 und  $\omega_{PID}$  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 $\varphi_s$	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  $\beta$  welcher benötigt wird um die Knickkreisfrequenzen des PID-Reglers berechnen zu können. Dieser Faktor  $\beta$  hängt mit der Tangentensteigung des Phasengangs der offenen Regelung im Punkt  $-135^\circ$  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  $\beta$  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  $\beta$  nun auch dieser Parameter ermittelt werden. Ergibt sich ein Wert grösser als eins oder imaginär, so wird  $\beta$  als eins angenommen.

Die Verstärkung des Reglers wird mit Hilfe des Phasenrands bestimmt. Der Phasenrand ist die Differenz der Streckenphase zu  $-180^\circ$ . 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 $\varphi_R$	Streckenphase $\varphi_S$	Überschwingen
$45^\circ$	$-135^\circ$	23%
$51.8^\circ$	$-128.5^\circ$	16.3%
$65.5^\circ$	$-114.6^\circ$	4.6%
$76.3^\circ$	$-103.7^\circ$	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  $\varphi_S$  der Phasenrand abgetragen. Dies liefert die Kreisfrequenz  $\omega_D$ . Die beiden Amplituden bei der Kreisfrequenz  $\omega_D$ , 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  $\omega_D$ .

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

### 2.2.2 Ablauf der Phasengangmethode

Die Phasengangmethode der Strecke  $\varphi_S$  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  $\varphi_S$  werden die Kreisfrequenzen in bestimmten Punkten gesucht.
2. Der Faktor  $\beta$  wird bestimmt.
3. Mithilfe von  $\beta$  werden die Zeiten  $T_{nk}$  und  $T_{vk}$  ermittelt.
4. Der Phasengang der offenen Regelung  $\varphi_{go}$  wird berechnet (Phasengang Strecke + Phasengang Regler)
5. Die Kreisfrequenz  $\omega_D$  beim gewählten Phasenrand wird berechnet.
6. Die Amplitudengänge der Strecke sowie des Reglers bei  $\omega_D$  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):

Quelle einfügen

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

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

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

$T_p$  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).

Quelle einfügen

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

## 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	<b>P</b>	$\frac{T_g}{K_s T_u}$		
	<b>PI</b>	$\frac{0.9 * T_g}{K_s T_u}$	$3.3 * T_u$	
	<b>PID</b>	$\frac{0.9 * T_g}{K_s T_u}$	$2 * T_u$	$0.42 * T_t$
Oppelt	<b>P</b>	$\frac{T_g}{K_s T_u}$		
	<b>PI</b>	$\frac{0.8 * T_g}{K_s T_u}$	$3 * T_u$	
	<b>PID</b>	$\frac{1.2 * T_g}{K_s T_u}$	$2 * T_u$	$0.42 * T_t$
Rosenberg	<b>P</b>	$\frac{T_g}{K_s T_u}$		
	<b>PI</b>	$\frac{0.91 * T_g}{K_s T_u}$	$3.3 * T_u$	
	<b>PID</b>	$\frac{1.2 * T_g}{K_s T_u}$	$2 * T_u$	$0.44 * T_t$

Tabelle 5: Faustformeln Ziegler/Nichols, Oppelt und Rosenberg

Quellen  
einfügen

Quelle ein-  
fügen

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

Tabelle 6: Chien/Hrones und Reswick

## 2.5 Schrittantwort der Regelung

- Kapitel schreiben
- Übertragungsfunktion Regelung (Berechnung aus üfunk regler und üfunk regelung)
  - Berechnung durch Residuen

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.

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

## 2.6 Optimierungsmöglichkeiten

- gesamtes Kapitel schreiben
- über maximum der schrittantwort und phasenrand kann überspringen genau berechnet werden
  - mit gesuchtem punkt im phasengang geschwindigkeit der schrittantwort optimieren

## **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 Test Matlabs**

### **4.1 Schrittantwort**

#### **4.1.1 Übertragungsfunktion**

#### **4.1.2 Wendetangent**

### **4.2 Dimensionierung mit Faustformeln**

### **4.3 Dimensionierung mit Phasengangmethode**

#### **4.3.1 Amplitudengang der Strecke**

#### **4.3.2 Phasengang der Strecke**

## **5 Schlusswort**

### **5.1 Schrittantwort**

#### **5.1.1 Übertragungsfunktion**

#### **5.1.2 Wendetangent**

### **5.2 Dimensionierung mit Faustformeln**

### **5.3 Dimensionierung mit Phasengangmethode**

#### **5.3.1 Amplitudengang der Strecke**

#### **5.3.2 Phasengang der Strecke**

## **6 Literaturverzeichnis**