

# REGLERDIMENSIONIERUNG MIT HILFE DER SCHRITTANTWORT

## RDT ONE

## FACHBERICHT

PROJEKT 2  
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.

# 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Streckenanalyse . . . . .	8
2.2	Phasengangmethode . . . . .	9
2.2.1	Grundlagen . . . . .	9
2.2.2	Ablauf der Phasengangmethode . . . . .	12
2.3	Übertragungsfunktion der Regler . . . . .	12
2.4	Dimensionierung mit Faustformeln . . . . .	13
2.5	Schrittantwort der Regelung . . . . .	14
2.5.1	Berechnung . . . . .	14
2.5.2	Optimierungsmöglichkeiten . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Software</b>	<b>16</b>
3.1	Packages und seine Klassen . . . . .	16
3.1.1	Package Controller . . . . .	16
3.1.2	Package Model . . . . .	16
3.1.3	Dimensionierung . . . . .	16
3.1.4	View . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Schlusswort</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Ehrlichkeitserklärung</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>20</b>

## 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.

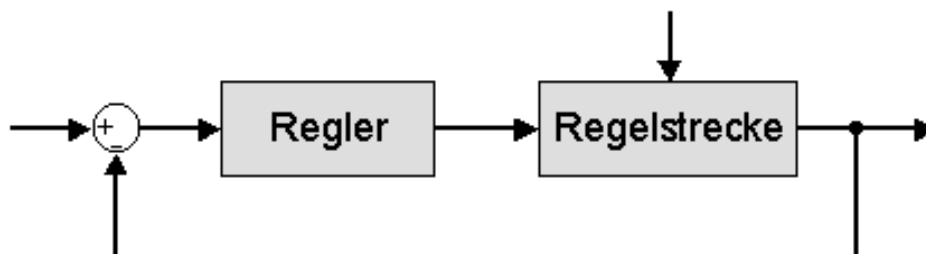
Als Ausgangslage ist die Schrittantwort der Strecke gegeben, womit die Streckenparameter herausgelesen werden können. Diese Werte sind in die Software einzugeben. Resultierend daraus erhält der Anwender die Reglerparameter sowie die Schrittantwort davon. Dieser Prozess kann in sechs Bereiche unterteilt 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.

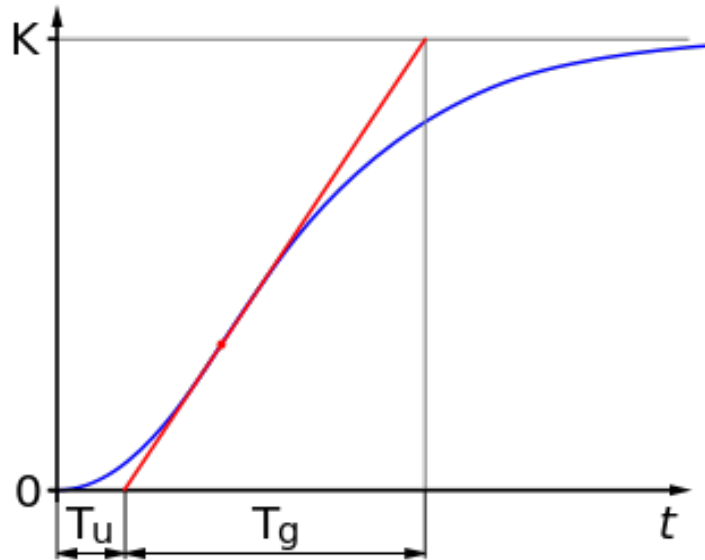


Abbildung 2: Schrittantwort einer Regelstrecke [2]

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

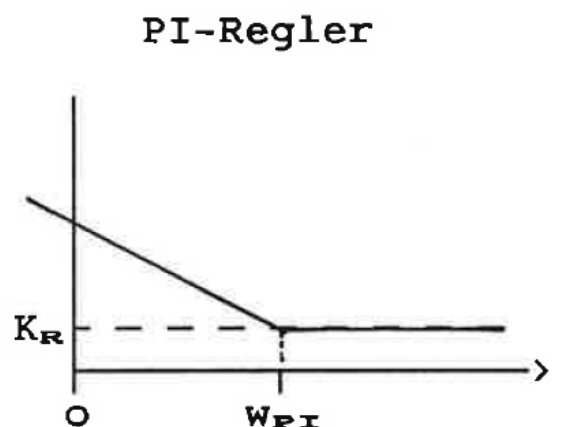
Durch Ersetzen von  $s$  durch  $j\omega$  in der Übertragungsfunktion der Strecke erhält man den Frequenzgang. Damit die Phasengangmethode angewendet werden kann, wird der Amplitudengang sowie der Phasengang der Strecke benötigt (Formeln 2, 3 und 4).

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

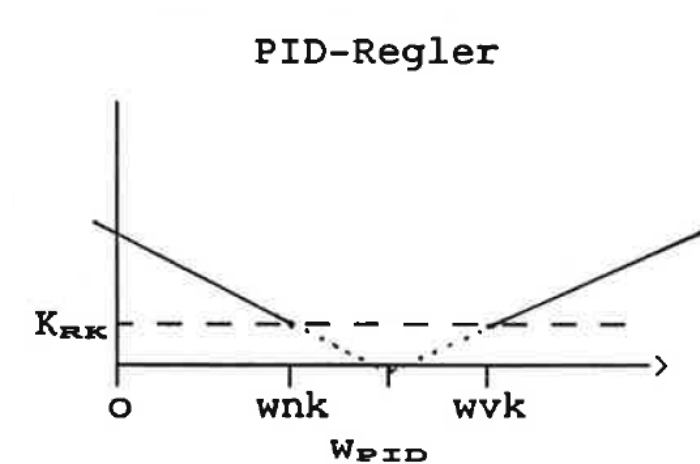
$$\varphi_S(\omega) = \text{arg}(G_S(j\omega)) \quad (3)$$

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

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 ( $\omega_{PI}$  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): [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	<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 [5]

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 [5]

## 2.5 Schrittantwort der Regelung

### 2.5.1 Berechnung

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. Diese befinden sich bei den Nullstellen des Nennerpolynoms. Die Residuen erhält man durch die Partialbruchzerlegung mittels Residuenkalkül gemäss Formel 12, welche aber nur Gültigkeit hat, wenn ausschliesslich einfache Nullstellen vorkommen.

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

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

$$h(t) = K\delta(t) + \sum_{i=1}^n R(i) * e^{P(i)t} \quad (13)$$

Aus der erhaltenen Impulsantwort  $h(t)$  muss nun noch die Schrittantwort berechnet werden, was mittels Integration gemacht wird (Formel 14).

$$s(t) = \int_0^t K\delta(\tau)d\tau + \sum_{i=1}^n \int_0^t R(i) * e^{P(i)\tau}d\tau \quad (14)$$

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, dass der gewählte Phasenrand auf das Überschwingen Einfluss hat (siehe Kapitel 2.2.1, S. 11, Tabelle 3). Die Berechnung kann also mittels gewählttem Phasenrand solange optimiert werden, bis das Überschwingen der Schrittantwort den Anforderungen entspricht.

### 3 Software

Ziel der Applikation ist es, die Berechnung der Schrittantwort eines Regelkreises zu visualisieren. Die Applikation ist im Model-View-Controll Konzept aufgebaut. Die View erzeugt die Graphische Benutzeroberfläche. Dort können die spezifischen Werte zur Berechnung der Schrittantwort des Regelkreises eingegeben werden. Zudem wird diese Graphisch in einem Diagramm Festgehalten. Der Controller übernimmt die Steuerung der Applikation und übergibt die durchzuführenden Berechnungen an das Model weiter. Das Model führt alle Berechnungen zur Dimensionierung des Regelkreises durch, welche dann anschliessen in der View wieder visualisiert werden. Somit wäre der Kreislauf der Applikation geschlossen.

Zum Aufdatieren der Benutzerschnittstelle wird das Observable- Observer Entwurfsmuster verwendet. Die View agiert als Observer und das Model als Observable.

#### 3.1 Packages und seine Klassen

##### 3.1.1 Package Controller

Der Controller ist verantwortlich für die Steuerung der Applikation. Er stellt für alle Befehle die der Benutzer im GUI eine Methode zur Verfügung, mit der das Model modifiziert wird. Weiter erkennt er Fehleingaben und meldet diese dem Benutzer durch die Methode `displayError` des Views. Bevor jeder Änderung des Models speichert sich der Controller eine Kopie des Modells, dadurch ist es möglich alte Zustände wiederherzustellen und die Befehle rückgängig und Wiederholen zu unterstützen. Weiter ist der Controller für das Speichern und Laden zuständig. Dies funktioniert da das Model das `Serializable` Interface implementiert und der Controller so die Daten mit einem `ObjectOutputStream` in eine Datei schreiben bzw. mit einem `ObjectInputStream` aus einer Datei laden kann. Der Controller ist nicht verantwortlich, dass das View die Daten des Models übernimmt, dies geschieht direkt durch die Klasse `Observable` (Observer Pattern). `PIDRechner` Startpunkt der Applikation. Initialisiert Controller, View und Model

##### 3.1.2 Package Model

Die Klasse `Model` verwaltet die Regelstecke und die verschiedenen Dimensionierungsmethoden. Es bietet Zugriffsmethoden um auf die Regelstrecke und Dimensionierungsmethoden zuzugreifen. Auch kann es Dimensionierungsmethoden kopieren oder löschen. `Regelkreis` Die Klasse `Regelkreis` dient zur Umwandlung der Übertragungsfunktionen von Regelstrecke und Regler in die Übertragungsfunktion des ganzen Kreises. `Regelstrecke` Die Klasse `Regelstrecke` bietet eine Abstraktion einer `PTn`-Strecke mit den Attributen `Ks`, `Tu` und `Tg`. Eine Regelstrecke ist ein Regelglied, das heisst sie kann als eine Übertragungsfunktion angesehen werden. Die Übertragungsfunktion wird durch die `Sani-Approximation` gebildet. `Regler` Diese Klasse dient zur Abstraktion eines `PID-T` Reglers mit den Parametern `Kr`, `Tn`, `Tv`, und `Tp`. Ein Regler wird normalerweise durch eine Dimensionierungsmethode gebildet. `TransferFunction` Eine Übertragungsfunktion besteht aus Zähler und Nenner. Sie bietet Methoden zur Faltung und Berechnung der Residuen. Weiter kann aus jeder Übertragungsfunktion eine Schrittantwort gebildet werden. `Polynom` `Polynom` abstrahiert reelle Polynome beliebigen Grades. Es bietet Methoden zur Addition und Multiplikation mit anderen Polynomen. Weiter können die Wurzeln und die Residuen (mit einem angenommenen Zähler von 1) ausgelesen werden. `Schrittantwort` Die Klasse `Schrittantwort` stellt die Schrittantwort für ein lineares Regelglied ohne Durchgriff dar. Sie bietet zudem Methoden zur Analyse. So kann sie feststellen ob eine Schrittantwort ausschwingt und wie gross An- und Ausschwingzeit sind. Weiter sucht sie nach dem Maximalwert der Kurve und bietet die Möglichkeit dessen Zeitpunkt und Grösse auszulesen.



### 3.1.3 Dimensionierung

Diese Klasse ist ein tagged-Union der anderen Dimensionierungsarten. So bietet diese Klasse auch alle Methoden der anderen Dimensionierungsmethoden. Wird eine Methode bei einer falschen Variante verwendet, wirft die Klasse eine `ClassCastException`. Der Typ kann mit der Methode `setTyp` gewechselt werden. Beim Wechseln zu der Manuellen Dimensionierungsmethode, werden die Werte des dimensionierten Reglers übernommen. `DimEnum` Dieser Enum dient zur Aufzählung aller Dimensionierungstypen. Er ordnet jedem Typ auch einen Text zu. `TopoEnum` Zur Unterscheidung von PI und PID Reglern wird dieser Enum verwendet. `AbstractDim` `AbstractDim` ist die abstrakte Grundklasse aller Dimensionierungsmethoden. Die Methode `calc` berechnet für eine gegebene Regelstrecke einen Regler. Durch `get-` und `setTopo` lässt sich die Reglertopologie modifizieren. Die Methode `getTyp()` gibt den Typ des konkreten Reglers zurück. `ZellwegerDim` Hier steckt die Phasengangmethode zur Reglerdimensionierung. Die Beschreibung der Methode findet sich im theoretischen Teil. `IterativDim` Diese Methode führt die Phasengangmethode mehrmals nacheinander aus und sucht mit einer binären Suchmethode nach dem gewünschten Überschwingen der Schrittantwort. Die anderen Klassen entsprechen den verschiedenen Faustregeln.

### 3.1.4 View

`View` ist die oberste Ebene im GUI (abgesehen vom `Frame`). Es beheimatet die `Sidebar`, den `Graph` und die `Statuszeile`. Auch initialisiert es die `Menübar` vom `JFrame`. `SidebarPanel` `SidebarPanel` ordnet die einzelnen Panels von `Regelstrecke`, `Regler` und `Analyse` vertikal untereinander an. `RegelstreckeView` `RegelstreckeView` zeigt die Parameter der `Regelstrecke` sowie die berechnete Ordnung und die Zeitkonstanten an. `ReglerView` Dieses `JPanel` visualisiert den Typ der Dimensionierungsmethode, deren Parameter und die Werte des daraus resultierenden Reglers. `AnalyseView` Zeigt die Eigenschaften einer Schrittantwort. `Graph` Zeichnet alle Schrittantworten mit dem `ChartPanel` von `JFreeChart`. Unter dem Graphen zeigt es weiter eine `Legende`. Die Zustände der `Checkboxen` werden nur vom `Graph` selbst verwendet und nicht dem `Controller` mitgeteilt.

## **4 Schlusswort**

## 5 Ehrlichkeitserklärung

Hiermit erklärt der Unterzeichnende (Projektleiter), dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne Hilfe Dritter und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen verfasst worden ist.

Alex Stocker (Projektleiter): \_\_\_\_\_

Datum, Ort: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_

## 6 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.

## 7 Anhang

- Herleitungen Formeln
- Beispielberechnung Phasengangmethode mithilfe von Matlab
- Bedienungsanleitung des Programmes

Alle An-  
hänge auf-  
führen!!!

Herleitung  $\beta$ 

$$\varphi_R(\omega) + \varphi_S(\omega) = \varphi_0(\omega)$$

$$\frac{d\varphi_R(\omega_0)}{d\omega} + \frac{d\varphi_S(\omega_0)}{d\omega} = \frac{d\varphi_0(\omega_0)}{d\omega} = \frac{-0,5}{\omega_{PD}}$$

$$\omega_{PD} \frac{d\varphi_R(\omega_0)}{d\omega} + \omega_{PD} \frac{d\varphi_S(\omega_0)}{d\omega} = \omega_{PD} \frac{d\varphi_0(\omega_0)}{d\omega} = -0,5$$

$$\omega_{PD} \frac{d\varphi_R(\omega_0)}{d\omega} = \frac{2\beta}{1+\beta^2}$$

$$\frac{2\beta}{1+\beta^2} + \omega_{PD} \frac{d\varphi_S(\omega_0)}{d\omega} = -0,5$$

$$\frac{2\beta}{1+\beta^2} = -0,5 - \underbrace{\omega_{PD} \frac{d\varphi_S(\omega_0)}{d\omega}}_{\text{Substitution} = z}$$

$$\frac{2\beta}{1+\beta^2} = z$$

$$2\beta = z + z\beta^2$$

$$0 = z\beta^2 - 2\beta + z$$

$$\beta_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{4 - 4z^2}}{2z} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - z^2}}{z}$$

$$\underline{\underline{\beta_{1,2} = \frac{1}{z} \pm \sqrt{\frac{1}{z^2} - 1}}}$$

Kommentare / Erklärungen:

$\varphi_R(\omega)$  Phasengang Regler  
 $\varphi_S(\omega)$  Phasengang Strecke  
 $\varphi_0(\omega)$  Phasengang offene Regelung

Steigung im Punkt  $\omega_{PD}$  beträgt  $-\frac{0,5}{\omega_{PD}}$

wird in obige Gleichung eingesetzt

# Herleitung Umrechnung Bodeform $\rightarrow$ Reglerform

$$\frac{K_R (1 + sT_{nh})(1 + sT_{vu})}{sT_{nh}(1 + sT_p)} = K_R \left( 1 + \frac{1}{sT_n} + \frac{sT_v}{1 + sT_p} \right)$$

$$\frac{K_R (s^2(T_{nh}T_{vu}) + s(T_{nh} + T_{vu}) + 1)}{sT_{nh}(1 + sT_p)} = \frac{K_R (s^2(T_nT_p + T_nT_v) + s(T_n + T_p) + 1)}{sT_n(1 + sT_p)}$$

$$\frac{K_R}{T_{nh}} (s^2(T_{nh}T_{vu}) + s(T_{nh} + T_{vu}) + 1) = \frac{K_R}{T_n} (s^2(T_nT_p + T_nT_v) + s(T_n + T_p) + 1)$$

mit  $s$  gegen 0  $\Rightarrow \frac{K_R}{T_{nh}} = \frac{K_R}{T_n}$

$$s^2(T_{nh}T_{vu}) + s(T_{nh} + T_{vu}) + 1 = s^2(T_nT_p + T_nT_v) + s(T_n + T_p) + 1$$

$$T_{nh}T_{vu} = T_nT_p + T_nT_v$$

$$T_{nh} + T_{vu} = T_n + T_p$$

$$T_v = \frac{T_{nh}T_{vu}}{T_n} - T_p$$

$$\underline{\underline{T_n = T_{nh} + T_{vu} - T_p}}$$

$$\underline{\underline{T_v = \frac{T_{nh}T_{vu}}{T_{nh} + T_{vu} - T_p} - T_p}}$$

$$\frac{K_R}{T_n} = \frac{K_R}{T_{nh}} \Rightarrow K_R = T_n \cdot \frac{K_R}{T_{nh}}$$

$$K_R = \frac{K_R (T_{nh} + T_{vu} - T_p)}{T_{nh}}$$

$$\underline{\underline{K_R = K_R \left( 1 + \frac{T_{vu}}{T_{nh}} - \frac{T_p}{T_{nh}} \right)}}$$

Kommentare  
Erklärungen:

Übertragungsfunktion  
Bodeform  
= Ü-funk Reglerform

kürzen:  $\frac{1}{s(1 + sT_p)}$

Kann auch  
geleitet werden

Koeffizienten müssen  
gleich sein

## Dimensionierung PI-Regler mit Phasengangmethode

Die Schrittantwort ist mit den folgenden Werten gegeben:

$$T_u = 1.11s \quad T_g = 8.62s \quad K_S = 1$$

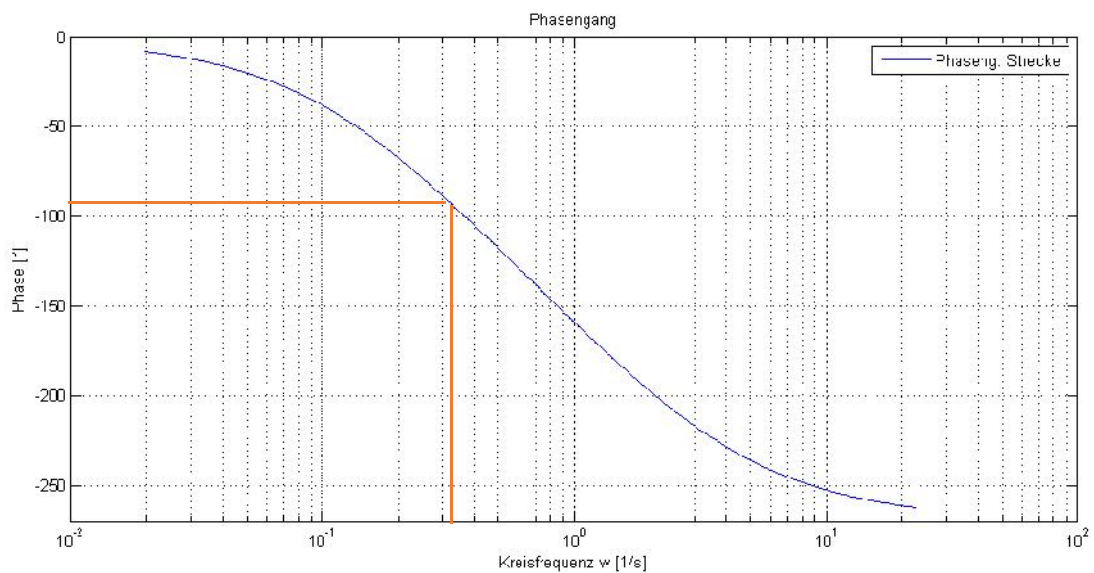
Die Sani-Methode ergibt:

$$T_1 = 0.4396s \quad T_2 = 1.4967s \quad T_3 = 5.0952s$$

Daraus folgt:

$$G(s) = K_S \frac{1}{1 + s \cdot 0.4396 \quad 1 + s \cdot 1.4967 \quad 1 + s \cdot 5.0952}$$

Im Phasengang der Strecke wird nun der -90°-Punkt gesucht.

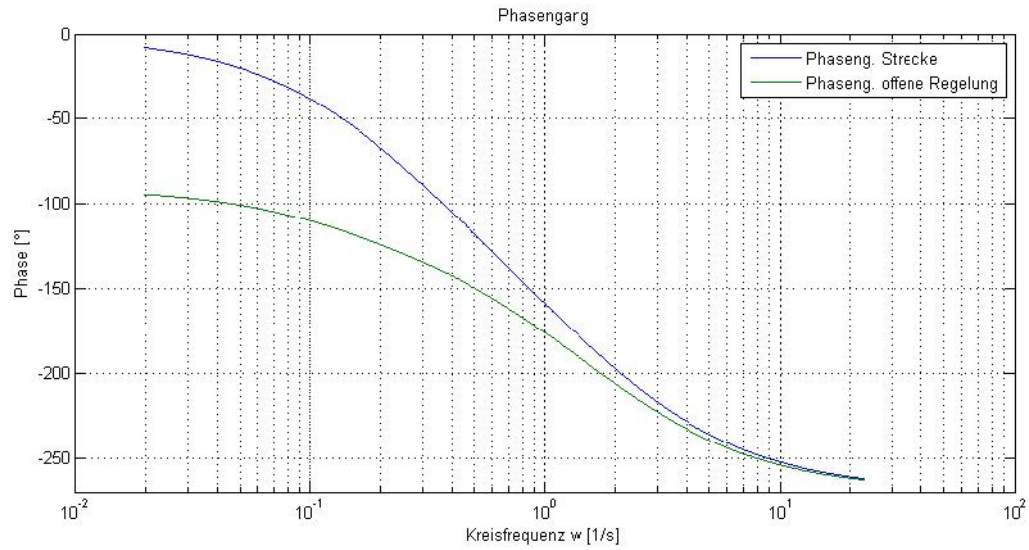


Bei -90°:  $\omega_{PI} = 0.308 \frac{1}{s} = \frac{1}{T_n} \quad T_n = 3.24s$



Durch Übertragungsfunktion des PI-Reglers kann man den Phasengang des Reglers bestimmen. Die beiden Phasengänge werden nun addiert.

$$G_R(s) = K_R \frac{1 + sT_n}{sT_n}$$



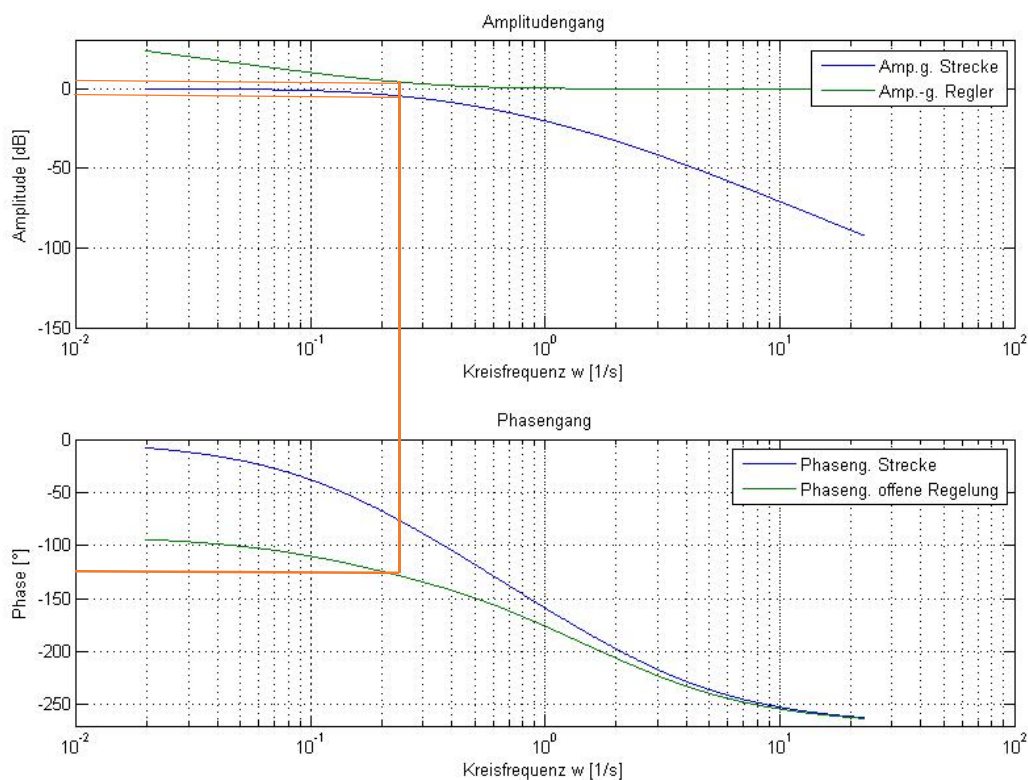
Die Amplitudengänge des Reglers und der Strecke werden nun benötigt um die Verstärkung des Reglers zu bestimmen. Dazu wird der Phasenrand (je nach gewünschtem Überspringen) im Phasengang der offenen Regelung abgetragen. In diesem Beispiel beträgt er  $51.8^\circ$ , d.h. im Phasengang muss der  $-128.2$ -Punkt gesucht werden.

Bei  $-128.2^\circ$ -Punkt:  $\omega_D = 0.2374 \frac{1}{s}$

$$G_{SD} = 0.5871 \quad G_{rD} = 1.6390 \quad G_{oD} = G_{SD} * G_{rD} = 0.9787$$

$$K_R = \frac{1}{|G_{oD}|} = 1.0218$$

Achtung: Diese Werte sind linear, die Plots sind aber logarithmisch dargestellt!



Damit sind alle Parameter des PI-Reglers bestimmt und somit kann die vollständige Übertragungsfunktion weiterverwendet werden.

## Bedienungsanleitung

1. Streckenbeiwert  $K_s$  eingeben.

2. Verzugszeit  $T_u$  eingeben.

3. Anstiegszeit  $T_g$  eingeben.

Diese Parameter können direkt aus der Schrittantwort der Strecke bestimmt werden, falls diese vorhanden ist. Die Ordnung der Regelstrecke wird mit dem Verhältnis  $T_u/T_g$  bestimmt.

4. Mit der grünen Box kann ein neuer Graph hinzugefügt werden. Mit der roten Box kann ein Graph entfernt werden.

5. Die Topologie (PI, PID) des Reglers wird ausgewählt.

6. Die Definition (Manuell, Phasengang, Ziegler, Oppelt, Rosenberg oder Chiens) des Reglers wird bestimmt.

7. Falls die Definition Phasengang ausgewählt wird, muss der Phasenrand vorgegeben werden.  
Der Phasenrand bestimmt die Verstärkung und somit das Überschwingen des Reglers.

8. Falls die Definition Chiens ausgewählt wird, muss die Regelung (Aperiodisches Störverhalten, Aperiodisches Führungsverhalten, Periodisches Störverhalten oder Periodisches Führungsverhalten) noch bestimmt werden.

9. Um den Überblick zu behalten wird für jeden geplotteten Graph eine Checkbox mit dazugehöriger Farbe erstellt.  
Mit Klicken auf die Checkbox kann der dazugehörige Graph ein- oder ausgeblendet werden.

<<Die Bedienoptionen in der Menu Leiste und die Analyse werden im Softwarebericht erklärt.>>

