

Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik  
L. Guzzella, R. D'Andrea

## Praktikum Mess- und Regeltechnik

### Anleitung zum Versuch

# Speedcontroller

Analyse und Einstellung einer schnellen  
Drehzahlregelung im Zeitbereich

Autoren:

Oliver Kaiser (IfA), Jan Ulrich (IfA), Tobias Greyer (IfA), Urban Mäder (IfA)  
Daniel Ambühl (IMRT), Michael Benz (IMRT)

September 2007

Mit freundlicher Unterstützung von:

  
Institut für Automatik  
Prof. M. Morari

Drehzahleregelte Antriebe spielen in der industriellen Praxis eine zentrale Rolle als Stellglieder bzw. Aktuatoren, z.B. in Werkzeugmaschinen und den meisten Anlagen der Verfahrens- und Energietechnik. Die früher allein verfügbaren Gleichstrommotoren werden heute zunehmend ergänzt durch Asynchronmotoren mit Frequenzumrichtern, welche in erster Näherung dieselben Regelungseigenschaften haben.

In diesem Versuch wird mit einem Labormodell die Wirkungsweise von analogen P- bzw. PI- Reglern vorgestellt und untersucht.

- In der **Vorbereitungsphase** (d.h. *vor* dem Versuchsnachmittag) untersuchen Sie mittels einer MATLAB-Simulation die Strecke und legen dann mit Hilfe der Regeln von Ziegler-Nichols einen P- und einen PI-Regler aus. Um die gegebenen Anforderungen erfüllen zu können, werden Sie die Reglerparameter ggf. nachtunen müssen. Um Ihnen Programmieraufwand zu ersparen, finden Sie im Anhang bzw. unter

[http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control\\_laboratory/experiments#speed](http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control_laboratory/experiments#speed)

zwei MATLAB-files für die Simulation der Strecke und den Reglerentwurf.

- Am **Labornachmittag** ist das Verhalten des geschlossenen Regelkreises anhand der Führungs- und Störsprungantworten systematisch zu erproben. Die Regler-Plattform ist dabei in Analogtechnik fertig implementiert und muss nur noch konfiguriert und parametrisiert werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsvorbereitung – Simulation in MATLAB</b>	<b>4</b>
2.1	Die offene Regelstrecke . . . . .	4
2.2	Der geschlossene Regelkreis . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>9</b>
3.1	Validierung der Modellierung . . . . .	9
3.2	Schliessen des Regelkreises . . . . .	9
3.3	Der geschlossene Regelkreis im Betriebspunkt Scheibe . . . . .	9
3.4	Windup . . . . .	10
3.5	Der geschlossene Regelkreis im Betriebspunkt Lüfter . . . . .	11
<b>A</b>	<b>Technische Datenblätter</b>	<b>13</b>
A.1	Daten des Wellenstranges . . . . .	13
A.2	Vorhandene Instrumentierung . . . . .	14
A.3	Regler-Plattform . . . . .	14
<b>B</b>	<b>MATLAB-Files</b>	<b>15</b>
B.1	Das m-File plant_step.m . . . . .	15
B.2	Das m-File speedcontroller.m . . . . .	16
<b>C</b>	<b>Beschreibung des Führungsverhaltens</b>	<b>17</b>



## 2 Versuchsvorbereitung – Simulation in MATLAB

### 2.1 Die offene Regelstrecke

Im Folgenden wird kurz auf die Modellierung der Regelstrecke eingegangen, damit Sie

1. die steady-state Stellgrößen für die beiden Betriebspunkte 'Scheibe' und 'Lüfter' bestimmen können und damit
2. die Implementierung in MATLAB nachvollziehbar ist.

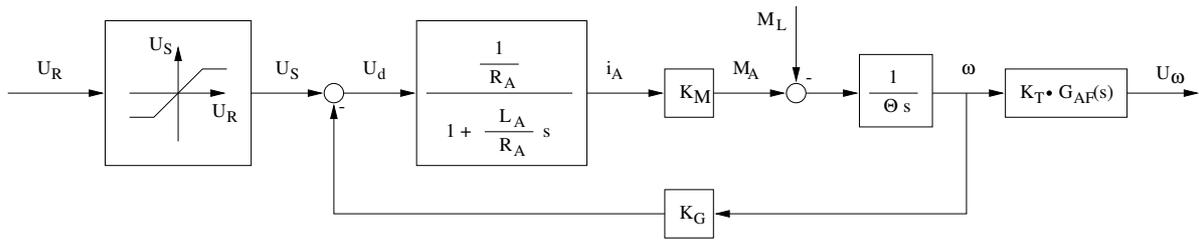


Abbildung 2: Die Strecke  $P(s)$

Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild der offenen Regelstrecke. Die Stellgröße  $U_R$  wird aufgrund des beschränkten Arbeitsbereiches der Operationsverstärker ( $\pm 24V$ ) nur innerhalb bestimmter Grenzen ( $\pm 4.8V$ ) verstärkt. Die Kennlinie des Verstärkers kann durch die folgenden Sättigungskennlinie beschrieben werden:

$$U_S = \begin{cases} -24V, & \text{für } U_R < -4.8V \\ K_V \cdot U_R & \text{für } -4.8 \leq U_R \leq 4.8V, \quad K_V = 5 \\ +24V, & \text{für } U_R > 4.8V \end{cases} \quad (1)$$

Der Verstärkungsfaktor  $K_V$  ist hierbei gleich 5.

Aus der Theorie der Gleichstrommaschine ergibt sich die folgende Differentialgleichung für den Ankerstrom  $i_A$ :

$$L_A \frac{di_A}{dt} = U_d - R_A i_A \quad (2)$$

Hier ist  $L_A$  die Ankerinduktivität und  $R_A$  der Ankerwiderstand.  $U_d$  ist die Differenzspannung zwischen der Motoreingangsspannung  $U_S$  und der Gegen-EMK  $K_G \omega$ . Die Gleichung (2) führt zur in Abbildung 2 zu erkennenden Übertragungsfunktion. Der Ankerstrom erzeugt ein Antriebsmoment

$$M_A = K_M \cdot i_A. \quad (3)$$

Das resultierende Moment bewirkt eine Beschleunigung der Welle:

$$\Theta \frac{d\omega}{dt} = M_A - M_L \quad (4)$$

$\Theta$  ist das Trägheitsmoment der Welle. Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der Welle folgt durch Integration. Diese wird mit dem Tachogenerator (Generatorkonstante  $K_T$ ) gemessen. Das resultierende Spannungssignal weist einen beträchtlichen Ripple auf und wird daher durch ein Analogfilter  $G_{AF}(s)$  zweiter Ordnung mit einstellbarer Eckfrequenz  $\omega_F$  geglättet:

$$G_{AF}(s) = \frac{\omega_F^2}{s^2 + 2D_F \omega_F s + \omega_F^2} \quad (5)$$

Hier ist  $s$  die Laplace-Variable,  $\omega_F$  die nominale Eckkreisfrequenz und  $2D_F$  der Dämpfungsgrad des Analogfilters.

Als Modell der Strecke folgt somit ein System vierter Ordnung. Die Differentialgleichung für die Zustandsvariable  $i_A$  ergibt sich aus Gleichung (2), die Differentialgleichung für die Zustandsvariable  $\omega$  aus Gleichung (4). Das Analogfilter ist zweiter Ordnung. Von daher werden zwei weitere Zustandsvariablen eingeführt: Die Ausgangsspannung des Analogfilters  $U_\omega$  und eine Hilfsvariable  $x_3$  ohne signifikante physikalische Bedeutung. Somit ergibt sich die folgende Zustandsraumdarstellung:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{\omega} \\ \dot{x}_3 \\ \dot{U}_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & -\frac{K_G}{L_A} & 0 & 0 \\ \frac{K_M}{\Theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_T \omega_F & -2D_F \omega_F & -\omega_F \\ 0 & 0 & \omega_F & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_V}{L_A} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\Theta} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_R \\ M_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_R \\ M_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

**Bemerkung:** Die Ausgangs- bzw. Regelgrösse der Strecke ist die Drehzahl der Welle, d.h.  $\omega$ . Aufgrund des gerippten Messsignals muss dieses gefiltert werden. Daher wird als Regelgrösse das gefilterte  $U_\omega$  verwendet. In diesem Versuch spielt die Dynamik des Filters keine entscheidende Rolle. Dies muss aber nicht immer so sein!

Es sollen nun die Gleichgewichtslagen für die beiden Betriebspunkte (siehe Tabelle 1) berechnet werden. In der Gleichgewichtslage sind alle zeitlichen Ableitungen gleich null. Somit können Sie die stationäre Stellgrösse  $U_R$  und die stationäre Regelgrösse  $U_\omega$  für die beiden Betriebspunkte mit Hilfe von Gleichung (6) bestimmen. Die hierzu benötigten Parameter entnehmen Sie bitte den Datenblätter im Anhang A.1 und A.2. Um Ihnen das Suchen zu erleichtern, sind die für die Berechnung wesentlichen Parameter hervorgehoben.

**Anmerkung:** Das Lastmoment des Lüfters ist von der Drehzahl abhängig. Vereinfachend dürfen Sie aber mit einem konstanten Lastmoment von  $6 \text{ mNm}$  ausgehen.

Betriebspunkt	Trägheitsmoment $\Theta$	Lastmoment $M_L$	Winkelgeschwindigkeit $\omega$
Welle mit Scheibe	$210.2 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$	$0 \text{ mNm}$	$200 \text{ rad/s}$
Welle mit Lüfter	$407.6 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$	$6 \text{ mNm}$	$200 \text{ rad/s}$

Tabelle 1: Daten der beiden Betriebspunkte

Betriebspunkt	Scheibe	Lüfter
$U_\omega$		
$i_A$		
$U_R$		

Tabelle 2: stationäre Werte der Betriebspunkte

### Aufgaben:

1. Berechnen Sie die stationären Betriebsdaten nach Gleichung (6) und füllen Sie Tabelle 2 aus.
2. Simulieren Sie nun die Sprungantworten für verschiedene Trägheitsmomente. Rufen Sie hierzu das MATLAB Skript `plant_step.m`<sup>1</sup> auf. Führen Sie die Simulation für verschiedene Trägheitsmomente durch (Scheibe, Lüfter). Die Trägheitsmomente können als Vektor eingegeben werden. Vergleichen Sie die Sprungantworten.  
Beachten Sie, dass sich die Sprungantworten auf einen Stellgrössensprung von 1 V beziehen.

Bringen Sie die ausgedruckten Sprungantworten am Versuchsnachmittag mit, um sie mit den gemessenen Antworten vergleichen zu können.

## 2.2 Der geschlossene Regelkreis

Als Regler werden die in der Industrie standardmässig verwendeten P- und PI-Regler benutzt. Abbildung 3 zeigt den geschlossenen Regelkreis für einen PI-Regler. Hierbei ist P die in Abbildung 2 dargestellte Regelstrecke.

<sup>1</sup>[http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control\\_laboratory/experiments#speed](http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control_laboratory/experiments#speed) → `plant_step.m`

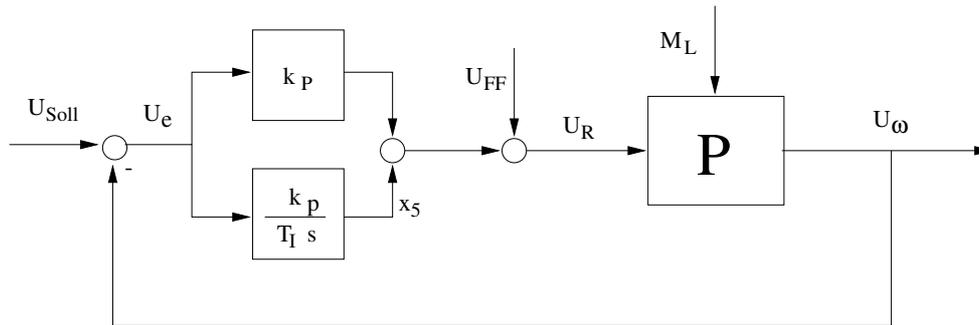


Abbildung 3: Der geschlossene Regelkreis mit PI-Regler

Neben der Standardrückführung wird eine Vorsteuerung ( $U_{ff}$ , Feedforward) verwendet. D.h. es wird am Eingang der Strecke eine zusätzliche Spannung  $U_{FF}$  aufgeschaltet. Diese Spannung entspricht dem für Tabelle 2 berechneten stationären  $U_R$ . Somit wird der Regler nur dazu verwendet, Sollwertabweichungen vom Betriebspunkt, Störungen und Modellierungsfehler auszuregeln.

Bedenken Sie, dass die Regelgrösse eigentlich  $\omega$  und nicht  $U_\omega$  ist. Es ist aber in diesem Fall hinreichend genau, die Dynamik des Messgliedes (des Tachometers mit Analogfilter) zu vernachlässigen.

Die Darstellung des geschlossenen Regelkreises im Zustandsraum ist die folgende:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{\omega} \\ \dot{x}_3 \\ \dot{U}_\omega \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & -\frac{K_G}{L_A} & 0 & -\frac{K_V}{L_A} K_P & \frac{K_V}{L_A} \\ \frac{K_M}{\Theta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_T \omega_F & -2 D_F \omega_F & -\omega_F & 0 \\ 0 & 0 & \omega_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_I} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{K_V}{L_A} & 0 & \frac{K_V}{L_A} K_P \\ 0 & -\frac{1}{\Theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{FF} \\ M_L \\ U_{Soll} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_\omega \\ U_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_p & k_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & K_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{FF} \\ M_L \\ U_{Soll} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Es wurde  $x_5$ , die Ausgangsspannung des Integrators, eingeführt.  $T_I$  ist die Nachstellzeit des I-Anteils des PI-Reglers und  $K_P$  ist die Verstärkung des P-Reglers.

Für die Simulation der Regelstrecke wird die nichtlineare Kennlinie des Spannungsverstärkers, vgl. Gleichung (1), durch die proportionale Verstärkung  $K_V$  ersetzt. Wird der Betrag der Stellgrösse  $U_R$  grösser als 4.8 V, so bleibt bei der Laborapparatur das Ausgangssignal  $U_S$  bei  $\pm 24$  V. Dies führt zu dem sog. Windup. Hierauf wird im Rahmen der Versuchsdurchführung näher eingegangen.

**Beachten Sie**, dass bei der Simulation nur Abweichungen vom jeweiligen Betriebspunkt betrachtet werden. Dementsprechend muss dem Führungssprung ( $U_{Soll}$ ) von 1 V (Änderung der Sollwertvorgabe der Drehzahl) gefolgt werden, während die Störung in  $U_{FF}$  auf null ausgeregelt werden sollte.

Zur Auslegung des Reglers benutzen Sie das Verfahren von Ziegler-Nichols. Hierbei handelt es sich um ein empirisches Verfahren, das entworfen wurde, um Regler für unbekannte Strecken auszulegen. Wenn die Strecke bekannt ist, werden meist hochwertigere Verfahren angewandt. In diesem Versuch sollen Sie jedoch dieses empirische Verfahren kennenlernen. Um ein Gefühl für die Wirkungsweise von P- und PI-Reglern zu bekommen, sollen Sie das Verfahren von Ziegler-Nichols in der Simulation anwenden.

**Benützen Sie** zur Auslegung des Reglers das MATLAB-Skript `speedcontroller.m`<sup>2</sup>.

Gehen Sie hierbei wie folgt vor:

1. Beginnen Sie mit einem kleinen P-Anteil (z. Bsp.  $k_p = 0.2$ ).

<sup>2</sup>[http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control\\_laboratory/experiments#speed](http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control_laboratory/experiments#speed) → `speedcontroller.m`

2. Vergrössern Sie  $k_p$  solange, bis die Führungssprungantwort stationär schwingt (d.h. mit konstanter Amplitude).
3. Schreiben Sie die kritische Verstärkung  $k_p^*$  auf und messen Sie die Periode  $T^*$  der Schwingung (in sec).
4. Stellen Sie nun  $k_p$  und  $1/T_I$  (in sec) mit Hilfe von Tabelle 3 ein.

Regler	$k_p$	$T_I$
P	$0.5 \cdot k_p^*$	–
PI	$0.45 \cdot k_p^*$	$0.85 \cdot T^*$

Tabelle 3: Einstellregeln nach Ziegler–Nichols für die kritische Verstärkung  $k_p^*$  und der Periodendauer  $T^*$  der aus  $k_p^*$  resultierenden Dauerschwingung.

Die Einstellregeln von Ziegler und Nichols wurden so gewählt<sup>3</sup>, dass für die Führungssprungantwort die folgenden Spezifikation erfüllt werden (vgl. Anhang C):

- Anregelzeit  $\leq 0.3s$  für 90% des stationären Wertes.
- Ausregelzeit  $\leq 1.5s$  für ein Toleranzband mit  $\pm 5\%$  vom stationären Endwert.
- Überschwingen (max. Regelfehler)  $\leq 20\%$  vom stationären Endwert.

#### Aufgaben:

1. Überlegen Sie sich ob die Einstellregeln von Ziegler–Nichols für diese Strecke angewandt werden können. Begründen Sie.
2. Bestimmen Sie die kritische Verstärkung für den Betriebspunkt Scheibe und legen Sie die Regler nach Tabelle 3 aus. Verwenden Sie hierzu das MATLAB-Skript `speedcontroller.m`. Tragen Sie die Ergebnisse in Tabelle 4 ein.
3. Welche der oben genannten Spezifikationen werden vom P- bzw. vom PI-Regler erfüllt?
4. Trimmen Sie nun die Regler nach, um das Überschwingen in der angegebenen Grenze zu halten. Tragen Sie die Ergebnisse in Tabelle 4 ein.
5. Bestimmen Sie analog die Reglerparameter für den Betriebspunkt mit Lüfter. Es reicht, wenn Sie eine Auslegung nach Ziegler–Nichols machen. Passen Sie das m-File entsprechend an und tragen Sie die Ergebnisse ebenfalls in Tabelle 4 ein.

Behalten Sie hierbei die **Stellgrößenbeschränkung** im Auge: Der Arbeitsbereich des Spannungsverstärkers ist zwar  $\pm 10$  V, jedoch ist der Verstärker aufgrund der Verstärkung von 5 und einem maximalen Ausgang von 24 V **nur bis zu einem Eingang von 4.8 V linear**, danach ist er gesättigt.

<sup>3</sup>unter Annahme dass  $P(s) \cong \frac{k}{\tau s + 1} \cdot e^{-Ts}$  wobei  $\frac{T}{T+\tau} < 0.3$

Betriebspunkt	Scheibe		Scheibe nachgetrimmt		Lüfter	
	$k_p^* =$	$T^* =$			$k_p^* =$	$T^* =$
<b>Regler</b>	P-Regler	PI-Regler	P-Regler	PI-Regler	P-Regler	PI-Regler
$k_p$ $T_I$						
<b>Führungsverhalten (<math>U_{Soll}</math>)</b>						
Anregelzeit [s]						
Ausregelzeit[s]						
Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]						
Stationärer Regelfehler $e_\infty$ [%]						
<b>Störverhalten von <math>U_{FF}</math></b>						
Ausregelzeit [s]						
Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]						
Stationärer Regelfehler $e_\infty$ [%]						

Tabelle 4: Ergebnisse der Reglerauslegung mittels Simulation

### 3 Versuchsdurchführung

Diese Phase ist der zentrale Teil des Versuchsnachmittages im Labor. Sie soll zeigen, wie dieser Reglerentwurf an der konkreten Anlage umgesetzt wird und wie er sich bewährt.

Neben dem Labormodell des DC-Antriebes und dem analogen PID-Regler (vgl. unbedingt Anhang A.3) befinden sich folgende Geräte am Arbeitsplatz:

- ein Funktionsgenerator für die Rechteck-Eingangssignale,
- ein Universal-Messinstrument zur Kontrolle von Spannungen und Strömen und
- ein Digital-Speicher-KO zur Visualisierung der Variablen.

#### 3.1 Validierung der Modellierung

Bevor Sie den Regelkreis schliessen, müssen Sie sicherstellen, dass Ihr Modell ausreichend gut mit der Realität übereinstimmt. Dazu sollen Sie nun die Modellierung bzw. Ihre Simulationsergebnisse an der konkreten Anlage validieren.

Die tieffrequenten Bereiche des Stellverhaltens, d.h. den Verstärkungsfaktor und die dominante Zeitkonstante, ermittelt man am schnellsten aus einer Stellsprungantwort. Je genauer die gemessene Sprungantwort auf die simulierte passt, umso zuverlässiger sollten auch die vorausberechneten Reglerparameter sein. Und entsprechend niedriger ist das Risiko für die Anlage.

##### Aufgaben:

1. Wie muss die Versuchseinrichtung konfiguriert und eingestellt werden, damit Stellsprungantworten der Regelstrecke gemessen werden können?
2. Nehmen Sie die Stellsprungantworten für einen Stellgrössensprung vom stationären Betriebspunkt  $U_{R,ss}$  aus um 1 V auf  $U_{R,ss} + 1V$ 
  - (a) im Betriebspunkt Scheibe.
  - (b) im Betriebspunkt Lüfter.
3. Welche Abweichungen stellen Sie fest?
4. Welche Ursache haben diese Abweichungen?

#### 3.2 Schliessen des Regelkreises

Nach der erfolgreichen Validierung der Modellierung können wir den Regelkreis schliessen. Da dies in der Praxis einige Schwierigkeiten bereitet, wird im Folgenden erläutert werden, wie der PID-Regler und die Strecke miteinander verbunden werden müssen, um den Regelkreis zu schliessen.

- Der Ausgang des PID-Reglers ist die Stellgrösse  $U_R$ . Um eine negative Rückführung (Feedback) zu erhalten, verbinden wir den invertierenden Ausgang des Reglers mit dem Spannungsverstärker der Strecke. Stellen Sie sicher, dass Sie den Verstärkungsfaktor 5 gewählt haben.
- Das über den Tiefpassfilter 2. Ordnung gefilterte Ausgangssignal der Strecke verbinden Sie mit dem Istwert auf der PID-Reglerplattform. Stellen Sie die Frequenz des Butterworthfilters auf 3 Hz.

#### 3.3 Der geschlossene Regelkreis im Betriebspunkt Scheibe

Nun endlich können Sie den Regler implementieren. Gehen Sie hierzu wie folgt vor:

1. Schalten Sie die Rückführung über den Regler ab und erhöhen Sie die Stellgrösse  $U_R(t)$  über den manuellen Eingang von Hand  $U_{FF}(t)$  vorsichtig, bis sich die Regelgrösse  $U_\omega$  nahe ihrem nominalen Sollwert  $U_{Soll}$  einpegelt.
2. Nehmen Sie den Reglerparameter  $k_p$  auf einen Wert zurück, der nach Erfahrung sicher klein genug ist. Starten Sie hier mit einem  $k_p$  von 0.2, stellen Sie also 0.01 an der Analogplattform ein. Schalten Sie nun den P-Zweig dazu und legen Sie einen kleinen Führungssprung an. Somit kontrollieren Sie, ob das Vorzeichen der Rückführung korrekt ist.

Betriebspunkt	Scheibe		Scheibe nachgetrimmt	
	$k_p^* =$	$T^* =$		
<b>Regler</b>	P-Regler	PI-Regler	P-Regler	PI-Regler
$k_p$ $T_I$				
<b>Führungsverhalten (<math>U_{Soll}</math>)</b>				
Anregelzeit [s]				
Ausregelzeit[s]				
Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]				
Stationärer Regelfehler $e_\infty$ [%]				
<b>Störverhalten von <math>U_{FF}</math></b>				
Ausregelzeit [s]				
Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]				
Stationärer Regelfehler $e_\infty$ [%]				

Tabelle 5: Laborexperiment: Reglerparameter Betriebspunkt Scheibe

- Schliessen Sie den Rechteckgenerator an den Sollwerteingang an und stellen Sie den Sollwert und den Gain des Generators so ein, dass ein Sprung von ca. 3.8 V auf 2.8 V und wieder auf 3.8 V laufend aufgeschaltet wird.
- Vergrossern Sie  $K_P$  solange, bis Sie eine Dauerschwingung<sup>4</sup> in der Ausgangsgrösse erkennen. Messen Sie am KO  $T^*$  und tragen Sie es zusammen mit  $k_p^*$  in die Tabelle 5 ein.
- Berechnen Sie die Reglerparameter nach Ziegler–Nichols und implementieren Sie diese. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in Tabelle 5 ein.
- Trimmen Sie die Parameter nach, um das Überschwingen zu reduzieren. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in Tabelle 5 ein.
- Vergleichen Sie typische Sprungantworten aus Simulation und Experiment. Was stellen Sie fest?
- Wird die spezifizierte Regelgüte erreicht?
- Wie verläuft die Stellgrösse  $U_R(t)$  bezüglich ihrer Anschläge?
- Zur Kontrolle: Welche Sprungantworten hätte sich mit den mittels Ziegler-Nichols vorausberechneten Reglerparametern ergeben?

### 3.4 Windup

Wenn Sie die Sollwertsprünge mit dem Rechteckgenerator beim PI–Regler aufschalten, können Sie bei genügend grossen Sprüngen beobachten, dass einer Absenkung der Drehzahl sehr gut gefolgt werden kann, einer Erhöhung jedoch langsamer gefolgt wird, der Istwert grösser als der Sollwert wird, und dann plötzlich wie ein umgekehrter Sprung sich von oben dem Sollwert nähert. Dieses Verhalten hängt mit der Stellgrössenbeschränkung zusammen. In Abbildung 4 wird der Unterschied zwischen einer Sprungantwort ohne (durchgezogene Linie) und mit (gestrichelte Linie) Stellgrössenbeschränkung dargestellt. Die Ursache liegt im sättigenden Spannungsverstärker. Ab einem Eingangssignal von  $\pm 4.8 V$  gibt er ein konstantes Signal von  $\pm 24 V$  aus. Der Spannungsverstärker gerät in die Sättigung. Man bezeichnet dies auch allgemein als Stellgrössenbeschränkung.

<sup>4</sup>Aufgrund von Reibung etc. kann das System nicht instabil werden, d.h. Sie werden keine in der Amplitude anwachsende Schwingung beobachten können.

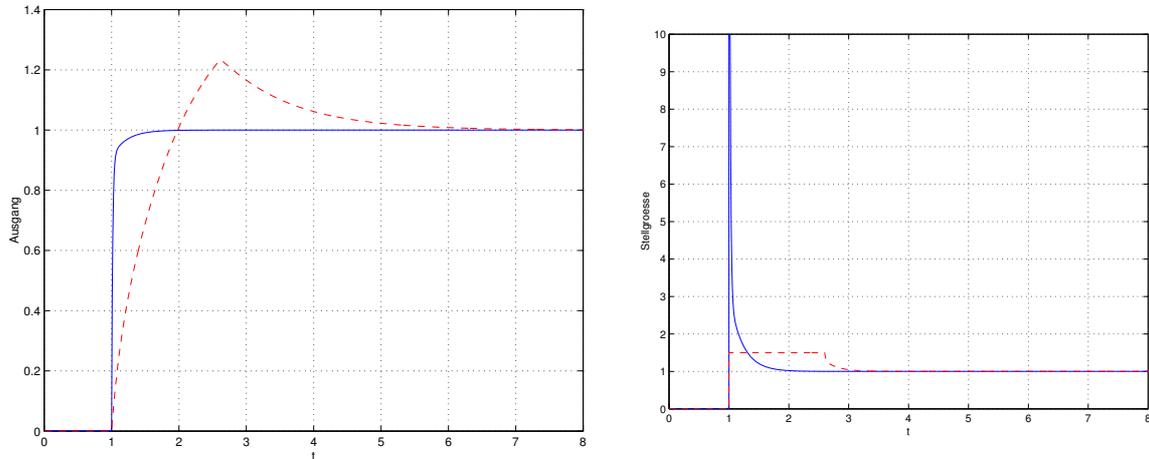


Abbildung 4: Sprungantwort eines Regelkreises ohne Stellgrößenbeschränkung (durchgezogene Linie) und mit Stellgrößenbeschränkung (gestrichelte Linie).

Die Stellgrößenbeschränkung führt im Experiment dazu, dass die Regelstrecke dem Sprung nicht so schnell folgen kann, wie der Regler annimmt. Der Regler hat keine Kenntnis von der Stellgrößenbeschränkung. Über die Ausgangsrückführung bzw. den Regelfehler bemerkt der Regler, dass die Strecke seinen Vorgaben nicht (schnell genug) folgt. Als Folge hiervon integriert der I-Anteil den Regelfehler  $U_e$  auf. Der Regler wickelt sich auf *wind up*. Erst wenn sich das Vorzeichen des Regelfehlers umkehrt, kann sich der I-Anteil wieder verringern. Daraus resultiert das in der Abbildung 4 dargestellte Überschwingen. Um dieses Phänomen zu vermeiden, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, die unter dem Begriff *Anti-windup* zusammengefasst werden. Im wesentlichen laufen alle Anti-windup-Massnahmen darauf hinaus, die Differenz zwischen der unbeschränkten Stellgröße und der beschränkten zu erfassen und dem anti-windup-Teil des Reglers mitzuteilen. Damit kann dieser erkennen, wenn er in Sättigung ist und den I-Anteil abschalten.

Messen Sie die Spannung des Reglerausganges (Stellgröße  $U_R$ ), sie wird während dieses Vorganges grösser als  $4.8\text{ V}$  sein.

**Um dieses Phänomen besser zu erkennen erhöhen Sie die Amplitude des aufgeprägten Führungssprunges.** Zeigen Sie dem betreuenden Assistenten dieses Phänomen und diskutieren Sie es mit ihm.

### 3.5 Der geschlossene Regelkreis im Betriebspunkt Lüfter

Tauschen Sie zum Abschluss die Scheibe gegen den Lüfter aus. Sollten Sie im vorherigen Abschnitt eine gute Übereinstimmung zwischen Ihren vorausgelegten Reglerparametern und den experimentell ermittelten haben, so können Sie jetzt die in der Simulation ermittelten  $K_P$  und  $1/T_I$  einstellen und diese gegebenenfalls nachtrimmen.

Beantworten Sie die folgenden Fragen:

1. Welchen Unterschied stellen Sie zwischen Betriebspunkt Lüfter und Betriebspunkt Scheibe fest?
2. Wird die spezifizierte Regelgüte
  - (a) auch ohne Nachtrimmen erreicht?
  - (b) erst mit Nachtrimmen erreicht?

Warum könnte ein Nachtrimmen erforderlich sein?

3. Wie verläuft hier die Stellgröße  $U_R(t)$  bezüglich ihrer Anschläge?

Wir hoffen, der Versuch hat Ihnen Spass gemacht und Sie haben etwas gelernt.

Auf Wiedersehen

# Anhang

## A Technische Datenblätter

### A.1 Daten des Wellenstranges

#### Spannungsverstärker für Antriebsmotor

Eckfrequenz	60	$kHz$
Eingangsbereich	$\pm 10$	$V$
Verstärkungsfaktoren (steckbar) $K_V$	0.1, 1, 5	
Ausgangsbereich	$\pm 24$	$V$
max. Dauer-Ausgangsstrom	2.0	$A$

#### Antriebsmotor

Nennspannung	$\pm 24$	$V$
Leerlaufdrehzahl (4400 Upm)	461	$\frac{rad}{s}$
Anlaufmoment	149	$mNm$
max. Dauerleistung	37	$W$
mittlerer Leerlaufstrom	50	$mA$
max. Dauerstrom	1.2	$A$
max. Drehzahl (9000 Upm)	942	$\frac{rad}{s}$
Gegen-EMK=Generatorkonst. $K_G$ $5.5 \frac{mV}{Upm}$	52.5	$\frac{s}{rad/s} \frac{mV}{A}$
Ankerinduktivität	1.3	$mH$
Ankerwiderstand $R_A$	8.5	$\Omega$
Drehmomentkonstante=Motorkonst. $K_M$	51.2	$\frac{mNm}{A}$
Rotor-Trägheitsmoment	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$kgm^2$

#### Welle ohne Lüfter

Trägheitsmoment der Scheibe	$203 \cdot 10^{-6}$	$kgm^2$
-----------------------------	---------------------	---------

#### Welle mit Lüfter

Trägheitsmoment	ca. $400 \cdot 10^{-6}$	$kgm^2$
Bremsmoment bei nom. Drehgeschw. 200 rad/s	ca. 6	$mNm$

#### Stromverstärker zum Lastmotor

Eckfrequenz	ca. 30	$kHz$
Eingangsbereich	$\pm 10$	$V$
Verstärkungsfaktor (steckbar)	10, 100, 400	$\frac{mA}{V}$
Ausgangsbereich Spannung	$\pm 24$	$V$
Ausgangsbereich Strom	$\pm 2$	$A$

#### Lastmotor

Nennspannung	$\pm 24$	$V$
Leerlaufdrehzahl (6750 Upm)	707	$\frac{rad}{s}$
Anlaufmoment	128	$mNm$
Dauerleistung (max.)	27	$W$
mittlerer Leerlaufstrom	110	$mA$
max. Dauerstrom	1.4	$A$
max. Drehzahl (9000 Upm)	942	$\frac{rad}{s}$
Gegen-EMK (Generatorkonst. $K_G$ ) $3.4 \text{ mV/Upm}$	32.5	$\frac{s}{rad/s} \frac{mV}{A}$
Ankerinduktivität	0.75	$mH$
Ankerwiderstand	6.2	$\Omega$
Drehmomentkonstante (Motorkonst. $K_M$ )	33	$\frac{mNm}{A}$
Rotor-Trägheitsmoment	$2 \cdot 10^{-6}$	$kgm^2$

**Bemerkung:**  $K_G$  und  $K_M$  haben die gleichen SI-Einheiten.

## A.2 Vorhandene Instrumentierung

Tachogenerator mit Verstärker

Verstärkungsfaktor $K_T$	10 V bei 5000 U <sub>pm</sub>	19.1	$\frac{mV}{rad/s}$
Spannungsrippe	Doppelamplitude bei 18-facher Drehkreisfrequenz	300	$mV_{pp}$

Analogfilter

Eingangs-Spannung		± 10	V
Ausgangsbereich		± 10	V
Nominale Eck-Kreisfrequenz	$\omega_F$	20	$\frac{rad}{s}$
Dämpfungsgrad	$2D_F$ (max. flach)	1.414	

## A.3 Regler-Plattform

Der Regelkreis wird hier über einen analogen PID-Regler auf der Basis von Operationsverstärkern geschlossen. Der Regler ist in Abbildung 5 dargestellt. Die gewünschte Reglerstruktur (P, PI, PID, etc.) kann über Kippschalter gewählt werden. Die Parameterwerte werden durch Einstellen der Widerstands- und Kapazitätswerte folgendermassen eingestellt:

- $K_P = \{0.000 \dots 0.999\} \cdot 20$
- $k_p/T_I = \{0.000 \dots 0.999\} \cdot \frac{1\mu F}{C1}$
- $T_D = \{0.000 \dots 0.999\} \cdot \frac{1\mu F}{C2}$

{0...1} steht hierbei für die Verstärkungsfaktoren  $k$  der Drehregler.  $C1$  und  $C2$  sind zwei einstellbare Kondensatoren, die die Werte 10nF, 0.1μF, 1μF und 10μF annehmen können. Wollen Sie beispielsweise  $k_p/T_i = 56$  einstellen, müssen Sie den Drehregler auf 0.56 (5 im Fenster, 6 auf der Strichskala), und  $C1$  auf 10nF stellen. Vergessen Sie nicht den Kippschalter für den I-Anteil zu aktivieren!

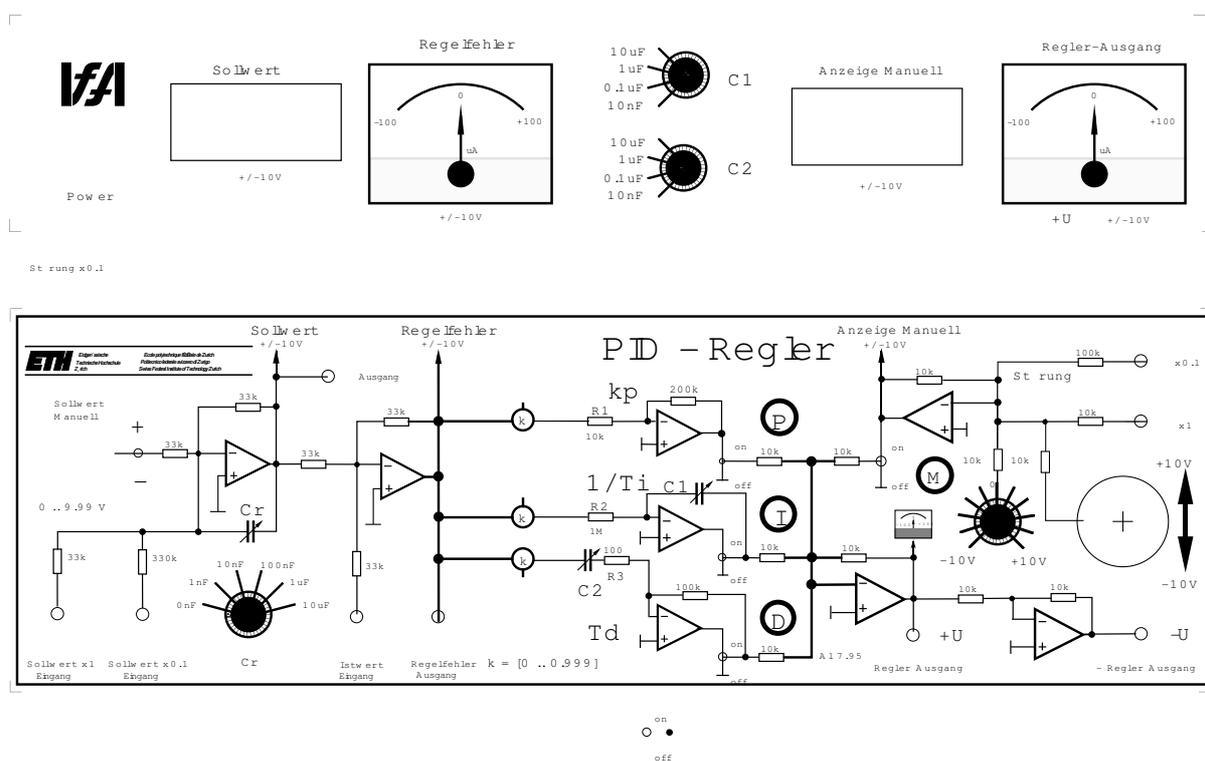


Abbildung 5: Die Analog-Regler-Plattform

## B MATLAB-Files

Sie können diese Files auch in elektronischer Form beziehen unter:

[http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control\\_laboratory/experiments#speed](http://www.idsc.ethz.ch/Courses/control_laboratory/experiments#speed)

### B.1 Das m-File plant\_step.m

```
% Simulation der Regelstrecke
% =====
clear all;close all;clc;

% Geben Sie hier die Trgheit und das Lastmoment ein
% =====
Theta = 210.2e-6; % [kgm^2]
ML = 0e-3; % [Nm]
% =====

disp('Skript plant_step: "Sprungantwort Schnelle Welle"');
disp(' zuletzt geaedert: 13.09.2007, D.Ambuehl');
disp(' ');

% Sprungskalierung
UR = 1.0; % V Fuehrungssprung
TF = 5; % s Laenge der Simulation

% Spannungsverstaerker
KV = 5.0; % - Verstaerkungsfaktor

% Antriebsmotor
RA = 8.5; % V/A Ankerwiderstand
LA = 1.3e-3; % Vs/A Ankerinduktivitaet
KG = 52.5e-3; % V/(rad/s) Generatorkonstante
KM = 51.2e-3; % Nm/A Motorkonstante

% Tachogenerator
KT = 19.1e-3; % V/(rad/s) Tachogeneratorkonstante

% Analogfilter
OmegaF = 20; % rad/s Eck-Frequenz
DF = 0.707; % Daempungsgrad

% Zustandsraumdarstellung:
% x1 = IA, x2 = Omega , x3, x4 = UOmega
% =====
A = [ -RA/LA -KG/LA 0 0;
      KM/Theta 0 0 0;
      0 KT*OmegaF -2*DF*OmegaF -OmegaF;
      0 0 OmegaF 0];

B = [ KV/LA*UR;
      -ML/Theta;
      0;
      0];

C = [0 0 0 1];

D = [0];

% Erzeugen des Zustandsraummodells
SYS = ss(A,B,C,D);

% Sprungantworten
t = 0 : 0.01 : TF;
[y,t] = step(SYS,t); %y is matrix!

disp(' ');
disp(' Plot Figure 1');
figure(1);
plot(t,y);
title(['Strecke: Fuehrungssprungantwort (U_R = ',num2str(UR),' V)']);
grid on;
xlabel('t [s]');
ylabel('Delta U_Omega [V]');
legend('Theta = ',num2str(Theta*1e6),'1e*6 [kg m^2], ML = ',num2str(ML*1000),'
```

## B.2 Das m-File speedcontroller.m

```

clear all;close all;clc;

% Geben Sie hier das Trgheitsmoment
% und die Reglerparameter ein
% =====
Regler = 'P'; % 'P' oder 'PI'
Theta = 210.2*10^(-6); % Traegheitsmoment [kgm^2]
KP =XXX;
TI = XXX;
% =====

disp(' ');
disp('Reglerauslegung');
disp('=====');
disp(' zuletzt gendert: 13.09.2006, D.Ambuehl');
disp(' ');
Text =[' Trgheitsmoment: ' num2str(Theta) ' kgm^2'];
TextKP =[' KP: ' num2str(KP) ' [-]'];
TextTI =[' TI: ' num2str(TI) ' [s]'];
TextKPHardware=[ ' KP_hw: ' num2str(KP/20) '*20 [-]'];
TextTIHardware=[ ' 1/TI_hw=KP/TI: ' num2str(KP/TI) ' [1/s]'];
TextRegler =[' Reglertyp: ' ,Regler];

if strcmp(Regler,'P')
    TI = Inf;
    TextTI = [ ' '];
    TextTIHardware = [ ' '];
elseif strcmp(Regler,'PI')
else
    error('No valid controller has been chosen!')
end

disp(' ');
disp(Text);
disp('Reglerauslegung nach Ziegler-Nichols:');
disp('-----');
disp(TextRegler)
disp(TextKP)
disp(TextTI)
disp(' ')
disp('Reglerparameter an der Hardware einzustellen:');
disp('-----');
disp(TextKPHardware)
disp(TextTIHardware)
disp(' ')
disp(' ')

Text1 = ['Theta: ' num2str(Theta) 'kgm^2'];
Text2 = ['KP: ' num2str(KP) '[-]'];
Text3 = ['TI: ' num2str(TI) '[1/s]'];

% Sprungskalierung
UFF = 1.0; % V Sprung des FeedForward
ML = 10e-3; % Nm Lastmomentsprung
USoll = 1.0; % V Fuehrungssprung des Sollwertes
TF = 5; % s Laenge der Simulation

% =====
% Spannungsverstaerker
KV = 5.0; % - Verstaerkungsfaktor

% Antriebsmotor
RA = 8.5; % V/A Ankerwiderstand
LA = 1.3e-3; % Vs/A Ankerinduktivitaet

KG = 52.5e-3; % V/(rad/s) Generatorkonstante
KM = 51.2e-3; % Nm/A Motorkonstante

%Tachogenerator
KT = 19.1e-3; % V/(rad/s) Tachogeneratorkonstante

% Analogfilter
OmegaF = 20; % rad/s Eck-Frequenz
DF = 0.707; % Daempfangsgrad

% Zustandsraumdarstellung:
% x1 = IA, x2 = Omega , x3, x4 = UOmega, x5
% =====
A = [ -RA/LA -KG/LA 0 -KV/LA*KP KV/LA;
      KM/Theta 0 0 0 0;
      0 KT*OmegaF -2*DF*OmegaF -OmegaF 0;
      0 0 OmegaF 0 0;
      0 0 0 -1/TI 0];
B = [ KV/LA*UFF 0 KV/LA*KP*USoll;
      0 -ML/Theta 0;
      0 0 0;
      0 0 0;
      0 0 1/TI*USoll];
C = [0 0 0 1 0;
      0 0 0 -KP KP];
D = [ 0 0 0;
      UFF 0 KP*USoll];

% Erzeugen des Zustandsraummodells
SYS = ss(A,B,C,D);

% Sprungantworten
t = 0 : 0.01 : TF;
y = step(SYS,t); %y is matrix!

figure(1);
subplot(221);
plot(t,y(:,1,3),'b');
title('Systemantwort U_Soll-Sprung');
grid on;
xlabel('Zeit [s]');
ylabel('Delta U_Omega [V]');

subplot(223);
plot(t,y(:,1,1),'b');
title('Systemantwort U_FF-Sprung');
grid on;
xlabel('Zeit [s]');
ylabel('Delta U_Omega [V]');

subplot(222);
plot(t,y(:,2,3)+2.2,'b') % U_FF aufgeschaltet = 3.1
title('Stellgroesse fuer U_Soll-Sprung');
grid on;
ylabel('U_R [V]');

subplot(224);
plot(t,y(:,2,1)+2.2,'b') % U_FF aufgeschaltet = 3.1
title('Stellgroesse fuer U_FF-Sprung');
grid on;
xlabel('Zeit [s]'); ylabel('U_R [V]');
legend([Text1,Text2,Text3],1);

```

## C Beschreibung des Führungsverhaltens

Zur Beschreibung des Führungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises werden folgende Begriffe benutzt, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Der Plot repräsentiert die Führungssprungantwort des geschlossenen Kreises für einen Einheitssprung.

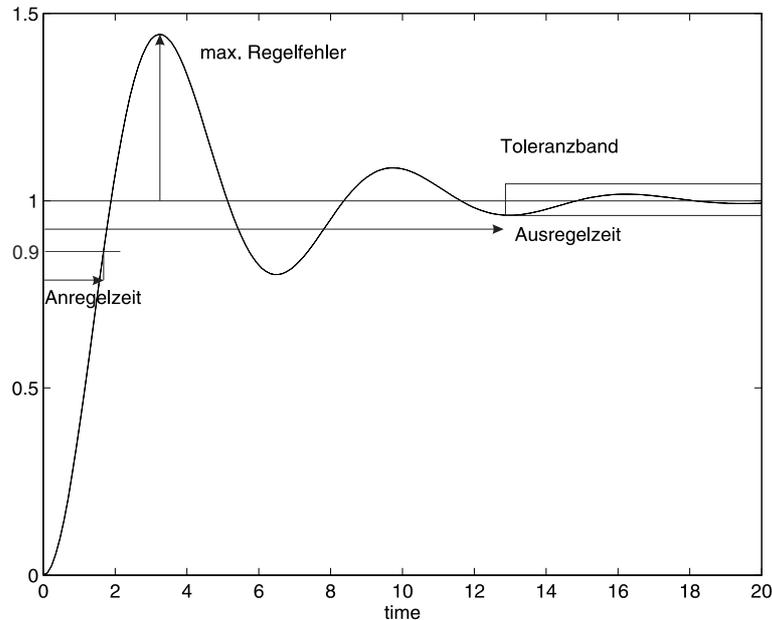


Abbildung 6: Zur Spezifikation der Regelgüte

- **Anregelzeit** [s] ( $t_{90}$ ): Die Zeit, die bis zum ersten Erreichen von 90% des stationären Endwertes vergeht. Dieser Endwert muss nicht immer dem angelegten Sprung entsprechen (stationärer Regelfehler).
- **Ausregelzeit** [s]: Die Ausregelzeit ist die Zeit, bei der die Abweichungen vom stationären Endwert kleiner als das Toleranzband sind.
- **Toleranzband** beschreibt die Abweichungen vom stationären Endwert. Übliche Werte liegen zwischen  $\pm 1\%$  und  $\pm 5\%$
- **max. Regelfehler (Überschwingen)**: Üblich sind hier Werte zwischen 5% und 20% vom stationären Endwert.