



Automatic Control Laboratory, ETH Zürich
Prof. J. Lygeros

Manual prepared by: T. Grämer, S. Richter, U. Mäder, A. Zraggen
Revision from: 7. März 2022

IfA Fachpraktikum - Experiment 2.4 : Speed Control

Drehzahlgeregelte 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 P-, PI- und PID-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-, PI- und einen PID-Regler aus.
- Am **Labornachmittag** ist das Verhalten des geschlossenen Regelkreises anhand der Führungs- und Störsprungantworten systematisch zu erproben und der zu Hause entworfene Regler zu evaluieren. Die Regler-Plattform ist fertig implementiert und muss nur noch parametrisiert werden. Um die gegebenen Anforderungen erfüllen zu können, werden Sie die Reglerparameter ggf. nachtunen müssen.

Zur Vorbereitung dieses Experiments werden folgende Dateien benötigt, welche von der IfA Fachpraktikum Website http://people.ee.ethz.ch/~ifa-fp/wikimedia/images/6/6e/IfA_2-4_template.zip (als zip-file auf der Seite dieses Experiments) heruntergeladen werden können:

`ifa24o1.m` Simulation der offenen Strecke
`ifa24c1.m` Simulation des geschlossenen Regelkreises

Während des Versuchsnachmittags wird zusätzlich folgende Datei benötigt, welche auf dem Versuchscomputer gespeichert ist:

`ifa24_get_data.m` Download der Messdaten von der Reglerplattform

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Modellierung	3
1.1	Aufbau der Versuchseinrichtung	3
1.2	Modell der offenen Regelstrecke	4
2	Theoretische Aufgaben	6
	Aufgabe 1: Gleichgewichtslage	6
2.1	Die Einstellregeln nach Ziegler-Nichols	8
2.1.1	Die Schwingmethode	8
	Aufgabe 2: Schwingmethode	8
2.1.2	Die Sprungmethode	9
	Aufgabe 3: Sprungmethode	9
	Aufgabe 4: Vergleich der beiden Methoden	9
	Aufgabe 5: Einhalten der Spezifikationen	11
3	Praktische Aufgaben	12
3.1	Validierung der Modellierung	12
	Aufgabe 6: Validierung der Gleichgewichtslage und der Modellierung	13
3.2	Schliessen des Regelkreises	14
	Aufgabe 7: Schwingversuch am realen System	14
	Aufgabe 8: Testen des Reglers	14
4	Schlussdiskussion	16
	Lernziel 1: Modellierung	16
	Lernziel 2: Die Verfahren von Ziegler-Nichols	16
	Lernziel 3: PID-Regler	16
	Lernziel 4: Abschluss der Arbeiten	16
A	Technische Datenblätter	18
A.1	Daten der Regelstrecke	18
B	Kenngrößen zur Bestimmung der Regelgüte im Zeitbereich	19

Kapitel 1

Problemstellung und Modellierung

1.1 Aufbau der Versuchseinrichtung

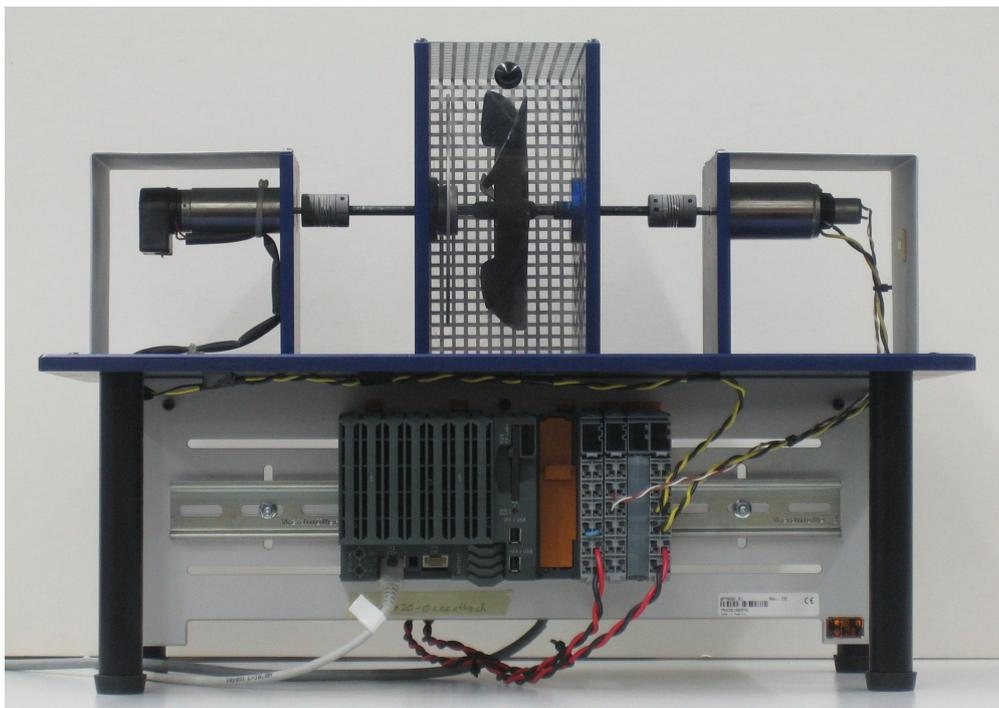


Abbildung 1.1: Die Versuchseinrichtung für die schnelle Drehzahlregelung

Abbildung 1.1 zeigt den Aufbau der Laborversuchseinrichtung. Rechts befindet sich der DC-Antriebsmotor, welcher über eine Spannungsquelle gespeist wird. Links befindet sich der Bremsmotor, mit dem ein Lastmoment durch Aufprägen eines entsprechenden Stromes erzeugt werden kann. Die Welle in der Mitte besteht aus starren Kupplungen und einem aufgeschraubten Lüfterrotor. Ferner ist auf der Antriebswelle ein Tachogenerator vorhanden, mit dem die Drehzahl bestimmt werden kann.

Unter der Versuchseinrichtung befindet sich die Reglerplattform, welche die Messung der

Drehzahl, die Steuerung der Motoren sowie die eigentliche Regelung übernimmt. Sie wird über eine Ethernetschnittstelle konfiguriert und besteht aus mehreren Modulen (von links nach rechts):

- Steuerungsmodul (X20 CP 1484) für die Kommunikation und die Regelung
- Analoges Eingangsmodul (X20 AI 2622) zur Messung des Tachosignals
- Motorbrückenmodul (X20 MM 2436) für die Speisung der Motoren

Das Motorbrückenmodul bietet zwei Ausgänge, die entweder als Spannungs- oder als Stromquelle konfiguriert werden können. Der Lastmotor wird von einer Stromquelle angesteuert. Dadurch ergibt sich ein Lastmoment, welches proportional zum Ankerstrom ist. Der Hauptmotor wird von einer Spannungsquelle mit einer Spannung von $\pm 24V$ angesteuert. In Tabelle 1.1 sind die wichtigsten Parameter des Motorbrückenmoduls zusammengefasst.

Verstärkungsfaktor	1
Ausgangsspannung (Antriebsmotor)	$\pm 24 V$
Ausgangsstrom (Lastmotor)	$\pm 1.4 A$

Tabelle 1.1: Daten der Reglerplattform

Die digitale Motorsteuerung liefert ein pulswidenmoduliertes (PWM) Signal von $\pm 24 V$ an die beiden Motoren. Ein PWM-Signal ist ein digitales, getaktetes Signal, dessen Amplitude entweder $\pm 24 V$ (high) oder $0 V$ (low) beträgt. Der duty-cycle D ($0 \leq D \leq 1$) bezeichnet den Teil einer Taktperiode, während der das Signal im Zustand high ist. Ist $D = 1$, liegt immer die volle Spannung an, bei $D = 0$ liegt keine Spannung am Motor an. Durch die Tiefpasswirkung des Motors wird das digitale Signal geglättet und kann näherungsweise als analoges Signal mit einer Spannung $D * \pm 24 V$ betrachtet werden.

1.2 Modell der offenen Regelstrecke

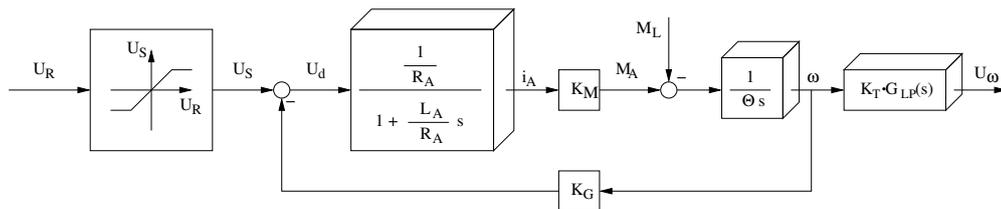


Abbildung 1.2: Modell der Regelstrecke $P(s)$

Abbildung 1.2 zeigt das Blockschaltbild der offenen Regelstrecke. Die Stellgröße U_R wird auf Grund des beschränkten Arbeitsbereiches der Motorsteuerung auf maximal $\pm 24V$ begrenzt. Es ergibt sich folgende Sättigungskennlinie:

$$U_S = \begin{cases} -24V, & \text{für } U_R < -24V \\ U_R & \text{für } -24 \leq U_R \leq 24V \\ +24V, & \text{für } U_R > 24V \end{cases} \quad (1.1)$$

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

$$L_A \frac{d i_A}{dt} = U_d - R_A i_A \quad (1.2)$$

Hier ist L_A die Ankerinduktivität und R_A der Ankerwiderstand. U_d ist die Differenzspannung zwischen der Motoreingangsspannung U_S und der induzierten Spannung $K_G \omega$ (Gegen-EMK). Die Gleichung (1.2) führt zum in Abbildung 1.2 zu erkennenden Strukturschaltbild.

Der Ankerstrom erzeugt ein Antriebsmoment

$$M_A = K_M \cdot i_A, \quad (1.3)$$

dem das von aussen aufgeprägte Lastmoment M_L entgegenwirkt. Das resultierende Moment bewirkt eine Beschleunigung der Welle:

$$\Theta \frac{d\omega}{dt} = M_A - M_L \quad (1.4)$$

Dabei ist Θ das Trägheitsmoment der Welle. Die Winkelgeschwindigkeit ω der Welle folgt durch Integration und wird mit dem Tachogenerator (Generatorkonstante K_T) gemessen. Das resultierende Spannungssignal weist einen beträchtlichen Ripple auf und wird daher durch ein Tiefpassfilter $G_{LP}(s)$ zweiter Ordnung mit der Übertragungsfunktion:

$$G_{LP}(s) = \frac{\omega_F^2}{s^2 + 2 D_F \omega_F s + \omega_F^2} \quad (1.5)$$

geglättet. Hier ist s die Laplace-Variable, ω_F die nominale Eckkreisfrequenz und $2D_F$ der Dämpfungsgrad des Tiefpassfilters.

Als Modell der Strecke folgt somit ein System vierter Ordnung. Die Differentialgleichung für die Zustandsvariable i_A ergibt sich aus Gleichung (1.2), jene für die Zustandsvariable ω aus Gleichung (1.4). Das Tiefpassfilter ist zweiter Ordnung. Deswegen werden zwei weitere Zustandsvariablen eingeführt: Die Ausgangsspannung des Filters U_ω und eine Hilfsvariable x_3 ohne signifikante physikalische Bedeutung. Somit ergibt sich die folgende Zustandsraumdarstellung:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{\omega} \\ \dot{x}_3 \\ \dot{U}_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & -\frac{K_G}{L_A} & 0 & 0 \\ \frac{K_M}{\Theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_T \omega_F & -2 D_F \omega_F & -\omega_F \\ 0 & 0 & \omega_F & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_A} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\Theta} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_S \\ M_L \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$U_\omega = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \end{bmatrix} + [0 \ 0] \begin{bmatrix} U_S \\ M_L \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Bemerkungen:

- Die eigentliche Ausgangs- bzw. Regelgröße der Strecke ist die Drehzahl der Welle, d.h. ω . Aufgrund des gerippten Messsignals muss gefiltert werden, daher wird als Regelgröße das gefilterte U_ω verwendet. In diesem Versuch spielt die Dynamik des Filters keine entscheidende Rolle für die folgende Regelung. Dies muss aber nicht immer so sein!
- Die nichtlineare Sättigungskennlinie $U_S = f(U_R)$ (Gl. 1.1) wird als separater Block ausgeführt (siehe Abb. 1.2) und wird in das Modell der Regelstrecke aufgenommen.
- Im weiteren wird jedoch ein Betrieb im linearen Bereich der Sättigungskennlinie angenommen und die Übertragungsfunktion von U_R auf U_ω mit $P(s)$ bezeichnet. Beachten Sie jedoch am Übungsnachmittag, dass die Spannung in manchen Versuchen gesättigt wird und sich durch diese Nichtlinearität ein von der Simulation in Matlab abweichendes Verhalten bis hin zu stark verschlechterter Regelgüte ergeben kann.

Kapitel 2

Theoretische Aufgaben

Das Ziel der Regelung ist es, die Regelgrösse U_ω um einen bestimmten, im Allgemeinen von 0 abweichenden Betriebspunkt zu stabilisieren. In diesem Versuch wird als Betriebspunkt eine Winkelgeschwindigkeit $\omega = 200 \text{ rad/s}$ gewählt. Das durch den Bremsmotor verursachte konstante Lastmoment soll 30 mNm betragen. Für diesen Betriebspunkt soll nun die Gleichgewichtslage berechnet werden. Die hierzu benötigten Parameter können Sie der Tabelle 2.1 und den Datenblättern im Anhang A.1 entnehmen. Um Ihnen das Suchen zu erleichtern, sind die für die Berechnung wesentlichen Parameter kursiv hervorgehoben. In der Gleichgewichtslage sind alle zeitlichen Ableitungen gleich null. Somit können Sie die stationäre Stellgrösse U_S und die stationäre Regelgrösse U_ω für den Betriebspunkt mit Hilfe des linearen Gleichungssystems (1.6) bestimmen.

Anmerkung: Das Lastmoment des Lüfters steigt quadratisch mit der Drehzahl an. Vereinfachend dürfen Sie aber von einem konstanten Lastmoment von 6 mNm bei einer Geschwindigkeit von 200 rad/s ausgehen.

Winkelgeschwindigkeit ω	<i>200 rad/s</i>
Trägheitsmoment Θ der Welle mit Lüfter	<i>$125 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2$</i>
Lastmoment M_L	<i>$(30 + 6) \text{ mNm}$</i>

Tabelle 2.1: Daten des Betriebspunkts

Aufgabe 1: Gleichgewichtslage

Berechnen Sie die stationären Werte der Zustände U_ω und i_A sowie der Stellgrösse U_S im Betriebspunkt mittels Gleichung (1.6) und füllen Sie Tabelle 2.2 aus.

Zustand	Wert
ω	<i>200 rad/s</i>
U_ω	
i_A	
U_S	

Tabelle 2.2: Stationäre Werte im Betriebspunkt

Als Regler werden in diesem Versuch die in der Industrie standardmässig verwendeten P-, PI- und PID-Regler benutzt. Abbildung 2.1 zeigt den geschlossenen Regelkreis mit einem PID-Regler. Hierbei ist $P(s)$ die in Abbildung 1.2 dargestellte Regelstrecke.

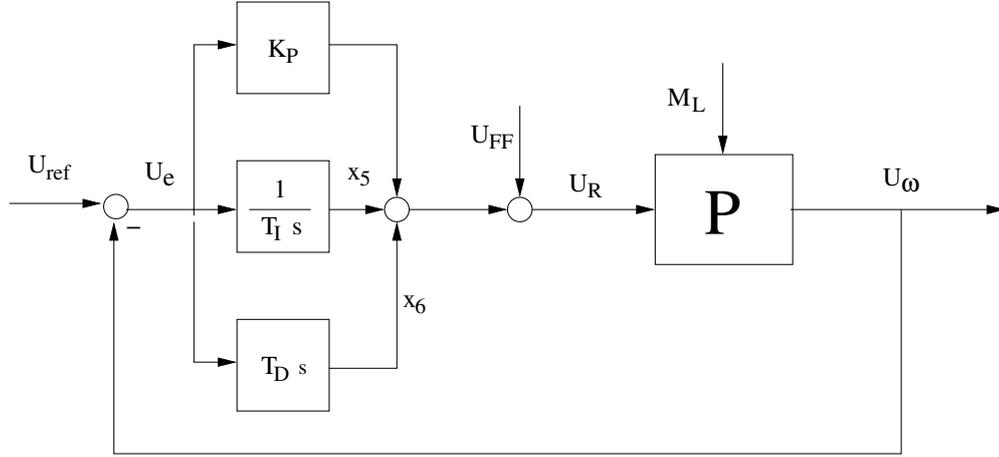


Abbildung 2.1: Der geschlossene Regelkreis mit PID-Regler

Neben der Standardrückführung wird ein Feedforward verwendet um die Regelgüte zu erhöhen, d.h. es wird am Eingang der Strecke eine zusätzliche Spannung U_{FF} aufgeschaltet. Diese Spannung entspricht dem in Aufgabe 1 berechneten stationären U_S . Somit wird der Regler nur dazu verwendet, Sollwertabweichungen vom Betriebspunkt, Störungen und Modellierungsfehler auszuregeln.

Die Darstellung des *geschlossenen* Regelkreises im Zustandsraum ist:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{\omega} \\ \dot{x}_3 \\ \dot{U}_\omega \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & -\frac{K_G}{L_A} & 0 & -\frac{1}{L_A}(K_P + k) & \frac{1}{T_I L_A} & -\frac{k}{L_A} \\ \frac{K_M}{\Theta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_T \omega_F & -2 D_F \omega_F & -\omega_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_A} & 0 & \frac{1}{L_A}(K_P + k) \\ 0 & -\frac{1}{\Theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{FF} \\ M_L \\ U_{ref} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_\omega \\ U_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_P - k & \frac{1}{T_I} & -k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ \omega \\ x_3 \\ U_\omega \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & K_P + k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{FF} \\ M_L \\ U_{ref} \end{bmatrix}$$

K_P ist die Verstärkung des P-Reglers. Weiters wurde x_5 , die Ausgangsspannung des Integrators, als neuer Zustand eingeführt. T_I ist die Nachstellzeit des I-Anteils des PI-Reglers. Da ein reiner D-Anteil nicht realisierbar ist (die Übertragungsfunktion weist im Zähler eine höhere Ordnung als im Nenner auf), wurde auf ein sogenanntes „Dirty D“-Element zurückgegriffen – ein realisierbarer Differentiator, der eine beschränkte Verstärkung aufweist. Dies wird dadurch erreicht, dass eine kleine Verzögerung T in dem Differentiator enthalten ist. Sein Ausgang wird

mit x_6 bezeichnet und seine Übertragungsfunktion ist $G(s) = k \cdot \frac{T_s}{Ts+1}$. Die Vorhaltezeit T_D ergibt sich nun aus der Verzögerung T und dem Verstärkungsfaktor k . Es gilt $T = \frac{T_D}{k}$ und $k \approx 10 \dots 20$.

Anmerkungen:

- Für die Simulation der Regelstrecke in den MATLAB-Files `ifa24o1.m` und `ifa24c1.m` wird die nichtlineare Kennlinie des Spannungsverstärkers, vgl. Definition (1.1), durch die proportionale Verstärkung 1 ersetzt.
- In Abbildung 2.1 ist der Einfachheit halber ein reines D-Element dargestellt und kein Dirty-D-Element, wie im Text beschrieben.

2.1 Die Einstellregeln nach Ziegler-Nichols

Auf Grund von ausgedehnten Versuchsreihen haben Ziegler und Nichols 1943 erstmals Einstellregeln für PID-Regler in Tabellenform angegeben, welche auch heute noch breite Anwendung finden. Es handelt sich dabei 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, obwohl ein Modell der Regelstrecke gegeben ist. Um ein Gefühl für die Wirkungsweise von P-, PI- und PID-Reglern zu bekommen, sollen Sie die Verfahren von Ziegler-Nichols in der Simulation anwenden.

Die unbekannte Strecke wird als Strecke dominant erster Ordnung mit *mittlerer relativer Totzeit* mit der Übertragungsfunktion

$$G_{u_e}(s) = e^{-sT_{t_e}} \frac{k_{s_e}}{1 + sT_{1_e}} \tag{2.1}$$

approximiert. Der Index e deutet an, dass es sich um ein Ersatzmodell der tatsächlichen Übertragungsfunktion der Regelstrecke handelt. Für ihre Einstellregeln geben Ziegler und Nichols den folgenden Gültigkeitsbereich an:

$$0.1 \lesssim T_{t_e}/T_{1_e} \lesssim 1.0 \tag{2.2}$$

wobei die Ergebnisse im Wertebereich $0.167 \lesssim T_{t_e}/T_{1_e} \lesssim 0.33$ erfahrungsgemäss gut sind. Ausserhalb bedürfen sie der manuellen Nachkorrektur. Man beachte, dass der Bereich 'kleiner' relativer Totzeit $0 \leq T_{t_e}/T_{1_e} \lesssim 0.10$ **nicht** zum Anwendungsbereich dieses Verfahrens gehört!

2.1.1 Die Schwingmethode

Beim Schwingversuch wird der Regelkreis über einen P-Regler geschlossen (der I- und der D-Anteil sind zu deaktivieren, indem $T_I = \infty$ (bzw. $1/T_I = 0$) und $T_D = 0$ gesetzt wird). Dann wird K_P in Schritten soweit erhöht, bis der Regelkreis an die Stabilitätsgrenze gerät. Das entsprechende K_P wird notiert (Im Englischen: „ultimate gain“, K_u). Weiters wird die Schwingungsperiode P_u gemessen. Aus diesen beiden Messwerten ergeben sich die Einstellwerte für den PID-Regler gemäss Tabelle 2.3.

Aufgabe 2: Schwingmethode

Legen Sie die Reglerparameter nach der Schwingmethode fest und füllen Sie die betreffenden Felder in Tabelle 2.4 aus. Benützen Sie zur Auslegung des Reglers die MATLAB-Funktion `ifa24c1(KP, 1/TI, TD)`, um die Stabilitätsgrenze des geschlossenen Regelkreises bei einem Sollwertsprung von 5 V zu ermitteln. Die beiden Parameter $1/TI$ und TD sind beide auf 0 zu setzen.

Verfahren	Regler	K_P	$1/T_I$	T_D
Schwingmethode	P	$0.5K_u$	–	–
	PI	$0.45K_u$	$1.2/P_u$	–
	PID	$0.6K_u$	$2/P_u$	$(1/8)P_u$
Sprungmethode	P	$T_{1_e}/(T_{t_e}k_{S_e})$	–	–
	PI	$0.9T_{1_e}/(T_{t_e}k_{S_e})$	$0.3/T_{t_e}$	–
	PID	$1.2T_{1_e}/(T_{t_e}k_{S_e})$	$0.5/T_{t_e}$	$0.5T_{t_e}$

Tabelle 2.3: Bestimmung der Reglerparameter nach Ziegler-Nichols

Anmerkung: Beachten Sie, dass die Spannung U_R beim Schwingversuch in Matlab teilweise ausserhalb der Sättigungsgrenze liegt. Da die Sättigung in der Simulation jedoch nicht berücksichtigt wird, ergibt sich dadurch kein Problem.

Verfahren	Regler	K_P	$1/T_I$	T_D
Schwingmethode	P		–	–
	PI			–
	PID			
Sprungmethode	P		–	–
	PI			–
	PID			

Tabelle 2.4: Reglerparameter nach Ziegler-Nichols (Modell)

2.1.2 Die Sprungmethode

Nicht alle Regelkreise lassen diesen Schwingversuch zu. Deshalb haben Ziegler-Nichols mit dem Sprungversuch ein zweites Verfahren angegeben. Hierzu wird der Regelkreis geöffnet. Man nimmt die Stellsprungantwort der Strecke auf einen Einheitssprung auf und bestimmt durch Anlegen der Wendetangente an der Stellsprungantwort die Ersatz-Totzeit T_{t_e} , den Streckenverstärkungsfaktor k_{S_e} und die Ersatz-Anstiegszeit T_{1_e} . Wird ein Sprung angelegt, dessen Amplitude nicht 1 beträgt, muss dies bei der Bestimmung von k_{S_e} berücksichtigt werden, indem das gemessene k_{S_e} durch die Höhe des Sprungs dividiert wird.

Aufgabe 3: Sprungmethode

Legen Sie die Reglerparameter nach der Sprungmethode fest und füllen Sie die verbleibenden Felder in Tabelle 2.4 aus. Gehen Sie dazu wie folgt vor: Verwenden Sie die MATLAB-Funktion `ifa24o1`, um die Sprungantwort der offenen Strecke für einen Stellgrössensprung von 5 V zu simulieren. Aus der Sprungantwort, bzw. der ersten Ableitung davon können Sie die benötigten Parameter T_{t_e} , T_{1_e} und k_{S_e} bestimmen, siehe Abb. 2.2. Der Streckenverstärkungsfaktor entspricht dem Endwert der Sprungantwort dividiert durch den Betrag des angelegten Sprungs (hier: 5 V), die Ersatz-Totzeit dem Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse und die Ersatz-Anstiegszeit entspricht der Zeit zwischen dem Schnittpunkt der Wendetangente mit der Zeitachse und dem Schnittpunkt der Wendetangente mit dem stationären Endwert. Den Wendepunkt und die Steigung der Wendetangente können Sie mit Hilfe der Ableitung der Sprungantwort bestimmen. Berechnen Sie dann die Werte für K_P , $\frac{1}{T_I}$ und T_D nach Tabelle 2.3.

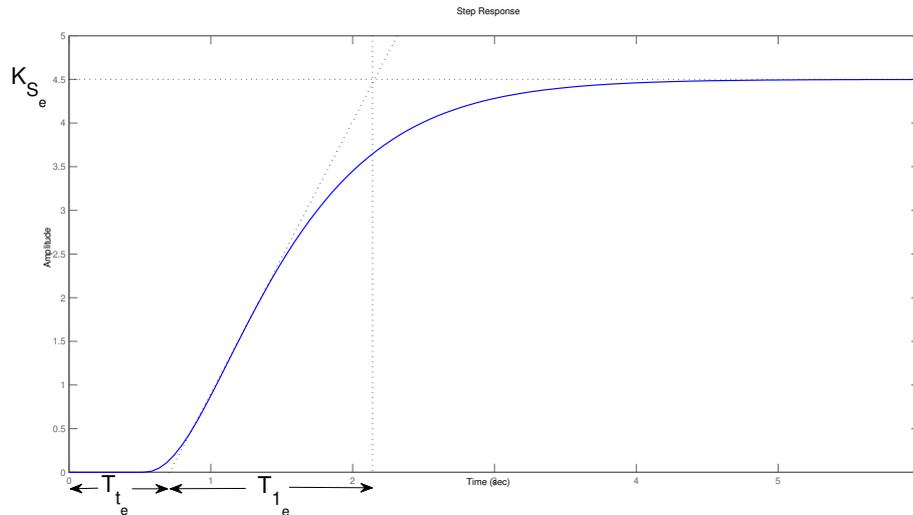


Abbildung 2.2: Spungmethode nach Ziegler-Nichols. Die Tangente ist an den Wendepunkt der Sprungantwort zu legen. In diesem Beispiel ist $T_{t_e} = 0.75$, $T_{1_e} = 1.4$ und $k_{S_e} = 4.5$, als Anregungssignal wurde ein Einheitssprung verwendet.

Aufgabe 4: Vergleich der beiden Methoden

Vergleichen Sie die Reglerparameter, die Sie mit den beiden Methoden erhalten haben. Wie erklären Sie sich die Unterschiede? Sind die Bedingungen, die Ziegler-Nichols für ihr Verfahren angeben, erfüllt?

Die Führungssprungantwort Ihres Reglers soll die folgenden Spezifikationen erfüllen (siehe Anhang B) :

- 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.

Wenn diese Spezifikationen mit den Reglerparametern nach Ziegler-Nichols nicht erfüllt werden, müssen Sie die Parameter manuell nachtrimmen. Die Tabelle 2.5 gibt an, wie sich eine Erhöhung der einzelnen Parameter auf die verschiedenen Größen auswirkt.

Parameter	Anregelzeit	Überschwingen	Ausregelzeit	stationärer Regelfehler
$\tilde{K}_P \uparrow$	\downarrow	\uparrow	kleiner Einfluss	\downarrow
$1/T_I \uparrow$	\downarrow	\uparrow	\uparrow	$\rightarrow 0$
$T_D \uparrow$	kleiner Einfluss	\downarrow	\downarrow	kein Einfluss

Tabelle 2.5: Effekt einer Erhöhung der einzelnen Reglerparameter

Aufgabe 5: Einhalten der Spezifikationen

- Verwenden Sie das MATLAB-Skript `ifa24c1(KP,1/TI,TD)`, um das Verhalten des geschlossenen Regelkreises auf einen Führungssprung von 5 V, einen U_{FF} -Sprung von ebenfalls 5 V und einen Lastmomentsprung von 10 mNm zu simulieren. Füllen Sie Tabelle 2.6 aus. Verwenden Sie entweder die Parameter der Sprung- oder die der Schwingmethode.
- Welche der oben genannten Spezifikationen werden vom P-, PI- und vom PID-Regler erfüllt?
- Trimmen Sie den PID Regler nach, um das Überschwingen in den angegebenen Grenzen zu halten. Die Auswirkungen einer Änderung der einzelnen Parameter sind in Tabelle 2.5 angegeben.

Regler	P-Regler	PI-Regler	PID-Regler	PID-Regler nachgetrimmt
K_P $\frac{1}{T_I}$ T_D				
Führungsverhalten (U_{ref})				
Anregelzeit [s] Ausregelzeit[s] Überschwingen $e_{max}(t)$ [%] Stationärer Regelfehler e_∞ [%]				
Störverhalten von U_{FF}				
Ausregelzeit [s] Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]				
Störverhalten von M_L				
Ausregelzeit [s] Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]				

Tabelle 2.6: Ergebnisse der Reglerauslegung mittels Simulation

Anmerkung: Behalten Sie die **Stellgrößenbeschränkung** im Auge: Der Arbeitsbereich des Spannungsverstärkers ist ± 24 V, danach ist er in Sättigung.

Kapitel 3

Praktische Aufgaben

Während des Versuchsnachmittages im Labor sollen Sie überprüfen, ob die Modellierung mit der tatsächlichen Regelstrecke übereinstimmt und schliesslich Ihren zu Hause entworfenen Regler an der konkreten Anlage testen.

Starten Sie als erstes das Skript `IfA 2.4` auf dem Desktop, um die benötigten Dateien in das Verzeichnis `C:\Scratch\Speed.Control` zu laden.

Die Steuerung der Versuchsapparatur geschieht über ein GUI (siehe Abb. 3.1), in das Sie die Reglerparameter eingeben können. Da die grafische Anzeige der verschiedenen Spannungsverläufe zeitlich nur grob aufgelöst ist, können Sie die Werte auch aufzeichnen und mit Matlab weiterverarbeiten. Öffnen Sie den VNC-Viewer und verwenden Sie das folgende Login, um das GUI zu starten:

```
Server:    autx20-01
Passwort:  control
```

Klicken Sie auf die Schaltfläche **Start**, um das Experiment zu starten. Mit der grossen Schaltfläche oben links können Sie die Steuerung (de)aktivieren. Der P-, I- und der D-Zweig können einzeln zugeschaltet werden (On/Off Schalter). Wenn alle Anteile deaktiviert sind, erhält man demnach die offene Regelstrecke. Die Felder mit schwarzen Zahlen können verändert werden, graue Zahlen dienen nur der Anzeige. Mit dem **record**-Button können Sie die Aufzeichnung der Spannungsverläufe starten und stoppen. Bei einer zeitlichen Auflösung von 1 ms können Sie maximal 30 Sekunden aufzeichnen, bei einer gröberen Auflösung entsprechend mehr. Während einer Aufzeichnung sind einige Funktionen gesperrt. Nach dem Beenden der Aufzeichnung müssen die Daten erst in den Speicher geschrieben werden, während dieser Zeit können Sie keine neue Aufzeichnung starten. Beachten Sie, dass die Reglerparameter im GUI mit K_P , K_I und K_D bezeichnet werden, wobei $K_I := \frac{1}{T_I}$ und $K_D := T_D$.

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 Regelstrecke 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 zur simulierten passt, umso zuverlässiger sollten auch die vorausberechneten Reglerparameter sein. Und entsprechend niedriger ist das Risiko für die Regelstrecke, wenn der Regelkreis geschlossen wird.

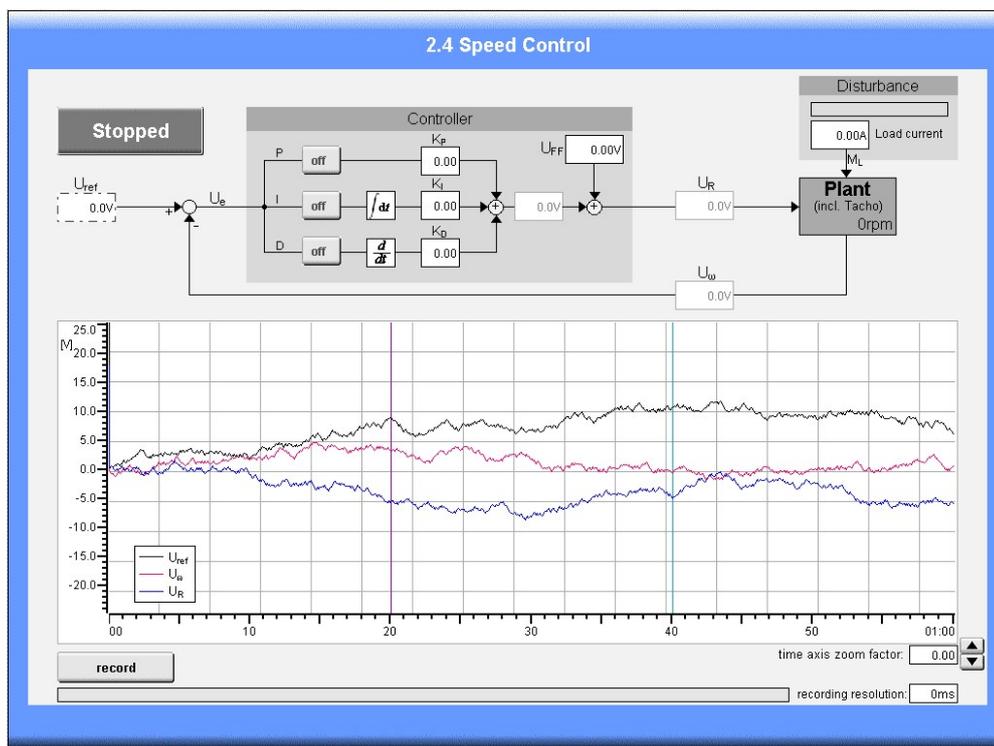


Abbildung 3.1: GUI zur Steuerung der Reglerplattform

Aufgabe 6: Validierung der Gleichgewichtslage und der Modellierung

Überprüfen Sie, ob die in Aufgabe 1 berechneten Werte für die Gleichgewichtslage korrekt sind. Ändern Sie dazu die Feedforward-Spannung U_{FF} , bis die Welle sich mit 200 rad/s dreht. Die Spannungen U_R und U_ω können Sie direkt ablesen. Den Strom i_A müssen Sie nicht messen. Da Sie das Verhalten der offenen Strecke untersuchen, darf der Regler dabei natürlich noch nicht aktiv sein. Hingegen müssen Sie das Lastmoment M_L vorgeben. Dies geschieht durch den Lastmotor, dessen Lastmoment proportional zum Strom der Stromquelle ist. Mit der Motorkonstanten aus dem Datenblatt kann man den benötigten Strom für ein Lastmoment von 30 mNm berechnen:

$$M_L = K_M \cdot i_L \implies i_L = 0.91A \quad (3.1)$$

Zustand	Wert
ω	
U_ω	
U_R	

Tabelle 3.1: Gemessene stationäre Werte im Betriebspunkt

Plotten Sie als nächstes die Sprungantwort des Modells der offenen Strecke mit Hilfe der MATLAB-Funktion `ifa24o1`. Zum Vergleich mit dem realen System setzen Sie

das Lastmoment auf 0 und starten dann die Aufzeichnung. Ändern Sie dann die Feedforward-Spannung von 0 V auf 5 V, um einen Sollwertsprung auf die offene Strecke zu erzeugen. Stoppen Sie die Aufzeichnung und lesen Sie die aufgezeichneten Daten mit der MATLAB-Funktion `ifa24_get_data` von der Steuerung aus. Passen Sie das MATLAB-Skript gegebenenfalls Ihren Bedürfnissen an, um den Sollwertsprung auf den Zeitpunkt 0 zu legen. Vergleichen Sie die beiden Sprungantworten. Stimmt die Modellierung mit dem realen System überein?

3.2 Schliessen des Regelkreises

Aufgabe 7: Schwingversuch am realen System

Da die simulierte Sprungantwort nicht sehr gut mit der gemessenen übereinstimmt, sollen Sie den Schwingversuch nun noch am realen System wiederholen. Um möglichst gute Ergebnisse in Bezug auf eine folgende PID-Parameterbestimmung zu erhalten, führen wir den Schwingversuch *um* den Betriebspunkt durch. Das Lastmoment wird dabei wie beim Sprungversuch wieder auf 0 gestellt, die Feedforwardspannung U_{FF} reduziert sich dadurch von der in Aufgabe 6 ermittelten. Ermitteln Sie diese Spannung zuerst ähnlich wie in Aufgabe 6.

Im Gegensatz zur Simulationsaufgabe 2 soll der Sollwertsprung nun jedoch nur eine Amplitude von 3 V aufweisen, um nichtlineare Effekte durch die Sättigung zu vermeiden. Sollten Sie solche dennoch beobachten, reduzieren Sie die Amplitude auf 2 V. Anstelle eines einzelnen Sprungs können Sie auch ein Rechtecksignal mit genügend grosser Periodendauer verwenden. Hierzu geben Sie als Offset U_ω ein und eine Amplitude von 1.5 V (1 V). Dies führt zu einem Sprung von 3 V (2 V) um den Betriebspunkt. Zur Messung der kritischen Periode P_u müssen Sie die Daten wiederum aufzeichnen und mit Matlab auswerten. Ermitteln Sie die Reglerparameter nach Ziegler-Nichols, füllen Sie die Tabelle 3.2 aus und vergleichen Sie die Parameter mit denjenigen aus der Simulation des Schwingversuchs (Tabelle 2.4).

Verfahren	Regler	K_P	$1/T_I$	T_D
Schwingmethode	P		–	–
	PI			–
	PID			

Tabelle 3.2: Reglerparameter nach Ziegler-Nichols (reales System)

Aufgabe 8: Testen des Reglers

Nun können wir endlich den Regelkreis schliessen. Setzen Sie zuerst den Wert der Feedforward-Spannung U_{FF} auf den ohne Lastmoment ermittelten Wert U_R aus der vorigen Aufgabe. Damit fahren Sie den Prozess in den Betriebspunkt. Als Referenzwert (*Sollwert*) stellen Sie wieder den Wert U_ω aus der vorigen Aufgabe ein bzw. setzen diesen Wert als Offset (für ein Sinus- oder Rechtecksignal).

Testen Sie nun den Regelkreis mit den Reglerparametern, die Sie durch den Schwingversuch am realen System ermittelt haben. Beginnen Sie mit einem P-Regler und probieren Sie auch noch einen PI- und einen PID-Regler aus. Untersuchen Sie das Verhalten auf verschiedene Sollwertvorgaben (Sinus, Rechteck). Ist der Regelkreis

Regler	PID-Regler nachgetrimmt
K_P $\frac{1}{T_I}$ T_D	
Führungsverhalten (U_{ref})	
Anregelzeit [s] Ausregelzeit[s] Überschwingen $e_{max}(t)$ [%] Stationärer Regelfehler e_∞ [%]	
Störverhalten von U_{FF}	
Ausregelzeit [s] Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]	
Störverhalten von M_L	
Ausregelzeit [s] Überschwingen $e_{max}(t)$ [%]	

Tabelle 3.3: Performance des nachgetrimmten Reglers

stabil? Trimmen Sie dann den Regler wie in der Aufgabe 5 nach und füllen Sie Tabelle 3.3 für einen Führungssprung von 2 V um den Betriebspunkt, einen U_{FF} -Sprung von 2 V und einen Lastmomentsprung von 10 mNm (entsprechen 0.3 A) aus.

Anmerkung: Achten Sie auf etwaige nichtlineare Effekte durch die Sättigung der Eingangsspannung wenn grössere als die angegebenen Sprünge durchgeführt werden. Welcher Anteil (P-, I- oder D-Anteil) ist besonders empfindlich gegenüber einer Sättigung?

Kapitel 4

Schlussdiskussion

Dieses Kapitel fasst die wichtigsten Lernziele des Experiments in Form von Fragen kurz zusammen. Machen Sie sich Gedanken/Notizen zu den Fragen und besprechen Sie diese anschliessend mit Ihrem Betreuer.

Lernziel 1: Modellierung

Bei der Modellierung und Simulation der offenen Strecke wurden gewisse Einflüsse (zum Teil implizit) vernachlässigt, die (neben Parameterunsicherheiten) Unterschiede zwischen den simulierten und gemessenen Sprungantworten bewirkten. Welche Einflüsse könnten das sein und wie könnten diese modelliert werden?

Lernziel 2: Die Verfahren von Ziegler-Nichols

Die Einstellregeln nach Ziegler-Nichols sind empirische Verfahren, um einen PID-Regler für eine unbekannte Strecke auszulegen. Welche Annahmen über die unbekannte Strecke werden getroffen und welche Bedingungen müssen erfüllt sein, um mit Ziegler-Nichols ein gutes Resultat zu erhalten?

Lernziel 3: PID-Regler

- Das Überschwingen wird sowohl durch eine Erhöhung des P-, als auch des I-Anteils vergrössert. Welcher dieser Anteile hat den grösseren Einfluss auf das Überschwingen (aus Ihren Beobachtungen am Versuchsnachmittag)?
- Welcher Anteil bewirkt ein Verschwinden des stationären Regelfehlers?
- Das analoge Tachosignal der Welle wird wegen des Rippels tiefpassgefiltert. Wie würden Sie ihre Reglerparameter ändern, wenn dieser Filter nicht vorhanden wäre? (Welche Anteile erhöhen/verkleinern/nicht ändern)

Lernziel 4: Abschluss der Arbeiten

Wir hoffen, der Versuch hat Ihnen Spass gemacht und Sie haben etwas gelernt. Füllt nun das online Feedback Formular auf der Registrationsseite unter **MyExperiments** aus. Jeder Student/Teilnehmer muss sein eigenes Feedback ausfüllen. Dies hilft uns unsere Versuche stetig zu verbessern. Vielen Dank für euere Inputs.

Bespricht nun mit eurem Betreuer das Experiment, um das Testat zu erhalten.

Auf Wiedersehen!

Anhang A

Technische Datenblätter

A.1 Daten der Regelstrecke

Spannungsquelle für Antriebsmotor			
Ausgangsbereich		± 24	V
max. Dauer-Ausgangsstrom		± 3.0	A
Antriebsmotor			
Nennspannung		± 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	$\hat{=}$ Generatorconst. K_G 5.5 mV/Upm	52.5	$\frac{mV}{rad/s}$
Ankerinduktivität		1.3	mH
Ankerwiderstand R_A		8.5	Ω
Drehmomentkonstante	$\hat{=}$ Motorkonst. K_M	51.2	$\frac{mNm}{A}$
Rotor-Trägheitsmoment		$5.2 \cdot 10^{-6}$	kgm ²
Welle mit Lüfter			
Trägheitsmoment		ca. $125 \cdot 10^{-6}$	kgm ²
Bremsmoment	bei nom. Drehgeschw. von 200 rad/s	ca. 10	mNm
Stromquelle für Lastmotor			
Ausgangsbereich		± 3	A
Softwareseitige Strombegrenzung		± 1.4	A
Lastmotor			
Nennspannung		± 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	$\hat{=}$ Generatorconst. K_G 3.4 mV/Upm	32.5	$\frac{mV}{rad/s}$
Ankerinduktivität		0.75	mH
Ankerwiderstand		6.2	Ω
Drehmomentkonstante (Motorkonst. K_M)		33	$\frac{mNm}{A}$
Rotor-Trägheitsmoment		$2 \cdot 10^{-6}$	kgm ²
Tachogenerator mit Verstärker			
Verstärkungsfaktor K_T	24 V bei 5000 Upm	45.82	$\frac{mV}{rad/s}$
Spannungsripple		300	mVpp
Tiefpassfilter			
Eingangs-Spannung		± 24	V
Ausgangsbereich		± 24	V
Nominale Eck-Kreisfrequenz	ω_F	20	$\frac{rad}{s}$
Dämpfungsgrad	$2D_F$ (max. flach)	1.414	

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

Anhang B

Kenngrößen zur Bestimmung der Regelgüte im Zeitbereich

Zur Beschreibung des Führungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises werden folgende Kenngrößen benutzt, die in Abbildung B.1 dargestellt sind. Der Plot repräsentiert die Führungssprungantwort des geschlossenen Kreises für einen Einheitssprung.

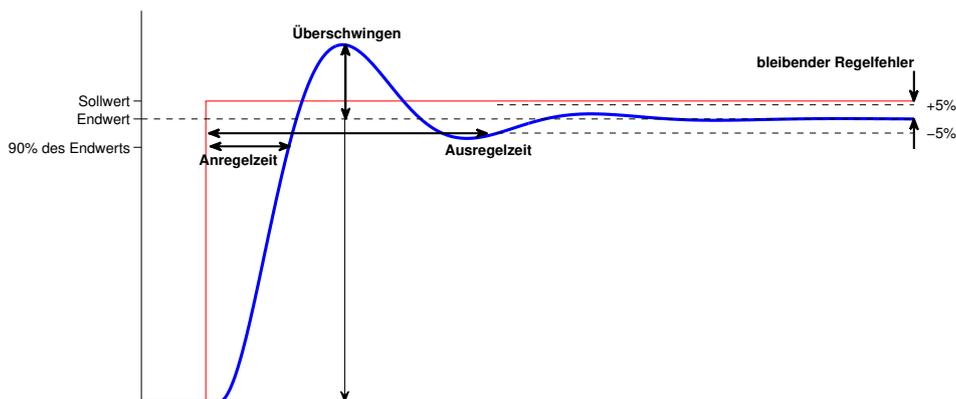


Abbildung B.1: Kenngrößen zur Spezifikation der Regelgüte im Zeitbereich

- **Anregelzeit [s]:** Die Zeit, die bis zum ersten Erreichen des stationären Endwertes vergeht. Dieser Endwert muss nicht immer der Höhe des angelegten Sprung entsprechen (stationärer Regelfehler). Ferner wird der Endwert oft asymptotisch erreicht, so dass die Anregelzeit alternativ als die Zeit definiert werden kann, die vergeht, bis 90% des stationären Endwertes erreicht ist.
- **Ausregelzeit [s]:** Die Ausregelzeit ist die Zeit, ab der die Abweichungen vom stationären Endwert im definierten Toleranzband bleiben.
- **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.