

# Regelung eines elektromechanischen Antriebs

Version vom  
20. Februar 2019

Teil des Praktikums Regelungstechnik (PRT)



## **Fachgebietsleiter**

Prof. Dr.-Ing. O. Stursberg  
stursberg@uni-kassel.de

## **Außerplanmäßiger Professor**

Prof. Dr. rer. nat. A. Linnemann  
linnemann@uni-kassel.de

# Safety Instructions

- In the event of an emergency, control effort should be immediately discontinued by pressing the red “OFF” button on the front of the control box.
- Stay clear of and do not touch any part of the mechanism while it is moving, while a trajectory has been commanded, or before the active controller has been safety checked.
- The following apply at all times except when motor drive power is disconnected:
  1. Stay clear of the mechanism while wearing loose clothing and when hair is not kept close to the head.
  2. Keep head and face well clear of the mechanism.
- Verify that the masses and inertia disks are secured prior to powering up the Control Box or transporting the mechanism.
- Do not take the cover off or physically touch the interior of the Control Box unless its power cord is unplugged (first press the “OFF” button on the front panel) and the PC is unpowered or disconnected.
- The power cord must be removed from the box prior to replacement of any fuses.

# Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsaufbau	4
2	Modellbildung	5
3	Vorbereitungsfragen	6
4	Handhabung des Versuchsstandes	7
5	Drehzahlregelung	8
6	Kaskadierende Positionsregelung	9
7	Verbesserte Positionsregelung	10

# 1 Versuchsaufbau

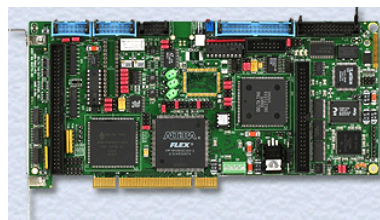
Der Versuchsaufbau behandelt die Regelung eines elektromechanischen Antriebs, wie er in vielen industriellen Anwendungen auftritt. Er besteht aus zwei rotatorisch gekoppelten Massen, die jeweils durch Gleichstrommotoren angetrieben werden. Der erste Motor (an der kleineren Scheibe) dient als Antriebsmotor, während über den zweiten Motor ein Lastmoment aufgebracht werden kann. An den Wellen der Antriebs- und Lastscheibe sind jeweils optische Messaufnehmer angebracht. Diese liefern Impulse, deren Anzahl pro Zeiteinheit proportional zur Drehgeschwindigkeit der Scheiben ist.

Die Scheiben sind elastisch über Zahnriemen und eine Koppelscheibe verbunden. Über die Koppelscheibe kann zusätzliche Reibung, Lose (Spiel, Schlupf) und Elastizität eingestellt werden. Ferner sind das Übersetzungsverhältnis der Scheiben sowie deren Trägheitsmomente veränderbar. Für den vorliegenden Versuch wird aber eine feste Konfiguration verwendet und angenommen, dass die beiden Scheiben starr gekoppelt sind. Dementsprechend wird auch nur der Sensor an der Lastscheibe verwendet.

Der Versuchsaufbau stellt industrielle Anwendungen nach, bei denen Bewegungen durch elektrische Achsantriebe erzeugt werden. Beispiele dafür sind Maschinen zum Bohren, Drillen, Fräsen oder Mahlen (mit Drehzahlregelung) sowie Antriebe zur Bestückung, Montage, Stanzung, Kennzeichnung und zum Transport (mit Positionsregelung).



Die Ein- und Ausgangselektronik für die Motoren und Sensoren ist in einem separaten Gehäuse untergebracht. Darin befinden sich der Netzanschluss, die Leistungsverstärkung, eine interne Stromregelung der Motoren sowie diverse Sicherheitsschaltungen.



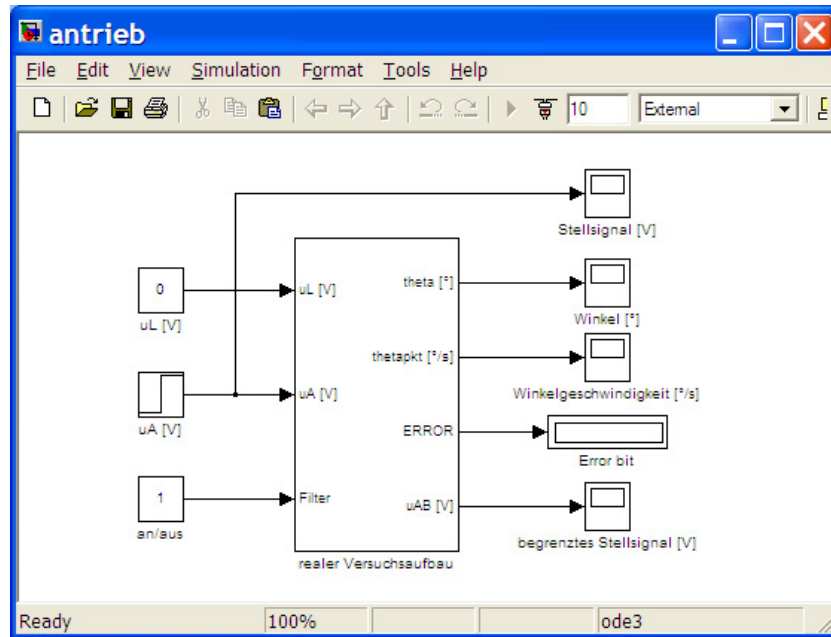
Die Stell- und Messsignale werden von einem DSP-Board im PC erzeugt bzw. verarbeitet. Neben der D/A- und A/D-Wandlung übernimmt die Karte einfache Signalverarbeitungsfunktionen sowie Sicherheits- und Überlastungsabschaltungen.

Über geeignete Treiber werden die Signale schließlich an Simulink übergeben, so dass die Messwertaufnahme und -anzeige sowie die Stellwertgenerierung direkt in Simulink erfolgen kann. Dabei wird eine Erweiterung<sup>1</sup> von Matlab/Simulink eingesetzt, die die Ausführung eines Simulink-Modells unter

---

<sup>1</sup>Real-Time Workshop und Real-Time Windows Target

Windows in Echtzeit ermöglicht.



Für das Praktikum wird ein angepasstes Echtzeit-Simulink-Modell bereit gestellt, dass die Bedienung des Versuchsaufbaus aus Simulink heraus erlaubt. Das Modell enthält einen Block „realer Versuchsaufbau“, der die Echtzeitregelung übernimmt. Die wichtigsten Signale sind:

### Stellsignal $u_A$ des Antriebsmotors

Dieses Signal entspricht der Eingangsspannung  $u_A(t)$  des Motors an der Antriebsscheibe in Volt und ist intern auf den Bereich von  $-5\text{ V}$  bis  $+5\text{ V}$  begrenzt. Das begrenzte Spannungssignal wird als  $u_{AB}$  zur Verfügung gestellt.

### Stellsignal $u_L$ des Lastmotors

Dieses Signal entspricht der Eingangsspannung  $u_L(t)$  des Motors an der Lastscheibe in Volt und ist intern auf den Bereich von  $-5\text{ V}$  bis  $+5\text{ V}$  begrenzt.

### Winkel $\theta$

Dieses Signal entspricht dem Winkel  $\theta$  der Lastscheibe in Grad.

### Winkelgeschwindigkeit $\text{thetapkt}$

Dieses Signal entspricht der Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\theta}$  der Lastscheibe in Grad/Sekunde.

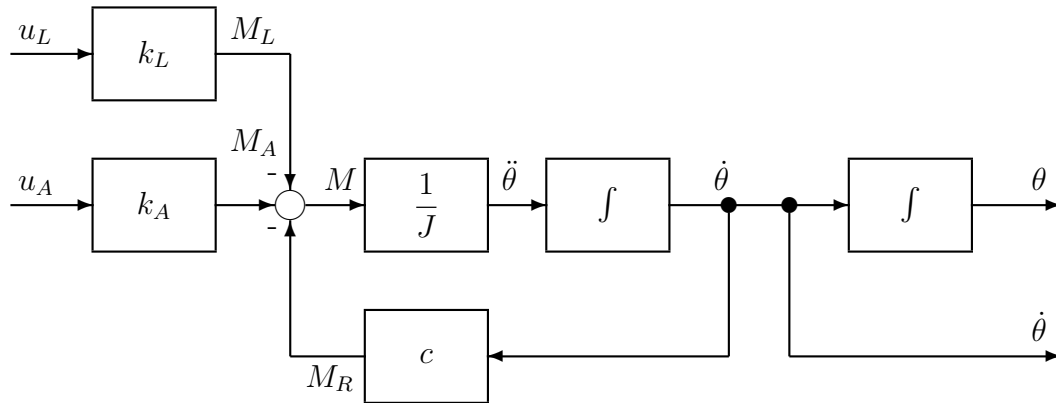
## 2 Modellbildung

In diesem Abschnitt wird ein einfaches Modell des Versuchsaufbaus hergeleitet. Dieses Modell hat die Eingangsspannungen  $u_A$  und  $u_L$  der beiden Motoren als Eingangssignale sowie den Winkel  $\theta$  und deren Ableitung  $\dot{\theta}$  als Ausgangssignale.

Es stellt sich heraus, dass die Zeitkonstanten der Motoren gegenüber den Zeitkonstanten des mechanischen Aufbaus vernachlässigbar klein sind, so dass die Motoren als P-Glieder modelliert werden können. Das auf die Lastscheibe wirkende Drehmoment  $M$  setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- dem Antriebsmoment  $M_A$ , hervorgerufen durch den Motor an der Antriebsscheibe,
- dem Lastmoment  $M_L$ , hervorgerufen durch den Motor an der Lastscheibe, sowie
- dem Reibungsmoment  $M_R$ .

Geht man von einer linearen Gleitreibung (proportional zur Winkelgeschwindigkeit) aus, so entsteht insgesamt ein Modell der folgenden Form:



Darin ist  $J$  das Trägheitsmoment des Gesamtaufbaus und  $c$  der Reibungskoeffizient, jeweils bezogen auf einen Winkel in Grad. Die Verstärkungen  $k_A$  und  $k_L$  der Motoren sind verschieden voneinander, da die Momente jeweils über unterschiedliche Übersetzungsverhältnisse auf die Lastscheibe wirken.

### 3 Vorbereitungsfragen

Machen Sie sich zunächst mit der Versuchsbeschreibung vertraut. Beantworten Sie die folgenden Fragen schriftlich und geben Sie Ihre Antworten zu Beginn des Versuches ab.

1. Betrachten Sie das Modell (Blockschaltbild) aus Kapitel 2 der Versuchsbeschreibung.

(a) Bestimmen Sie  $K_A$ ,  $K_L$  und  $T$  in Abhängigkeit von  $k_A$ ,  $k_L$ ,  $J$  und  $c$  für

$$G_{\dot{\theta}u_A}(s) = \frac{K_A}{Ts + 1}, \quad G_{\dot{\theta}u_L}(s) = \frac{K_L}{Ts + 1}$$

(b) Wie lauten

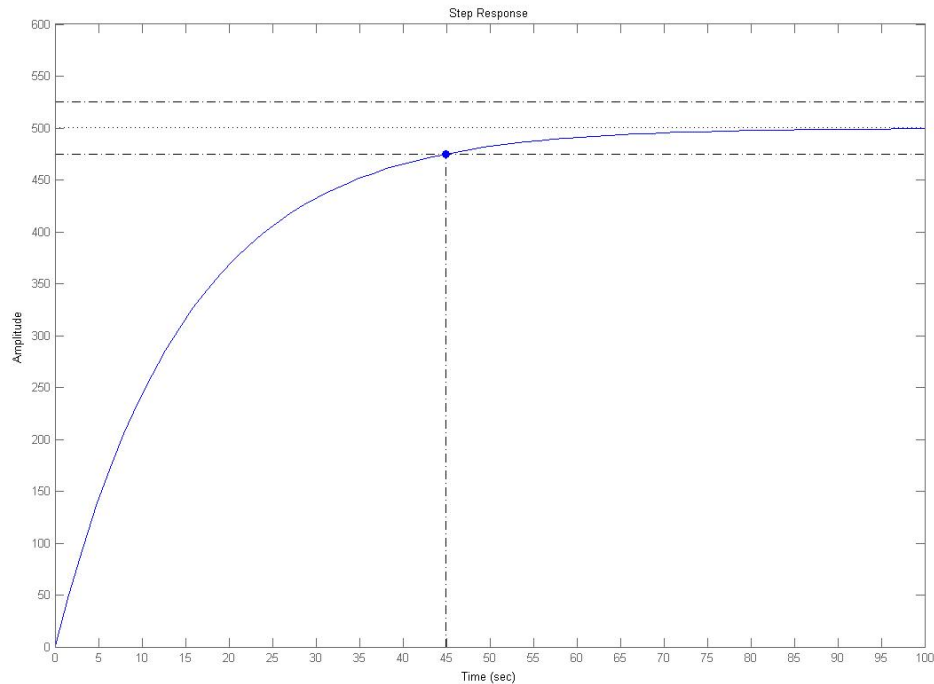
$$G_{\theta u_A}(s), \quad G_{\theta u_L}(s)?$$

2. Im unten stehenden Bild ist die Sprungantwort eines Systems zu sehen, die dem des Versuchs ähnelt.

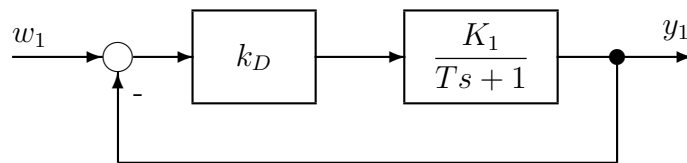
(a) Welche Art von System liegt hier vor?

(b) Wie lautet die zugehörige Übertragungsfunktion?

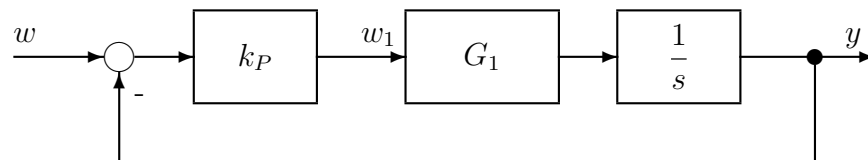
(Hinweis: Benutzen Sie Ihre Kenntnisse aus der Vorlesung)



3. (a) Stellen Sie die Übertragungsfunktion  $G_1(s) = G_{y_1 w_1}(s)$  des folgenden Systems auf und vereinfachen Sie diese auf einen Bruchstrich.



- (b) In folgendem Blockschaltbild soll nun die Übertragungsfunktion aus (a) in dem mit  $G_1$  bezeichneten Block eingebunden sein. Stellen Sie die Übertragungsfunktion  $G_{yw}(s)$  des Gesamtsystems auf und vereinfachen Sie diese.



- (c) Wie lauten die Koeffizienten des Nennerpolynoms von  $G_{yw}(s)$ ? Normieren Sie den Koeffizienten der höchsten Potenz von  $s$  auf 1.

## 4 Handhabung des Versuchsstandes

Der Versuchsaufbau wird über Matlab/Simulink bedient. Hierfür werden einige Dateien zu Beginn des Versuchs zur Verfügung gestellt. Dabei werden alle Versuche an der Maschine grundsätzlich nur mit der Datei **antrieb.mdl** und von Ihnen erstellten Erweiterungen durchgeführt. Alle von Ihnen erstellten Erweiterungen sollen dabei entweder direkt in der Datei vorgenommen werden, oder in separaten Kopien. Versuchen Sie *nicht* den Modellblock der Maschine in ein neues Simulink-Modell zu kopieren. Für Offline-Simulationen erstellen Sie Ihre eigenen (neuen) Modell-Dateien. Damit der Versuch reibungslos durchgeführt werden kann, halten Sie sich bitte an die im Folgenden beschriebenen Schritte zur Bedienung des Versuchsstandes:

1. Setzen Sie die Maschine und alle in ihr enthaltenen Speicher vor jedem Versuch zurück. Führen Sie dazu das Simulink-Modell `ECPDSPResetmdl.mdl` wie folgt aus:
  - (a) Öffnen Sie das Modell.
  - (b) Klicken Sie auf den **Connect to target**-Button in der Icon-Leiste (links neben der Simulationszeit).
  - (c) Klicken Sie auf den **play**-Button in der Icon-Leiste. Nach einer Sekunde ist das Modell fertig durchgelaufen.

Die Modelldatei kann danach wieder geschlossen werden.

2. Konfigurieren Sie das Modell `antrieb.mdl` entsprechend des durchzuführenden Versuchs.
3. Sollten Sie unter Punkt 2 neue Simulink-Blöcke hinzugefügt, alte entfernt, Verbindungslinien hinzugefügt oder gelöscht bzw. die Simulationszeit verändert haben, müssen Sie die Datei neu compilieren. Nutzen Sie dazu entweder den Befehl im Menü (**Tools/Real-Time Workshop/Build Model**), oder den Button in der Icon-Leiste (**Incremental Build**). Das Ändern von Blockparametern macht diesen Schritt nicht zwingend erforderlich. *Achtung:* Beim Compilieren wird das Modell nicht gespeichert.
4. Verbinden Sie das Programm mit der Maschine mittels des **Connect to target**-Buttons in der Icon-Leiste.
5. Starten Sie das Modell über den **play**-Button in der Icon-Leiste.

Zu beachten ist, dass die Maschine über eine interne Sicherung verfügt, die eine Notabschaltung veranlasst, wenn bestimmte Ereignisse eintreten. Dazu gehören unter anderem:

- Die Motorspannung wurde über einen zu langen Zeitraum auf einem zu hohen Level gehalten. (z.B. 5 V länger als 0,3 s)
- Die Steigung der Winkelgeschwindigkeit ist zu groß. (max. 2000 °/s)
- Die Motorspannung weist zu große Fluktuationen auf.

Die Notabschaltung wird durch setzen des Ausgangs *ERROR* am Streckenblock angezeigt. Die Aufzeichnung der Scopes wird dadurch nicht beeinflusst, jedoch können die Motoren nicht mehr angesteuert werden. Um diesen Zustand zu beheben, führen Sie einen Reset der Anlage wie oben unter 1. beschrieben durch. Überlegen Sie auch, wie es zu dieser Notabschaltung kommen konnte, und beheben Sie ggf. das Problem, bevor Sie den Versuch wiederholen.

## 5 Drehzahlregelung

- a) Konfigurieren Sie das Modell `antrieb.mdl` nach den Vorgaben und nehmen Sie die Systemantwort (Sprungantwort) von  $u_A$  nach  $\dot{\theta}$  auf.

**Vorgaben:**

- Simulationszeit 40 s
- Sprung  $u_A$  von 0 auf 1 V bei 1 s



- Filter aus. (Auf 0 setzen)

Welche Probleme ergeben sich für das weitere Vorgehen?

- Nehmen Sie die Sprungantwort gemäß den Vorgaben aus a) erneut auf. Setzen Sie diesmal jedoch den Eingang **Filter** auf 1. Lesen Sie die Übertragungsfunktion  $G_{\theta_{u_A}}(s)$  des Systems aus dem Ergebnis ab.
- Erstellen Sie ein Simulink-Modell, welches die in Teil b) bestimmte Übertragungsfunktion simuliert. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Sprungantwort aus Teil b).
- Berechnen Sie mit Hilfe der Übertragungsfunktion aus b) und einer Faustformel aus der Vorlesung einen P-Regler für die Winkelgeschwindigkeit.

**Vorgabe:**  $t_{5\%} = 0,3 \text{ s}$

- Ergänzen Sie das Simulink-Modell aus c) um Ihren Regler und prüfen Sie die Einhaltung der Vorgaben.

**Sollwert:**  $1600^\circ/\text{s}$

Wie groß ist der stationäre Endwert des geregelten Systems? Berechnen Sie, falls nötig, einen Korrekturfaktor als Vorsteuerung, so dass  $h_E = 1$  gilt. Wie groß ist die benötigte Stellgröße? Ist dies ein realistischer Wert?

- Implementieren Sie Regler und Steuerung an der Maschine und testen Sie diese. Setzen Sie hierfür den Eingang **Filter** auf 1.

**Sollwert:**  $1600^\circ/\text{s}$  und  $800^\circ/\text{s}$ .

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Simulation aus e).

- Entwerfen Sie einen PI-Regler mit Hilfe von SISO-Tool.

**Vorgaben:**  $\Delta_m = 0\%$ ,  $t_{5\%} = 0,4 \text{ s}$

Implementieren und testen Sie diesen Regler. Ist eine Vorsteuerung notwendig?

## 6 Kaskadierende Positionsregelung

Die Positionsregelung soll nun über eine Kaskadenregelungsstruktur mit zwei P-Reglern erfolgen. Als innere Schleife wird der unter Abschnitt 4 berechnete P-Regler für die Winkelgeschwindigkeit verwendet. Die Vorsteuerung aus Abschnitt 4 wird hier nicht benötigt.

- Stellen Sie die Übertragungsfunktion des in Abschnitt 4 entstandenen geregelten Systems auf.
- Erweitern Sie diese Übertragungsfunktion um die Eigenschaften des Positionssystems.
- Benutzen Sie die so entstandene Übertragungsfunktion in SISO-Tool um einen P-Regler für die Position zu berechnen, der  $t_{5\%}$  ohne Überschwingen minimiert.
- Erstellen Sie ein Simulationsmodell der Kaskadenregelung mit einer Sollwertvorgabe von  $90^\circ$ . Prüfen Sie die Einhaltung der Vorgaben. Ergibt sich eine realistische Stellgröße?

- e) Implementieren Sie die gesamte Kaskadenregelung und testen Sie diese an der Maschine. Da die Drehzahlregelung nun nur kurzzeitig aktiv ist (bis der Endwinkel erreicht ist, siehe Teil d)), ist der Einsatz des Filters nicht mehr notwendig. Setzen Sie daher den Eingang **Filter** für diesen Versuch auf 0. **Sollwert:**  $90^\circ$

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Simulation aus Teil d). Beachten Sie dabei das Stellsignal  $u_A$  und deren Begrenzung  $u_{AB}$ .

- f) Das System soll jetzt auf einen größeren Sollwert ( $\theta = 10000^\circ$ ) geregelt werden. Da die Drehzahlregelung nun länger aktiv ist, setzen Sie den Eingang **Filter** für diesen Versuch auf 1.
- g) Welche Probleme treten auf? Wie kann man diese lösen?

## 7 Verbesserte Positionsregelung

Um das Regelungsergebnis zu verbessern, sollen nun beide Schleifen der Kaskadenregelung in einem Schritt ausgelegt werden. Die Regelungsstruktur in Form von zwei P-Reglern soll beibehalten werden. Als Zielvorgaben sollen gelten:

- $t_{5\%} = 0,3s$
  - $\Delta_m = 10\%$
- a) Benutzen Sie Faustformeln aus der Vorlesung, um die gewünschten Pole der Führungsübertragungsfunktion der Kaskadenregelung zu berechnen. Stellen Sie damit die gewünschten Nennerkoeffizienten der Führungsübertragungsfunktion auf.
- b) Bestimmen Sie die Verstärkungen der beiden P-Regler durch Vergleich mit den Nennerkoeffizienten der Übertragungsfunktion der Kaskadenregelung (Hausaufgabe).
- c) Simulieren Sie diesen Regler und überprüfen Sie die Einhaltung der Vorgaben. Achten Sie auch auf die Stellgröße.
- d) Implementieren Sie den Regler und testen Sie ihn an der Maschine. (**Filter=0**) **Sollwert:**  $90^\circ$