

Praktikum Regelungstechnik: Regelung eines instabilen Magnetlagers V1.0

Hinweis: Das Praktikum besteht aus mehreren zusammenhängenden Versuchsteilen, die sich über 4 Termine erstrecken. Verschaffen Sie sich bereits vor dem ersten Praktikumstermin einen Überblick über das gesamte Praktikum und bearbeiten Sie vor jedem Praktikumstermin die entsprechende vollständige Versuchsvorbereitung.

Das vollständige Praktikum ist selbstverständlich Prüfungsstoff!

Ergänzende Sicherheitshinweise, die von jedem Studenten zu beachten sind:

- Starkes Magnetfeld: Vorsicht bei medizinischen Geräten, wie z.B. Herzschrittmacher. Armbanduhr, Handy, Scheckkarten und andere empfindliche Geräte müssen in sicherem Abstand vom Magneten aufbewahrt werden.
- Laserstrahl Klasse 2: Nicht in den Strahl blicken, Reflexionen vermeiden.
- Quetschungsgefahr der Finger: Gefahr beim Einbringen der Kugel; Kugel nicht runterfallen lassen.
- Hohe Spannungen bis über 60 V: keine spannungsführenden Leitungen berühren; hohe Ströme bis 5 A: Leitungen nicht trennen, da Gefahr von Lichtbögen.
- Heiße Oberflächen, besonders an der Spule und dem Eisenkern.

1. Regelungsaufgabe

Im Rahmen des Praktikums soll ein vereinfachtes, geregeltes Magnetlager untersucht und in Betrieb genommen werden. Ein ähnliches Lager kommt in der Industrie beispielsweise bei schnell drehenden Spindeln zum Einsatz, wo reibungsfreie Bewegungen gefordert werden. Abbildung 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der zu untersuchenden Anordnung. Primäres Ziel der Regelung des Magnetlagers ist es, den gezeigten ferromagnetischen Schwebekörper (Kugel) trotz externer Störkräfte in einer (ohne Regelung instabilen) Gleichgewichtslage in unmittelbarer Nähe zum Kern eines Elektromagneten festzuhalten. Störkräfte können z.B. durch Luftbewegungen entstehen. Die berührungsfreie Gleichgewichtslage, die durch den Abstand der Kugel zum Magnetkern mit $x(t) = x_0$ definiert werden soll, erlaubt eine reibungsfreie Drehbewegung der Kugel, die technisch in der erwähnten Anwendung ausgenutzt wird. Die Gleichgewichtslage, die auch Arbeitspunkt AP genannt wird, erfordert im Mittel einen Arbeitspunktstrom $i(t) = i_0$, der in der Spule des Elektromagneten fließen muss. Dieser Strom erzeugt eine elektromagnetische Kraft auf die Kugel, die gerade die Gewichtskraft kompensiert.

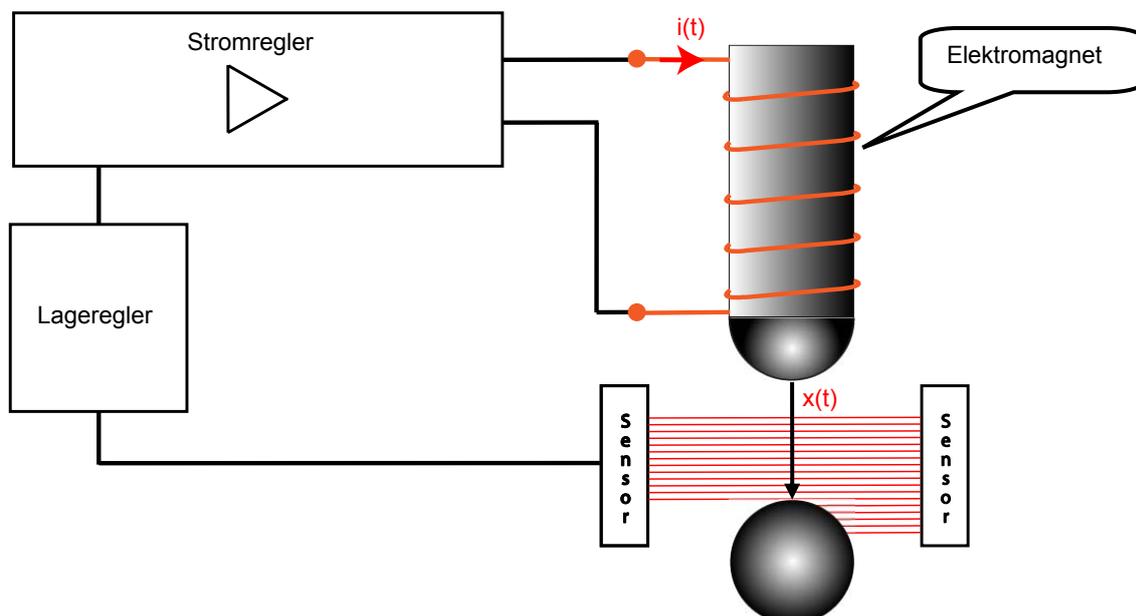


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des geschlossenen Regelkreises einer einfachen, aktiven Magnetlagerung mit einem Freiheitsgrad in vertikaler Richtung

Ein weiteres Ziel der Regelung ist es, kleine Soll-Bewegungen um den Arbeitspunkt in vertikaler Richtung auszuführen. Um Störungen entgegenzuwirken bzw. die erwähnten Sollbewegungen auszuführen, muss die elektromagnetische Kraft auf den Schwebekörper entsprechend schnell zu verändern sein. Die einzige physikalische Eingriffsmöglichkeit ist dabei der Strom des Elektromagneten. Ein einfaches Verändern der Spannung an der Spule reicht für schnelle Stromänderungen nicht aus, da sich die Induktivität der Spule „entgegenstellt“. Daher wird eine Stromregelung mit hoher Dynamik (Bandbreite) benötigt, deren Sollwert von einer übergeordneten Lageregelung vorgegeben wird. Die Lageregelung misst die Kugelposition mit Hilfe eines Lagemesssystems (optischer Positionssensor) und fordert einen höheren Strom in der Spule, falls die Kugel zu weit „unten“ ist und umgekehrt.

Wir berücksichtigen in dieser Anwendung drei vertikale Kräfte, vgl. Abbildung 2, nämlich die nach unten wirkende Gewichtskraft mg (m = Masse des Schwebekörpers, g = Gravitationskonstante), die nach oben wirkende Magnetkraft f_m und eine unbekannte, externe Störkraft f_d (nur vertikale Richtung).

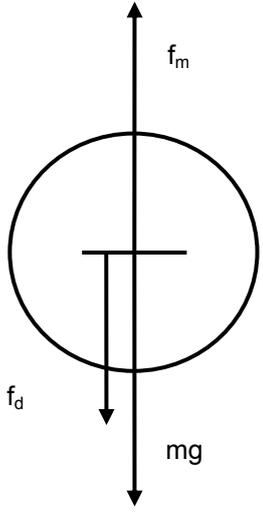


Abbildung 2: Auf die Kugel wirkende Kräfte (Gewichtskraft mg , Magnetkraft f_m und externe Störkraft f_d)

Die Kraft des Elektromagneten ist dabei nichtlinear mit der Position x des Schwebekörpers und dem Strom i im Elektromagneten verknüpft:

$$f_m = f_m(i, x)$$

Der tatsächliche Abstand der Kugel ergibt sich aus der Summe aus AP-Abstand x_0 und Abweichung Δx :

$$x = x_0 + \Delta x$$

Der Magnetstrom i setzt sich neben dem konstanten Arbeitspunktstrom i_0 aus einem variablen Anteil Δi zusammen, der vom Lageregler angefordert und vom Stromregler (hoffentlich) umgesetzt wird. Mit dem Strom Δi lässt sich die Kraft Δf_m erzeugen, durch die z.B. Störkräfte ausgeregelt werden können:

$$i = i_0 + \Delta i$$

In der Abbildung 3 sind die **Kraftkennlinienfelder** des Magnetlagers in Abhängigkeit vom Spulenstrom i bzw. vom Abstand x der Kugel zum Magnetkern dargestellt. Zu sehen sind die bereits bestimmten Messpunkte und die 3D-Fläche der vorgeschlagenen Approximation:

$$f_m(i, x) = k_m \frac{i^2}{x} \text{ mit } k_m = 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{A^2}$$

Beachte, dass die Stromrichtung für die Magnetkraft selbstverständlich keine Rolle spielt (quadratische Abhängigkeit der Kraft vom Strom).

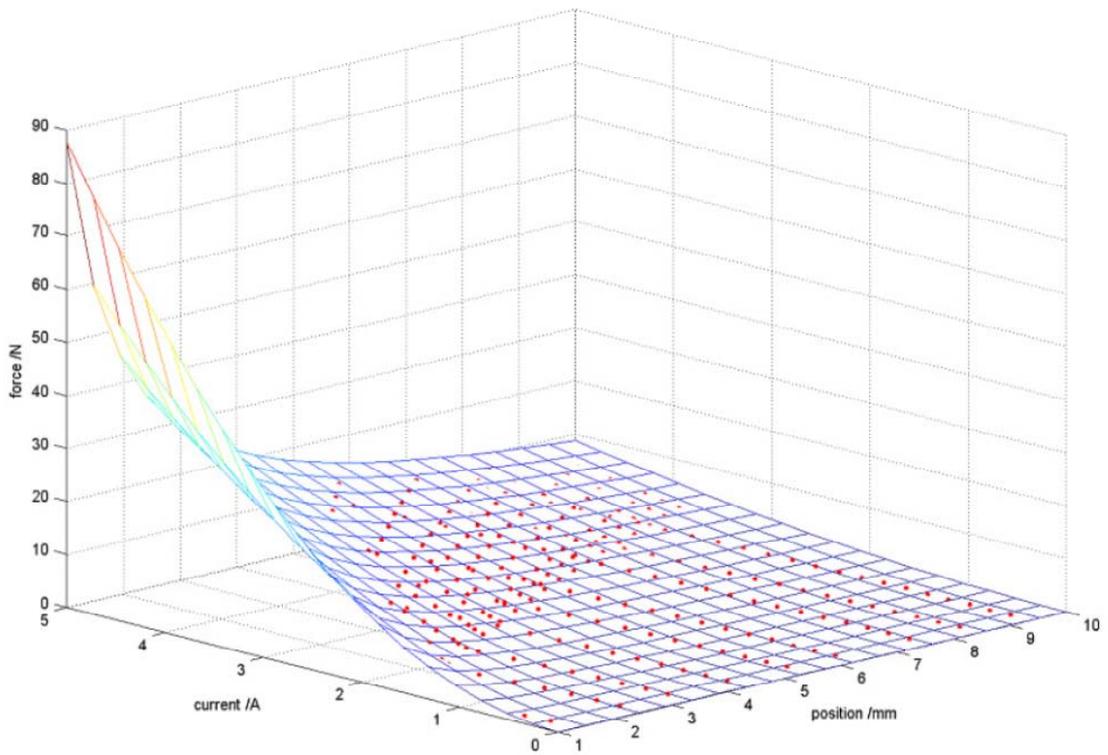
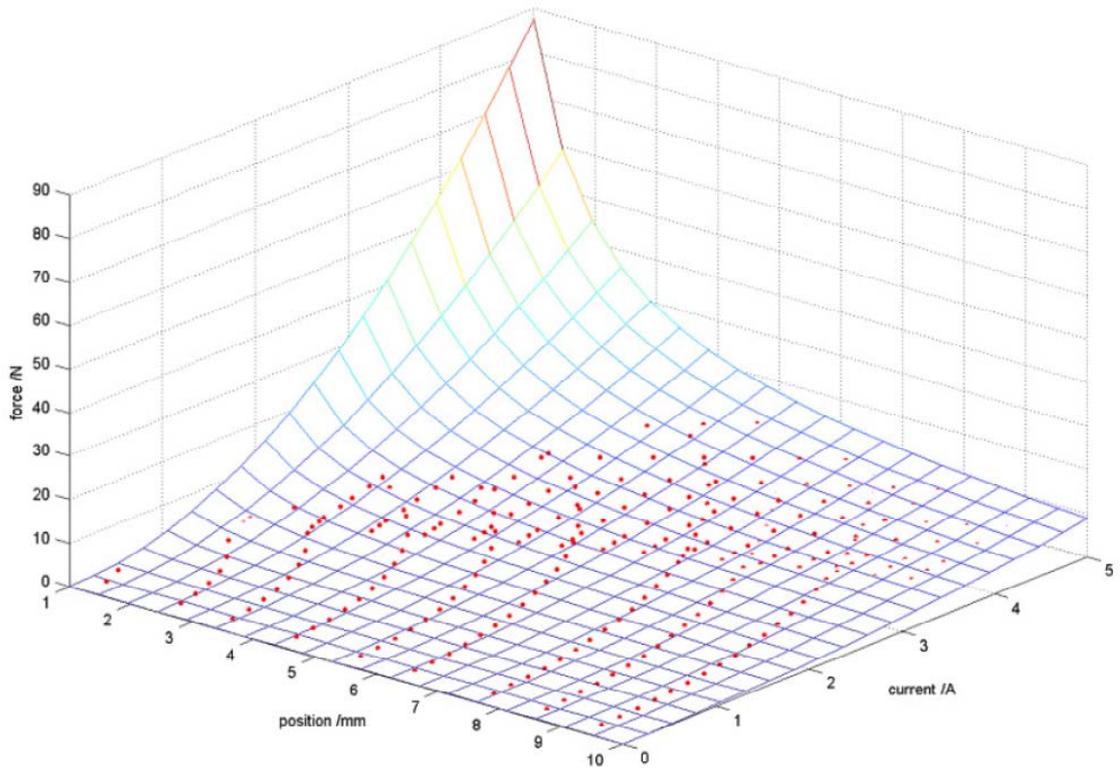


Abbildung 3: Kraftkennlinienfelder des Magnetlagers (rot: Messpunkte, 3D-Fläche: Approximation)

Als Folge des AP-Stroms i_0 und des AP-Abstands x_0 ergibt sich im AP eine Magnetkraft f_{m0} , die gerade die Gewichtskraft mg des Schwebekörpers kompensiert:

$$f_{m0} = f_m(i_0, x_0) = mg$$

Mit Hilfe der approximierten analytischen Beschreibung ist das Magnetlager im Arbeitspunkt zu linearisieren, um einen linearen Regleransatz wählen zu können. Dann resultiert näherungsweise folgender linearer Zusammenhang zwischen der Magnetkraft f_m und dem Strom Δi bzw. der Position Δx (Taylorreihe mit Abbruch nach dem 1. Glied):

$$f_m(i_0 + \Delta i, x_0 + \Delta x) \approx f_m(i_0, x_0) + \underbrace{\left. \frac{\partial f_m}{\partial x} \right|_{x_0, i_0}}_{k_{mx}} \cdot \Delta x + \underbrace{\left. \frac{\partial f_m}{\partial i} \right|_{x_0, i_0}}_{k_{mi}} \cdot \Delta i$$

Daraus folgt:

$$\Delta f_m(\Delta i, \Delta x) \approx k_{mx} \cdot \Delta x + k_{mi} \cdot \Delta i$$

(Linearisierte Kraftformel für den Elektromagneten im Arbeitspunkt)

Dabei verwendet man den sog. Kraft-Strom-Faktor k_{mi} mit der Einheit Newton pro Ampere, und den Kraft-Weg-Faktor k_{mx} mit der physikalischen Dimension einer Steifigkeit, also Newton pro Meter. Natürlich nimmt die Genauigkeit der linearisierten Kraftformel mit zunehmender Abweichung vom Arbeitspunkt ab. Dennoch ist die Beziehung ausreichend genau für die Auslegung des Lagereglers.

Folgende Daten der Anordnung sind gegeben:

- Spule: 1260 Windungen, Nennleistung 80 W (nur zur Information, diese Größen werden nicht weiter benötigt)
- Masse der Kugel: $m = 0,45$ kg
- AP-Position: $x_0 = 5$ mm
- AP-Geschwindigkeit: $v_0 = 0$ (*)
- AP-Beschleunigung: $a_0 = 0$ (*)
- AP-Strom: $|i_0| = 2,5$ A (leicht mit der analytischen Kraftformel zu verifizieren)
- AP-Störkraft: $f_{d0} = 0$
- Spulentemperatur im Arbeitspunkt: $T_0 = 120$ ° Celsius
- Maximal zulässiger Spulenstrom: 5 A
- Maximale Spulenspannung: ca. ± 60 V
- Spulenwiderstand: ca. $R = 6$ Ω (genaue Bestimmung während des Praktikums)
- Spuleninduktivität: ca. $L = 0,3$ H (genaue Bestimmung während des Praktikums)

(*) Anmerkung: Befindet sich die Kugel im Gleichgewicht des AP, dann sind diese Größen der Kugel selbstverständlich jeweils Null.

2. Laboraufbau

In der Abbildung 4 sind der Laboraufbau mit Elektromagnet (Spule) und optisches Lagemesssystem, Fa. Mikro-Epsilon (im Bild „rechts“), Leistungsverstärker mit Stromregelung, Fa. Servowatt (im Bild „schwarzes Gehäuse“), und digitaler Regler (Fa. ABB) mit Steckverbindungen (im Bild „links oben“) zu sehen.

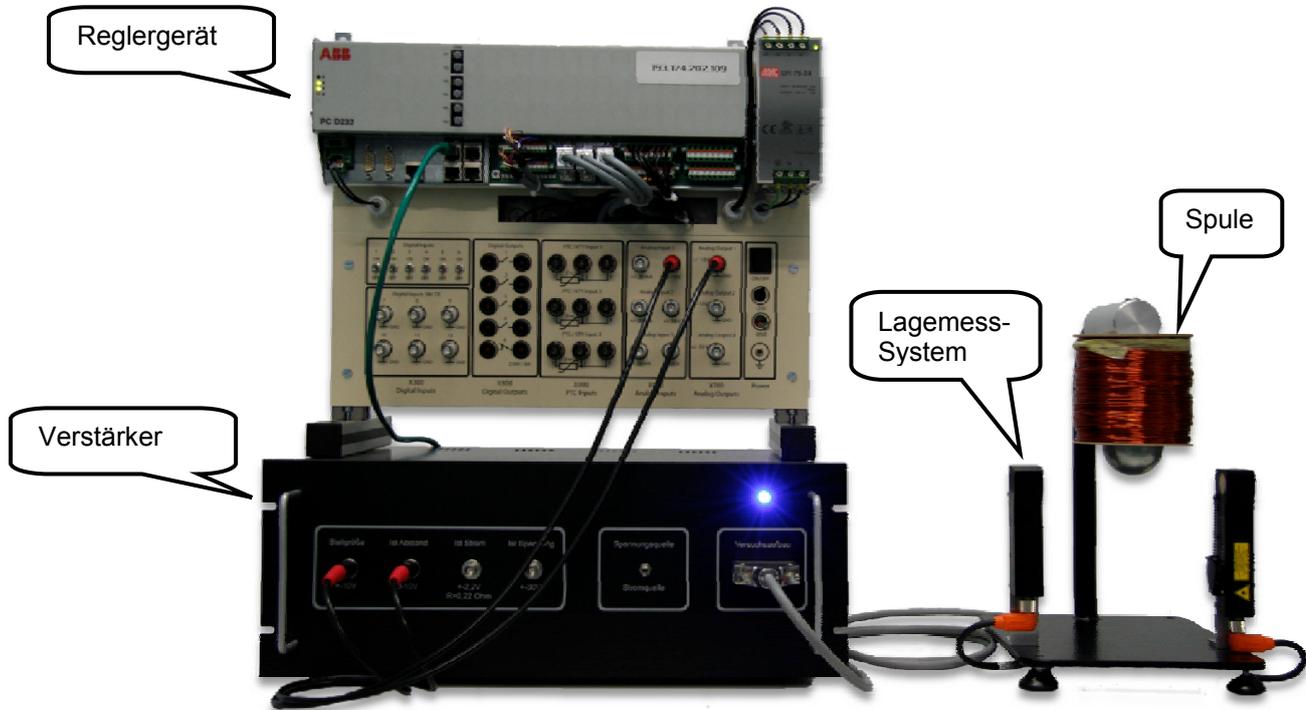


Abbildung 4: Laboraufbau

Der **Lageregler** wird digital im sog. PEC-Gerät (**P**ower **E**lectronics **C**ontroller) der Fa. ABB realisiert. Der unterlagerte **Stromregler** basiert auf einer analogen Operationsverstärkerschaltung. Für die Bereitstellung der benötigten hohen Leistung wird ein Leistungs-OP verwendet, der wie jeder andere OP beschaltet werden kann.

Die Daten des Verstärkers und des Lagemesssystems sind den jeweiligen Datenblättern zu entnehmen, die am Versuchsstand zur Verfügung stehen. Es wird erwartet, dass bei Versuchsbeginn die Unterlagen gesichtet werden.

Achtung: Das Lagemesssystem muss erst eine Dauer von ca. 30 Minuten auf Betriebstemperatur gebracht werden, damit die Messung linear und rauscharm durchgeführt werden kann. Der Positionssensor kann aber auch unmittelbar nach dem Einschalten verwendet werden, falls keine sehr hohe Genauigkeit benötigt wird. Dies ist normalerweise hier immer der Fall.

Spezifikation der Schnittstellensignale

Angaben zum Verstärker (OP-Schaltung) und zum Lage-Reglergerät:

| Baugruppe | Nr. | Beschreibung | Wert | Einheit |
|-----------------------------|-----|---|-------------|---------|
| Power Operational Amplifier | 1 | Position: Messsignal (Ist-Abstand) | 0 - 10 | V |
| | 2 | Control Signal: Stellgröße | ± 10 | V |
| | 3 | Output Current: Ist-Strom (Shunt $R_S = 0,22\Omega$) | max. 1,1 | V |
| | 4 | Output Voltage: Ist-Spannung am OP-Ausgang | ± 30 * | V |
| Reglergerät | 5 | Analog Input 1 (externer Sollwert) | ± 10 | V |
| | 6 | Analog Input 2 (Lage-Istwert) | ± 10 | V |
| | 7 | Analog Input 3 (wird nicht benötigt) | ± 10 | V |
| | 8 | Analog Output 1 (Stellgröße: Stromsollwert) | ± 10 | V |
| | 9 | Analog Output 2 (frei verwendbar) | ± 10 ** | V |
| | 10 | Analog Output 3 (frei verwendbar) | ± 10 ** | V |

* Die maximale Ausgangsspannung des Operationsverstärkers beträgt ± 60 V. Bei der Messung der OP-Ausgangsspannung ist ein interner Spannungsteiler zu berücksichtigen. 60 V tatsächliche Verstärkerspannung entsprechen nur 30 V an der Buchse.

** Zur Anzeige interner Reglergrößen auf dem bereitstehenden Oszilloskop

Hinweise:

- Der Verstärker wird mit 230 V Netzspannung versorgt.
- Der Verstärker kann in 2 Betriebsweisen verwendet werden:
 - (1) als Stromregler
 - (2) als Spannungsverstärker

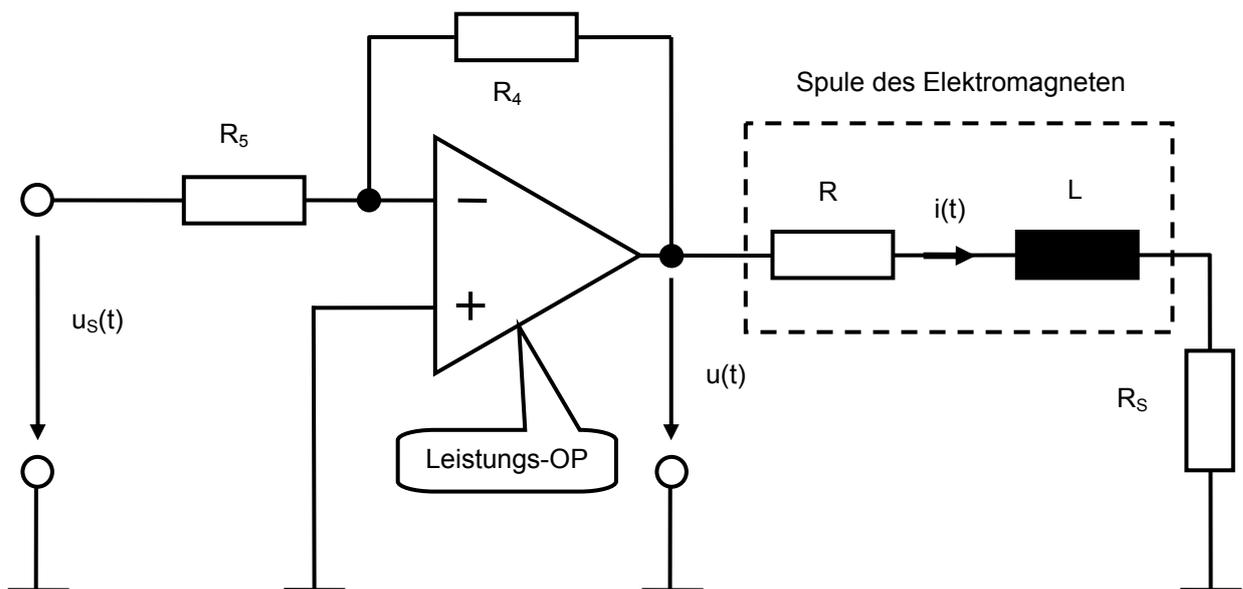
Je nach Aufgabenstellung wird eine bestimmte Betriebsweise benötigt. Einzelheiten finden Sie in der jeweiligen Versuchsbeschreibung.

1. Versuchstag: Modellbildung und Identifikation

Für die Regelung des Magnetlagers wird ein Modell der Regelstrecke benötigt. Die grundsätzliche Modellierung lässt sich leicht durch die das Lager beschreibenden physikalischen Gleichungen finden. Hier werden nur wenige, sehr einfache Gesetze der Physik benötigt. Die Parameter der physikalischen Gesetze (z.B. Spulenwiderstand) sind experimentell zu ermitteln.

Beachte: Grundsätzlich wird nur das eindimensionale Bewegungsverhalten der Kugel in vertikaler Richtung berücksichtigt.

Hinweis: Als Versuchsaufbau für die experimentelle Parameterbestimmung der Spule steht Ihnen zunächst ein Leistungs-Spannungsverstärker in folgender Beschaltung zur Verfügung:



Dazu wird der Leistungs-OP durch entsprechende Beschaltung mit Steckbrücken als invertierender Spannungsverstärker konfiguriert – die Betreuer unterstützen Sie hierbei.

Die Parameter der Bauelemente sind:

$$R_5 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_S = 0,22 \text{ }\Omega \text{ (Mess-Shunt)}$$

Der Spannungsabfall an R_S kann zur Bestimmung des elektrischen Stroms in der Spule verwendet werden. Dazu dient eine entsprechende BNC-Buchse am Versuchsaufbau. Ebenso kann die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers an einer BNC-Buchse am Versuchsaufbau abgegriffen werden.

Beachte: Bei der Messung der OP-Ausgangsspannung ist ein Spannungsteiler zu berücksichtigen, der die tatsächliche Ausgangsspannung um den Faktor 2 teilt.

Versuchsvorbereitung:

(Aufwand: ca. 8 handgeschriebene Seiten)

| | |
|-------|---|
| V1.1 | <p>Stellen Sie die Differentialgleichung (DGL) der Spule incl. Shuntwiderstand mit der Spannung $u(t)$ als Eingang und dem Spulenstrom $i(t)$ als Ausgang auf.</p> <p>Hinweis: Berücksichtigen Sie nur die Widerstände R und R_S und die Induktivität L der Spule. Die Spule kann als <u>lineares System 1. Ordnung</u> betrachtet werden. Die Einflüsse der Kugel, der Temperatur und der Eisensättigung auf den Widerstand bzw. die Induktivität der Spule sind vernachlässigbar.</p> |
| V1.2 | <p>Berechnen Sie die Übertragungsfunktion $\frac{I(s)}{U(s)}$ direkt aus der DGL und bestimmen Sie deren Polstelle. Liegt ein stabiles System vor? Existiert der Frequenzgang $\frac{I(\omega)}{U(\omega)}$ und wie lautet dieser gegebenenfalls?</p> |
| V1.3 | <p>Berechnen Sie nun die Übertragungsfunktion $\frac{I(s)}{U(s)}$, indem Sie die Widerstände und die Induktivität im Laplace-Bereich beschreiben.</p> |
| V1.4 | <p>Nun soll bei zunächst energiefreier Spule (verschwindende Anfangswerte) eine konstante Eingangsgleichspannung der Höhe $A = 1$ [Volt] zum Zeitpunkt $t = 0$ [sec] „plötzlich“ (sprungförmig) zugeschaltet werden. <u>Berechnen und zeichnen</u> Sie in sauberer Art und Weise (Handzeichnung) den Ausgangsstrom der Spule (nennt man dann Sprungantwort) mittels inverser Laplace-Transformation. Wie lauten <u>Anfangs- bzw. Endwert</u> der Sprungantwort (für $t = 0$ [sec] bzw. $t \rightarrow \infty$). Berechnen Sie auch die <u>Anfangssteigung</u> der Sprungantwort (für $t = 0$ [sec]). Verwenden Sie die Zahlenwerte der Versuchsanleitung und verwenden Sie folgende Abkürzungen, um Schreibaufwand zu sparen: $V = 1/(R+R_S)$ und $T = L/(R+R_S)$.</p> |
| V1.5 | <p>Die Zeitkonstante der Anordnung ist mit $L/(R+R_S)$ definiert. Welcher prozentuale Ausgangsstrom (bezogen auf den Endwert) wird bei der Sprungantwort nach einer Zeitkonstante erreicht? Berechnen Sie diesen aus der Sprungantwort.</p> |
| V1.6 | <p>Welchen statischen Verstärkungsfaktor besitzt die Anordnung für Gleichspannung am Eingang?</p> |
| V1.7 | <p>Berechnen und zeichnen Sie in sauberer Art und Weise (Handzeichnung) den Amplituden und Phasengang des Systems über der Kreisfrequenz ω in ein Diagramm mit linearem Maßstab. Verwenden Sie die Zahlenwerte der Versuchsanleitung. Wählen Sie 11 gleichmäßig verteilte Werte für ω zwischen 0 und 100 [rad/sec].</p> |
| V1.8 | <p>Nun sei die Spulenspannung gegeben durch $u = u_0 + \Delta u$ und der Spulenstrom $i = i_0 + \Delta i$. Wie lautet die Übertragungsfunktion $\frac{\Delta I(s)}{\Delta U(s)}$?</p> <p>Hinweis: Beachten Sie, dass gilt: $u_0 = (R+R_S)i_0$. Beginnen Sie zunächst mit der DGL aus V1.1 und setzen Sie dort die Angaben aus V1.8 ein. Transformieren Sie dann das Ergebnis in den Bildbereich (Laplace-Bereich).</p> <p>Wie ändert sich die in V1.2 gefundene Übertragungsfunktion?</p> |
| V1.9 | <p>Berechnen Sie den Kraft-Strom-Faktor k_{mi} und den Kraft-Weg-Faktor k_{mx} mit Hilfe der analytischen Kraftformel mit der Annahme, dass gilt: $i_0 = -2.5$ A (Merken!!!).</p> <p>Bestimmen Sie dazu die Ableitungen entsprechend dieser Anleitung und werten Sie diese am Arbeitspunkt aus.</p> |
| V1.10 | <p>Berechnen Sie die (vertikale) Beschleunigung $a = \Delta a$ (AP-Beschleunigung $a_0 = 0$) der Kugel.</p> <p>Hinweis: Es wirken die Magnetkraft f_m, die Gewichtskraft mg und die Störkraft $f_d = \Delta f_d$ (AP-Störkraft $f_{d0} = 0$). Verwenden Sie die bereits linearisierte Magnetkraft. Im zu bestimmenden Zusammenhang sollen nur Delta (Δ)-Größen vorkommen.</p> |

| | |
|-------|---|
| V1.11 | <p>Berechnen Sie die (vertikale) Geschwindigkeit $v = \Delta v$ (AP-Geschwindigkeit $v_0 = 0$) der Kugel mit Hilfe der Beschleunigung Δa. Stellen Sie dazu die Gleichung im Zeitbereich auf.</p> <p>Hinweis: Verwenden Sie die aus der Physik bekannte Integralbeziehung. Beginnen Sie die Betrachtung bei $t = 0$. Ein Anfangswert der Geschwindigkeit $\Delta v(t = 0)$ ist nicht zu berücksichtigen. Im zu bestimmenden Zusammenhang sollen nur Delta (Δ)-Größen vorkommen.</p> |
| V1.12 | <p>Berechnen Sie die (vertikale) Position Δx der Kugel mit Hilfe der Geschwindigkeit Δv. Stellen Sie dazu die Gleichung im Zeitbereich auf.</p> <p>Hinweis: Verwenden Sie die aus der Physik bekannte Integralbeziehung. Beginnen Sie die Betrachtung bei $t = 0$. Der Anfangswert der Position ist nicht zu berücksichtigen, d.h. $\Delta x(t = 0) = 0$. Im zu bestimmenden Zusammenhang sollen nur Delta (Δ)-Größen vorkommen.</p> |
| V1.13 | <p>Erstellen Sie das um den Arbeitspunkt linearisierte Blockschaltbild des unregelten Magnetlagers (Regelstrecke) im <u>Laplace-Bereich</u>.</p> <p>Hinweis: Verwenden Sie folgende Delta-Größen (Signale) im Blockschaltbild, die die Abweichung vom Arbeitspunkt markieren:</p> <p>Δu (Eingangsspannung Spule) bzw. $\Delta U(s)$ Δi (Strom in der Spule) bzw. $\Delta I(s)$ Δf_d (Störkraft) bzw. $\Delta F_d(s)$ Δa (Kugel-Beschleunigung) bzw. $\Delta A(s)$ Δv (Kugel-Geschwindigkeit) bzw. $\Delta V(s)$ Δx (Kugelposition) bzw. $\Delta X(s)$</p> <p>Eingangsgroßen des Blockschaltbildes sind die Spulenspannung $\Delta U(s)$ und die Störkraft $\Delta F_d(s)$. Die Ausgangsgröße ist die Position $\Delta X(s)$ der Kugel. Anfangswerte sind nicht zu berücksichtigen.</p> <p>Weiterer Hinweis: Eine Integration im Zeitbereich entspricht im Laplacebereich der Multiplikation mit „$1/s$“.</p> |
| V1.14 | <p>Wie lautet die Übertragungsfunktion $\frac{\Delta X(s)}{\Delta U(s)}$ der Regelstrecke (Annahme: $\Delta f_d(t) = 0$). Berechnen Sie diese aus dem Blockschaltbild nach V1.13.</p> <p>Prüfen Sie dann die Stabilität der Regelstrecke. Berechnen Sie hierfür zunächst die Lage der Polstellen der Übertragungsfunktion.</p> |

Versuchsdurchführung:

Bevor einzelne Messungen/Arbeiten konkret am Versuchsaufbau ausgeführt werden, sind diese mit den Betreuern aus Sicherheitsgründen zu besprechen. Auch bei sonstigen Fragen stehen Ihnen die Betreuer gerne zur Seite.

| | |
|------|---|
| P1.1 | <p>Führen Sie mit dem vorhandenen Spannungsverstärker eine Sprungantwort der Spule durch. Verwenden Sie dazu ein geeignetes periodisches Rechtecksignal und messen Sie den Strom in der Spule mit Hilfe des vorhandenen Oszilloskops. Bestimmen Sie daraus die Zeitkonstante T des Systems, den Spulenwiderstand R und die Induktivität L der Spule, indem Sie 2 verschiedene Varianten ausprobieren:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Prozent-Methode entsprechend der Versuchsvorbereitung2. Steigung der Ursprungtangente entsprechend der Versuchsvorbereitung <p>Welche der beiden Methoden halten Sie für genauer? Begründen Sie Ihre Antwort.</p> <p>Hinweis: Für die spätere Reglerauslegung ist es ausreichend genau, die Messung bei Raumtemperatur der Spule durchzuführen. Genau genommen müsste man die Messung bei Arbeitpunktemperatur durchführen. Berücksichtigen Sie bei der Widerstandsbestimmung der Spule auch den Shuntwiderstand der Anordnung.</p> |
| P1.2 | <p>Nehmen Sie den Frequenzgang des Systems mit dem Spannungsverstärker punktweise auf. Dazu sind die Spulenspannung und der Spulenstrom mit Hilfe des Oszilloskops aufzuzeichnen.</p> <p>Messen Sie den Frequenzgang bei folgenden Kreisfrequenzen:</p> <p>$\omega = 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000$ [rad/sec]</p> <p>Schätzen Sie mit Hilfe der komplexen Wechselstromrechnung und dem Amplitudengang für jede Frequenz die Induktivität ab.</p> <p>Fertigen Sie durch Handzeichnung ein Bodediagramm des Frequenzgangs an und interpretieren Sie dieses.</p> |
| P1.3 | <p>Eine alternative Darstellung des Frequenzgangs ist mit Hilfe der Ortskurve möglich. Zeichnen Sie die Ortskurve. Diskutieren Sie Vor- und Nachteile dieser im Vergleich zum Bodediagramm unterschiedlichen Darstellungsweise.</p> |
| P1.4 | <p>Legen Sie fest, welche Werte für R und L in den weiteren Versuchsteilen verwendet werden sollen und begründen Sie Ihre Festlegung.</p> <p>Hinweis: Die Werte für R und L werden später für die Auslegung einer Stromregelung benötigt. Die Stromregelung ist sehr robust, d.h. man benötigt keine genauen Streckenparameter. Die Stromregelung besitzt eine Eigenkreisfrequenz von $\omega_0 = 1000$ [rad/sec]. Man kann nachweisen, dass man im Bereich dieser Frequenz ein möglichst gutes Modell der Strecke benötigt.</p> |

Dokumentation: Erstellen Sie pro Gruppe einen vollständigen und individuellen Praktikumsbericht, der alle obigen Punkte der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung beinhaltet.

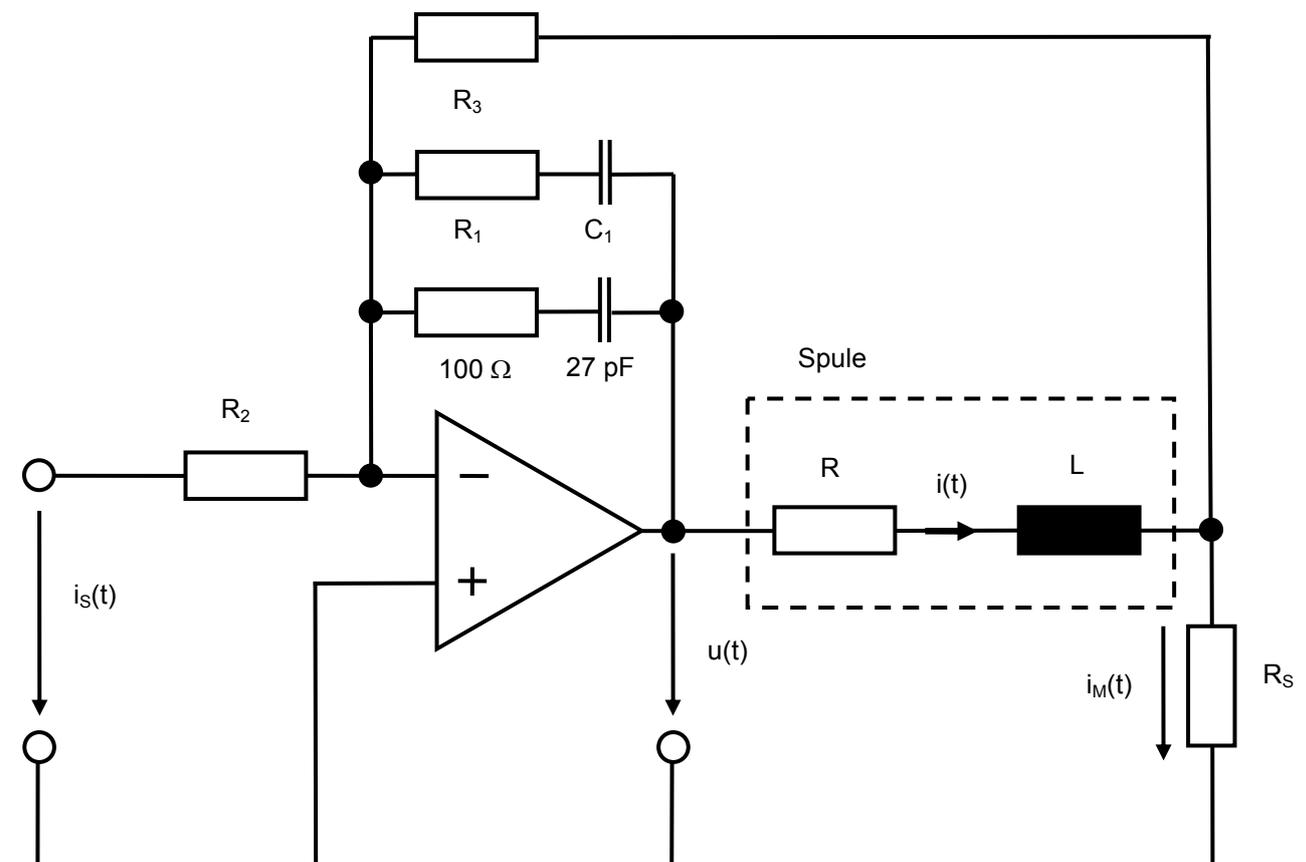
2. Versuchstag: Aufbau und Auslegung des zu realisierenden Stromreglers mit Leistungs-OPV

Um die Kugel tatsächlich stabil im Arbeitspunkt zu halten bzw. eine „dynamische“ Wunschbewegung der Kugel „einzuprägen“, benötigt man eine Möglichkeit, die Kraft, die auf die Kugel wirkt, möglichst rasch zu ändern. Die einzige physikalische Eingriffsmöglichkeit, um die Kraft zu beeinflussen, ist der elektrische Strom im Elektromagneten. Der bereits beschriebene invertierende Spannungsverstärker bietet jedoch nur die Möglichkeit, seine Ausgangsspannung, und damit die Spannung an der Spule zu verändern. Aufgrund der großen Zeitkonstante der Spule wird sich der Strom bei einer Spannungsänderung nur sehr langsam beeinflussen lassen. Allerdings besteht die Möglichkeit, durch eine entsprechende Beschaltung des Operationsverstärkers, eine PI-Stromregelung aufzubauen, die uns in die Lage versetzt, den Strom in der Spule mit einer ausreichend hohen Dynamik zu verändern.

Für diese PI-Stromregelung ist die im Folgenden gezeigte Schaltung geeignet und bereits implementiert. Allerdings ist die Parametrierung der Schaltung noch nicht erfolgt und während des Praktikums vorzunehmen.

Hinweis: Die Schaltung besitzt implizit einen Soll-Ist-Vergleich und den PI-Regler. Die Spannung $i_s(t)$ kann dabei als Stromsollwert betrachtet werden, mit der der Strom $i(t)$ in der Spule in gewünschter Weise beeinflusst werden kann. Der Shuntwiderstand R_s bildet die Messeinrichtung und das Messsignal wird über den Widerstand R_3 zurückgekoppelt.

Hinweis: Der $100\ \Omega$ -Widerstand und der Kondensator mit der Kapazität von $27\ \text{pF}$ werden lediglich zur Vermeidung von hochfrequenten Schwingungen benötigt und können zur Berechnung der Stromregelung einfach weggelassen werden, da ihr Einfluss auf die Regelungsaufgabe vernachlässigbar ist:



Da, wie bereits ausgeführt, die Stromrichtung keine Rolle spielt, beschränken wir uns hier, ohne weitere Auswirkungen, auf nichtnegative Stromsollwerte $i_s(t) = i_{s0}(t) + \Delta i_s(t)$, mit dem Arbeitspunktsollstrom $i_{s0}(t)$ und dem variablen Anteil $\Delta i_s(t)$. **Beachte:** Der Arbeitspunktstrom wird mit Hilfe des Stromsollwertes in der Anlage eingestellt.

Der Widerstand R_S ist wieder ein Shunt-Widerstand, der für die Schaltung zwingend notwendig ist und mit dessen Spannungsabfall der Strom durch die Spule bestimmt werden kann (herausgeführt auf eine BNC-Buchse des Verstärkers):

$$R_S = 0,22 \Omega$$

Der Kondensator C_3 ist bereits fest vorgeben und implementiert. Sein Wert beträgt:

$$C_1 = 330 \text{ pF}$$

Die Spulenparameter R und L sind aus dem 1. Versuchstag bereits bekannt.

Es lässt sich zeigen, dass mit der vorgeschlagenen Schaltung grundsätzlich folgende Wunsch-Übertragungsfunktion zwischen Eingangsspannung i_S (Sollstrom) und Spulenstrom i erreicht werden kann (bei Vernachlässigung der Bauelemente zur Schwingungsunterdrückung):

$$H_{Wunsch}(s) = \frac{I(s)}{I_s(s)} = H_0 \cdot \frac{\frac{1}{\alpha\omega_0} s + 1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + s \frac{2D}{\omega_0} + 1}$$

Dabei ist H_0 die statische Verstärkung der Schaltung. Mit D und ω_0 lassen sich die Polstellen der Übertragungsfunktion beeinflussen. Wir sind an einer Stromregelung mit komplexen Polstellen interessiert. Für komplexe Polstellen muss $D < 1$ gelten. α beeinflusst die sogenannte Nullstelle der Übertragungsfunktion, deren Wirkung noch untersucht werden soll.

Für die vorliegende Aufgabe sind folgende Parameter zu erzielen:

$$H_0 = -0,5 \text{ A/V (Achtung: negatives Vorzeichen wegen des invertierenden Betriebs des Stromreglers} \rightarrow i_{so}(t) = +5 \text{ V)}$$

$$D = 0,7 \text{ (Dämpfungskonstante; ergibt komplexe Polstellen mit relativ starker Dämpfung)}$$

$$\omega_0 = 1000 \text{ 1/sec (Kennkreisfrequenz Nennerpolynom)}$$

Zur Interpretation der Übertragungsfunktion ist es sinnvoll, diese in folgende, gleichwertige Form umzuwandeln:

$$H_{Wunsch}(s) = H_0 \cdot \left(\frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + s \frac{2D}{\omega_0} + 1} + s \cdot \frac{1}{\alpha\omega_0} \cdot \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + s \frac{2D}{\omega_0} + 1} \right)$$

Mit Einführung der Abkürzung

$$H(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + s \frac{2D}{\omega_0} + 1} \text{ folgt nun}$$

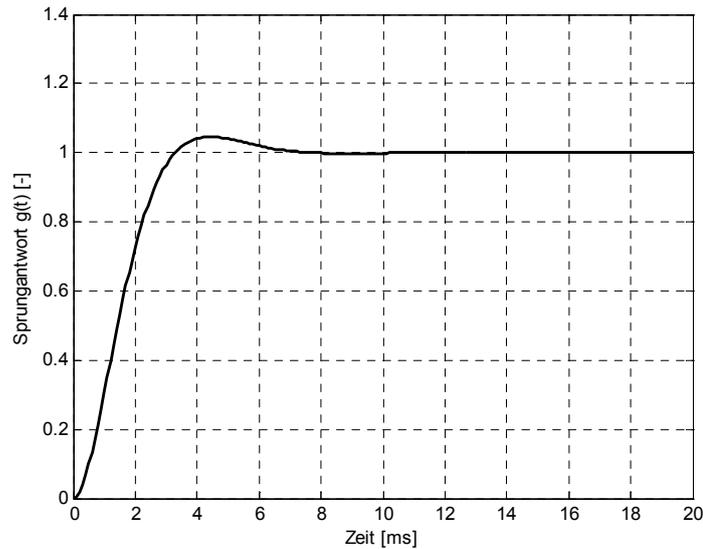
Beachte:
Multiplikation mit „s“!

$$H_{Wunsch}(s) = H_0 \cdot \left(H(s) + s \cdot \frac{1}{\alpha\omega_0} \cdot H(s) \right)$$

Die Sprungantwort von $H(s)$ kann leicht mit Hilfe einer Transformationstabelle bestimmt werden. Sie lautet

$$g(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-D^2}} e^{-D\omega_0 t} \sin\left(\omega_0 \sqrt{1-D^2} t + \arccos(D)\right), \text{ falls } D < 1, \text{ und ist in nachfolgender Abbildung für die}$$

angegebenen Werte von D und ω_0 gezeigt:

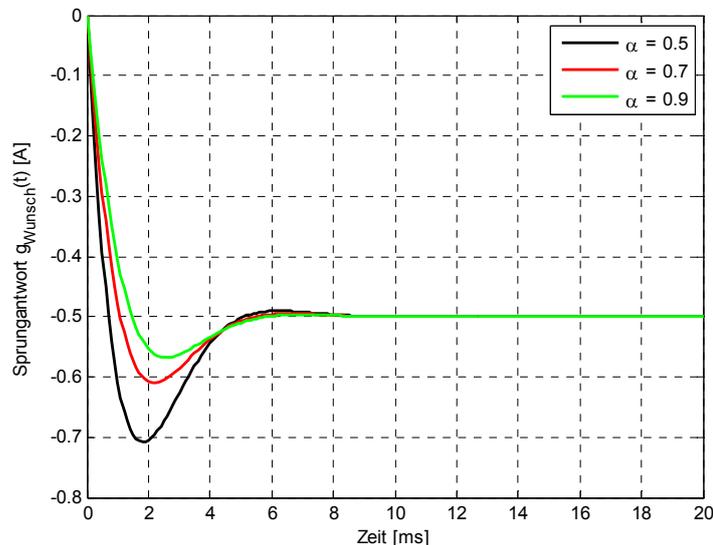


Aufgrund der komplexen Polstellen schwingt die Sprungantwort erwartungsgemäß leicht über.

Wir wissen bereits, dass die in der Übertragungsfunktion von H_{Wunsch} angegebene Multiplikation mit dem Laplaceoperator „s“ im Zeitbereich einer Ableitung entspricht. Die Sprungantwort von H_{Wunsch} ergibt sich dann also durch

$$g_{Wunsch}(t) = H_0 \cdot \left(g(t) + \frac{1}{\alpha \omega_0} \cdot \frac{d g(t)}{dt} \right) \text{ und ist in nachfolgender Abbildung für die angegebenen Werte von } H_0, D \text{ und}$$

ω_0 und verschiedene Werte für α gezeigt:



Abhängig von α wird also das Überschwingen der Stromregelung beeinflusst. Dies ist leicht nachzuvollziehen, wenn man die Formel für $g_{Wunsch}(t)$ betrachtet. Je kleiner α , desto größer ist die Wirkung der Ableitung und umso größer ist die Überschwingungsamplitude.

Für das Praktikum sind nun die gewünschten Werte H_0 , D und ω_0 der Übertragungsfunktion H_{Wunsch} durch geeignete Wahl der freien Widerstände R_1 , R_2 und R_3 festzulegen. Dazu ist zunächst die Übertragungsfunktion der realen Schaltung mit den Bauelementparametern aufzustellen und dann ein Koeffizientenvergleich mit dem Nenner der Wunschübertragungsfunktion H_{Wunsch} durchzuführen. Die noch verbleibende Größe α kann mit den Widerständen der Schaltung nicht festgelegt werden, sondern ergibt sich indirekt bei dem durchzuführenden Koeffizientenvergleich und ist dann einfach zu akzeptieren.

Anmerkungen zu dem verwendeten Programmpaket: Für die Versuchsdurchführung wird das in der Industrie weit verbreitete Rechnerwerkzeug MATLAB (Fa. Mathworks) verwendet. Es ist wie viele moderne Rechnerwerkzeuge matrixbasiert (Matlab ist Abkürzung für „matrix laboratory“). Für Anwendungen in der Regelungstechnik steht die Erweiterung „Control System Toolbox“ zur Verfügung. Innerhalb von Matlab können mit dem Paket SIMULINK auch regelungstechnische Blockschaltbilder in graphischer Form äußerst komfortabel simuliert werden.

Ziel dieses Praktikums ist auch das Erlernen einiger wichtiger Befehle in Matlab und der Control System Toolbox“. Sie sollten nach dem Praktikum in der Lage sein, einfache mathematische Berechnungen in Matlab durchzuführen, Funktionen zu plotten und Matlab-Programme zu entwerfen, insbesondere natürlich im Bereich der Regelungstechnik. Ebenso sollten Sie die wichtigsten Bibliotheks-Blöcke in Simulink kennen und fähig sein, eine einfache Simulation in Simulink aufzubauen.

Kleine Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit Matlab sind Prüfungsstoff. Verwenden Sie in Zukunft eigenständig das Programmpaket insbesondere zur Prüfungsvorbereitung. Die Theorie der Vorlesung kann damit hervorragend verinnerlicht und vertieft werden. Es ist empfehlenswert, die Studentenversion für den eigenen Rechner zu kaufen. Alternativ können Sie natürlich gerne die Hochschulrechner benutzen, auf denen Matlab gestartet werden kann. Bitte wenden Sie sich an die Betreuer, falls Sie diesbzgl. Fragen haben.

Versuchsvorbereitung:

(Aufwand: ca. 3 handgeschriebene Seiten)

| | |
|------|---|
| V2.1 | Lesen Sie sich die im Vorlesungsskript enthaltene Beschreibung zum Programmpaket Matlab/Simulink vollständig und sorgfältig durch. |
| V2.2 | Stellen Sie die Übertragungsfunktion $\frac{I(s)}{I_S(s)}$ der Operationsverstärkerschaltung allgemein in Abhängigkeit aller Bauelementparameter auf. Der OP kann dabei als ideal angenommen werden. Wenden Sie die Kirchhoff'schen Knoten- und Maschenregeln sinnvoll an. Die Bauelemente zur Schwingungsunterdrückung sind nicht zu berücksichtigen. Zur Überprüfung Ihres Ergebnisses ist die Lösung im Folgenden angegeben: $\frac{I(s)}{I_S(s)} = -\frac{R_3 + R_S}{R_2 R_S} \cdot \frac{sR_1 C_1 + 1}{s^2 LC_1 \left(\frac{R_3}{R_S} + 1 \right) + sC_1 \left(\frac{RR_3}{R_S} + R + R_3 + R_1 \right) + 1}$ |
| V2.3 | Berechnen Sie allgemein und zahlenmäßig die Widerstände R_1 , R_2 und R_3 durch Koeffizientenvergleich der Übertragungsfunktion nach V2.2 mit dem Wunschpolynom $H_{Wunsch}(s)$. Hinweis: Verwenden Sie die Zahlenwerte für die experimentell ermittelten Spulenparameter R und L des ersten Versuchstages und die in V2.2 angegebene Lösung für die Übertragungsfunktion der Schaltung. |
| V2.4 | Bestimmen Sie allgemein und zahlenmäßig die Größe α durch Koeffizientenvergleich der Übertragungsfunktion nach V2.2 mit dem Wunschpolynom $H_{Wunsch}(s)$. Welchen Einfluss von α erwarten Sie bzgl. des Überschwingens der Sprungantwort der Stromregelung? |

Versuchsdurchführung:

Verwenden Sie die Matlab-Version 2009b für alle zukünftigen Simulationen und auch zum Implementieren.

Speichern Sie alle Dateien für Dokumentationszwecke auf einem geeigneten Datenträger ab.

| | |
|------|--|
| P2.1 | Simulieren Sie zunächst mit Hilfe von Matlab/Simulink die Sprungantwort des Spulenmodells und vergleichen Sie diese mit der gemessenen Sprungantwort des 1. Versuchstages. Die Simulation soll anhand einer geeigneten Übertragungsfunktion in Simulink erfolgen. |
| P2.2 | Simulieren Sie in Simulink die Sprungantwort der Wunschübertragungsfunktion $H_{\text{Wunsch}}(s)$. Vergleichen Sie das Ergebnis mit P2.1. Welcher Vorteil ergibt sich? |
| P2.3 | Simulieren Sie die Sprungantwort der Operationsverstärker-Schaltung mit PLECS (Programmerweiterung zur Simulation von Schaltungen) innerhalb von Matlab/Simulink und vergleichen Sie die Ergebnisse mit P2.2 der Versuchsdurchführung. Protokollieren Sie auch die Spulenspannung bei der Sprungantwort. Achten Sie darauf, dass die OP-Ausgangsspannung nicht in die Begrenzung geht. Welchen „Preis“ bezahlt man für die schnelle Stromänderung? <u>Hinweis:</u> Berücksichtigen Sie zunächst nicht die Bauelemente zur Schwingungsunterdrückung (die Simulation der Schaltung zeigt dennoch keine Schwingungsanfälligkeit, ganz im Gegensatz zur realen Schaltung). |
| P2.4 | Prüfen Sie nun simulativ, ob ein Vernachlässigen der Bauelemente zur Schwingungsunterdrückung bei der Auslegung der Schaltung tatsächlich zulässig war. |
| P2.5 | Parametrieren Sie nun die reale Schaltung am Versuchsaufbau und nehmen Sie experimentell eine Sprungantwort auf. Beobachten Sie sowohl die transienten Vorgänge wie auch das stationäre Verhalten. Protokollieren Sie auch die Verstärkerausgangsspannung. <u>Hinweis:</u> Achten Sie darauf, dass die Verstärkerausgangsspannung während der transienten Vorgänge nicht in die Begrenzung geht. |
| P2.6 | Die Spule wurde - <u>so einfach wie möglich</u> - als System 1. Ordnung modelliert. Der Operationsverstärker wurde bzgl. seines Zeitverhaltens sogar als ideal angenommen. Vergleichen Sie die experimentelle Sprungantwort mit der simulierten Sprungantwort innerhalb von PLECS und finden Sie mögliche Ursachen für Abweichungen. Halten Sie eine genauere Modellierung des realen Systems (Spule und Operationsverstärker) für erforderlich? |

Dokumentation: Erstellen Sie pro Gruppe einen vollständigen und individuellen Praktikumsbericht, der alle obigen Punkte der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung beinhaltet.

3. Versuchstag: Digitale PD-Lageregelung

Um die Kugel im Arbeitspunkt zu stabilisieren, benötigen wir eine der Stromregelung übergeordnete Lageregelung (Positionsregelung). Solche Regelkreise mit innerer und äußerer Regelschleife heißen **Kaskadenregelungen** und sind weit verbreitet in der Industrie. Für die Auslegung und Parametrierung der Lageregelung gehen wir davon aus, dass der unterlagerte Stromregler nahezu ideal schnell arbeitet und keine Begrenzungseffekte auftreten. Wir werden später sehen, dass diese Vereinfachung zulässig ist. Der Betrag der statischen Verstärkung der Stromregelung ist allerdings selbstverständlich zu berücksichtigen (Beachte, dass das Stromvorzeichen für die Kraftbildung keine Rolle spielt).

Auch die Positionsmessung wird als ideal angenommen. Tatsächlich ist deren Dynamik mit einer Bandbreite von ca. 100 kHz vernachlässigbar schnell. Die Messeinrichtung kann einen Abstand der Kugel zum Magneten in einem Bereich von etwa 0 bis 10 mm erfassen. Das Spannungssignal, das der Sensor ausgibt, ist mit **ausreichender Näherung** proportional zum Abstand der Kugel vom Magneten und bewegt sich entsprechend des Kugelabstandes in einem Bereich von 0 V bis 10 V. Ist die Kugel ganz oben am Spulenkern, so ist der Abstand der Kugel vom Magneten 0 mm und die Ausgangsspannung des Sensors entsprechend etwa 0 V. Am unteren Ende des Messbereichs ist der Abstand Kugel – Magnet etwa 10 mm und das Sensorsignal entsprechend etwa 10 V. Daraus folgt ein Umrechnungsfaktor von 1V/mm. Bei der Implementierung des Reglers muss das Sensorsignal in einen Wert umgerechnet werden, der dem Abstand Δx der Kugel vom Arbeitspunkt in der Mitte des Messbereichs des Sensors entspricht. Der Abstand beträgt im Arbeitspunkt 5mm, dort ist Δx gleich 0. Wird die Kugel nach oben bewegt, so soll Δx negativ werden und umgekehrt. Der Faktor 1V/mm bleibt natürlich gleich. Diese Umrechnung ist bereits im Reglergerät PEC implementiert.

Im Folgenden leiten wir ein erstes Reglergesetz her, indem wir versuchen, einen Regler zu finden, mit dem sich das geregelte Magnetlager so verhält wie das gezeigte mechanisches Feder-Dämpfer-System, siehe dazu Abbildung 5. Wie gezeigt werden wird, führt dies zu einem sehr einfachen PD-Reglergesetz.

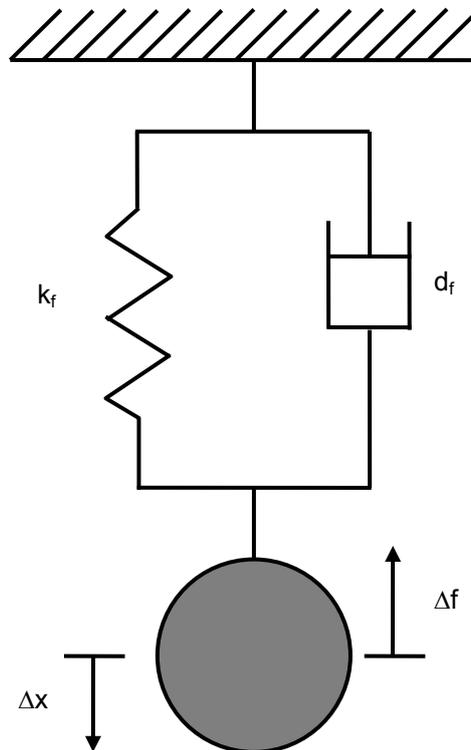


Abbildung 5: Feder-Dämpfer-Äquivalent

Die Kraft der äquivalenten Feder-Dämpfer-Aufhängung ist gegeben durch:

$$\Delta f(t) = k_f \Delta x(t) + d_f \frac{d(\Delta x(t))}{dt}$$

mit der Federsteifigkeit k_f und dem Dämpfungskoeffizienten d_f .

Gleichsetzen mit der linearisierten Kraftformel und Auflösen nach dem Strom Δi führt zu der gewünschten Reglerfunktion:

$$\Delta i(t) = \underbrace{\frac{k_f - k_{mx}}{k_{mi}}}_{P\text{-Verstärkung}} \cdot \Delta x(t) + \underbrace{\frac{d_f}{k_{mi}}}_{D\text{-Verstärkung}} \cdot \frac{d(\Delta x(t))}{dt} = \left(k \cdot \Delta x(t) + k_d \cdot \frac{d(\Delta x(t))}{dt} \right)$$

Der P-Anteil enthält die gewünschte Lagersteifigkeit k_f , während der D-Anteil für den Dämpfungskoeffizienten d_f verantwortlich ist (interessanter Vergleich). In der realen Anwendung kann der Strom $\Delta i(t)$ nicht unmittelbar in Abhängigkeit der Position $\Delta x(t)$ beeinflusst werden, allerdings ist dies näherungsweise mit Hilfe des nahezu ideal arbeitenden Stromreglers über den Stromsollwert $\Delta i_s(t)$ möglich.

Beachte, dass der Regler keinen Sollwerteingang besitzt und nur zur Stabilisierung des Arbeitspunktes dient.

Da Istwerte in realen Anwendungen immer mit teils hochfrequentem Rauschen behaftet sind, ist bei Einsatz einer Regelung mit D-Anteil ein Tiefpassfilter zur Reduzierung der Rauschamplituden zu verwenden, weil der D-Anteil gerade die hochfrequenten Störungen noch verstärkt. Im Praktikum verwenden wir das PT_2 -Filter, welches im Anhang beschrieben ist. Eingangsgröße des Filters ist der Istwert $\Delta x(t)$. Das Filter liefert neben dem gefilterten Eingangssignal $\Delta x_f(t)$ auch die

Ableitung des gefilterten Eingangssignals $\frac{d(\Delta x_f(t))}{dt}$. Das PD-Reglergesetz soll die gefilterten Größen nutzen.

$$\Delta i(t) = \left(k \cdot \Delta x_f(t) + k_d \cdot \frac{d(\Delta x_f(t))}{dt} \right)$$

Folgende Zahlenwerte sollen für den Versuch angenommen werden:

| Parameter | Wert |
|---|-------------|
| Gewünschte Federsteifigkeit k_f [N/m] | 1125 |
| Gewünschte Federdämpfung d_f [Ns/m] | 31,5 |
| Abtastzeit T [s] bei digitaler Regelung | 100 μ s |

Tabelle 1: Parameter der PD-Regelung

Versuchsvorbereitung:

(Aufwand: ca. 3 - 4 handgeschriebene Seiten)

In der Versuchsvorbereitung wird lediglich die analoge Regelung betrachtet.

| | |
|------|--|
| V3.1 | <p>Betrachten Sie für die Auslegung der Lageregelung die zugehörige vollständige Regelstrecke. Aus Sicht der Lageregelung ist der unterlagerte Stromregelkreis Teil der Regelstrecke. Der Eingang der Regelstrecke ist dann der Stromsollwert $\Delta I_S(s)$, der Ausgang ist die Kugelposition $\Delta X(s)$. Zeichnen Sie das Blockschaltbild der (linearisierten) Regelstrecke und berechnen Sie die gesamte Übertragungsfunktion $\frac{\Delta X(s)}{\Delta I_S(s)}$. Ist die Regelstrecke stabil?</p> <p><u>Hinweis:</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Die Dynamik der Stromregelung ist zu vernachlässigen, nicht aber die statischen Verstärkung, d.h. $\frac{\Delta I(s)}{\Delta I_S(s)} \approx -0,5 \frac{A}{V}$• Lassen Sie das Istwertfilter vereinfachend weg. |
| V3.2 | <p>Berechnen Sie zunächst die Übertragungsfunktion des analogen Reglergesetzes $\frac{\Delta I(s)}{\Delta X(s)}$ aus den Angaben der Versuchsanleitung. Der Regler fordert einen Strom $\Delta I(s)$, der jedoch in der Anwendung nur über den bereits implementierten Stromregler mit Hilfe von $\Delta I_S(s)$ eingepreßt werden kann. Zeichnen Sie ein Blockschaltbild des kompletten analogen Regelkreises und berücksichtigen Sie die Störgröße $\Delta F_d(s)$. Kompensieren Sie auch die statische Wirkung des Stromregelkreises, indem Sie in geeigneter Weise den Faktor 2 in den Regelkreis mit einbeziehen. Berechnen Sie dann die Störübertragungsfunktion $\frac{\Delta X(s)}{\Delta F_d(s)}$ des Lage-Regelkreises. Welche Kennwerte Eigenkreisfrequenz ω_0 und Dämpfung D des Nennerpolynoms ergeben sich und welche Bedeutung haben diese?</p> <p><u>Hinweis:</u> Verwenden Sie die Zahlenwerte der Tabelle. Die Dynamik der Stromregelung ist zu vernachlässigen.</p> |
| V3.3 | <p>Arbeiten Sie den Anhang dieses Dokuments zum digitalen Istwertfilter <u>sorgfältig</u> durch. Dieses wird während der Versuchsdurchführung zur Simulation und Implementierung benötigt.</p> |

Versuchsdurchführung:

Speichern Sie alle Dateien für Dokumentationszwecke auf einem geeigneten Datenträger ab.

| | |
|------|--|
| P3.1 | <p>Zeichnen Sie das Blockschaltbild der analogen Regelung des linearisierten Magnetlagers in ein Fenster innerhalb Simulink. Begrenzen Sie den Stromsollwert sinnvoll, wie das in der realen Anwendung natürlich auch zu implementieren ist, um Schaden von der Anlage abzuwenden.</p> <p>Hinweis: Berücksichtigen Sie zunächst nur die statische Verstärkung der Stromregelung. Zur Begrenzung kann sehr einfach der „Saturation-Block“ in Simulink verwendet werden. Hier ist zunächst kein Istwertfilter zu berücksichtigen.</p> |
| P3.2 | <p>Simulieren Sie nun die Störsprungantwort mit einer sinnvollen Amplitude. Achten Sie darauf, dass die Stromsollwertbegrenzung nicht eingreifen muss. Vergleichen Sie das Einschwingverhalten der Regelung mit den Kennwerten der Versuchsvorbereitung.</p> |
| P3.3 | <p>Fügen Sie der Simulation des Regelkreises ein analoges PT_2-Filter zur Istwert-Filterung hinzu. Wählen Sie folgende Parameter des Filters:</p> <ul style="list-style-type: none">• Statischer Verstärkungsfaktor: 1• Dämpfungskonstante: $D = 0.7$• Kennkreisfrequenz: so groß, dass das Regelverhalten kaum beeinträchtigt wird (abschätzen und in der Simulation ausprobieren), aber so klein, dass eine möglichst gute Filterwirkung besteht. <p>Verwenden Sie die Ausgangsgrößen des Filters für den PD-Regler.</p> |
| P3.4 | <p>Fügen Sie der Reglersimulation nun die analoge Stromregelung in PLECS mit dazu. Ändert sich die Störsprungantwort wesentlich? Ist ein Vernachlässigen der Stromreglerdynamik zulässig?</p> |
| P3.5 | <p>Implementieren Sie nun die Lageregelung im Regelungsgerät mit Hilfe von Simulink. Verwenden Sie dazu das bereitgestellte Template. Parametrieren Sie dann, bei erfolgreicher Simulation, die Lageregelung direkt in Simulink.</p> <p>Hinweis: Die Betreuer unterstützen Sie bei Bedarf.</p> |
| P3.6 | <p>Testen Sie die Lageregelung mit unterlagertem Stromregelkreis, indem Sie die Kugel in die Lichtschranke einbringen. Verändern Sie die Dämpfung der Regelung und die Filterzeitkonstante und beobachten Sie den Einfluss. Testen Sie auch die Robustheit der Regelung, indem Sie andere ferromagnetische Körper zum Schweben bringen, z.B. eine 5-Cent Münze.</p> <p>Hinweis: Überprüfen Sie zunächst die Einstellung der Stromregelung.</p> <p>Gehen Sie pfleglich mit dem Versuchsaufbau um. Hinterlassen Sie für nachfolgende Studenten eine unbeschädigte Versuchseinrichtung!</p> |

Dokumentation: Erstellen Sie pro Gruppe einen vollständigen und individuellen Praktikumsbericht, der alle obigen Punkte der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung beinhaltet.

4. Versuchstag: Digitale PID-Lageregelung

Im Unterschied zu der vorhergehenden PD-Regelung soll nun ein Sollwerteingang berücksichtigt werden, mit dessen Hilfe die Position des Schwabekörpers verändert werden kann. **Beachte:** Damit ändert sich auch der Arbeitspunkt und die Genauigkeit der Linearisierung der Kraftformel nimmt mit zunehmendem Abstand vom AP ab. Dies wird allerdings im Folgenden ignoriert, d.h. wir hoffen auf eine robuste Regelung, die mit diesen Parameteränderungen zurechtkommt. Es wird sich zeigen, dass diese Annahme gerechtfertigt ist.

Um stationäre Genauigkeit zu erreichen, wird die Regelung um einen Integral-Anteil erweitert.

Versuchsvorbereitung:

(Aufwand: ca. 2 handgeschriebene Seiten)

| | |
|------|---|
| V4.1 | Entwerfen Sie eine der Stromregelung überlagerte, analoge PID-Lageregelung in 2DOF-Struktur mit $\beta = \gamma = 0$. Zeichnen Sie ein <u>sauberes und detailliertes</u> Blockschaltbild der Regelung (ausschließlich mit Δ -Größen). Verwenden Sie das bereits bekannte PT_2 -Istwertfilter. Für den D-Anteil der Regelung ist der entsprechende Ausgang des PT_2 -Filters zu verwenden, damit nicht zusätzlich die Ableitung des Istwerts berechnet werden muss. Integrieren Sie eine Stromsollwertbegrenzung mit Anti-Windup-Funktionalität. |
| V4.2 | Berechnen Sie die Reglerverstärkungen k , k_i , k_d und T_i entsprechend der Vorlesung mit $\omega_0 = 50$ [rad/sec], $D = 0,7$ und $\alpha = 0,7$. Hinweis: Die Dynamik der Stromregelung und des PT_2 -Filters ist zu vernachlässigen. |

Versuchsdurchführung:

Speichern Sie alle Dateien für Dokumentationszwecke auf einem geeigneten Datenträger ab.

| | |
|------|--|
| P4.1 | Betrachten Sie die bereits vorgefertigte Simulation der analogen Regelung und parametrieren Sie diese entsprechend der Versuchsvorbereitung. Ergänzen Sie die Simulation durch das PLECS-Modell der Stromregelung. Testen Sie das Führungs- und Störverhalten der analogen Regelung. Erstellen Sie nun ausgehend von der analogen Simulation die Simulation der digitalen Regelung. Verwenden Sie zur Abtastung und Speicherung von Istwerten ein „Zero-Order-Hold“-Glied aus der Bibliothek unter Rubrik Simulink/Discrete. Die Abtastzeit beträgt $100 \mu s$. Diskretisieren Sie dann den I-Anteil des Reglers mit Hilfe der Tustin-Approximation. Implementieren Sie die Istwert-Filterung im z-Bereich, wie in der Anleitung beschrieben. Vergleichen Sie die <u>analoge und digitale</u> Regelung hinsichtlich Führungs- und Störverhalten. Hinweis: Die Regelstrecke soll auch bei digitaler Regelung zeitkontinuierlich bleiben, so wie dies der Realität entspricht. |
| P4.2 | Betrachten Sie nun eingehend die bereits vorgefertigte Implementierung der Lageregelung. Ändern Sie ggf. die digitale Simulation, damit diese die realen Verhältnisse ausreichend genau berücksichtigt. Ziel der Simulation ist, die berechneten Reglerparameter vor der Implementierung <u>sicher</u> zu testen. Parametrieren Sie dann die Lageregelung direkt in Simulink. Hinweis: Ändern Sie aus Sicherheitsgründen nichts an der Struktur der Implementierung! |
| P4.3 | Ermitteln Sie experimentell das Führungsverhalten der aktiven Magnetlagerung (Führungssprungantwort) und vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Simulation. Gehen Sie pfleglich mit dem Versuchsaufbau um. Hinterlassen Sie für nachfolgende Studenten eine unbeschädigte Versuchseinrichtung! |

Dokumentation: Erstellen Sie pro Gruppe einen vollständigen und individuellen Praktikumsbericht, der alle obigen Punkte der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung beinhaltet.

Anhang: Digitales Istwertfilter

In industriellen Regelkreisen ist das Sensorsignal, welches die Regelgröße (Istwert) erfasst, oft mit Rauschen oder Störungen behaftet. Bei Verwendung eines D-Anteils im Regler wirkt sich das Rauschen meist ungünstig auf den Verlauf der Stellgröße aus. In der Praxis verwendet man dann oft folgendes PT₂-Filter zur Filterung des Istwerts (nach Åström, Advanced PID control, ISA, 2006):

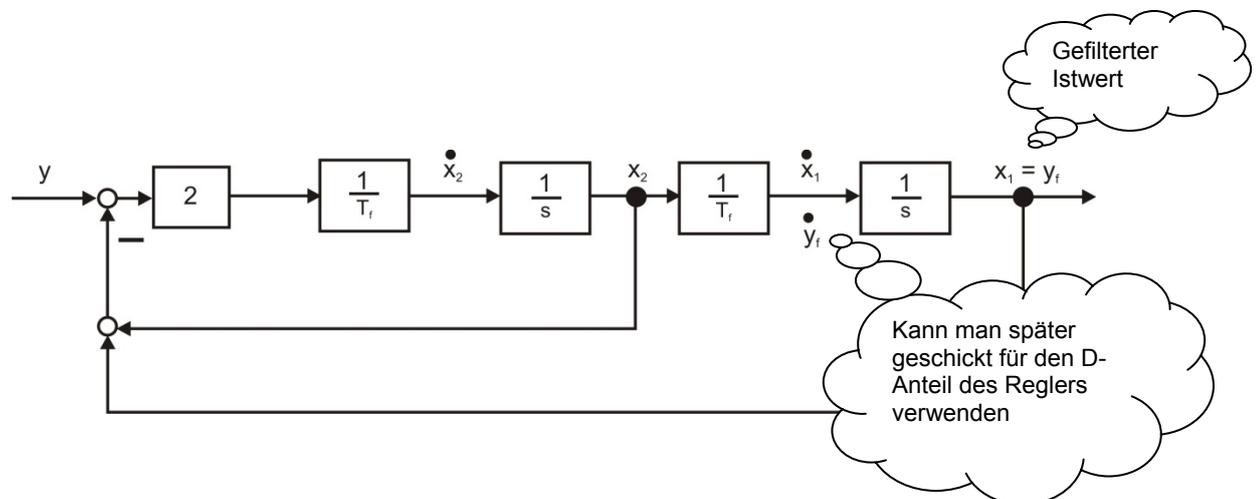
$$Y_f(s) = \frac{1}{1 + sT_f + \frac{(sT_f)^2}{2}} Y(s)$$

Dabei bezeichnet $Y(s)$ die mit einem Sensor erfasste Regelgröße und $Y_f(s)$ die gefilterte Regelgröße. Das PT₂-Filter besitzt den stationären Verstärkungsfaktor 1, die Dämpfungskonstante $D = \frac{1}{\sqrt{2}}$ und die Eigenkreisfrequenz $\omega_0 = \sqrt{2}/T_f$. Aus Erfahrung weiß man, dass sich oft folgende Wahl der Filterzeitkonstanten T_f empfiehlt:

$$T_f = \frac{T_d}{N}, \quad N = 2 \dots 20$$

Dabei ist T_d die **Differentiationszeit** des PD- oder PID-Reglers. Genaue Werte sind im Experiment zu finden. Eine Simulation hilft meist nur begrenzt, da man das Rauschen des Sensorsignals nicht genau kennt bzw. genügend genau bestimmen kann.

Um das Filter digital implementieren zu können, ist eine zeitdiskrete Darstellung erforderlich. Wir starten mit dem Blockschaltbild des analogen Filters:



Man kann leicht nachvollziehen, dass obiges Blockschaltbild dem Ansatz der PT₂-Übertragungsfunktion entspricht. Es gilt:

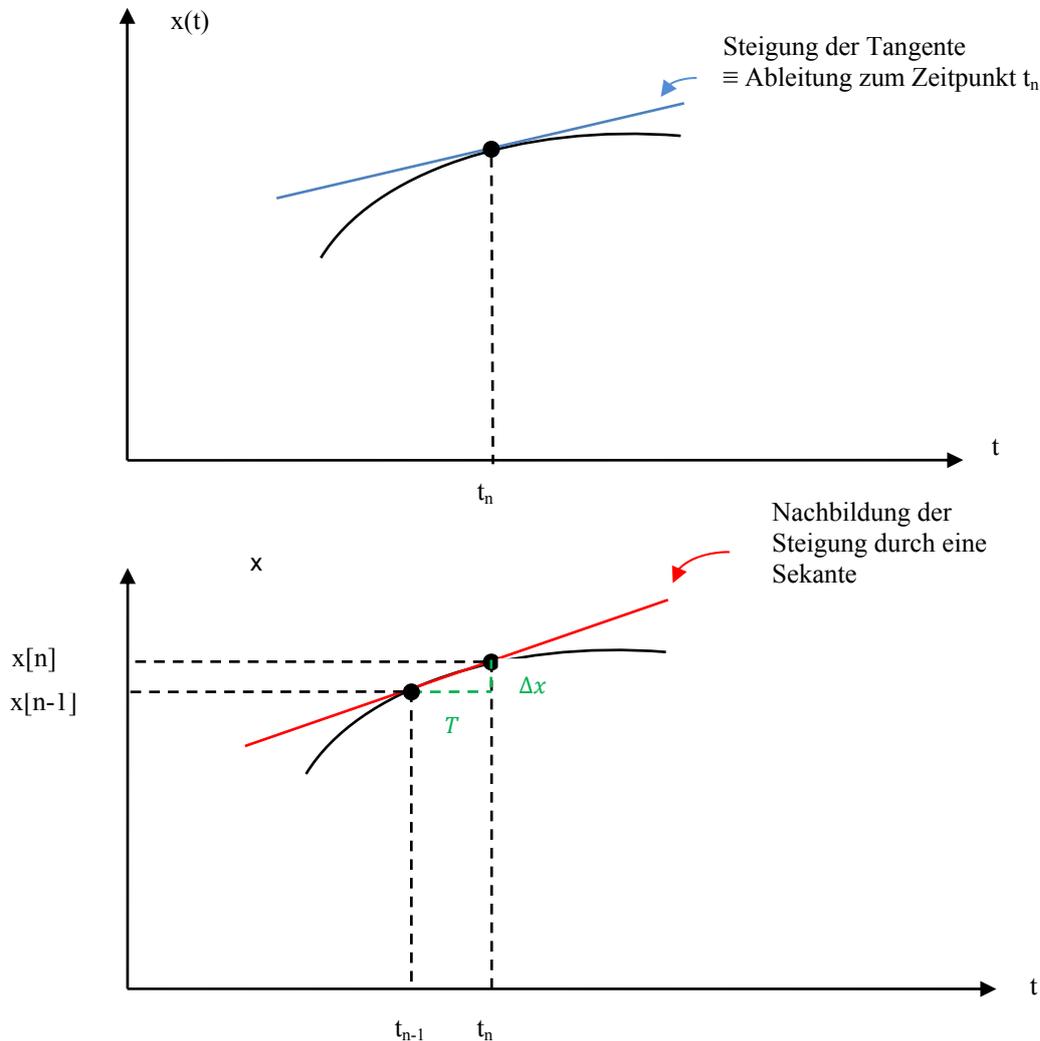
$$\frac{T_f^2}{2} \ddot{y}_f = y - \underbrace{T_f \dot{y}_f}_{x_2} - y_f$$

Oder anders ausgedrückt:

$$T_f \frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$T_f \frac{dx_2}{dt} = 2(y - x_1 - x_2)$$

Die beiden in dem obigen Gleichungssystem vorkommenden Ableitungen werden nun mit Hilfe dem sogenannten Rückwärtsdifferenzenquotienten (Euler-Verfahren) diskretisiert (Approximation der Steigung):



$$T_f \frac{x_1[n] - x_1[n-1]}{T} = x_2[n]$$

$$T_f \frac{x_2[n] - x_2[n-1]}{T} = 2(y[n] - x_1[n] - x_2[n])$$

Dabei ist T die Abtastzeit des digitalen Algorithmus. Zunächst werden die Gleichungen nach $x_1[n]$ und $x_2[n]$ aufgelöst. Es folgt unmittelbar:

$$(1) x_1[n] = x_1[n-1] + \frac{T}{T_f} x_2[n]$$

$$(2) x_2[n] = x_2[n-1] + 2 \frac{T}{T_f} y[n] - 2 \frac{T}{T_f} x_1[n] - 2 \frac{T}{T_f} x_2[n]$$

In Gleichung (2) taucht $x_2[n]$ auf beiden Seiten auf. Deswegen bringen wir $x_2[n]$ zunächst auf die linke Seite:

$$x_2[n] \left(1 + 2 \frac{T}{T_f} \right) = x_2[n-1] + 2 \frac{T}{T_f} (y[n] - x_1[n])$$

Nun teilen wir durch die Klammer auf der linken Seite:

$$(2') \quad x_2[n] = \frac{T_f}{T_f + 2T} x_2[n-1] + \frac{2T}{T_f + 2T} (y[n] - x_1[n])$$

In dieser Form ist das Gleichungssystem noch nicht implementierbar, da sowohl $x_1[n]$ als auch $x_2[n]$ jeweils von $x_2[n]$ bzw. $x_1[n]$ abhängen. Deswegen setzen wir (2') in (1) ein. Daraus folgt:

$$x_1[n] = x_1[n-1] + \frac{T}{T_f + 2T} x_2[n-1] + \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f} (y[n] - x_1[n])$$

Nun taucht $x_1[n]$ auf beiden Seiten der Gleichung auf. Wir bringen $x_1[n]$ auf die linke Seite:

$$x_1[n] \left(\underbrace{1 + \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f}}_{\frac{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2}{T_f^2 + 2TT_f}} \right) = x_1[n-1] + \frac{T}{T_f + 2T} x_2[n-1] + \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f} y[n]$$

Nun kann nach $x_1[n]$ aufgelöst werden:

$$x_1[n] = \frac{T_f^2 + 2TT_f}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} x_1[n-1] + \frac{TT_f}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} x_2[n-1] + \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} y[n]$$

Um nach $x_2[n]$ auflösen zu können, müssen wir (1) in (2') einsetzen:

$$x_2[n] = \frac{T_f}{T_f + 2T} x_2[n-1] + \frac{2T}{T_f + 2T} y[n] - \frac{2T}{T_f + 2T} x_1[n-1] - \frac{2T}{T_f + 2T} \frac{T}{T_f} x_2[n]$$

Auch hier taucht $x_2[n]$ auf beiden Seiten der Gleichung auf. Wir bringen $x_2[n]$ auf die linke Seite

$$x_2[n] \left(\underbrace{1 + \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f}}_{\frac{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2}{T_f^2 + 2TT_f}} \right) = \frac{T_f}{T_f + 2T} x_2[n-1] + \frac{2T}{T_f + 2T} y[n] - \frac{2T}{T_f + 2T} x_1[n-1]$$

und teilen durch die Klammer auf der linken Seite:

$$x_2[n] = \frac{T_f}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} x_2[n-1] + \frac{2TT_f}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} (y[n] - x_1[n-1])$$

Diese beiden Differenzgleichungen lassen sich in einem Mikrocomputer implementieren.

Dabei bedeuten:

$x_1[n]$ entspricht y_f (gefilterter Messwert)

$x_2[n]$ entspricht $T_f \dot{y}_f$ (Ableitung gefilterter Messwert und mit T_f skaliert)

Achtung: Der Algorithmus funktioniert fehlerhaft für den Spezialfall $T_f = 0$:

Es folgt:

$x_1[n] = y[n]$ (ist in Ordnung)

$x_2[n] = 0$ (falsch)

Um auch $T_f = 0$ zu ermöglichen, formulieren wir den Algorithmus für $x_1[n]$ etwas (trickreich) um:

$$x_1[n] = x_1[n-1] + \frac{TT_f}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} x_2[n-1] + \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2} (y[n] - x_1[n-1])$$

und führen neue Variablen ein:

$y_1[n] = x_1[n]$

$y_2[n] = \frac{T}{T_f} x_2[n]$

Mit den Abkürzungen (Parametern)

$p_1 = \frac{T_f^2}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2}$, $p_2 = \frac{2T^2}{T_f^2 + 2TT_f + 2T^2}$ lässt sich schreiben:

Hinweis: Ersetze (oben)

$$x_2[n-1] = \frac{T_f}{T} y_2[n-1]$$

$$y_1[n] = y_1[n-1] + p_1 y_2[n-1] + p_2 (y[n] - y_1[n-1])$$

bzw.

$$\begin{aligned} y_2[n] &= p_1 y_2[n-1] + p_2 (y[n] - y_1[n-1]) \\ y_1[n] &= y_1[n-1] + y_2[n] \end{aligned}$$

Dabei bedeuten:

$y_1[n]$ entspricht y_f (gefilterter Messwert)

$y_2[n]$ entspricht $\frac{T}{T_f} T_f \dot{y}_f = T \dot{y}_f$ (Ableitung gefilterter Messwert und mit T skaliert)

Achtung: Der Algorithmus funktioniert jetzt auch für den Spezialfall $T_f = 0$:

Es folgt:

$p_1 = 0$ und $p_2 = 1$

$y_2[n] = y[n] - y_1[n - 1]$ (Rückwärtsdifferenz Messwert → in Ordnung)

$y_1[n] = y_1[n - 1] + y[n] - y_1[n - 1] = y[n]$ (ist in Ordnung)

Für die Implementierung auf dem Echtzeitsystem im Labor benötigen wir abschließend die Darstellung der Filtergleichungen im z-Bereich. Dazu transformieren wir obige Differenzgleichungen in den Frequenzbereich:

$Y_2(z) = p_1 z^{-1} Y_2(z) + p_2 (Y(z) - z^{-1} Y_1(z))$

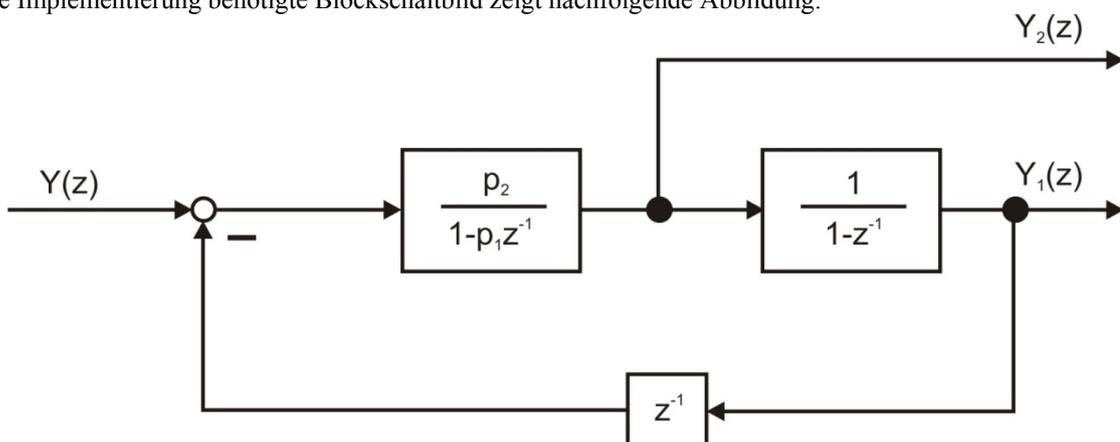
$Y_1(z) = z^{-1} Y_1(z) + Y_2(z)$

Daraus ergibt sich unmittelbar:

$$Y_2(z) = \frac{p_2}{1 - p_1 z^{-1}} Y(z) - \frac{p_2 z^{-1}}{1 - p_1 z^{-1}} Y_1(z)$$

$$Y_1(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} Y_2(z)$$

Das für die Implementierung benötigte Blockschaltbild zeigt nachfolgende Abbildung:



Literatur:

[1] Magnetlager, G. Schweitzer, A. Traxler, H. Bleuler, Springer Verlag 1993.
 [2] Matlab – Simulink – Stateflow, A. Angermann, M. Beuschel, M. Rau, U. Wohlfarth, Oldenbourg Verlag, 5. Auflage 2007.
 [3] Handbücher von Fa. Mathworks unter <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html> online als PDF-Dateien verfügbar