

Anleitung zum Versuch Regelkreis

Stand 23.05.2022

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung.....	2
II.	Theoretische Grundlagen	2
II.1	Regelkreis	2
II.2	Binäre Regler	3
II.3	Proportionalregler	4
II.4	Integralregler.....	5
II.5	Differentialregler	5
III.	Einstellung eines PID-Reglers	6
III.1	Einstellmethode nach Ziegler und Nichols	7
III.2	Lambda Einstellung.....	8
IV.	Versuchsvorbereitung	9
IV.1	Inhalt und mechanischer Aufbau.....	9
IV.2	Mechanischer Aufbau	10
IV.3	Elektrischer Aufbau	11
IV.4	Arduino Software.....	17
IV.5	Programm.....	19
IV.6	Messwertausgabe	20
IV.7	Inbetriebnahme	21
V.	Versuchsdurchführung	22
V.1	Versuchsaufbau	22
V.2	Charakterisierung der Regelstrecke	22
V.3	Charakterisierung eines Zwei-Punkt-Reglers	22
V.4	Proportionalregler	23
V.5	Ziegler-Nichols Einstellung.....	23
V.6	Lambda Einstellung.....	24
V.7	Optimierung eines Reglers.....	25
VI.	Hinweise zur Protokollanfertigung.....	25
VII.	Quellen.....	25

I. Einleitung

Regler werden für verschiedenste Zwecke in Industrie und Messtechnik eingesetzt. Der Unterschied zum Steuern liegt in der Rückführung des Ausgabewertes, wodurch Regler besonders geeignet sind, eingestellte Sollwerte unter dem Einfluss von Störgrößen zu halten und nachzuführen [1]. Die Geschichte der Regeltechnik reicht hierbei bis ins 19. Jhd. Bereits bei Dampfmaschinen wurden einfache mechanische Fliehkraftregler zur Regelung der Solldrehzahl eingesetzt [2]. Mit dem Aufkommen der Elektrotechnik wurden dynamischere Regelsysteme möglich, die es erlaubten, Regelparameter leichter einzustellen und entsprechend zeitkritischer auszulegen. Bis zum kommerziellen Einsatz von Mikrochips behielten hier die Zweipunktregler, durch ihre einfache Bauart bedingt, ihre große Bedeutung. Programmgesteuerte Regelsysteme sind nahezu universell einsetzbar. Ob Drehzahl-, Temperatur- oder Volumenstromregelung: die implementierten Regler sind derart abstrahiert, dass meist nur die Leistungselektronik am Ausgang deren Verwendung einschränkt.

Mit diesem Praktikum sollen Sie sich durch Hilfe eines Arduino Mikrokontrollers mit Reglern und deren Eigenschaften vertraut machen. Im Versuch soll ein Styroporball auf einer Luftsäule schweben. Hierzu ist ein Messsystem zur Bestimmung der Ballhöhe vorhanden, der Regler in Form des Arduino-Programms, sowie ein Gebläsemotor, der den Ball drehzahlabhängig steigen oder fallen lässt.

Nachfolgende Anleitung beschäftigt sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen der Regelungstechnik, sowie den damit verbundenen Einstellregeln für Regler. Anschließend werden, der Aufbau sowie die Inbetriebnahme des Regelkreisversuchs erläutert. Die zu bearbeitenden Aufgaben schließen die Anleitung ab.

II. Theoretische Grundlagen

II.1 Regelkreis

Für die Regelungstechnik werden dynamische Systeme betrachtet, d.h. sie lassen sich im Allgemeinen durch einen mathematischen Zusammenhang zwischen einer Eingangsgröße y der Zeit t und einer Ausgangsgröße x beschreiben:

$$x = f(y, t)$$

Als Beispiel sei hier ein Heizkörper genannt, dessen Eingangsgröße die Durchflussrate von warmem Wasser und die Ausgangsgröße die resultierende Raumtemperatur ist. Durch eine Änderung der Eingangsgröße (z.B. Erhöhung des Warmwasserdurchflusses) erfolgt eine dynamische Änderung der Ausgangsgröße des Systems (z.B. die Raumtemperatur), was auch als Steuerung des Systems bezeichnet wird. Durch Einsatz von Messtechnik können Parameter kontinuierlich beobachtet und mit Sollwerten verglichen werden, wodurch es möglich ist, die Eingangsgrößen gezielt so zu verändern, dass die Sollwerte erreicht werden und die Zeit bis zum Erreichen dieses Wertes minimiert werden kann. Dieser Prozess wird als Regelung des Systems und das zu regelnde System als Regelstrecke bezeichnet. Der Regler selbst umfasst hierbei die logische oder

mathematische Operation, die für die Änderung der Eingangsgrößen durchgeführt werden. Im einfachsten Fall wird die Ausgangsgröße x des Systems beobachtet und mit einem Sollwert w verglichen. Durch Differenzbildung ergibt sich die Regelabweichung e :

$$e = w - x$$

Durch den Regler wird nun die Stellgröße y berechnet, die als Eingangsgröße in die Regelstrecke eingeht. Es liegt daher eine Rückkopplungs-Schleife (Feedback-loop) vor, da der Ausgangswert des Systems durch den Regler den Eingangswert des Systems beeinflusst. Wie dies geschieht hängt dabei von der Art des Reglers ab. Zudem können Störgrößen z das Systems beeinflussen (z.B. ein offenes Fenster senkt die Raumtemperatur), die durch einen guten Regler kompensiert werden sollten. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 1 dargestellt.

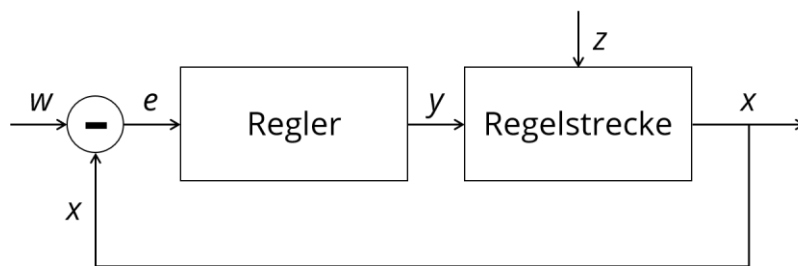


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Regelkreises mit dem Sollwert w , der Regelgröße x , der Regelabweichung e , der Stellgröße y und der Störgröße z .

II.2 Binäre Regler

Binäre Regelungen zeichnen sich selbst heute noch durch ihre Einfachheit aus und gehören zur Gruppe der nichtstetigen Regler. Diese Regler werden überwiegend für genau einen Einsatzzweck hergestellt und besitzen demnach meist eine feste Sollwertvorgabe. Das Regelverhalten kann wie folgt beschrieben werden:

$$y = y_{\max} \text{ wenn } x < w$$

$$y = y_{\min} \text{ wenn } x > w$$

Im Falle eines Heizkörpers würde dies bedeuten, dass der Wasserdurchfluss so lange auf Maximum gehalten wird, bis die Solltemperatur erreicht ist und auf Minimum reduziert wird, sobald die Temperatur überschritten wird. Dies hat auch zur Folge, dass das System nur dann einen stationären Zustand erreichen kann, wenn $f(y_{\max}) \leq w$ gilt, also der Sollwert w größer oder gleich dem maximal möglichen Wert $x_{\max} = f(y_{\max})$ des Systems ist. Für alle anderen Fälle wird die Regelgröße x um den Sollwert w oszillieren, wobei die Frequenz von der Trägheit des Systems abhängt.

Da eine hohe Frequenz einen hohen Verschleiß für Bauteile, wie z.B. Ventile, zur Folge haben kann, wurde der Zweipunktregler entwickelt.

Bei diesem existiert ein oberer und ein unterer Grenzwert (w_o und w_u) um den Sollwert herum, sodass gilt:

$$y = y_{\max} \text{ wenn } x < w_u$$

$$y = y_{\min} \text{ wenn } x > w_o$$

Dies hat zur Folge, dass die Regelgröße x oszilliert, wobei die Amplitude und Frequenz von der Differenz dieser beiden Grenzwerte abhängt. Der Regler weist eine Hysterese in seinem Schaltverhalten auf, da die Werte von y im Bereich $w_u < x < w_o$ davon abhängen, welche Grenze zuletzt erreicht worden ist (z.B. die Heizung gerade am Abkühlen oder am Aufheizen ist). Bei einer symmetrischen Hysterese der Weite $2a$ gilt:

$$w_u = w - a$$

$$w_o = w + a$$

Ein Beispiel aus der Praxis für einen Binärregler finden Sie in „Zusatzmaterialien.pdf“.

II.3 Proportionalregler

Statt einem binären Schaltverhalten können Regler auch kontinuierliche Werte in Abhängigkeit der Größe der Regelabweichung einnehmen. Das einfachste Beispiel wäre hierbei der Proportionalregler, auch als P-Regler oder P-Anteil bezeichnet, der die Regelabweichung e mit einer Reglerverstärkung K_C multipliziert:

$$y = K_C \cdot e + y_{\min}$$

Wird diese Formel für die Regelabweichung umgestellt ergibt sich:

$$e = \frac{y - y_{\min}}{K_C}$$

Für den Fall, dass der Sollwert erreicht wird, gilt $e = 0$, wodurch deutlich wird, dass der Sollwert nur erreicht wird, wenn $y = y_{\min}$, also $w = f(y_{\min})$, oder $K_C = \infty$ ist. Dies hat zur Folge, dass ein P-Regler für sich nie einen beliebigen Sollwert regeln kann und daher stets eine konstante Regelabweichung aufweist. Wird die Reglerverstärkung erhöht wird zunächst die Regelabweichung verringert. Sobald die kritische Reglerverstärkung $K_{C,krit}$ erreicht wird, wird das System instabil und fängt an, um den Sollwert zu oszillieren. Für sehr hohe Werte von K_C geht das Verhalten in das eines binären An/Ausregler über.

K_C bezeichnet die allgemeine Reglerverstärkung und wird für die Berechnung von anderen Konstanten benötigt. Im Falle des Proportionalreglers gilt:

$$K_P = K_C$$

Daher finden Sie je nach Nomenklatur statt K_C auch die Bezeichnung K_P .

II.4 Integralregler

Um einen Regler mit P-Anteil so zu modifizieren, dass er beliebige Sollwerte einregeln kann, wird ein Integralregler (I-Regler oder I-Anteil) eingeführt. Für ihn gilt:

$$y = K_C \cdot \frac{1}{T_N} \int e \, dt + y_{\min}$$

Im Integralanteil wird der zeitliche Verlauf der Regelabweichung widergespiegelt. Bleibt eine Regelabweichung über eine Zeit weg konstant, erhöht sich der I-Anteil proportional dazu. Ein I-Regler allein ist ausreichend, um ein System zu regeln, jedoch führt dies zu einer sehr langsamen Regelung, die oszillierend den Sollwert erreicht, da für jeden Zeitbereich mit positiver Regelabweichung bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes ein äquivalenter Zeitbereich mit negativer Regelabweichung existieren muss, damit der Integralanteil einen Wert von 0 annimmt (Wind-up Effekt). Dies kann vermieden werden, wenn nicht der gesamte Zeitraum, sondern nur ein ausgewählter Zeitbereich für die Integration verwendet wird (z.B. die letzten 10 Minuten) und der Regler somit „vergessen“ kann.

Wird hingegen ein PI-Regler verwendet, können sich P- und I-Anteil kompensieren. Der P-Anteil führt zu einer schnelleren Regelung des Systems, während der I-Anteil dazu beiträgt, dass das Problem der konstanten Regelabweichung des P-Reglers gelöst werden kann.

Ein PI-Regler wird dabei wie folgt beschrieben:

$$y = K_C \left(e + \frac{1}{T_N} \int e \, dt \right) + y_{\min}$$

Die Nachstellzeit T_N (bzw. Integralzeit T_I , je nach Nomenklatur) stellt dabei die Zeit dar, nach der P und I-Anteil gleich groß sind, wenn eine konstante Regelabweichung e vorliegt, also eine Sprungantwort des Reglers durchgeführt wird. In vielen Fällen wird statt T_N eine Konstante K_I für den I-Anteil verwendet, wobei gilt:

$$K_I = \frac{K_C}{T_N}$$

K_I hat jedoch keine eigenständige physikalische Bedeutung, sodass die Verwendung von T_N zu bevorzugen ist.

II.5 Differentialregler

Während der P-Anteil den gegenwärtigen Zustand des Systems betrachtet und der I-Anteil die Vergangenheit des Systems analysiert, wird mit einem Differentialregler (D-Regler oder D-Anteil) versucht das zukünftige Verhalten des Systems zu antizipieren. Mathematisch wird der D-Anteil wie folgt beschrieben:

$$y = K_C \cdot T_V \cdot \frac{de}{dt} + y_{\min}$$

Da in der zeitlichen Änderung der Regelabweichung bei einer Änderung des Sollwertes w eine unstetige Änderung auftritt, wird in der Praxis stattdessen häufig die zeitliche Änderung der Ausgangsgröße x betrachtet:

$$y = K_C \cdot T_V \cdot \frac{dx}{dt} + y_{\min}$$

Wird ein reiner D-Regler allein verwendet, findet keine Regelung statt, da schlicht eine konstante Regelabweichung vorliegt, deren zeitliche Ableitung 0 ist. In Verbindung mit P- und/oder I-Anteilen wird ein oszillatorisches Verhalten gedämpft, sodass ein Gleichgewichtszustand schneller erreicht werden kann. Im Falle eines PD-Reglers verbleibt auch hier eine konstante Regelabweichung. Ein PID-Regler lässt sich mathematisch mit der folgenden Gleichung beschreiben:

$$y = K_C \left(e + \frac{1}{T_N} \int e \, dt + T_V \cdot \frac{de}{dt} \right) + y_{\min}$$

Die Vorhaltzeit T_V (bzw. Differentialzeit T_D) stellt dabei die Zeit dar, nach der P und D-Anteil gleich groß sind, wenn eine konstante Änderung der Regelabweichung $\Delta e/\Delta t$ vorliegt, also eine Anstiegsantwort des Reglers durchgeführt wird. In vielen Fällen wird statt T_V eine Konstante K_D für den D-Anteil verwendet, wobei gilt:

$$K_D = K_C \cdot T_V$$

III. Einstellung eines PID-Reglers

Zur Einstellung eines Reglers haben sich verschiedene Verfahren etabliert, um die richtigen Parameter zu ermitteln, wobei diese von heuristischen Methoden nach Versuch und Irrtum, über Methoden, die wenig Informationen aus einfachen Systemantworten benötigen, bis hin zu Simulationen des Systems reichen können. Wenn das System robust ist und beispielsweise keine Schäden durch Überschwinger oder Oszillationen auftreten können, so können Werte von K_C , T_N und T_V durch intelligentes Raten und etwas Methodik so lange verändert werden, bis sich ein zufriedenstellendes Verhalten zeigt. Die „perfekten“ Einstellungen sind für einen PID-Regler dabei meistens nicht notwendig. Um einen Regler zu bewerten können folgende Kriterien (vgl. Abbildung 2) einer sprungartigen Änderung des Sollwertes hinzugezogen werden:

- Zeit t_1 bis zum ersten Erreichen des 5% Bandes ($\pm 5\%$ des Sollwertes)
- Zeit t_2 bis das 5% Band nicht mehr verlassen wird
- Höhe x_{os} der ersten Überschwingung
- Konstante Regelabweichung e_r

Dabei sollten zur Vergleichbarkeit x_{os} und e_r auf den Sollwert normiert werden. In Tabelle 1 sind die Auswirkung einer Erhöhung der Werte von K_C , T_N und T_V auf die Bewertungskriterien einer Sprungantwort aufgeführt. Anhand dieser können die Reglereinstellungen gezielt geändert werden.

Tabelle 1: Auswirkung einer Erhöhung der Werte von K_C , T_N und T_V auf die Bewertungskriterien einer Sprungartigen Änderung des Sollwertes.

	t_1	x_{os}	t_2	e_r
K_C	-	+	0	-
T_N	+	-	-	+
T_V	0	-	-	0

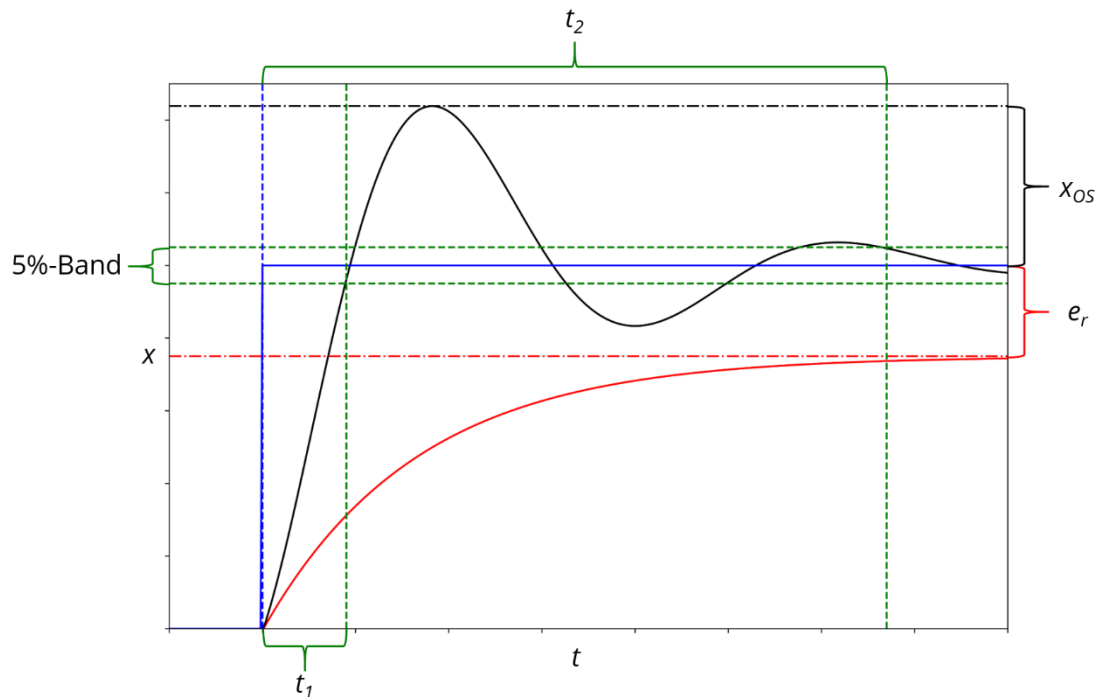


Abbildung 2: Charakteristische Kriterien bei der Bewertung von Sprungantworten. Der Sollwert-Sprung ist in blau dargestellt. Es sind Antworten eines Systems mit einem PI-Regler (schwarz) und einen P-Regler (rot) dargestellt. Der PI-Regler erreicht nach t_1 zum ersten Mal 95% des Sollwertes. Es folgt jedoch ein Überschwinger der Höhe x_{os} der danach abklingt. Erst nach t_2 wird das 5%-Band nicht mehr verlassen. Beim P-Regler liegt im Gleichgewicht eine konstante Regelabweichung von e_r vor.

III.1 Einstellmethode nach Ziegler und Nichols

Ziegler und Nichols haben 1942 die ersten Einstellregeln beschrieben [3], wobei zunächst eine Sprungantwort des Systems bei offener Rückkopplungsschleife (also ungeregt) durchgeführt wird. Je nach Art des Systems können charakteristische Zeiten und Werte bestimmt werden, aus denen wiederum Werte für K_C , T_N und T_V berechnet werden können. Über die Zeit haben sich viele verschiedene Berechnungsweisen angesammelt, wie z.B. Cohen-Coons-Regeln oder die Lambda Einstellung, die später auch in diesem Praktikum verwendet werden soll. Je nach Verhaltensweise des Systems können diese besser oder schlechter funktionieren und liefern häufig nur die initialen Werte, die danach zur erwünschten Reaktionsweise des Systems hin optimiert werden. Die ursprüngliche Methode von Ziegler und Nichols zielt beispielsweise auf eine schnelle Antwort des

Systems ab, nimmt dafür aber einen hohen Überschwinger in Kauf, der in einer Viertelumplitudendämpfung abnimmt. Dadurch kann das System jedoch zu Instabilitäten tendieren. Falls Überschwinger das System beschädigen, sollte daher Ziegler und Nichols nicht verwendet werden.

Wenn das System hingegen Oszillationen erlaubt und keine Sprungantwort durchgeführt werden soll, so kann eine zweite Variante der Methode nach Ziegler und Nichols verwendet werden. Hierzu wird zunächst ein reiner P-Regler betrachtet, d.h. $T_N = \infty$ und $T_V = 0$. Die Reglerverstärkung K_C wird nun schrittweise erhöht, bis eine stabile Oszillation auftritt und die kritische Reglerverstärkung $K_{C,krit}$ dieser Oszillation notiert. Die Periodendauer T_{krit} der Oszillation wird gemessen. Aus diesen beiden Werten können nun Werte von K_C , T_N und T_V berechnet werden, wobei gilt:

$$K_C = 0,6 \cdot K_{C,krit}$$

$$T_N = 0,5 \cdot T_{krit}$$

$$T_V = 0,125 \cdot T_{krit}$$

III.2 Lambda Einstellung

Die Lambda Einstellung wurde 1968 von Dahlin entwickelt und findet vor allem in der Papierherstellung große Anwendung [4]. Sie ist so ausgelegt, dass das System auf eine Sollwertänderung mit einem PT1T0 Verhalten (PT1-Verhalten mit einer Totzeit T_0) reagiert, wobei keine Überschwinger auftreten. Im Vergleich zu Ziegler und Nichols reagiert das System langsamer, aber stabiler. Zur Ermittlung der Parameter wird zunächst eine unregelte Sprungantwort durchgeführt, wobei bei der Auswertung ein PT1T0-Verhalten angenommen wird. Die folgenden Parameter (vgl. Abbildung 3) werden ermittelt:

- $K' = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ der Quotient der Ausgangs- und der Eingangswertänderung
- t_t die Verzugszeit des Systems
- τ die Zeit, die nach der Verzugszeit gebraucht wird, bis $0,63 \Delta x$ erreicht ist.

Aus diesen Werten können nun Werte von K_C , T_N und T_V berechnet werden, wobei gilt:

$$K_C = \frac{\tau}{K' \cdot (N \cdot \tau + t_t)}$$

$$T_N = \tau$$

$$T_V = 0$$

Wobei N einen Wert zwischen 1 und 3 einnehmen sollte. Hierbei gilt, dass bei höherem N das System stabiler, aber dafür langsamer wird. Da $T_V = 0$ ist, wird ersichtlich, dass mit dieser Vorgehensweise ein PI-Regler eingestellt wird.

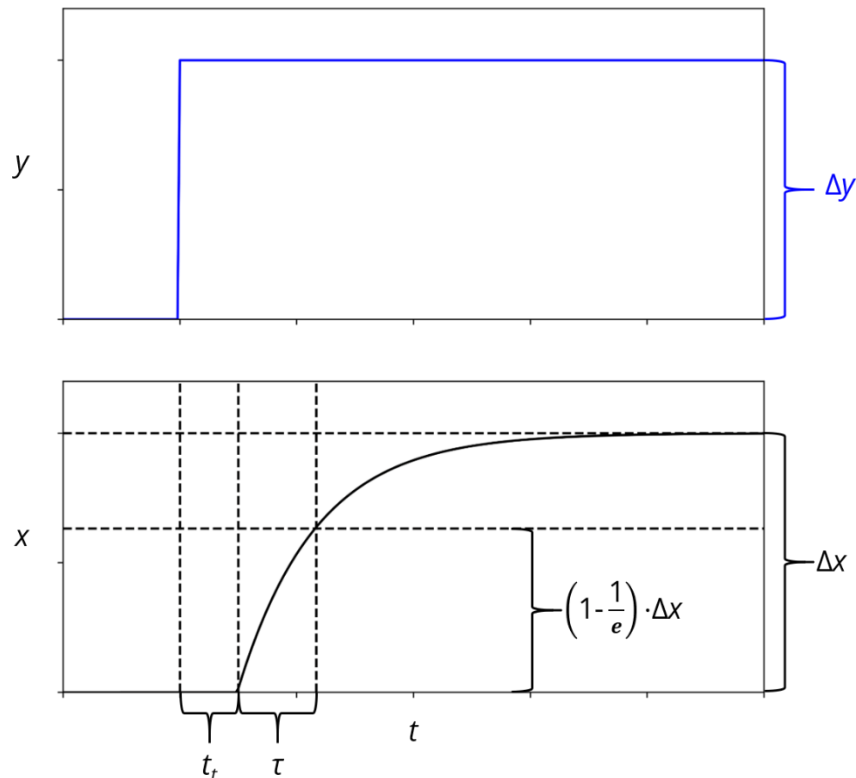


Abbildung 3: Ermittlung der Parameter der Lambda-Einstellung durch Sprungantwort. Oben ist die Änderung des Eingangswertes, unten die Änderung des Ausgangswertes. Wichtige Parameter sind die Änderung des Eingangswertes Δy und des Ausgangswertes Δx , die Verzugszeit t_t des Systems, sowie die Zeitkonstante τ , die zum Erreichen von $1 - (1/e) = 0,63$ des stationären Ausgangswertes im Gleichgewicht nach der Verzugszeit benötigt wird.

IV. Versuchsvorbereitung

IV.1 Inhalt und mechanischer Aufbau

Die für den Versuch notwendigen Bauteile liegen dem Versuchskoffer bei und umfassen:

- Plexiglasrohr, Halterung und Styroporball
- Ultraschallabstandssensor
- Gebläse und Netzteil
- Steckbrett, Widerstände und Kabel
- Arduino Uno

Bitte prüfen Sie vor dem Aufbau den Koffer auf Vollständigkeit! Hierzu liegt ein Laufblatt bei mit den einzelnen Positionen sowie der zugehörigen Koffernummer. Nachfolgend wird sich in der Aufbauanleitung auf die einzelnen Positionsnummern aus dem Laufblatt bezogen. Wird hierbei festgestellt, dass einzelne Teile fehlen oder beschädigt sind, teilen Sie das bitte dem Lehrstuhl für Magnetofluidynamik, Mess- und Automatisierungstechnik unter Angabe der Koffernummer per Mail an: Adrian.Lange@tu-dresden.de mit.

In „Zusatzmaterialien.pdf“ sind Alternativlösungen aufgeführt, um vergleichbare Versuchsaufbauten erstellen zu können, wenn kein Koffer ausgeliehen werden konnte.

IV.2 Mechanischer Aufbau

Mithilfe von Muttern werden Gebläse, Lochplatte und Viertelscheiben an den Positionen gehalten. Hutmuttern dienen als Füße. Das Plexiglasrohr wird in die Öffnung, die sich durch die Viertelscheiben bildet, gesteckt. Die Lichtschranke wird in eines der Löcher einer einzelnen Viertelscheibe gesteckt. Der montierte Aufbau ist zweckmäßiger Weise auf einer ebenen Unterfläche zu platzieren. Der waagerechte Schlitz im Rohr dient mit dem Schieber als Drossel für den Sprungversuch. Dieser ist so auszurichten, dass der Schieber mit der Nase in die Lichtschranke eingreift. Versuchen Sie zunächst intuitiv den Versuchsaufbau anhand von Abbildung 4 aufzubauen. Für Details können Sie „Zusatzmaterialien.pdf“ zu Rate ziehen.

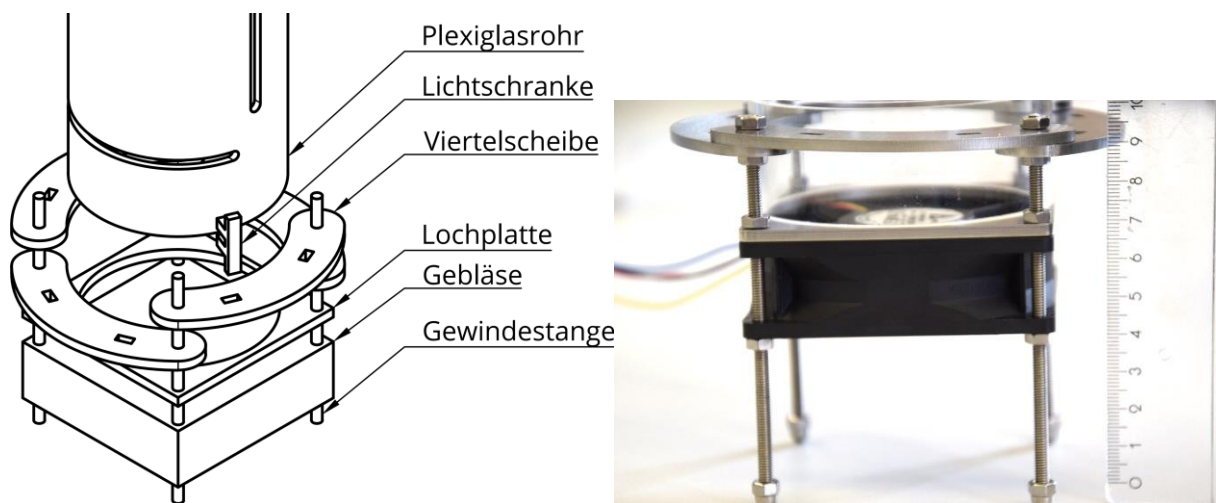
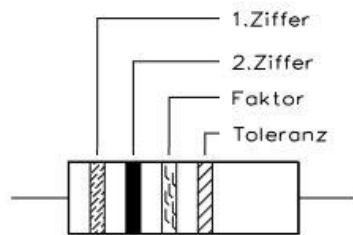


Abbildung 4: Schematischer Aufbau und eine Aufnahme des Versuchsaufbaus.

IV.3 Elektrischer Aufbau

Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass vor Inbetriebnahme eine Kontrolle der Verdrahtung vorzunehmen ist, um Kurzschlüsse zu vermeiden!

Die Zuordnung der Widerstände erfolgt durch Farbcodes auf den Widerständen. Ausgehend von dem Ring, der näher am Ende des Widerstandes liegt, werden folgende Ringe unterschieden:

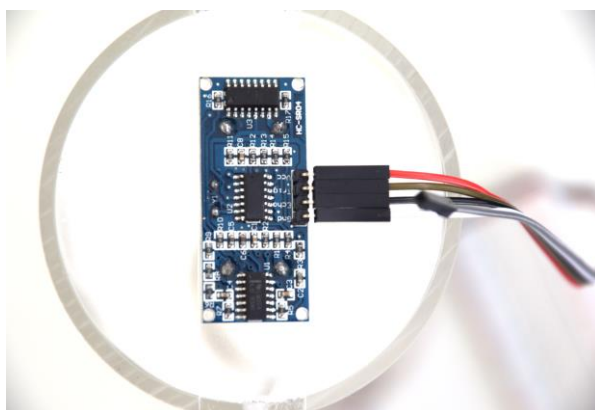


Farbe	1. Ring 1. Ziffer	2. Ring 2. Ziffer	3. Ring Multiplikator	4. Ring 4. Ziffer
schwarz	–	0	$10^0 = 1$	–
braun	1	1	10^1	$\pm 1 \%$
rot	2	2	10^2	$\pm 2 \%$
orange	3	3	10^3	–
gelb	4	4	10^4	–
grün	5	5	10^5	$\pm 0,5 \%$
blau	6	6	10^6	$\pm 0,25 \%$
violett	7	7	10^7	$\pm 0,1 \%$
grau	8	8	10^8	–
weiß	9	9	10^9	–
gold	–	–	10^{-1}	$\pm 5 \%$
silber	–	–	10^{-2}	$\pm 10 \%$
keine	–	–	–	$\pm 20 \%$

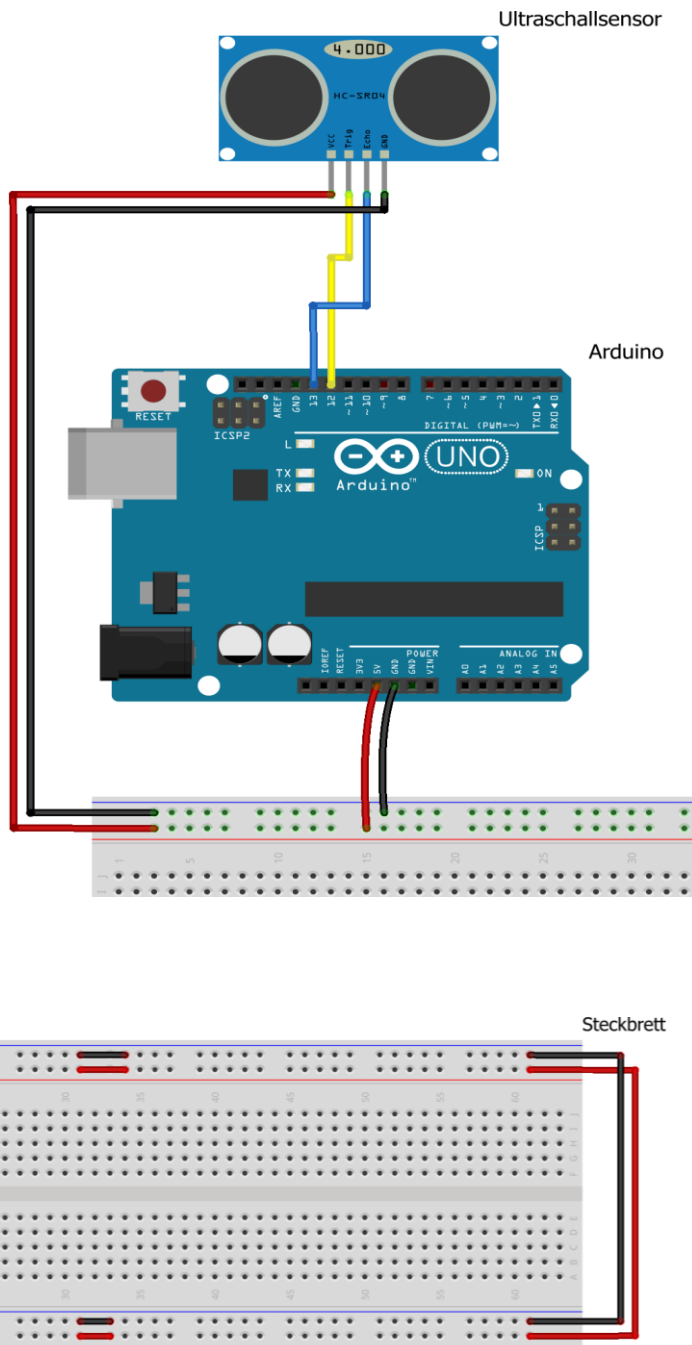
Abbildung 7: Anhand der Farbcodes auf den Widerständen ist die eindeutige Zuordnung des Widerstandswertes möglich [6]. Bsp.: [grün, blau, rot, braun] entspricht: $56 \cdot 10^2 \Omega \pm 1\% = 5600 \Omega \pm 1\%$.



Der Ultraschallsensor (12) wird in die Aussparungen am oberen Ende des Plexiglasrohres eingesetzt. Hierbei ist auf die Richtung zu achten, da dieser nur in einer Position korrekt sitzt. Mit der Wäscheklammer (18) kann der Sensor fixiert werden.

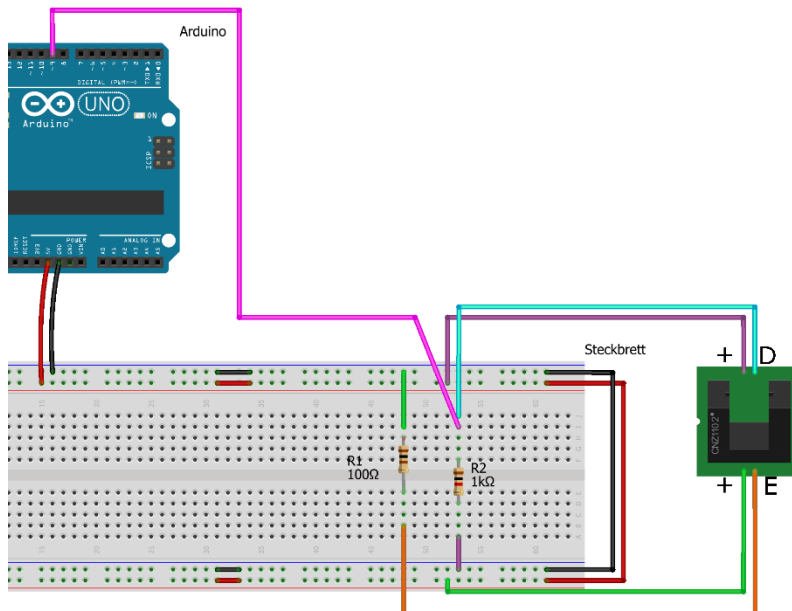
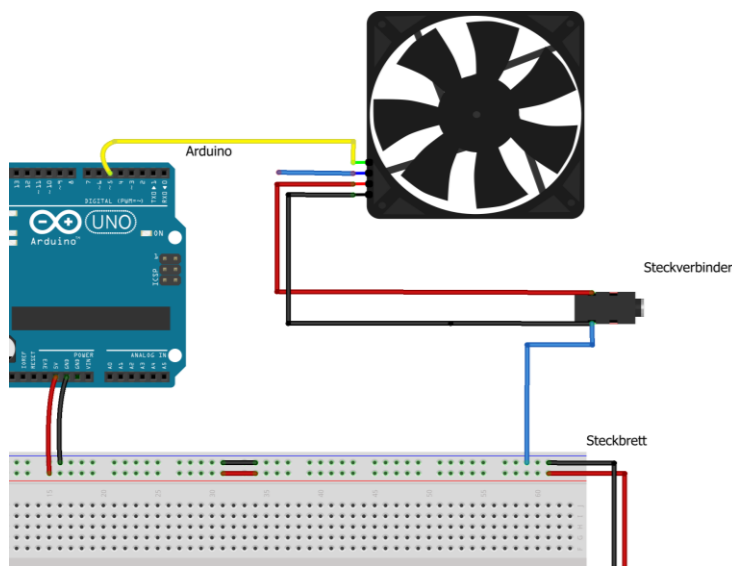


Für die Verbindung zum Arduino (1) und zum Breadboard (8) sind 60cm lange Jumper-Kabel (7) vorgesehen.



Die rote Versorgungsschiene ist mit dem 5V-Pin und die blaue Versorgungsschiene mit dem GND-Pin am Arduino zu verbinden. Zum Anschließen des Ultraschallsensors sind die Pins VCC mit einer der roten Versorgungsschienen am Breadboard, sowie der GND-Anschluss mit der blauen Versorgungsschiene zu verbinden. Der Echo-Pin wird mit DIO13 des Arduino verbunden, Trig mit DIO 12. Die Kabelfarben sind entsprechend der vorhandenen frei wählbar.

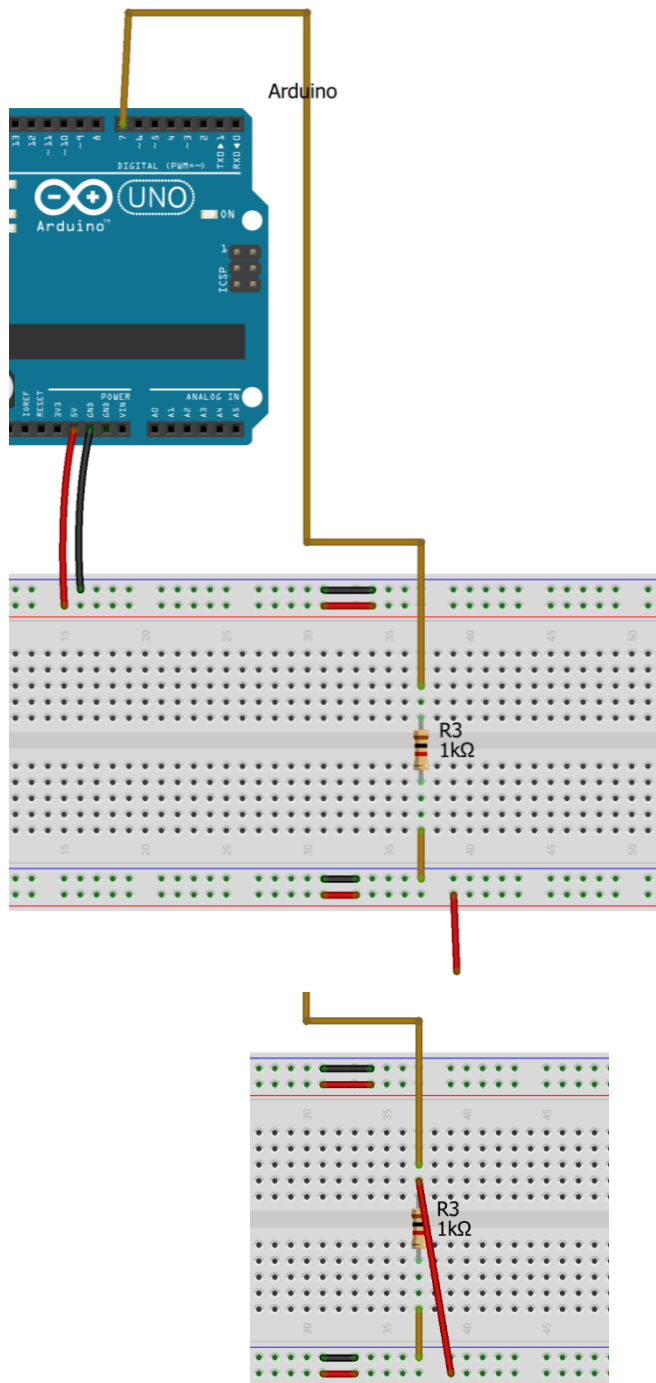
Das Steckbrett ist zur Durchkontaktierung mit Brücken zu versehen. Hierbei sind jeweils die rot-markierten Leisten untereinander zu verbinden, analog dazu die blauen Leisten.



Der Lüfter wird einerseits durch den offenen Masseanschluss aus der Steckbuchse (dunkelblau) mit der GND-Schiene (blau) des Breadboards verbunden. Die gelbe Leitung der Pulsweitenmodulation (PWM) des Lüfters wird mit dem DIO 5 des Arduino verbunden. Der verbleibende Draht (hellblau) ist der Tachoanschluss und bleibt frei.

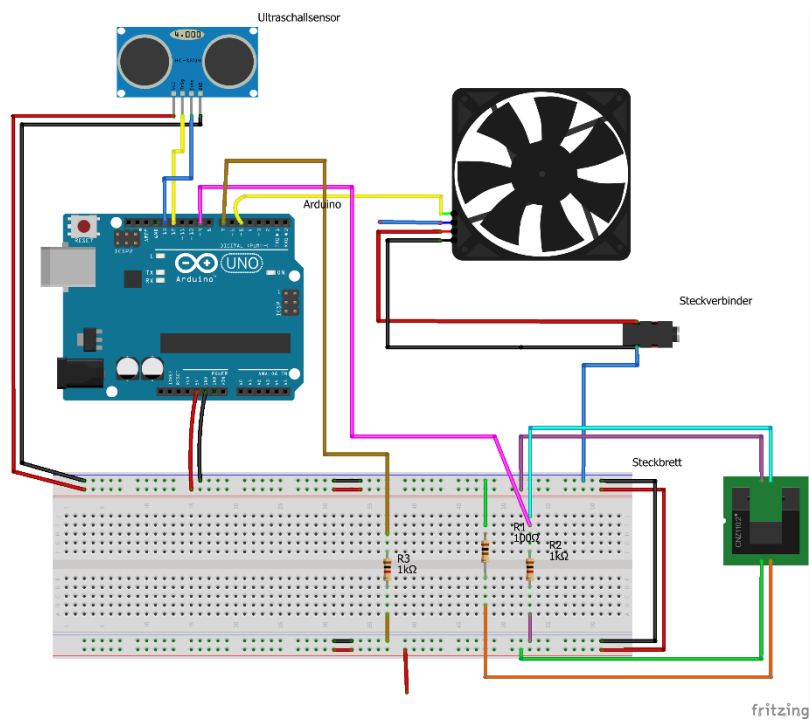
Die Anschlussmarkierungen sind auf der Stirnseite der Lichtschranke aufgegossen.

Die beiden +Pole sind jeweils über ein separates Kabel mit der roten +Versorgungsschiene auf dem Breadboard zu verbinden. Der D Anschluss wird über einen 1kΩ- Widerstand gegen GND angeschlossen. Vor dem Widerstand ist noch ein Anschluss auf DIO 9 zum Arduino anzuschließen. Der E Anschluss wird mit einem 100Ω- Widerstand gegen GND abgeführt.

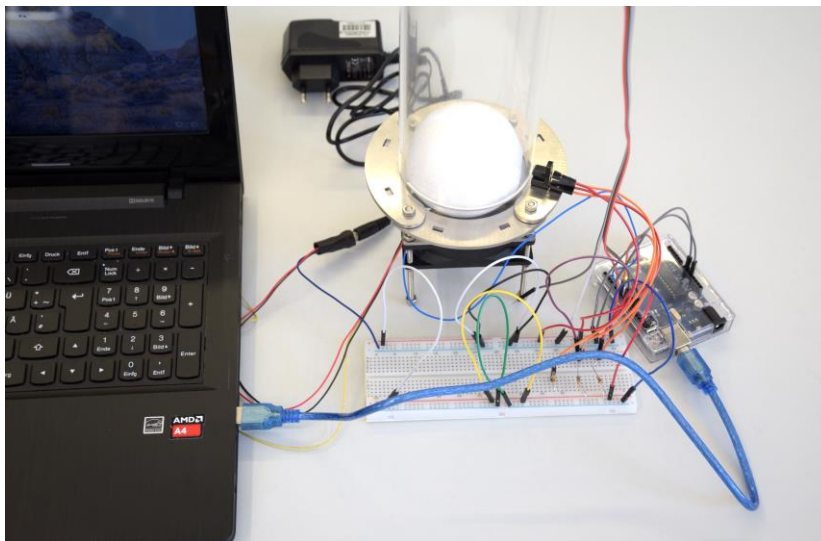


Als Schalter dient eine offene +Leitung. Außerdem ist eine Leitung vom DIO 7 des Arduino kommend mit einem 1kΩ Widerstand gegen GND abzuführen. Im Standardfall liegt damit FALSE am Arduino an.

Wird die +Leitung am Widerstand, also parallel zur DIO 7-Leitung angeschlossen, ist der Schalter geschlossen und zeigt TRUE.



Komplettes Schaltbild



Fertig verdrahteter Aufbau

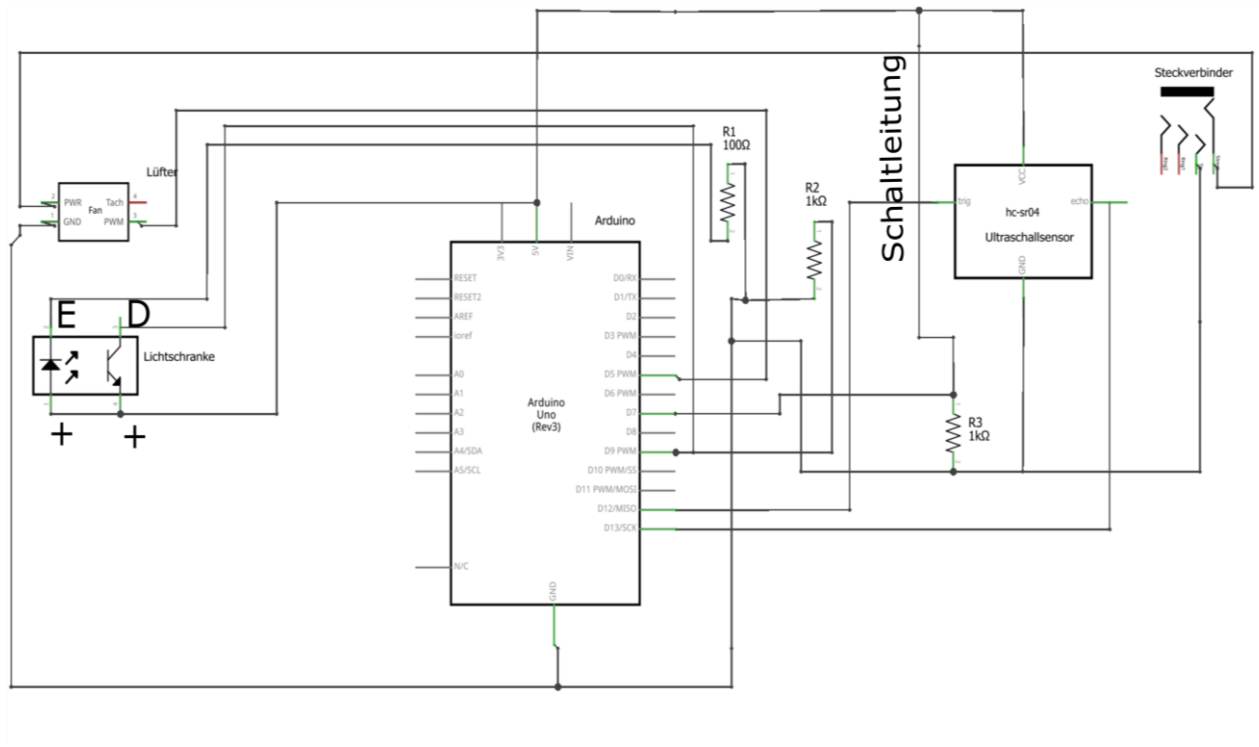


Abbildung 8: Schaltplan des Versuchsaufbaus

IV.4 Arduino Software

Die Software zum Programmieren des Arduino nennt sich Arduino IDE (Integrated Development Environment) und kann unter: <https://www.arduino.cc/en/software> heruntergeladen werden. Nach dem Installieren kann eine Verbindung zum Arduino aufgebaut werden. Hierzu ist der Arduino über das USB-Interface mit dem Rechner zu verbinden und die passende USB-Schnittstelle unter „Werkzeuge/Port“ auszuwählen. Hier können je nach Rechner und vorhandener USB-Ports verschiedene Werte einzustellen sein. Da es sich um eine endliche Anzahl von Ports handelt, hilft im Zweifelsfall die Devise: Ausprobieren, es kann nichts kaputt gehen:

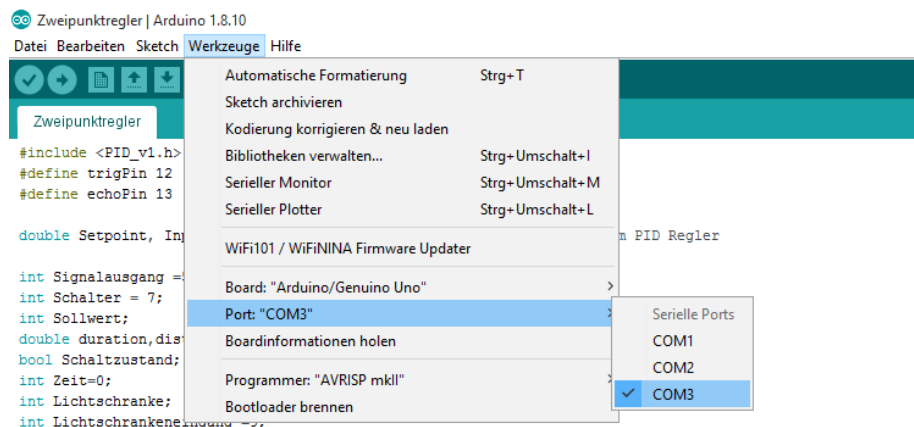


Abbildung 9: Auswählen des Ports. Dieser kann individuell variieren.

Die zum Flashen, also zum Beschreiben des Mikrokontrollers notwendige Hardware-Information ist unter „Werkzeuge/Board“ einzustellen. Bei den verwendeten Boards handelt es sich um Arduino UNO Boards mit dem Chip AT MEGA 328p. Dies wird in Abbildung 10 dargestellt:

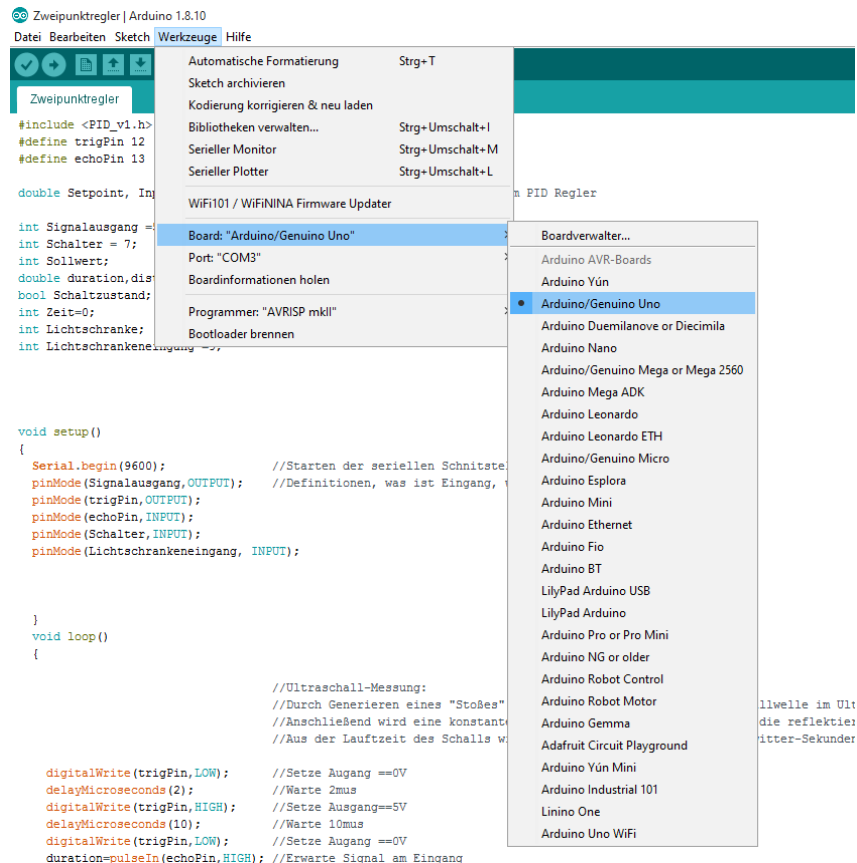



Abbildung 10: Auswählen des Boards. Hier muss Arduino UNO eingestellt werden (Kofferpraktikum)

Wenn alles eingestellt ist, testen Sie das System am einfachsten mit dem Programm LED Blink. Dieses ist unter „Datei/Beispiele/Basics/Blink“ zu finden. Wenn dieses Programm geöffnet ist, klicken Sie auf . Anschließend können Sie im Ausgabefenster unten den Prozess beobachten. Es folgt ein Debugging, also ein Prüfen auf Syntaxfehler und anschließend der Buildprozess. Hierbei werden die in verständlicher Programmiersprache ausgeführten Anweisungen auf Bit/Byte-Ebene übersetzt und in Form von Spannungssignalen auf den Controller gespielt. Anschließend sollte die LED auf dem Arduino blinken.

Die mitgelieferten Standardprogramme für das Praktikum RK benötigen zur Ausführung, bzw. zur richtigen Funktion eine sog. Bibliothek. Die „PID“ Bibliothek von Brett Beauregard muss zuvor installiert werden. Dies geschieht über „Werkzeuge/Bibliotheken verwalten...“ Hier kann in der Suchleiste nach der entsprechenden Bibliothek gesucht werden. Durch Installieren wird diese nutzbar. Anschließend kann das bereitgestellte Programm ausgeführt werden. Dies wird in Abbildung 11 dargestellt:

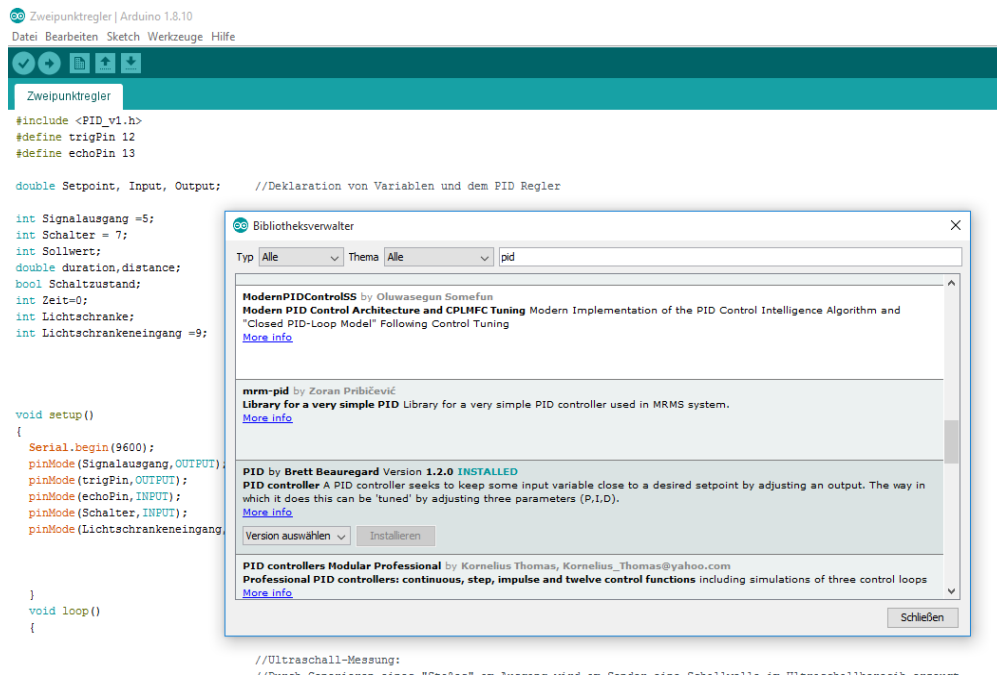


Abbildung 11: Im Bibliotheksverwalter kann die passende PID Bibliothek installiert werden.

Zu beachten ist zwingend, dass die Programme über „Datei/Öffnen“ geöffnet werden. Die Zip-Ordner sind vorher zu entpacken. Der Datei-Name der Programme und der Ordner darf nicht verändert werden. Dies kann sonst zu Problemen führen.

IV.5 Programm

Die bereitgestellten Programme umfassen sämtliche Funktionalitäten, die für die Durchführung des Praktikums notwendig sind. Hierfür sind folgende Programme nutzbar:

- PWM.ino
- Zweipunktregler.ino
- PID_Regler.ino

Der grundsätzliche Aufbau des Programms ähnelt sehr stark einer Routine in Hochsprache, etwa C++. Zu Beginn werden durch inkludieren der benötigten Header und Bibliotheken verschiedene Funktionalitäten nutzbar gemacht.

Hieran schließt sich die Definition von Variablen an. Input, Output, Zähler und ähnliches können und müssen hier definiert werden, um im späteren Programm darauf zugreifen zu können (Eine Definition im Main ist auch möglich, verlängert aber die Zykluszeit).

Im Setup werden einmalige Zuweisungen getroffen, die später über den gesamten Programmablauf bestehen bleiben, etwa die Zuweisung, welche DIO (Digital Input Output) Input und welcher Output sein soll. Die Unterteilung in Setup und Main ist eine Notwendigkeit, die von der Arbeitsweise eines Mikrocontrollers herrührt: Dieser ist ein Einkern-Prozessor mit gewissen Speicherstellen (wenn man so will: Arbeitsspeicher) Die Zuweisung wie dieser Speicher genutzt wird, bzw. wie die Prozesse des Hauptprogramms abgearbeitet werden sollen (mit welcher Zeit) ist nicht ohne weiteres möglich.

Mikrokontroller können zwar z.B. in Assembler sehr hardwarenah programmiert werden, wodurch auch einige Funktionalitäten mehr genutzt werden können, die die Arduino-Oberfläche nur sehr umständlich oder gar nicht bereit stellt, allerdings würde dies hier zu weit führen.

Abschließend steht das Main-Programm (Hauptprogramm), das zyklisch durchlaufen wird. Sämtliche Befehle, die hierin aufgelistet sind, werden in jedem Zyklus ausgeführt.

Um nun eine Regelung vornehmen zu können, sind dementsprechend zunächst alle Variablen für den Regler und der Regler selbst definiert worden (INPUT, OUTPUT, Sollwert und myPID). Im Setup sind dem Regler noch die Regelparameter (K_P , K_I und K_D) übergeben worden.

Das Hauptprogramm misst zunächst den aktuellen Ballabstand. Dieser hat dabei seinen Maximalwert am Boden über dem Lüfter und wird als Istwert in den INPUT des Reglers geladen. Als Sollwert ist ein Float-Wert (Gleitkommazahl) vorgesehen, der zwischen 0 und d_0 , also dem Maximalabstand des Balls frei gewählt werden kann. Der Regler verarbeitet die gedrehte Anordnung des Wegemesssystems durch die Funktion „REVERSE“.

Durch Berechnen des Ausgabewertes des Reglers wird der OUTPUT auf den Ausgabepin geschrieben. Dieser Wert nimmt Werte zwischen 0 und 255 an. Hier ist zu beachten, dass nicht jedes Regelsystem diese Systemgrenzen aufweist. Entsprechend der Aufgabenstellung sind hierzu sinnvolle Werte zu ermitteln und dem Regler als Systemgrenze an entsprechender Stelle zu übergeben.

Außerdem sind für die weiteren Aufgaben Funktionalitäten vorgesehen. Beispielsweise kann durch Nutzen des Schalters ein einfacher Sprung realisiert werden.

Für den Zweipunktregler ist ebenfalls ein einzelnes Programm vorgesehen. Dieses Programm verkörpert jedoch nur den reinen Zweipunktregler ohne Hysterese und muss von Ihnen ergänzt werden.

IV.6 Messwertausgabe

Die Aufnahme der Messwerte zum Versuch wird mittels eines seriellen Monitors durchgeführt. Im Beispielpogramm sind hierzu die jeweiligen Befehle hinterlegt, die neben einem String für die Datenbeschriftung die jeweiligen Messwerte über die serielle USB-Schnittstelle an den PC senden. Unter „Werkzeuge/Serieller Monitor“ kann ein Ausgabefenster geöffnet werden, indem, nach verbinden und flashen des Controllers, eine zyklengesteuerte Ausgabe erscheint. Dies wird in Abbildung 12 dargestellt:

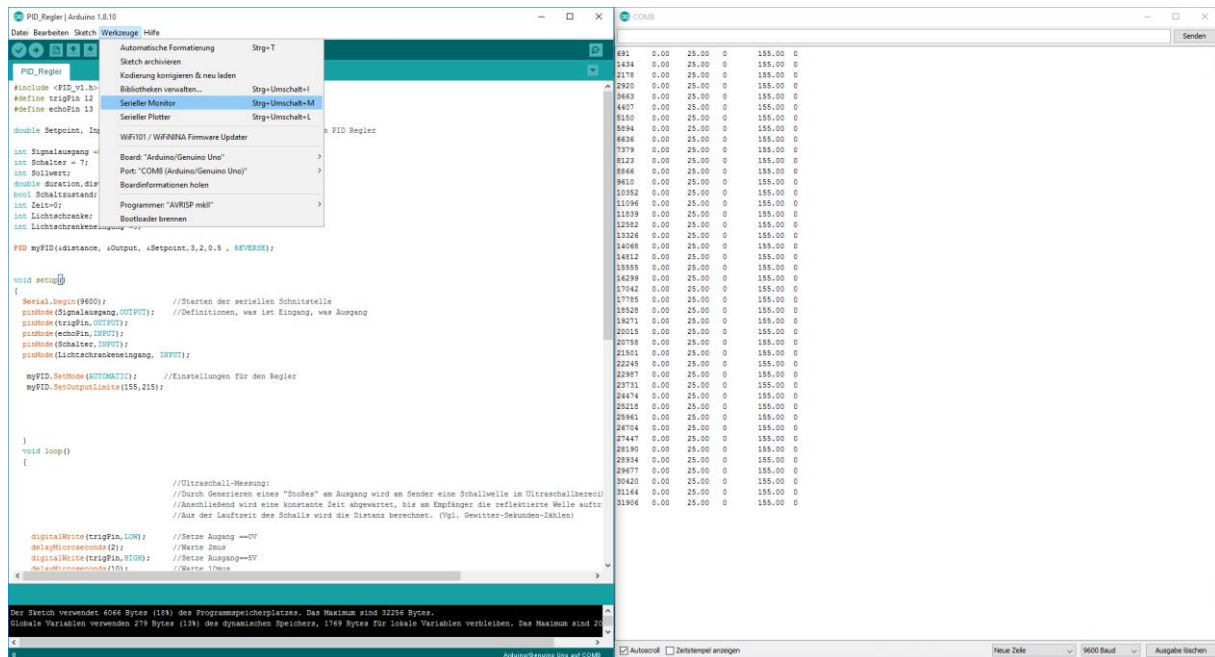


Abbildung 12: Durch öffnen des seriellen Monitors können die Messwerte in ein Tabellenkalkulationsprogramm geladen werden.

Diese Messwerte können durch „Ausgabe löschen“ gelöscht werden. Ein Übertragen in ein Tabellenkalkulationsprogramm ist mit Copy und Paste möglich. Beachten Sie hierbei evtl. auftretende Formatierungsprobleme (Dezimalzeichen beachten!).

IV.7 Inbetriebnahme

Da der Lüfter von unten nicht abgeschlossen ist, besteht **erhöhte Schnittgefahr bei laufendem Lüfter! Fassen Sie nie in den laufenden Lüfter!** Besondere Vorsicht ist bei den selbst hergestellten Aufbauten (Version ohne Koffer) geboten.



Zunächst wird die Verbindung zum Arduino hergestellt. Das Programm kann nun hochgeladen werden. Überprüfen Sie durch Öffnen des seriellen Monitors („Werkzeuge/Serieller Monitor“) ob ein Datentransfer über die serielle Schnittstelle stattfindet. Werden hier Daten gesendet, kann durch Einstecken des Netzteils der Motor gestartet werden.

V. Versuchsdurchführung

V.1 Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus der Regelstrecke „vertikales Rohr“, dem Stellglied „Lüfter“, dem Messglied „Ultraschallsensor“ und dem Regler „Arduino“. Die Position eines Styroporballes in dem Rohr wird über einen Ultraschallsensor bestimmt und durch einen Arduino-Mikrocontroller geregelt, indem dieser die Pulsweitenmodulation (PWM) des Lüfters vorgibt, wodurch dessen Drehzahl und damit der Luftstrom im Rohr geregelt wird. Eine zusätzliche Last kann aufgebracht werden, indem der Rohrdurchmesser über dem Lüfter mit einem Schieber verengt werden kann. Eine Lichtschranke dient zur Registrierung des Schiebers. Bauen Sie den Versuch wie in Abschnitt IV erläutert auf.

Stecken Sie das Netzteil auf keinen Fall in den Arduino, es ist nur für den Lüfter vorgesehen.

V.2 Charakterisierung der Regelstrecke

Steuern Sie den Lüfter mit „PWM.ino“ direkt an, um die Regelstrecke zu charakterisieren. Der PWM-Ausgang kann dabei Werte von 0 bis 255 einnehmen. Testen Sie ausreichend viele PWM-Werte, wobei für jede Messung genügend Zeit bis zum Erreichen eines Gleichgewichtes veranschlagt werden sollte. Tragen Sie die Mittelwerte der vom Ball erreichten Höhen im Gleichgewicht mit deren zweifacher Standardabweichung als Fehler gegen die PWM-Werte in einem Diagramm auf. Beachten Sie, dass der Ultraschallsensor die Distanz d von oben misst und Sie die Höhe h durch das Referenzieren mit der Ruheposition des Styroporballes d_0 ermitteln müssen. Notieren Sie sich die Ruheposition des Styroporballes d_0 , die Untergrenze für den PWM-Wert y_{\min} bis der Styroporball die Ruheposition gerade verlassen hat und die Obergrenze für den PWM-Wert y_{\max} bis der Styroporball das obere Ende des Rohres gerade noch nicht erreicht hat. Achten Sie dabei Sog-Effekte, die am oberen Rohrende auftreten können und vermeiden Sie diese, indem Sie ein im Zweifel etwas kleineres y_{\max} wählen.

V.3 Charakterisierung eines Zwei-Punkt-Reglers

Benutzen Sie das Programm „Zweipunktregler.ino“. Hier ist ein einfacher Zweipunktregler ohne Hysterese programmiert. Im Skript werden y_{\min} und y_{\max} benötigt. Lassen Sie den Styroporball durch Ausführen des Programmes regeln und messen Sie die Ballhöhe und den PWM-Wert für mehrere Perioden der Schwingung.

Ergänzen Sie nun das Programm um eine Hysterese, indem Sie die bedingten Anweisungen des Programmes (Stichwort: conditional statements, vgl. Abschnitt II.2) modifizieren. Achten Sie hierbei auf die Vorzeichen und darauf, dass die Balldistanz und nicht die Höhe geregelt wird. Dokumentieren Sie die Änderung des Programmcodes im Protokoll. Lassen Sie den Styroporball erneut regeln. Messen Sie auch hierbei die Ballhöhe und den PWM-Wert für mehrere Perioden der Schwingung. Zweckmäßigerweise sollte der Ball in der Mitte des Rohres geregelt werden, da hier der Einfluss von Randeffekten am geringsten ist und die größte Hysterese möglich ist. Wählen Sie die Weite der Hysterese groß genug, dass sie sich signifikant auf die Frequenz und Amplitude auswirkt.

Tragen Sie die Werte der Ballhöhe beider Fälle in einem Diagramm gegen die Zeit für mindestens eineinhalb Perioden auf. Markieren Sie den verwendeten Sollwert im Diagramm. Bestimmen Sie für die Ballhöhe die Amplitude A und die Frequenz f für beide Fälle. Nutzen Sie hierbei mehrere Nulldurchgänge für die Bestimmung der Frequenz. Welchen Effekt hat die Einführung einer Hysterese auf die Amplitude und die Frequenz?

Optional: Ändern Sie die Weite der Hysterese und gehen Sie wie zuvor vor. Welchen Effekt hat die Weite der Hysterese auf die Amplitude und die Frequenz?

V.4 Proportionalregler

Gehen Sie wie im Abschnitt III.1 beschrieben vor. Benutzen Sie das Programm „PID_Regler.ino“. Im Skript werden y_{\min} und y_{\max} benötigt. Stellen Sie zunächst einen beliebigen Wert von K_P ein und belassen Sie die Werte von K_I und K_D auf 0. Lassen Sie den Ball auf die Mitte des Rohres regeln und beobachten Sie, ob eine Oszillation nach dem Einschwingprozess auftritt. Falls keine Oszillation auftritt, so erhöhen Sie K_P , falls eine Oszillation auftritt, so senken Sie K_P . Es bietet sich bei der Änderung der Werte an, in Vielfachen des vorher eingesetzten Wertes zu denken. Beispielsweise können Sie die Hälfte oder das Doppelte des vorherigen Wertes nehmen, um die möglichen Werte schneller einzugrenzen. Nähern Sie sich auf diese Weise zunächst grob dem Wert von $K_{C,krit}$ an. Für eine genaue Bestimmung stellen Sie ein K_P ein, das in der Nähe von $K_{C,krit}$ liegt, aber bei dem noch keine Oszillation nach dem Einschwingprozess vorliegt. Erhöhen Sie nun den Wert schrittweise, bis sich eine stabile Oszillation nach dem Einschwingprozess ergibt. Ermitteln Sie für $K_{C,krit}$ die dazugehörige Periodendauer T_{krit} der Oszillation.

Messen Sie nun für die folgenden drei Fälle die Regelung des Systems:

$$K_P = \frac{1}{3} \cdot K_{C,krit} \quad K_P = K_{C,krit} \quad K_P = 3 \cdot K_{C,krit}$$

Lassen Sie den Styroporball durch Ausführen des Programmes auf die Mitte des Rohres regeln und messen Sie die Ballhöhe und den PWM-Wert ausreichend lange. Im Falle einer Oszillation messen Sie für mehrere Perioden der Schwingung nach dem Einschwingprozess. Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Ballhöhen und PWM-Werten nach dem Einschwingprozess jeweils in einem Diagramm dar. Markieren Sie den verwendeten Sollwert im Diagramm mit den Ballhöhen. Untersuchen Sie die Regelung in Bezug auf die Amplitude A der Schwingung und der konstanten Regelabweichung e_r . Geben Sie e_r als die relative Abweichung in Prozent bezogen auf den Sollwert an. Wie verhalten sich die zeitlichen Verläufe der PWM-Werte in den drei Fällen und mit welchen Typen von mathematischen Funktionen können diese beschrieben werden?

V.5 Ziegler-Nichols Einstellung

Berechnen Sie anhand von $K_{C,krit}$ und T_{krit} die Werte von K_G , T_N und T_V nach den in Abschnitt III.1 aufgeführten Formeln. Da die verwendete Arduino PID-Bibliothek die Konstanten K_P , K_I und K_D verwendet, gilt:

$$K_P = K_C$$

$$K_I = \frac{K_C}{T_N}$$

$$K_D = K_C \cdot T_V$$

Notieren Sie alle berechneten Werte in ihrem Protokoll. Nutzen Sie das Skript „PID_Regler.ino“ und stellen Sie den PID-Regler mit diesen Werten ein. Führen Sie nun eine Sprungantwort aus und Messen Sie die Reaktion des Systems. Sie messen die Sprungantwort, indem Sie nach einer Zeit den Sollwert des Systems durch den Schalter ändern (vgl. Abschnitt IV.3) und die Reaktion des Systems messen. Wählen Sie hierfür einen unteren Sollwert, bei dem der Regler aktiv regelt und der Ball nicht mehr auf dem Lüfter aufliegt. Wählen Sie einen oberen Sollwert, bei dem der Ball noch genügend Abstand zum oberen Rohrende hat, da hier Sog-Effekte auftreten können, die die Form der Sprungantwort beeinflussen können.

Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Ballhöhe graphisch dar. Markieren Sie die verwendeten Sollwerte im Diagramm. Untersuchen Sie die Sprungantwort in Bezug auf t_1 , t_2 , x_{OS} und e_r . Nutzen Sie ein $\pm 7,5$ %-Band für die Bestimmung der beiden Zeiten. Geben Sie x_{OS} und e_r als die relativen Abweichungen in Prozent bezogen auf den Sollwert an.

Führen Sie nun einen Lastabwurf durch. Stellen Sie hierfür einen Sollwert ein und lassen das System das Gleichgewicht erreichen. Stecken Sie nun den Schieber in den dafür vorgesehenen Schlitz in dem Plexiglasrohr, sodass die Lichtschranke durch den Schieber blockiert wird. Stellen Sie sicher, dass der Regler im gedrosselten Zustand aktiv regelt und nicht dauerhaft y_{max} als PWM-Wert ausgegeben wird. Falls dies der Fall sein sollte, senken Sie den Sollwert. Nach erneut erreichtem Gleichgewicht ziehen Sie nun möglichst schnell den Schieber heraus und messen die Reaktion des Systems auf den Lastabwurf. Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Ballhöhe graphisch dar. Machen Sie deutlich, wann der Lastabwurf stattgefunden hat und markieren Sie den verwendeten Sollwert. Untersuchen Sie den Lastabwurf in Bezug auf x_{OS} , t_1 und σ_s . Hierbei ist x_{OS} die relative Abweichung des Überschingers bezogen auf den eingestellten Sollwert, t_1 die Zeit, ab der das $\pm 7,5$ %-Band nach dem Überschinger wieder erreicht wird und σ_s die Standardabweichung der Messwerte im Gleichgewichtszustand nach dem Lastabwurf.

V.6 Lambda Einstellung

Gehen Sie wie im Abschnitt III.2 beschrieben vor. Führen sie eine unregelte Sprungantwort aus, indem Sie mithilfe des Schalters den PWM-Wert von y_{min} nach y_{max} ändern. Nutzen Sie hierfür das Programm „PWM.ino“. Messen Sie die Reaktion des Systems. Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Ballhöhe graphisch dar und ermitteln Sie die Werte von K' , t_t und τ .

Berechnen Sie die Werte von K_c , T_N und T_V nach den in Abschnitt III.2 aufgeführten Formeln und daraus die Konstanten K_P , K_I und K_D , wobei $N=3$ gilt. Nutzen Sie wie zuvor das Skript „PID_Regler.ino“ und stellen Sie den PID-Regler mit diesen Werten ein.

Führen Sie nun eine Sprungantwort des Systems aus und testen Sie den Regler durch einen Lastabwurf. Analysieren Sie beide Messungen wie in Abschnitt V.5 beschrieben. Nutzen Sie dabei für die Vergleichbarkeit die gleichen Sollwerte wie zuvor.

Diskutieren Sie Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Ziegler-Nichols Einstellung und der Lambda Einstellung in Bezug auf die gemessenen Sprungantworten und Lastabwürfe.

V.7 Optimierung eines Reglers

Optional: Wählen Sie entweder die Ziegler-Nichols Einstellung oder die Lambda Einstellung aus. Versuchen Sie Anhand der Tabelle 1 aus Abschnitt III die Einstellung in Bezug auf t_1 , t_2 , x_{0s} und e_r hin zu optimieren. Führen Sie dann eine Sprungantwort des Systems aus und testen Sie den Regler durch einen Lastabwurf. Analysieren Sie beide Messungen wie in Abschnitt V.5 beschrieben. Vergleichen Sie ihren optimierten Regler mit dem ursprünglichen Regler und diskutieren Sie die Veränderungen.

VI. Hinweise zur Protokollanfertigung

Das Protokoll ist von der Gruppe eigenständig anzufertigen. Vermerken Sie bitte, welchen Versuchsaufbau (Koffer oder Eigenbau) Sie verwendet haben. Im Falle des Eigenbaus sollte dieser mittels Bildaufnahme dokumentiert und kurz erläutert werden. Beachten Sie, dass alle Messwerte und berechneten Parameter aus Werten und den dazugehörigen Einheiten bestehen. Stellen Sie sicher, dass in ihren Diagrammen die Einzelmesswerte als Messpunkte gut erkennbar und die Achsenbeschriftung vollständig sind.

VII. Quellen

- [1] Schulz, G., Graf, K., Regelungstechnik 1, 2015, Walter de Gruyter GmbH, Berlin Boston.
- [2] Lunze, J., Regelungstechnik 1, 2016, Springer-Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg.
- [3] Ziegler J.G. and Nichols N.B., *Optimum settings for automatic controllers*, Trans. ASME, pp. 759-768, 1942
- [4] Dahlin E.B., *Designing and Tuning Digital Controllers*, Instr and Cont Syst, 41 (6), 77, 1968.
- [5] William S. Levine, W.S (Editor), *CRC Control Handbook, Chapter 72, "Control of the Pulp and Paper Making Process"*. CRC Press and IEEE Press, 1996. Chapter 72 – Bialkowski W
- [6] Bernstein, H., *Bauelemente der Elektronik*, 2015, De Gruyter Oldenbourg, Berlin, München.