

# Regelungstechnik verstehen und erleben

## Realisierung einer PID-geregelten Wippe mit Ball unter Verwendung eines Mikrocontrollers

ANNA HAAB – TONIO MAHR – MIRIAM CLINCY

Mit zunehmender Automatisierung und Digitalisierung gewinnt sowohl im Alltag als auch in der Industrie die Regelungstechnik immer weiter an Bedeutung. Im Folgenden soll ein Versuch vorgestellt werden, der das Ausbalancieren eines Balls auf einer Wippe unter Verwendung eines Mikrocontrollers als anschauliches Beispiel für einen Regelkreis nutzt. Die Funktionsweise der drei Regelglieder des realisierten PID-Reglers können dabei getrennt und in Kombination nachvollzogen werden.

Der Versuch wurde für das in Baden-Württemberg derzeit als Schulversuch angebotene Leistungsfach Naturwissenschaft und Technik (NwT) in der gymnasialen Oberstufe konzipiert, eignet sich aber auch für den Einsatz in ähnlichen technikbezogenen Unterrichtsfächern am Gymnasium oder für den Unterricht in berufsbildenden Schulen.

### 1 Einleitung

Regelkreise werden von den Schüler/innen im Alltag selten bewusst wahrgenommen, obwohl sie damit ständig in Berührung kommen. Egal ob wir die Klopplung betätigen und sich der Spülkasten wieder mit genau der richtigen Menge Wasser füllt, oder ob wir die Heizung auf eine angenehme Temperatur einstellen. Im Hintergrund sorgt ein Regelkreis dafür, dass die Dinge so funktionieren, wie wir es gewohnt sind. Dabei kommen unterschiedliche Reglertypen zum Einsatz. Während Zweipunkt- oder Dreipunkt-Regler durch eingängige Unterrichtsversuche bereits in der Mittelstufe behandelt werden können, ist die Einführung eines PID-Reglers oft mit größeren Schwierigkeiten verbunden. Zum einen muss die Mathematik dahinter durchdrungen werden, zum anderen lassen sich die Reglertypen je nach Anwendungsfall nicht immer klar unterscheiden. Mit dem hier vorgestellten Versuch werden die Funktionsweisen dagegen einfach demonstriert, da die Auswirkungen der einzelnen Regelanteile (P-, I- und D-Regler) auch getrennt und stets direkt beobachtet werden können. Ausgehend davon verdeutlicht es auch die dahinterstehende Mathematik sehr eingängig.

Ziel des Schülerversuchs ist es, einen Ball auf einer Wippe auszubalancieren. Dazu muss die Position des Balls geregelt werden. Die Position wird mit einem Infrarot-Sensor gemessen. Ein Arduino verarbeitet die Eingabe über einen PID-Regelalgorithmus und steuert den Kippwinkel der Wippe über einen Servomotor an. P-, I- und D-Regler müssen dazu optimal auf das System eingestellt werden. Der Versuch kann den Schüler/innen ermöglichen, handlungs- und problemorientiert ein vertieftes Verständnis für anspruchsvolle Aspekte der Regelungstechnik zu erlangen.

### 2 Die Aufgabe der Regelungstechnik

Allgemein gesagt, befasst sich die Regelungstechnik mit der Herausforderung, einen sich zeitlich verändernden Prozess so zu beeinflussen, dass dieser in einer vorgegebenen Weise abläuft. Dies wird realisiert, indem eine von außen beeinflussbare Größe fortlaufend erfasst, mit der Führungsgröße verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird (LUNZE, 2016).

Zwei Beispiele aus dem Alltag, ein biologisches und ein technisches, illustrieren die allgemeine Beschreibung der Hauptaufgabe der Regelungstechnik gut: Wenn die Sonne scheint, regelt das Auge die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut, indem der Schließmuskel der Pupille diese weitet oder verengt. Ein Thermostat regelt die Temperatur in der Wohnung, indem die Heizung so angesteuert wird, dass sich die gewünschte Temperatur im Raum einstellt. Die beiden Beispiele verdeutlichen, dass die von außen beeinflussbare Größe so ausgewählt werden muss, dass das definierte Ziel erreicht wird. Da diese Auswahl in Abhängigkeit davon getroffen wird, inwieweit das Ziel bereits erreicht ist, entsteht ein Regelkreis, der aus dem gegebenen Prozess und einer für dieses Ziel zu schaffenden Einrichtung, dem Regler, besteht (LUNZE, 2016).

Grafisch kann dies mithilfe des allgemeinen Regelkreises (Abb. 2) dargestellt werden.

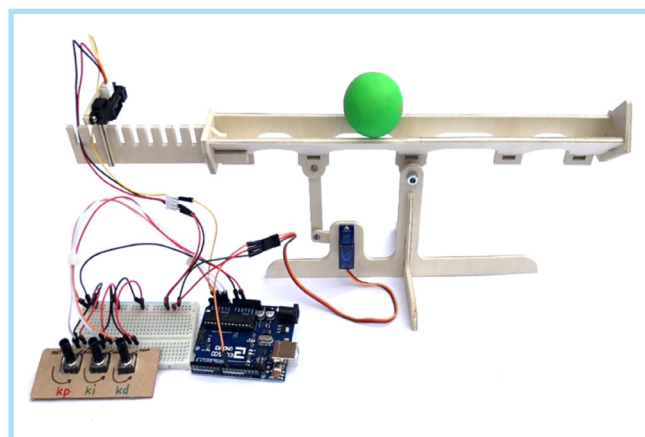


Abb. 1. Beispielhafter Aufbau der Wippe mit Ball und Potentiometern

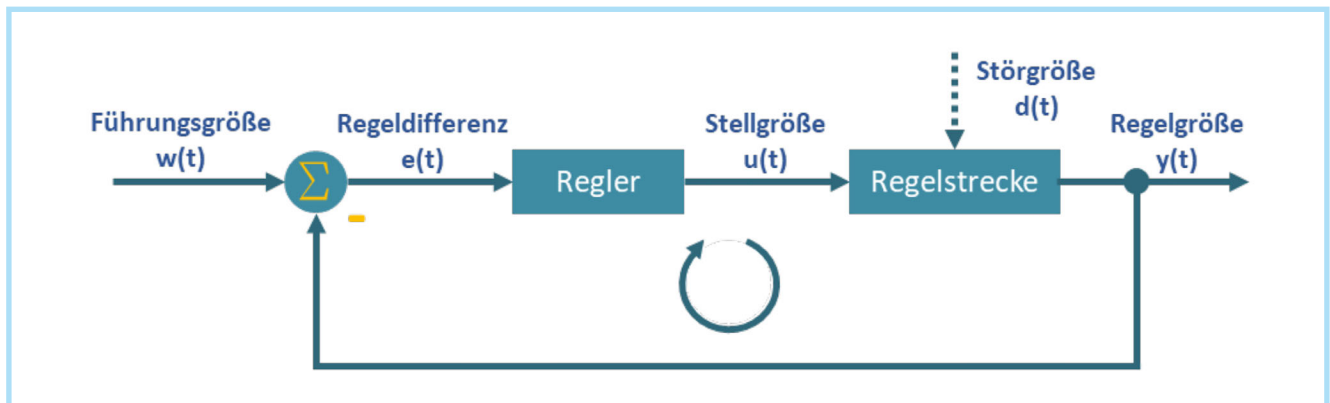


Abb. 2. Der allgemeine Regelkreis

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, hängt die Regelgröße  $y(t)$  von der Stellgröße  $u(t)$  und einer Störgröße  $d(t)$  ab, die nicht beeinflusst werden kann. Ziel der Regelung ist es, die Regelgröße der vorgegebenen Führungsgröße  $w(t)$  nachzuführen, und das so, dass für den stationären Zustand zum Zeitpunkte  $t$  gilt:  $y(t) = w(t)$ . Der Regler muss deshalb die Stellgröße  $u(t)$  so vorgeben, dass der Einfluss der Störgröße auf die Regelgröße kompensiert und die Regelgröße der Führungsgröße angepasst wird. Neben dem gewünschten Wert  $w(t)$  steht dem Regler hierfür auch der aktuelle Wert  $y(t)$  der Regelgröße zur Verfügung (TIESTE & ROMBERG, 2015).

Aufgrund des Prinzips der Rückkopplung kann der Regler die Regeldifferenz  $e(t) = w(t) - y(t)$  bilden. In Abhängigkeit dieser Regeldifferenz wird die Stellgröße so vorgegeben, dass das Regelziel möglichst schnell erreicht wird. Der Regler stützt sich also – im Gegensatz zu einer Steuerung – nicht nur auf die Führungsgröße  $w(t)$ , sondern auch auf den aktuellen Istwert  $y(t)$  der Regelgröße (LUNZE, 2016).

Bei der Wippe ist die Führungsgröße  $w(t)$  die vorgegebene Position des Balls in der Mitte der Wippe. Die Regelgröße  $y(t)$  entspricht der aktuellen Position des Balls. Daraus kann die Regeldifferenz  $e(t)$  als Differenz zwischen vorgegebener und aktueller Position ermittelt werden. Diese Regeldifferenz dient als Eingangsgröße für den hier realisierten PID-Regler, der den Winkel des Servomotors als Stellgröße  $u(t)$  ausgibt. Die Regelstrecke besteht aus dem System Wippe mit Ball, dem Infrarot-Sensor zum Ermitteln der Ballposition, sowie dem Servomotor, der als Aktor den Winkel der Wippe steuert. Im vorgestellten Versuch wirken unterschiedliche Störgrößen  $d(t)$ , wie die Reibung des Balls auf der Wippe, Spiel und Reibung in den Gelenken und der Luftwiderstand für Ball und Wippe, auf das System ein.

### 3 Der PID-Regler

Ein PID-Regler setzt sich aus einem parallelgeschalteten P-Regler, I-Regler und einem D-Regler zusammen. Die Stellgröße  $u(t)$  wird dabei aus der Summe des Proportional-, Integral- und Differenzial-Anteils der Regeldifferenz  $e(t)$  gebildet (Abb. 3).

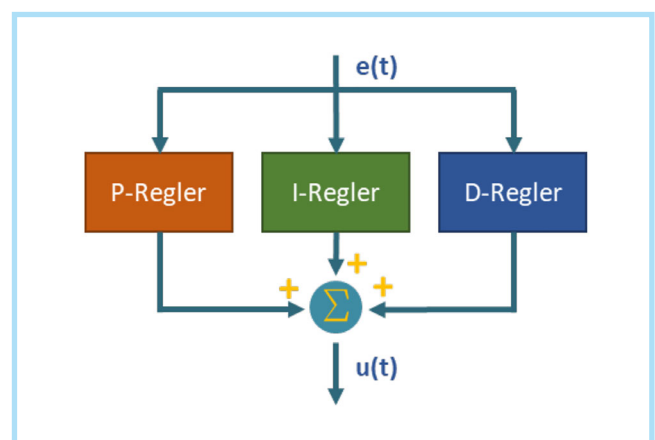


Abb. 3. Der PID-Regler

Der P-Regler stellt die Stellgröße  $u(t)$  proportional zum aktuellen Wert der Regeldifferenz  $e(t)$  ein. Für den P-Anteil der Stellgröße gilt daher die Beziehung

$$u_p(t) = k_p \cdot e(t). \quad \text{Gl. 1}$$

$k_p$  ist dabei der Proportionalbeiwert des P-Reglers, der beim Reglerentwurf eingestellt werden kann (ZACHER & REUTER, 2017).

Im Versuch ergibt sich bei einer reinen P-Regelung folgender Zusammenhang: Je weiter der Ball aus der Mitte der Wippe entfernt ist, desto größer wird die entgegengerichtete Auslenkung der Wippe. Wird die P-Regelung der Wippe beobachtet, ist zu erkennen, dass das System zwar schnell auf Regeldifferenzen reagieren kann, sich jedoch im eingeschwungenen Zustand eine bleibende Regeldifferenz einstellt. Das ist eine direkte Konsequenz daraus, dass die Stellgröße proportional zur Regeldifferenz ist, denn die Wippe regelt immer erst dann der Bewegung des Balls entgegen, wenn dieser die Nulllage passiert hat, sodass der Ball seinen stationären Zustand in der Mitte der Wippe nicht erreichen kann und das Regelziel nicht erreicht wird.

Um eine bleibende Regeldifferenz von Null zu erreichen, muss ein I-Regler eingesetzt werden. Bei diesem ist die Stellgröße sowohl vom aktuellen Wert der Regeldifferenz als auch von den

Werten der Regeldifferenz in der Vergangenheit abhängig. Sein Funktionsprinzip beruht auf der Integration der Regeldifferenz. Analytisch ergibt sich für den I-Anteil der Stellgröße  $u(t)$  die Beziehung

$$u_i(t) = k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad \text{Gl. 2}$$

Wird auch hier die reine I-Regelung der Wippe betrachtet, kann beobachtet werden, dass aus der Integration der Regeldifferenz resultiert, dass die entgegengerichtete Auslenkung der Wippe immer größer wird, je länger sich der Ball außerhalb der Mitte befindet. Vorteil des I-Reglers ist allerdings, dass die Regeldifferenz zu Null wird und damit die vorgegebene und die ausgeglichene Position des Balls übereinstimmen. Ein Nachteil des ausschließlichen Einsatzes eines I-Reglers ist, dass das Einregeln im Vergleich zum P-Regler sehr lange dauert (LUNZE, 2016).

Der differenzielle Regler betrachtet im Gegensatz zum P- und I-Regler nicht den aktuellen Wert der Regeldifferenz oder das zeitliche Integral über diese, sondern die zeitliche Änderungsrate der Regeldifferenz. Bei einer reinen D-Regelung der Wippe ist zu beobachten, dass je schneller sich der Ball in eine Richtung bewegt, desto größer wird die entgegengerichtete Auslenkung der Wippe. Mathematisch lässt sich dies über die Ableitung der Regeldifferenz nach der Zeit modellieren. Für den D-Regler ergibt sich daher die Stellgrößenfunktion

$$u_d(t) = k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad \text{Gl. 3}$$

Der D-Regler zielt nicht darauf ab, die Regeldifferenz zu Null werden zu lassen, sondern darauf, dass sich die Regeldifferenz mit der Zeit nicht mehr ändert. Grundsätzlich muss daher der

D-Anteil bei einer Regelung über eine entsprechende Wahl des Proportionalbeiwerts  $k_d$  klein gehalten werden, da Rauschen auf dem Messsignal für die Regelgröße unvermeidbar ist und sich damit die gemessene Regeldifferenz kontinuierlich ändert (ZACHER & REUTER, 2017). Wird das System aus Wippe und Ball ausschließlich mit einem D-Regler geregelt, so ist der stationäre Zustand erreicht, sobald der Ball an einer willkürlichen Position zum Stehen kommt und er somit keine Geschwindigkeit mehr besitzt.

Werden P-Regler, I-Regler und D-Regler nun wie in Abbildung 3 parallelgeschaltet, resultiert daraus ein PID-Regler. Dieser kombiniert die Eigenschaften der einzelnen Regelglieder.

Mathematisch ausgedrückt, ergibt sich für die resultierende Stellgröße des PID-Reglers die Formel

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad \text{Gl. 4}$$

Ein PID-Regler regelt schnell (P- und D-Anteil) und besitzt keine bleibende Regeldifferenz (I-Anteil). Für das vorgegebene Anwendungsproblem im Versuch „Ausbalancieren eines Balls auf einer Wippe“ ist er also gut geeignet.

#### 4 Vorbereitung des Versuchs PID-Regelung einer Wippe mit Ball

Der Versuch PID-Regelung einer Wippe mit Ball kann von den Schüler/innen selbstständig durchgeführt werden. Hierfür wurde ein Bausatz für die Wippe entworfen. Für die Umsetzung des Versuchs werden zudem weitere elektronische Bauteile, ein Arduino und ein Versuchsleitfaden, der die Schüler/innen bei den einzelnen Schritten bis zur Realisierung der PID-geregelten Wippe begleitet, benötigt. Alle Komponenten wurden

so ausgewählt, dass sie in der Regel an Schulen verfügbar sind oder sich leicht und günstig beschaffen lassen. Für den Versuch wird benötigt:

- Leitfaden zum Versuch PID-Regelung einer Wippe mit Ball (siehe Online-beilage)
- 1x Arduino Uno mit USB-Kabel
- 1x Servomotor TS90A
- 1x IR-Abstandssensor GP2Y0A21YK0F
- 3x Potentiometer 10 kΩ linear
- 1x Steckbrett
- Verbindungskabel (mind. 17x Male Male)
- 1x Tischtennisball
- 1x Wippe aus Sperrholz (aus Pappel-Sperrholz A3 420 x 297 x 4 mm)
- 1x Zylinderschraube M5x25
- 3x Mutter M5

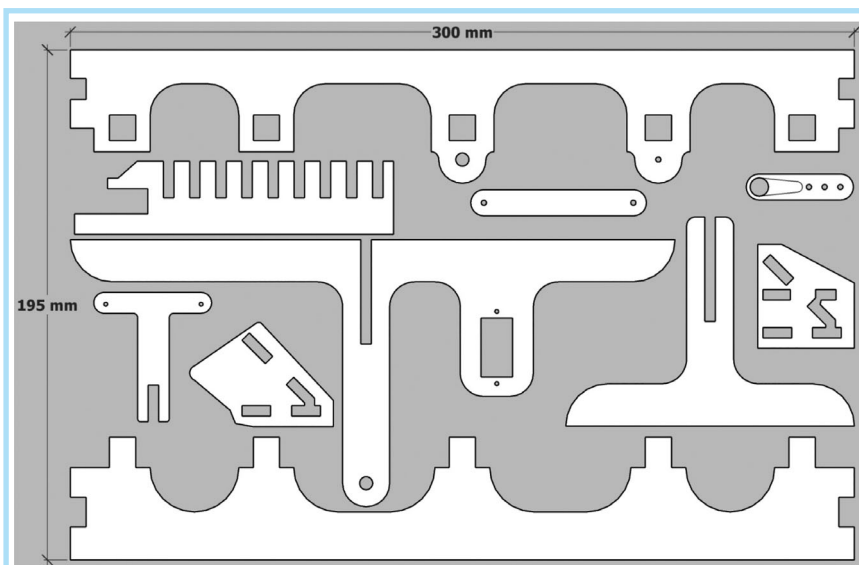


Abb. 4. Fräsvorlage für 4 mm Pappel-Sperr-Holz. Außenabmessungen: 300 x 195 mm – Modell selbst erstellt mit Trimble SketchUp

- 4x Unterlegscheibe M5
- 2x Zylinderschraube M3x16
- 4x Mutter M3
- 6x Unterlegscheibe M3

Die Wippe besteht aus 4 mm-Pappel-Sperrholz. Die Außenmaße der Fräsvorlage (Abb. 4) beschränken sich auf 195 x 300 x 4 mm. Die Fräsvorlage lässt sich dadurch auf der an Schulen verbreiteten Fräse „KOSY4“, die einen maximalen Fahrweg von 220 x 310 x 100 mm besitzt, an einem Stück fertigen. Die Fräsvorlage liegt im gängigen, plattformübergreifenden .dxf-Format vor.

Die Frästeile können ohne Werkzeug von den Schüler/innen zur fertigen Wippe zusammengesteckt werden. Auch die Gelenke lassen sich ohne Werkzeug montieren. Lediglich der Sensor sowie der Servomotor müssen vormontiert werden, falls kein Kreuzschlitzschraubendreher vorhanden ist. Das zugrundeliegende CAD-Modell (Abb. 5) wurde ebenfalls mit der Freeware-Lösung Trimble-SketchUp gefertigt, sodass Modifikationen jederzeit möglich sind.

Zur Messung der Position des Balls auf der Wippe wird der Infrarot-Abstandssensor Sharp GP2Y0A21YK0F mit einem Messbereich von 100–800 mm verwendet. Dieser Messbereich ist sinnvoll, da sich das ausgegebene Signal des Sensors umgekehrt proportional verhält, sodass die Messgenauigkeit bei größerer Entfernung abnimmt (Abb. 6).

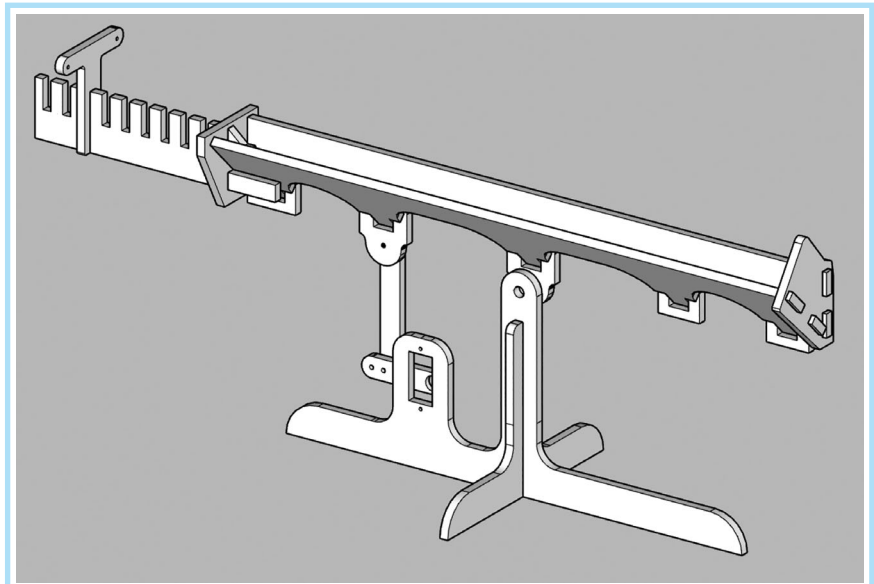


Abb. 5. CAD-Modell der Wippe – Modell selbst erstellt mit Trimble SketchUp

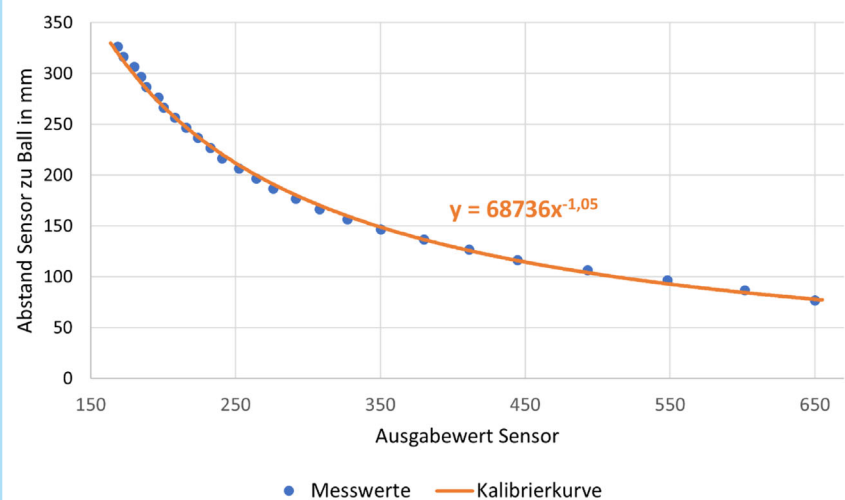


Abb. 6. Nichtlinearer Verlauf des IR-Abstandssensors und zugehörige Kalibrierkurve aus Beispielmessung – Grafik selbst erstellt mit Microsoft Excel

## 5 Durchführung des Versuchs PID-Regelung einer Wippe mit Ball

Nachdem die Wippe mithilfe eines Erklärvideos aufgebaut wurde, werden die Elektronikkomponenten angeschlossen. Die verwendeten Ports zum Ansteuern und Auslesen der einzelnen Komponenten sind fest vorgegeben, sodass der Programmcode universell einsetzbar ist. Die schematische Verschaltung der einzelnen Komponenten und die Pin-Belegung liegen dem Versuch bei (Abb. 7).

Die anschließende Durchführung des Versuchs ist für 8 Unterrichtsstunden vorgesehen und wird mithilfe von Arbeitsblättern angeleitet, so dass sich diese Unterrichtseinheit in besonderem Maße auch als Heimversuch eignet.

**Vorbereitung des Versuchs:** Als Anknüpfung an das Vorwissen zur Regelungstechnik wiederholen vorbereitende Arbeitsaufträge den allgemeinen Aufbau eines Regelkreises und identifizieren die entsprechenden Komponenten im System „PID-Regelung einer Wippe mit Ball“ als Blockdiagramm. Die Schüler/innen erhalten weiterhin die Stellgrößenfunktion des Reglers. Darin sind die einzelnen Regelanteile klar zu erkennen (Gl. 4). Die nachfolgende Aufgabe besteht darin, wichtige Bestandteile, Merkmale, Eigenschaften oder Beziehungen systematisch aus der gegebenen Funktion herauszuarbeiten und so das Verständnis für die Umsetzung des PID-Reglers als Arduino-Code vorzuentlasten.

**Hypothesenbildung:** Auf Basis dieser Überlegungen werden nun Hypothesen aufgestellt, wie die einzelnen Regelanteile das



**Pinbelegung:**

Potentiometer kp: Analoger Eingang 0  
 Potentiometer ki: Analoger Eingang 1  
 Potentiometer kd: Analoger Eingang 2

IR-Abstandssensor: Analoger Eingang 3  
 Servo-Motor: Digitaler Ausgang 9

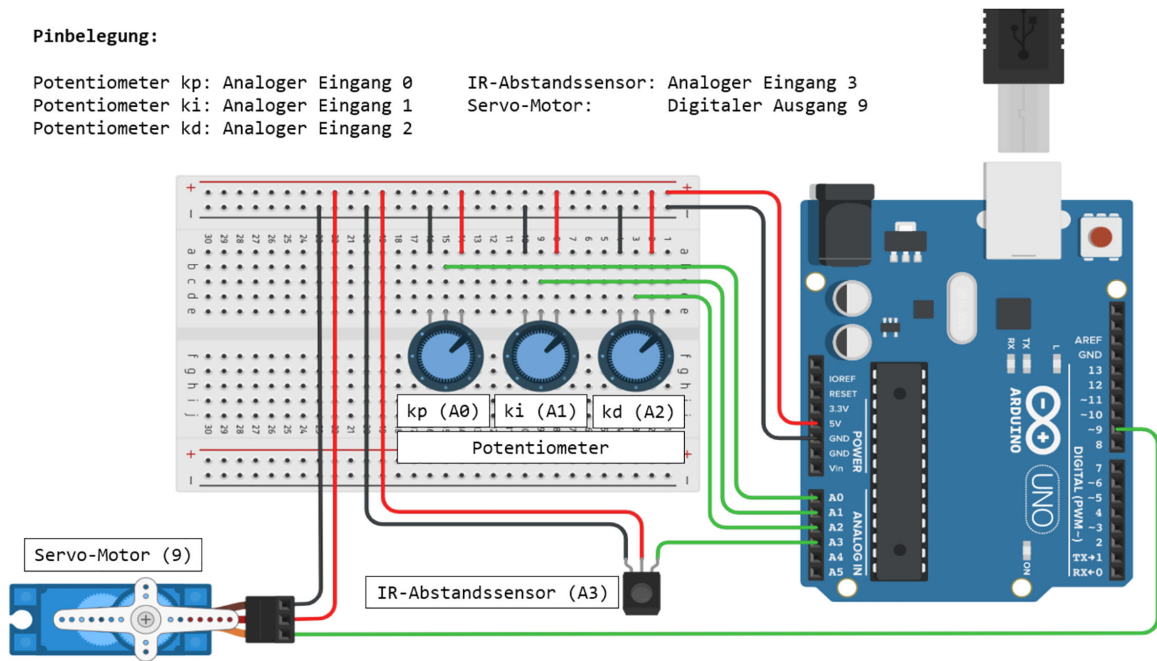


Abb. 7. Schematische Verschaltung der elektronischen Komponenten und Pin-Belegung am Arduino – Grafik selbst erstellt mit Tinker-CAD

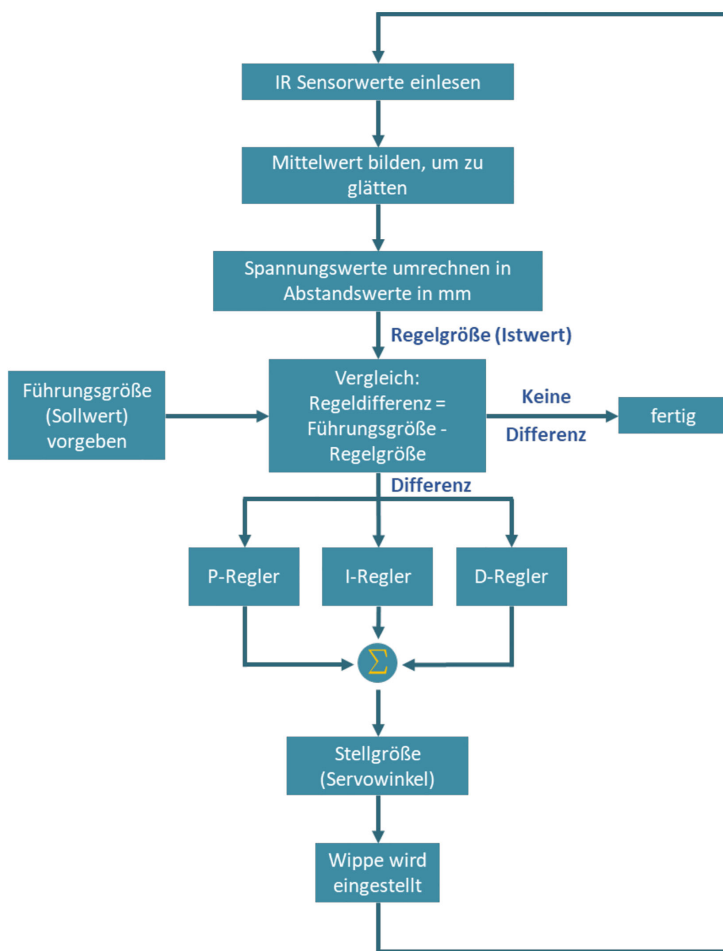


Abb. 8. Programmablaufplan Wippe mit Ball

Verhalten der Wippe beeinflussen können. Dabei soll zusätzlich zwischen großen und kleinen Regeldifferenzen bzw. schnellen und langsamen Änderungen der Regeldifferenz differenziert werden. Die Hypothesen sollen jeweils mithilfe der Stellgrößenfunktion begründet und später mithilfe des Programmcodes und dem resultierenden Verhalten der Wippe überprüft werden.

**Codierung und Kalibrierung des Sensors:** Da der Fokus des Versuchs auf dem Verständnis der Wirkungsweise eines PID-Reglers sowie der Optimierung der Regelparameter liegt, wird den Schüler/innen eine kommentierte Code-Vorlage vorgegeben, in der nur noch aufgabenspezifische Variablen bzw. Funktionen definiert und der PID-Regler realisiert werden müssen. Zwei vorangestellte Aufgaben zur Übertragung des allgemeinen Regelkreises auf die Wippe mit Ball, sowie das Schreiben eines Ablaufplans (Abb. 8) anhand einer Vorlage, helfen dabei, den vorgegebenen Code nachzuvollziehen.

Bevor der PID-Regelcode angegangen werden kann, muss zunächst der IR-Sensor kalibriert werden. Wird der Sensor über das Steckbrett mit dem Arduino verbunden, so liefert er keine Abstandswerte, sondern ein nicht-lineares Sensor-

## PID-Regelung

```

1 //Bildet den Mittelwert aus 300 Messungen
2 float aufsummiert = 0;
3 for (int i = 0; i <= 300; i++) {
4     int abstand_volt = analogRead(A3);
5     aufsummiert = aufsummiert + abstand_volt;
6 }
7 float mittelwert = aufsummiert / 300;
8
9 //Ermittelte Kalibrierfunktion des IR-Abstandssensors
10 regelgroesse = 68736 * pow(mittelwert, -1.05);
11
12 //Berechnung der Regeldifferenz und der Änderung der Regeldifferenz
13 regeldifferenz = fuehrungsgroesse - regelgroesse;
14 delta_regeldifferenz = regeldifferenz - regeldifferenz_alt;
15
16 //P-Regelanteil
17 float kp_volt = analogRead(A0);
18 kp = kp_max * (kp_volt / 1023);
19 regelanteil_p = kp * regeldifferenz;
20
21 //I-Regelanteil
22 float ki_volt = analogRead(A1);
23 ki = ki_max * (ki_volt / 1023);
24 integral += regeldifferenz * delta_t;
25 regelanteil_i = ki * integral;
26
27 //D-Regelanteil
28 float kd_volt = analogRead(A2);
29 kd = kd_max * (kd_volt / 1023);
30 regelanteil_d = kd * (delta_regeldifferenz / delta_t);
31
32 //Stellgröße (Servowinkel) ausgeben
33 stellgroesse = regelanteil_p + regelanteil_i + regelanteil_d;
34 stellgroesse = map (stellgroesse, -150, 150, nullwinkel - auslenkung_max, nullwinkel + auslenkung_max);
35 stellgroesse = constrain(stellgroesse, nullwinkel - auslenkung_max, nullwinkel + auslenkung_max);
36 myServo.write (stellgroesse);
37
38 //Neuer Wert für die alte Regeldifferenz
39 regeldifferenz_alt = regeldifferenz;

```

Abb. 9. Codeausschnitt zur PID-Regelung einer Wippe mit Ball mit einstellbaren  $k_p$ -,  $k_i$ - und  $k_d$ -Werten – Code erstellt mit Arduino IDE

signal. Da jedes System aus Wippe und Sensor seine eigenen Charakteristika besitzt, muss jede/r Schüler/in eine eigene Kalibrierfunktion finden. Hierfür ist eine Vorlage für ein Tabellenkalkulationsprogramm vorhanden, in welcher bereits die Tabellenstruktur, eine Anleitung und ein vorformatiertes Schaubild eingebettet sind (Abb. 6). Die Schüler/innen bestimmen mithilfe dieser Datei die Kalibrierfunktion ihres IR-Sensors und übertragen die Funktion später in ihren Programmcode.

**Versuch:** Zunächst werden im Code jeweils zwei Regelparameter der PID-Regelung auskommentiert und das Regelverhalten der Wippe mit Ball beobachtet. Anschließend werden die Beobachtungen festgehalten und mit dem vorhergesagten Verhalten aus der Hypothesenbildung verglichen.

Es folgt die Optimierung der Regelparameter mit Hilfe von einstellbaren Werten für  $k_p$ ,  $k_i$  und  $k_d$ , die mit Potentiometern realisiert werden. Der Gesamtaufbau mit Potentiometern ist in Abbildung 1 gezeigt. Der PID-Regelcode soll in Hinblick auf

vorgegebene Kriterien verbessert werden. Dazu optimieren die Schüler/innen die PID-Regelung ihrer Wippe so, dass sich das System möglichst schnell und ohne bleibende Regeldifferenz einschwingt. Dafür sollen die drei Regelanteile  $k_p$ ,  $k_i$  und  $k_d$  so in den Programmcode eingebunden werden, dass ihr jeweiliger Proportionalitätsfaktor mit Hilfe der drei Potentiometer zwischen 0 und  $k_{p\_max}$ ,  $k_{i\_max}$  und  $k_{d\_max}$  variiert werden kann, so wie im nachfolgenden Codeausschnitt gezeigt (Abb. 9).

Anschließend wird der in der Arduino IDE integrierte serielle Plotter genutzt, um die Einstellungen für  $k_p$ ,  $k_i$  und  $k_d$  so über die Potentiometer zu variieren, dass sich eine optimale Einstellung ergibt. Dabei können die Verhaltensweisen der einzelnen Regleranteile (Abb. 10–12) und das Zusammenwirken dieser als PID-Regler (Abb. 13) beobachtet und nachvollzogen werden. Videos, die das Verhalten der Wippe bei reiner P-, I- und D-Regelung, sowie bei PID-Regelung zeigen, sind über die Onlinebeilage abrufbar.

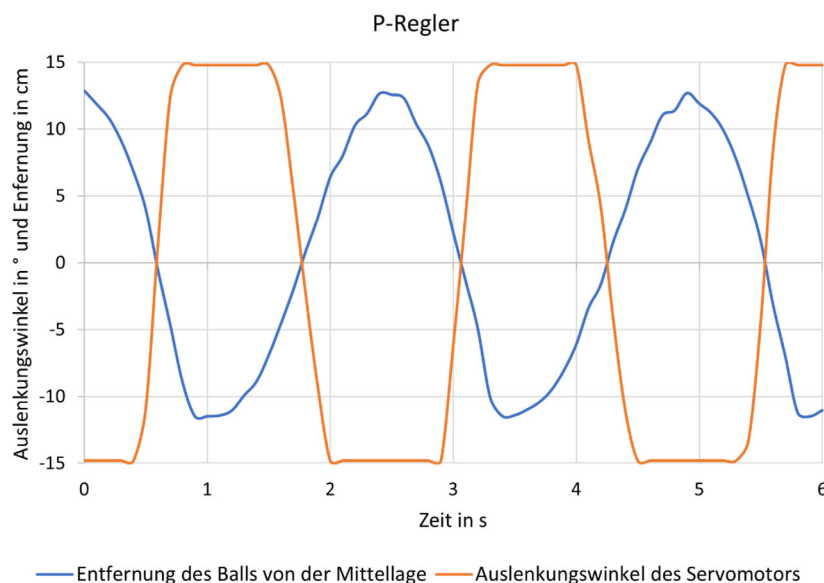


Abb. 10. Verhalten eines P-Reglers bei der Ausregelung eines Balls auf der Wippe

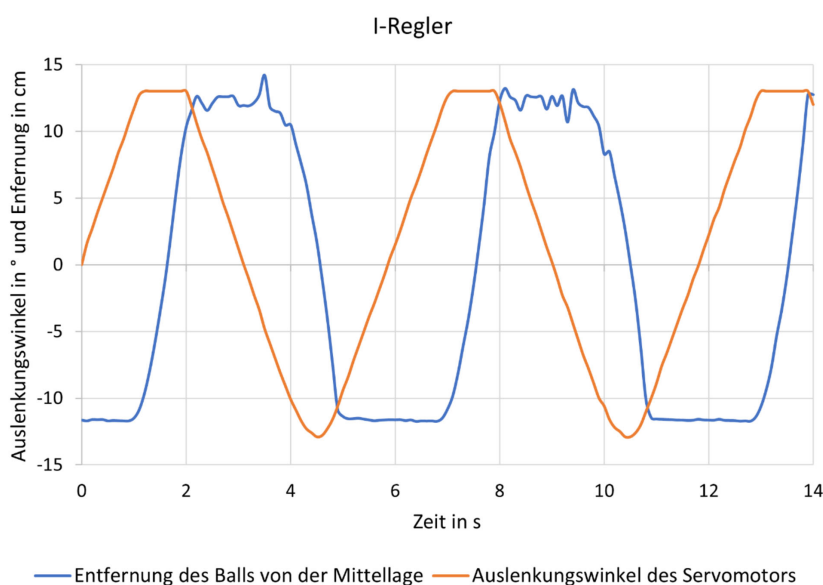


Abb. 11. Verhalten eines I-Reglers bei der Ausregelung eines Balls auf der Wippe

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Versuch zur Verdeutlichung der Funktionsweise eines PID-Reglers eignet sich sehr gut für den Einsatz im Technikunterricht in der Oberstufe. Grundlegende Kompetenzen aus der Regelungstechnik, Elektronik und dem Programmieren eines Mikrocontrollers sowie aus der Messtechnik können mithilfe des Versuchs vertieft werden. Die Schüler/innen untersuchen in diesem Versuch die Funktionsweise eines PID-Reglers und optimieren den Einfluss der drei Regelglieder auf das Verhalten der Wippe während der Regelung. Durch den einfachen, exemplarischen Aufbau des Systems „Wippe mit Ball“ können alle Regelvorgänge direkt nachvollzogen und beobachtet werden.

Der Einsatzbereich des Versuchsaufbaus geht zudem über den hier skizzierten Umfang hinaus: Die Wippe lässt sich auch in der kompletten Unterrichtseinheit der Regelungstechnik als begleitendes Modell verwenden. So kann der Übergang vom 2-Punktregler zum 3-Punktregler und weiter zum P-Regler beispielhaft an der Wippe mit Ball erläutert und demonstriert werden. Jeder dieser Schritte bringt eine Verbesserung des Regelverhaltens mit sich. Die Erweiterung über I-Regler, PI-Regler und schließlich PID-Regler lässt sich hervorragend anknüpfen.

*Der Versuchsleitfaden inklusive der benötigten Arbeitsblätter, das Linearisierungsdokument, ein Beispielcode, Videos und CAD-Dateien können über die Onlinebeilage abgerufen oder direkt über die Autor/inn/en angefragt werden.*

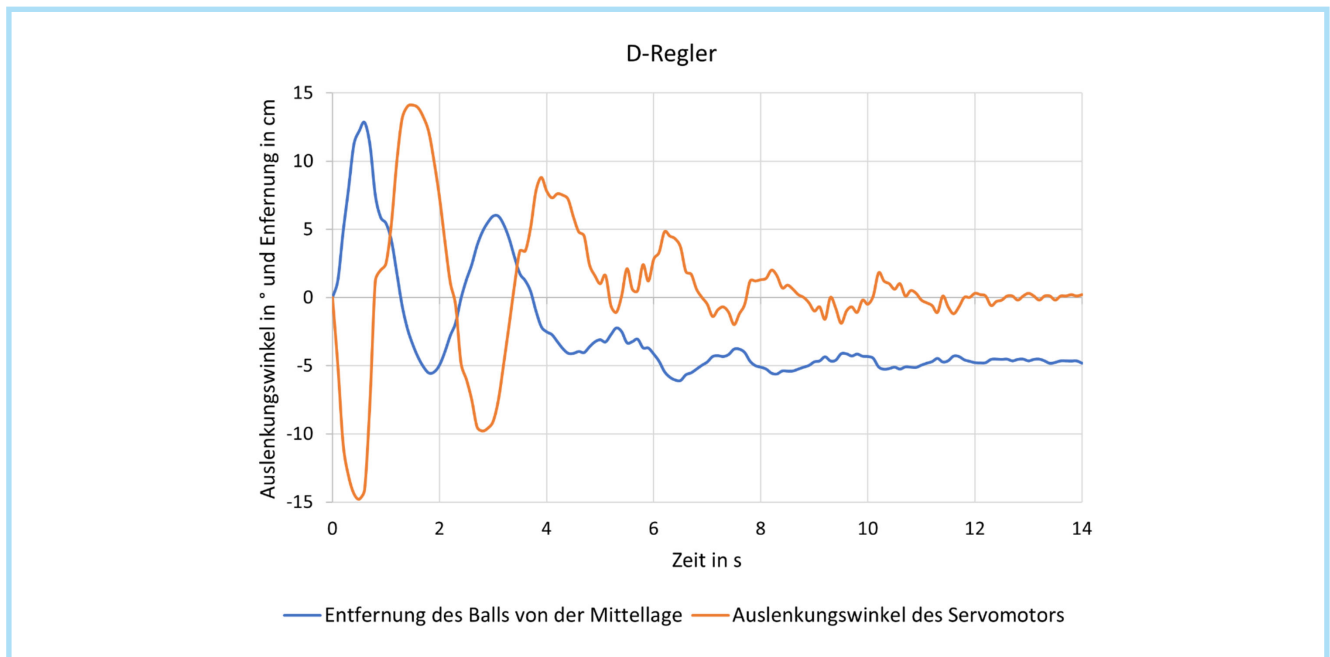


Abb. 12. Verhalten eines D-Reglers bei der Ausregelung eines Balls auf der Wippe

## Literatur

LUNZE, J. (2016). *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 11. überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer-Verlag.

TIESTE, K. & ROMBERG, O. (2015). *Keine Panik vor Regelungstechnik! Erfolg und Spaß im Mystery-Fach des Ingenieurstudiums*. 3. aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

ZACHER, S. & REUTER, M. (2017). *Regelungstechnik für Ingenieure. Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. 15. korrigierte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Ministerium für Kultur, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2019). *Bildungsplan 2016, Gymnasium, Naturwissenschaft und Technik (NwT) – Schulversuch Leistungsfach in der Kursstufe*. Stuttgart.

Ministerium für Kultur, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2020). *Bildungsplan 2016, Gymnasium, Naturwissenschaft und Technik (NwT) – Schulversuch Basisfach in der Kursstufe*. Stuttgart.

ANNA HAAB studiert aktuell im Master Lehramt Gymnasium mit den Fächern Naturwissenschaft und Technik und Chemie an der Universität Tübingen. Seit 2018 ist sie MINT-Studienbotschafterin der

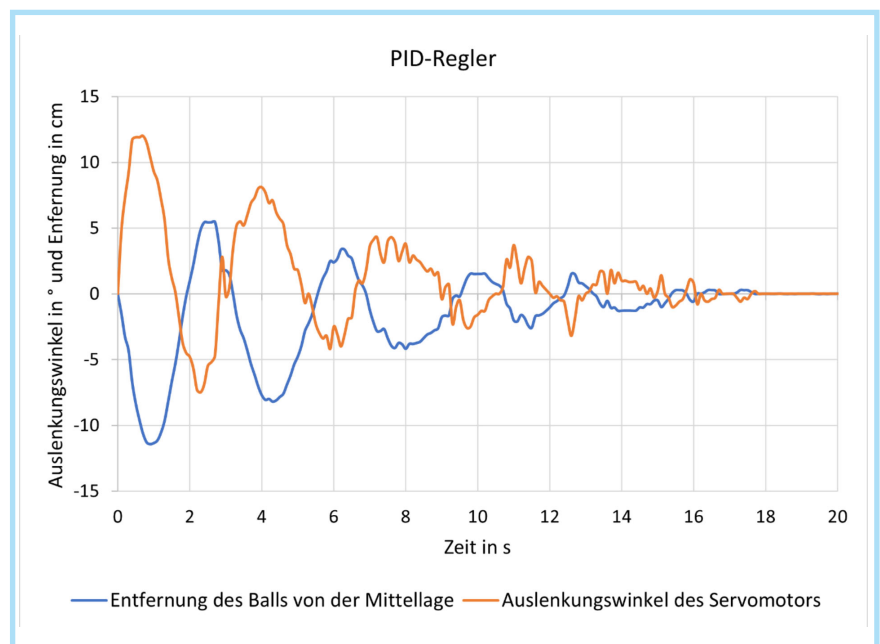


Abb. 13. Verhalten eines PID-Reglers bei der Ausregelung eines Balls auf der Wippe

Universität Tübingen und seit 2019 FundaMINT-Stipendiatin der Deutsche Telekom Stiftung.

TONIO MAHR hat den Studiengang Bachelor Maschinenbau an der FH Reutlingen abgeschlossen. Aktuell studiert er im Master Lehramt Gymnasium mit den Fächern Naturwissenschaft und Technik und Geographie an der Universität Tübingen

Prof. DR. MIRIAM CLINCY, miriam.clinicy@hs-esslingen.de, Hochschule Esslingen, Kanalstr. 33, 73728 Esslingen, war Gymnasiallehrerin für Physik und Mathematik und ist Professorin für Mathematik, Physik und Fachdidaktik Naturwissenschaft und Technik (NwT) an der Hochschule Esslingen.