

## Zwischenbericht „Ballwippe mit PID-Regler“

### Einordnung des Projektes

Ziel des GTA „Robotik und Elektronik“ am Gymnasium Dresden-Plauen ist das Heranführen von Schülern an elektrische Schaltungen, das Verständnis von Mikrocontrollern sowie die Vorbereitung und Teilnahme an Wettbewerben (u.a.: First LEGO-League, Invent-a-Chip, Jugend forscht). Derzeit besteht die AG aus 11 Schülern der Klassenstufen 6 bis 10. Wir treffen uns einmal pro Woche im Schulgebäude für ca. 2 Stunden.

Im Herbst/Winter Halbjahr bearbeiten wir meist die Aufgaben der First LEGO-League und im Frühjahr/Sommer vorrangig Themen der Elektronik. Aufgrund der Teilung konnte das Projekt nicht vollständig im SJ 2023/24 umgesetzt werden und der vorliegende Bericht stellt einen Zwischenstand des Projektes dar.

Im Rahmen des Projektes soll eine Wippe entstehen, die einen Ball (Tischtennisball oder ähnlich) auf einer motorisch angetriebenen U-förmigen Bahn positionsgenau zur Ruhe regeln kann.

Das Modell soll zum Verständnis von P- (proportional), PI- (proportional und integral) und PID- (... und differenzierend) Reglern im Rahmen der AG genutzt oder auch im Physik- und Informatikunterricht. Daher soll das Funktionsmodell stabil und nicht zu klein gebaut werden.

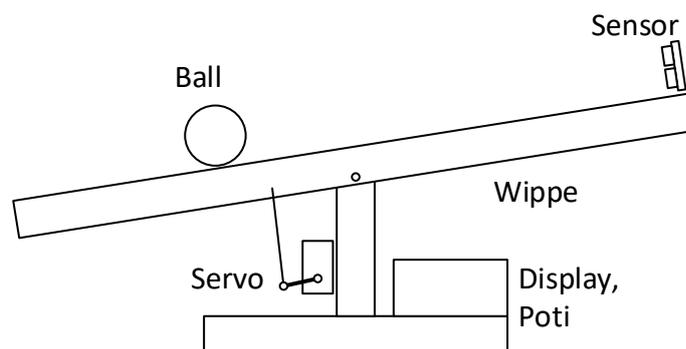
Auslöser der Idee war eine Internetrecherche zu ähnlichen Projekten:

<https://www.youtube.com/watch?v=JFTJ2SS4xyA>

<https://www.hackster.io/nihalsuri/self-balancing-ball-and-beam-using-pid-control-2bfb86>

<https://github.com/Milind220/ball-balance?tab=readme-ov-file>

### Projektumsetzung im Detail



Im beantragten Projekt soll ein Ball (z.B. Tischtennisball oder kleiner Softball) auf einer ca. 60 cm langen U-förmigen Wippe durch einen Mikrocontroller ausbalanciert werden. Die Lageerfassung des Balls erfolgt durch einen Ultraschall- oder IR-Laser-Sensor (ToF-Sensor). Als Aktor kommt ein Modellbau-Servomotor zum Einsatz. Die Mechanik der Ballwippe wird als Holz und einer U-Aluminiumschiene (Baumarkt) bestehen.

Die Regleranteile (P, I und D) sollen über Drehpotentiometer einstellbar sein und an einem 2x16 Zeichen Display angezeigt werden. Die Leiterplatte soll von den Schülern designed, geroutet und bestückt werden. Der Mikrocontroller wird im ersten Schritt ein Arduino sein – je nach Fortschritt könnte die Leiterplatte aber auch diese Bauteile enthalten. Das Gehäuse für Display und Mikrocontroller kann als 3D-Druck in einer anderen GTA der Schule entstehen.

## Projektumsetzung im Detail

Das Ziel der AG ist das Vermitteln von technischen Zusammenhängen und der Funktion von Sensoren und Aktoren. Ein fertiges Funktionsmodell samt Quellcode aus dem Internet gibt es für dieses Projekt nicht – und würde auch nicht dem Ansatz der AG entsprechen.

Das Projekt teilt sich demnach in folgende Teilaufgaben:

1. Mechanik
  - a. Gestell der Ballwippe → Werkstatt
  - b. Anbauteile an der Wippe (Klebeпад, Halterungen für ToF-Sensor, Halterungen für Ultraschallsensor, Halterung des Servos) → Konstruktion und 3D-Druck
  - c. Gehäuse für die Bedieneinheit → Konstruktion und 3D-Druck
2. Elektronik
  - a. Verkabelung zur Bedieneinheit (Sensor, Servomotor)
  - b. Arduino-Shield löten
3. Programmcode (EVA-Prinzip)
  - a. Eingabe: Sensordaten erfassen, Potentiometer und Tasten auslesen
  - b. Verarbeitung: drei Regler (P, PI, PID)
  - c. Ausgabe: Servomotor ansteuern, Textausgabe auf dem LCD-Modul

## Mechanik

Hauptbestandteil der Wippe ist ein 60 cm langes Aluminium-U-Profil der Abmaße (25 x 25 x 2 mm). Als Grundplatte kam ein Stück Buchenholz (15 x 25 x 1,8 cm) zum Einsatz. Die Wippe wird mittig gelagert. Dazu wählten wir eine Aussparung im U-Profil. Das Lager bildet eine dünne Achse (z.B. alte Fahrradspeiche) und einen vertikalen Holzstab (20 x 20 x 130 mm). Das Funktionsmodell ist dadurch stabil, optisch ansprechend und das Lager nahe am Schwerpunkt. Allerdings liegt dann auch der vertikale Holzstab teilweise im Innern der U-Schiene und dadurch auch im Erfassungsbereich des Sensors. Evtl. ist eine Lagerung unterhalb der U-Schiene zu bevorzugen (siehe Problem, Sensoren).

Bei Zugang zum Werkraum lässt sich das Gestell der Ballwippe durch max. 2 ... 3 Schüler umsetzen. In Ermangelung der Zugangsrechte/Belehrungen/Unfallschutz war das leider nicht möglich und die Teile wurden vom Betreuer der AG vorgefertigt. Der Zusammenbau erfolgte dann im Physikzimmer durch die Teilnehmer der AG.

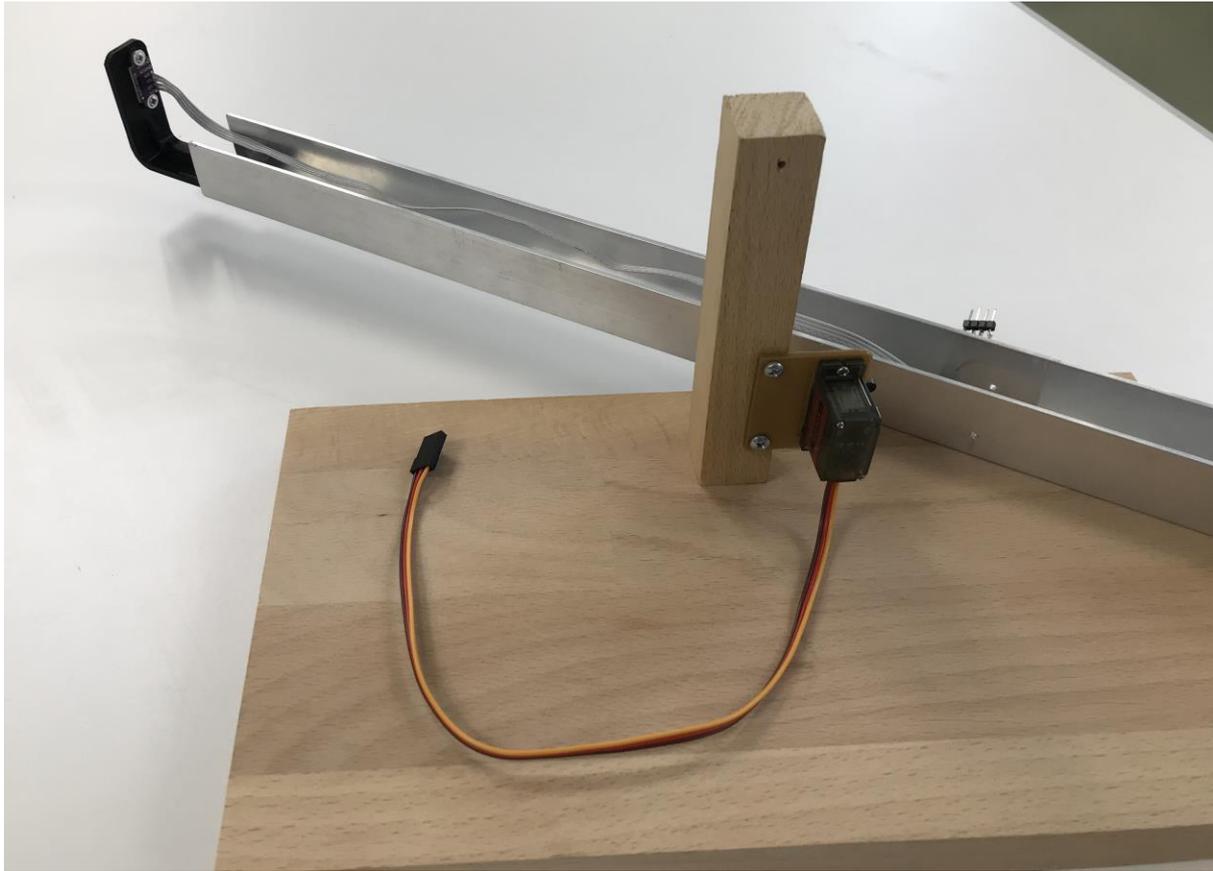


Bild 1: Grundplatte, Holzstab (mit Servo), U-Schiene (mit ToF-Sensor)

Die Befestigung des Ultraschallsensors an der Wippe erfolgte zuerst durch ein gekauftes Plastikteil. Da weder die Befestigungslöcher noch der Abstand zur Schiene passt, ist davon abzuraten und gleich ein 3D-Druckteil zu entwerfen. Auch für den alternativen ToF-Sensor ist dies erforderlich.

Ein AG-Treffen beschäftigte sich mit der freien Software FreeCAD (zum Konstruieren eines einfachen Druckteils). Herausforderung ist hier die zeitnahe Installation der Software auf den Schüler-Laptops.

Zu Beginn sollte ein einfaches Druckteil gewählt werden, z.B. ein Klebepad an der Unterseite der U-Schiene.

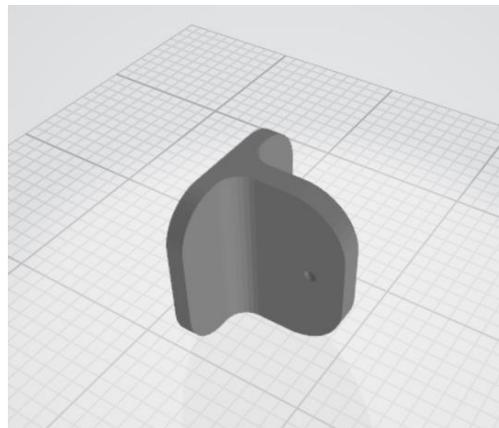
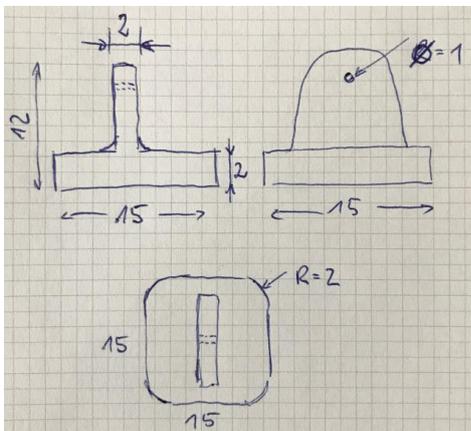


Bild 2: Klebepad der Wippe zur Servoansteuerung. Von der Handskizze (links) zum SLT-Model aus FreeCAD (rechts)

Ein weiteres einfaches 3D-Druckteil dient zur Befestigung des Servos am vertikalen Holzstab. Auch dies konnte innerhalb eines Treffens der AG hergestellt werden.

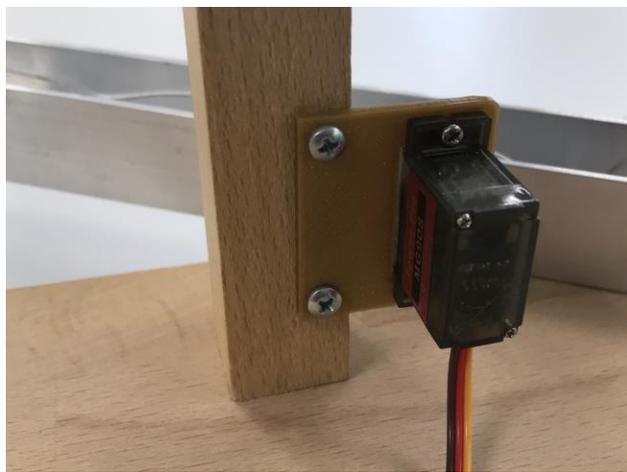
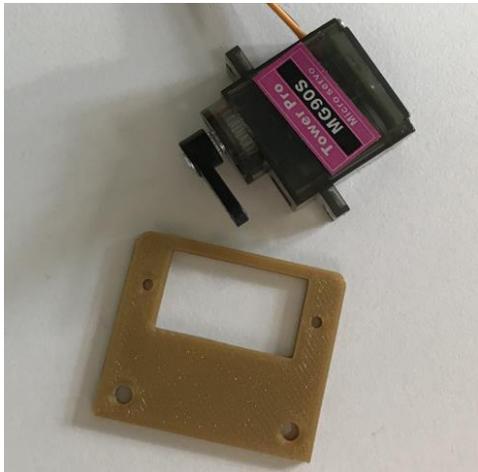
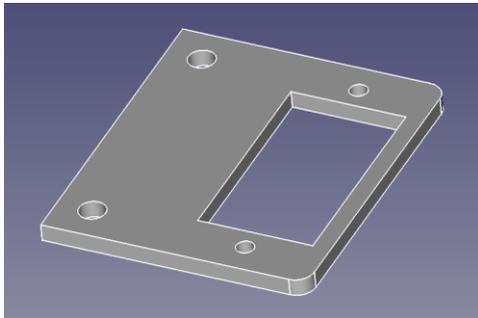


Bild 3: Servobrettchen in FreeCAD (oben, links), Druck (oben rechts) und fertig ausgedruckt und montiert (unten)

Aufwendigere Druckteile stellen die Befestigung des ToF-Sensors an der U-Schiene und das Gehäuse der Bedieneinheit dar. Diese könnten in Heimarbeit sehr engagierter Schüler oder im Rahmen einer parallelen 3D-Druck AG umgesetzt werden. Zwar gibt es am Gymnasium eine parallele 3D-Druck AG – aber zu wenige engagierten Teilnehmer 😊, sodass die komplexen Teile vom AG-Betreuer entworfen wurden.

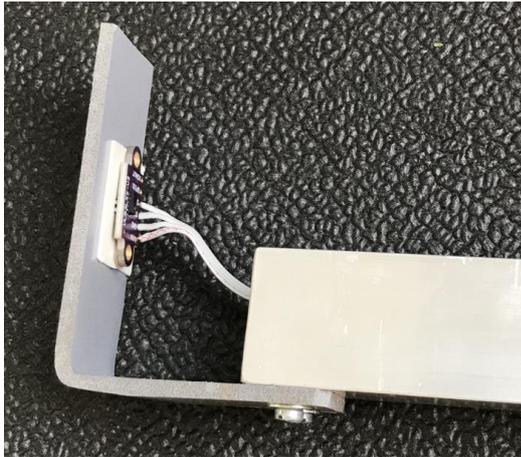


Bild 4: Provisorische Befestigung des ToF-Sensors (zu instabil)

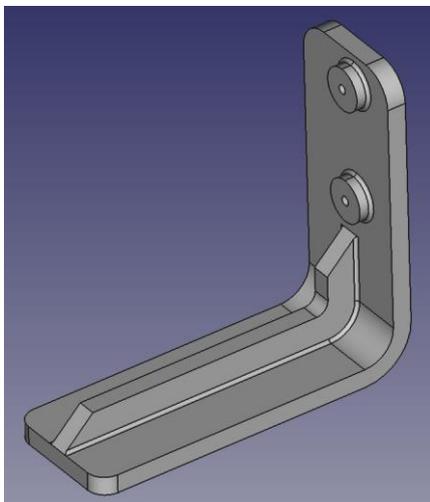


Bild 5: Befestigung des ToF-Sensors - Konstruktion in FreeCAD (links), fertig gedruckt und montiert (rechts)

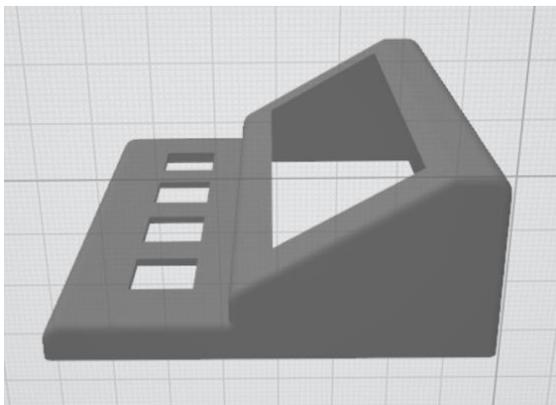


Bild 6: Gehäuse der Bedieneinheit (links, STL-Modell) und fertig mit LCD und Arduino Shield (rechts)

## Elektronik

Kernkomponente ist der Funduino/Arduino UNO R3 mit USB Schnittstelle für die Programmierung und seriellen Ausgabe sowie seinen Buchsenleisten für den Anschluss der Peripherie.



Bild 7: Mikrocontrollerboard kompatibel zu Arduino UNO R3

Der Entwurf der Schaltung erfolgte in der AG, allerdings sind hier viele Grundlagen zu vermitteln. Als Schaltungsentwurf kam das webbasierte EasyEDA (<https://easyeda.com/>) zum Einsatz. Besser geeignet ist KiCAD (<https://www.kicad.org/>) – konnte aber nicht auf den Laptops installiert werden.

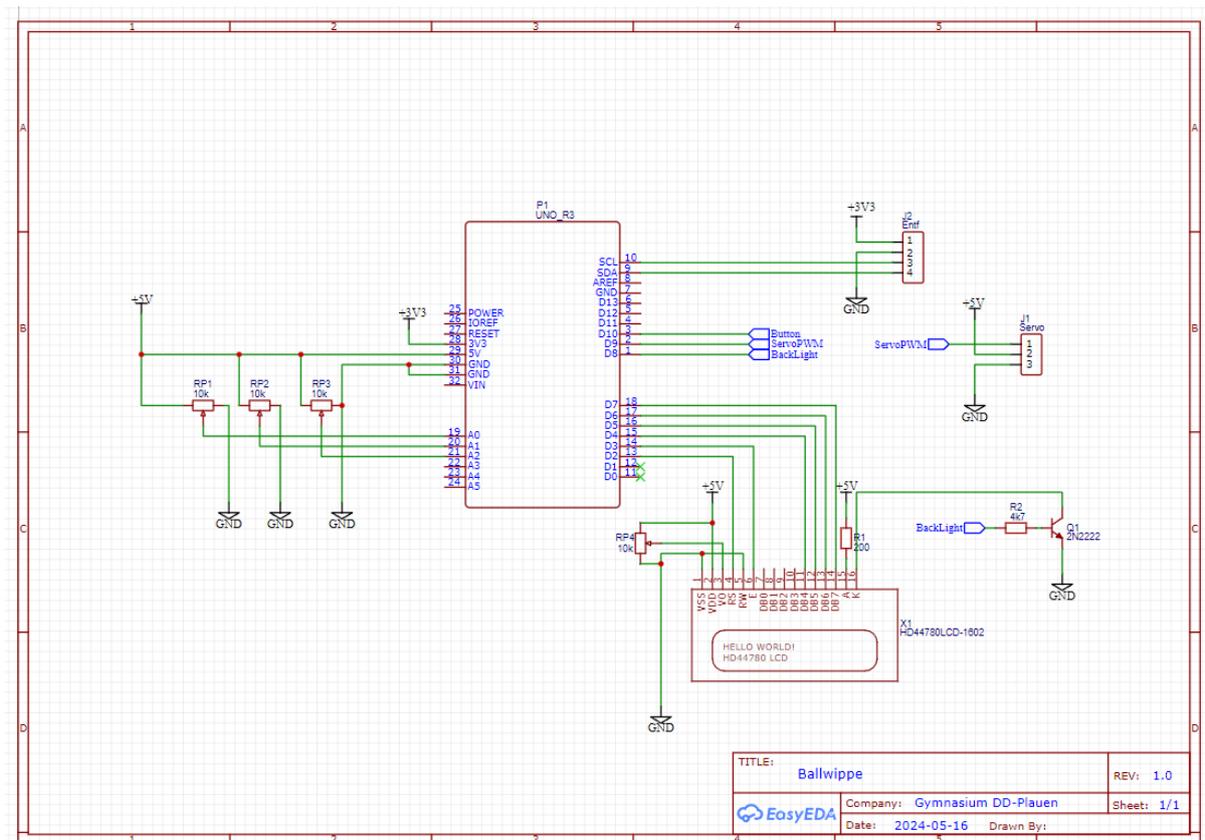


Bild 8: Elektrische Schaltung des Shields - Arbeitsstand

Die elektrische Schaltung entsteht derzeit als Aufsteckplatine für einen Arduino UNO R3. Dafür gibt es günstige Lochrasterplatinen (siehe Materialliste)

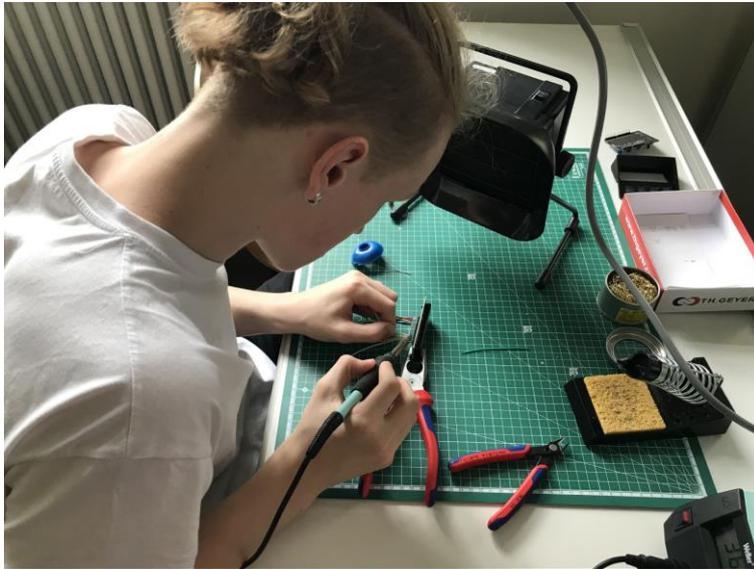


Bild 9: Teilnehmer der AG beim Bedrahten des LCD-Moduls

## Programmierung

Teilprogramme zur Auswertung des Ultraschallsensors (HC-SR04) oder des ToF/Laser-Sensors (VL53L0X-V2), der Drehpotentiometer und zur Ansteuerung der Anzeige und des Servos entstanden im Rahmen der AG. Für diese AG-Treffen entstanden auch Merkseiten für die Teilnehmer (siehe Anhang).

Bestehende Klassensätze für Arduino und Zubehörteile (insb. Steckbrett, LCD-Display, Servomotor, Ultraschallsensoren) konnten für das Projekt verwendet werden. Je nach Vorwissen der Teilnehmer sind Grundlagen der Programmierung in C im Vorfeld zu vermitteln. Vorteile haben hier Schüler der oberen Klassenstufen, die bereits Erfahrungen mit Arduino im Physikunterricht hatten.

### **Versuch: Ultraschallsensor – HC-SR04**

Die Signale lassen sich aber sehr gut visualisieren und der Ultraschallsensor ist didaktisch besser geeignet als der Laser-Sensor. Es gibt bereits fertige Arduino Bibliotheken – aber dann ist der Lerneffekt recht gering. Wir haben daher unter Nutzung des Timer1 (16 bit) einen schnellen Zähler mit Interrupt programmiert, der das Ausgabesignal des Moduls vermisst. Über die Schallgeschwindigkeit kann auf die Entfernung geschlossen werden.

Unter idealen Bedingungen, d.h. ohne horizontalen Holzstab in der Mitte konnten wir einen Ball mit ca. 6 cm Durchmesser auf der U-Schiene erkennen. Auf der Ballwippe mit Holzstab-Lager war eine Lageerkennung über der Hälfte nicht mehr möglich. Wahrscheinlich treten Reflexionen durch den Stab auf.

Mit unserem Aufbau haben wir derzeit Probleme und haben diesen Sensor vorerst abgewählt.

**Versuch: IR-Laser-Sensor (Time-of-Flight (ToF) Sensor) – VL53L0X-V2**

Hightech an der Ballwippe! Der Lasersensor misst Entfernungen bis ca. 3 m im Millimeterbereich (so das Herstellerversprechen). Leider ist die Ansteuerung nur über eine API möglich. Daher muss man hier eine Arduino Bibliothek verwenden. Eine gute und einfache Erklärung findet sich unter:

<https://wolles-elektronikkiste.de/vl53l0x-und-vl53l1x-tof-abstandssensoren>

[Zwischenstand 12/2024] Die Messergebnisse des Laser-Sensors waren noch nicht stabil genug, sodass wir andere Konfigurationen des Sensors (über die API einstellbar) ausprobieren wollen.

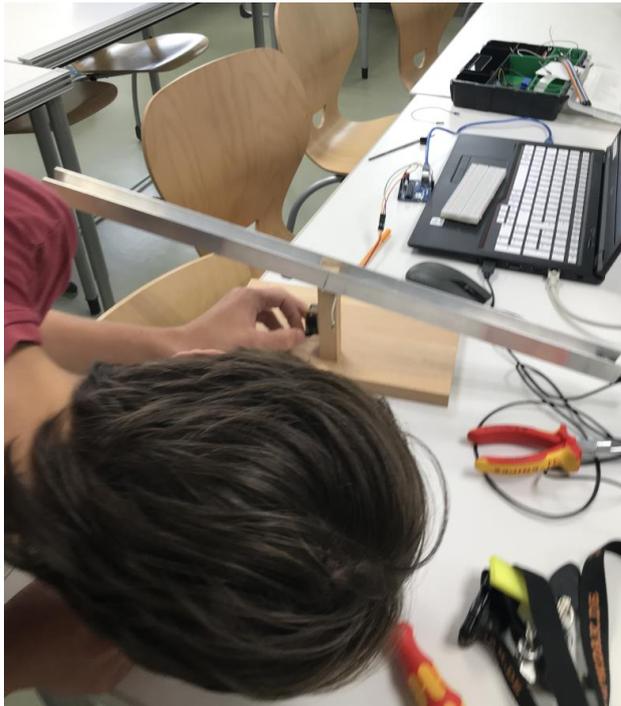


Bild 10: Teilnehmer der AG mit Ballwippe bei der Programmierung des Servos

## Ausblick

- Finale Festlegung: Ultraschallsensor oder ToF Sensor; Ballgröße
- Fertigstellung des Arduino Shields
- Programmierung (Zusammenführen der Teilprogramme)

An der Wippe soll den Schülern die Funktionsweise von P-Regler, I-Regler, PI-Regler und PID-Regler gezeigt werden. Dazu wird das fertige Modell dann evtl. später auch im Informatikunterricht eingesetzt (je nach Erfolg).

## Förderung durch VDE Labs-for-Chips

Für die Visualisierung der schnellen Signale (z.B. PWM-Signale für das Servo sowie Signale des Ultraschallsensors) schaffte die AG durch die Förderung von „VDE Labs-for-Chips“ ein passendes Digital-Speicheroszilloskop an. Dies ist die Hauptanschaffung für dieses Projekt und soll auch für Folgeprojekte der AG genutzt werden.



*Bild 11: USB-Digital Speicheroszilloskop und Signalgenerator mit Tastköpfen und Zubehör*

## Fazit

Die Schwierigkeit ist das Erfassen/Messen der Position des Balls auf der Wippe. Ein zu kleiner Ball wird schlecht vom Ultraschallsensor erkannt. Auch der ToF-Sensor ist nicht ideal und erfordert helle Objekte. Das Projekt eignet sich gut, um verschiedene Bereiche der Elektronik und auch im 3D-Druck zu vermitteln. Besonders Spaß hatten die Schüler mit dem Servomotor – evtl. wird hier das eine oder andere Plastikgetriebe „aufgeben“.

Eine Herausforderung ist auch die IT-Infrastruktur. Die Programmgrößen von Arduino IDE, FreeCAD, UltiMaker Cura und KiCAD übersteigen schnell die Quota der Schüleraccounts und langwierige Anfragen nach einer Installation der richtigen Software auf den Laptops kosten leider zu viel Zeit. Evtl. sind eigene Rechner der AG mit Administrator Rechten besser geeignet als ein zentral verwalteter Klassensatz von Laptops.

## Anhang

### Merk- und Arbeitsblätter

Im Rahmen des Projektes sind Merkblätter zu Teilkomponenten entstanden, die den Schülern ausgegeben wurden.

- Servomotor
- Ultraschallsensor
- Schaltplan und Leiterplattendesign
- 7-Segment-Anzeige

AG Elektronik und Robotik

#### Das (Modellbau)Servo

Verwendung im RC-Modellbau für proportionale Bewegungen (z. B.: RC-Flugzeuge: Ansteuerung von Höhen- und Seitenruder) oder auch im Auto (z. B.: elektrische Servolenkung).

**Aufbau und Funktion**  
DC-Motor, Getriebe, Ansteuerelektronik, Potentiometer

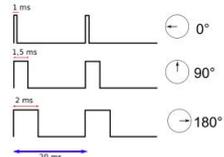


Ein Regelkreis (PI-Regler oder PID-Regler) sorgt für die nötige Winkeländerung bei Sollwertvorgabe oder mechanischen Einflüssen/Kräften. Der Winkel/die Lage wird über ein Potentiometer erfasst. Der Getriebemotor kann (über eine Vollbrücke angesteuert) nach links oder rechts drehen.

**Ansteuerung des Servos**  
Das Servo hat typischerweise drei Kabel (Minus, Plus und Signal). Über ein PWM-Signal mit 20 ms Periodendauer stellt man den Winkelwert ein. Die Breite des High-Pegels bestimmt den Ausschlag des Servos.

**Belegung Servostecker**

- Minus
- Plus
- PWM



Bilder: Wikipedia und eigene

Feb. 2024 P. Stachel

AG Elektronik und Robotik

#### Der Ultraschall-Entfernungsmesser HC-SR04

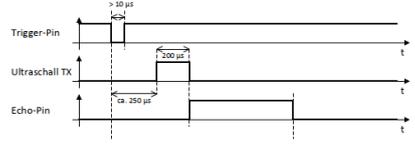
Verwendung zur Entfernungsmessung zu Gegenständen mit glatter Oberfläche im Bereich 2 cm bis 3 m. Praktisch kommen Ultraschall-Entfernungsmesser in Einparkhilfen am Auto vor.

**Aufbau und Funktion**  
Ultraschall-Sender (TX) und Empfänger (RX), Auswertelektronik



Bild: x0-delivery

**Ansteuerung des Messmoduls**  
Durch eine fallende Flanke am Trigger-Eingang wird ein Messzyklus gestartet. Ein Ultraschall-Impuls (40 kHz) wird für ca. 200 µs abgegeben. Die reflektierten Schallwellen (Echo) werden erfasst und als elektrischer Impuls an Pin 3 ausgegeben. Dabei ändert Pin 3 seinen Pegel von L → H, wenn auf das Echo gewartet wird, und von H → L, wenn das Echo empfangen wurde.



**Ermittlung der Laufzeit (Echo)**  
Aus der Zeitdauer vom Senden des Ultraschallsignals bis zum Empfang des Echos lässt sich die Entfernung zu einer reflektierenden Oberfläche abschätzen.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist abhängig von der Lufttemperatur  $\theta$  und beträgt:

$$c_{Luft}(\theta) \approx \left( 331,5 + 0,6 \frac{\theta}{^\circ\text{C}} \right) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Mrz. 2024 P. Stachel

## 3D Druckdateien

Siehe zip-Datei

## Quellcode

Siehe zip-Datei

## Materialien

Material	Besonderheit	Bezugsquelle	Kosten / Stück
VL53L0X	ToF-Sensor	<a href="https://www.az-delivery.de/products/vl53l0x-time-of-flight-tof-laser-abstandssensor">https://www.az-delivery.de/products/vl53l0x-time-of-flight-tof-laser-abstandssensor</a>	Ca. 4 EUR
Ultraschall-Sensor	HC-SR04	<a href="https://www.az-delivery.de/products/3er-set-hc-sr04-ultraschallmodule">https://www.az-delivery.de/products/3er-set-hc-sr04-ultraschallmodule</a>	Ca. 3 EUR
U-Schiene Alu		Baumarkt	
Bodenplatte	Buchenholz, 18 mm	Baumarkt	
Modellbau Servo,	Metallgetriebe, MG90S	<a href="https://funduinoshop.com/elektronische-module/elektromotoren-und-zubehoer/servomotoren/mg90s-metallgetriebe-micro-servo">https://funduinoshop.com/elektronische-module/elektromotoren-und-zubehoer/servomotoren/mg90s-metallgetriebe-micro-servo</a>	Ca. 4 EUR
Lochraster-Leiterplatte	Expansion Board UNO - Prototype PCB for Arduino UNO R3 - Black Board	Amazon	Ca. 2 EUR
LCD-Display	16x2, parallele Schnittstelle	<a href="https://www.az-delivery.de/products/16x2-lcd-blaues-display">https://www.az-delivery.de/products/16x2-lcd-blaues-display</a>	Ca. 6 EUR
USB Oszilloskop	Digilent Analog Discovery 3	<a href="#">Analog Discovery 3 Pro Bundle</a> Akademische Variante → Rabatt für Schulen möglich	Ca. 320 EUR

## Ansprechpartner für dieses Projekt

Dr. Philipp Stachel

gta.elektronik-und-robotik@gdp.lernsax.de

AG Elektronik und Robotik  
Gymnasium Dresden-Plauen  
Kantstr. 2  
01187 Dresden

**Hinweis:**

Zur besseren Lesbarkeit wird im Text die maskuline Form „Schüler“ verwendet. Das GTA richtet sich selbstverständlich auch an Schülerinnen.