

## Aufbauanleitung für eine aktive Schwingungsdämpfung mittels Geschwindigkeitsrückführung

In dieser Anleitung wird das grundsätzliche Prinzip einer aktiven Schwingungsdämpfung beschrieben sowie ein exemplarischer Aufbau eines analogen Regelkreises mit entsprechenden Sensoren und Aktoren um Nachbauen.

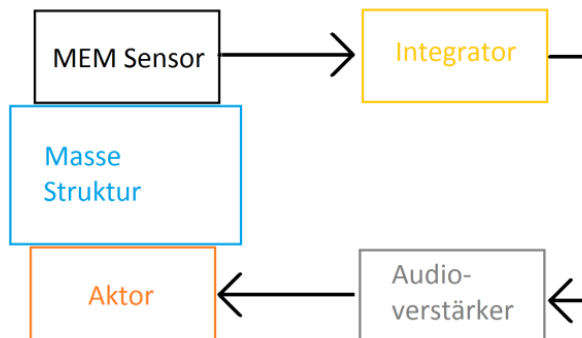
Viel Spaß!

Die Anleitung besteht aus insgesamt 11 Schritten:

- Schritt 1: Der grundsätzliche Aufbau
- Schritt 2: Benötigte Materialien
- Schritt 3: Auswahl des Sensors
- Schritt 4: Anschluss des Sensors
- Schritt 5: Einhausung des Sensors
- Schritt 6: Erstellung des Schaltplans
- Schritt 7: Aufbau der Platine
- Schritt 8: Auswahl des Aktors
- Schritt 9: Auswahl des Verstärkers
- Schritt 10: Aufbau des Regelkreises
- Schritt 11: Einstellung und Inbetriebnahme des Regelkreises
- Optionaler Schritt 12: Einhausung der Elektronik

### **Schritt 1: Der grundsätzliche Regelkreis**

Das hier verwendete Prinzip ist die aktive Dämpfung mittels Geschwindigkeitsrückführung. Dabei werden wie in Abbildung 1 gezeigt, ein Beschleunigungssensor und ein Aktor an die zu dämpfende Struktur montiert. Das Sensorsignal wird anschließend mittels eines Integrators in eine Geschwindigkeit überführt und über einen Audioverstärker auf den Aktor gegeben. Dieser leitet das rückgeführte Geschwindigkeitssignal als Kraft in die Struktur, was die Dämpfung des Systems erhöht. Dadurch werden Schwingungen reduziert.



*Abb. 1: Regelkreis für die Schwingungsdämpfung*

Dieser prinzipielle Regelkreis kann für verschiedene Anwendungen verwendet und die einzelnen Komponenten an den jeweiligen Zweck angepasst werden.

## Schritt 2: Benötigte Materialeien und Geräte

Für den Aufbau werden ein LötKolben, Seidenschneider, Abisolierzange, Schraubendreher und die folgenden Materialien benötigt:

- 1 Aktor (gewählt „Blanko BassShaker“; Alternativen unter [https://www.openadaptronik.de/2016/08/05/aktoren-geht-es-auch-guenstig-post\\_3/](https://www.openadaptronik.de/2016/08/05/aktoren-geht-es-auch-guenstig-post_3/))
- 1 Audioverstärker (gewählt „Sure Electronics TPA250“)
- 1 Sensor (gewählt „ADLX335“)
- Operationsverstärker (gewählt „TL084IN“)
- DCDC-Wandler für den Operationsverstärker (gewählt „TRA 1-0523“)
- 5 V Spannungsversorgung (für die Steuerelektronik)
- 24 V Spannungsversorgung (für den Verstärker)
- Widerstände, Kondensatoren, LEDs und ein Potentiometer (siehe Tabelle Nr. 2)
- Kabel, Schrumpfschlauch und Stecker

## Schritt 3: Auswahl des Sensors

Der Sensor dient zur Aufnahme der Störungen und Vibrationen, die an der Struktur gedämpft werden sollen. Ein Test und Empfehlungen einiger günstiger Beschleunigungssensoren sind unter (link) zu finden. Wir verwenden hier in diesem Beispiel den ADLX335, da dieser Sensor auch bei kleinen Störungen und Vibrationen ein gutes Signal liefert.

## Schritt 4: Anschluss des Sensors

Der Sensor verfügt über drei Achsen. Da wir nur eine Raumrichtung betrachten, wird nur eine Achse verwendet. Angeschlossen werden muss die Versorgungsspannung (5 V), GND und der Signalanschluss für die verwendete Achse (hier Z-Achse). Somit reichen ein einfaches dreipoliges Kabel und ein dreipoliger Stecker aus. Wir verwenden hier einen 3,5 mm Klinkenstecker, siehe Abbildung 2.



Abb. 2: Sensor ADLX335 mit angeschlossenem Kabel. Hier wurden alle Anschlüsse angelötet, um sie

bei Bedarf auch nutzen zu können. Für den hier verwendeten Regelkreis reichen + 5 V, GND und eine Achse aus.

### Schritt 5: Einhausung des Sensors

Nach dem Anschluss des Kabels muss der Sensor noch mit einem Gehäuse versehen werden. Dies dient dem Schutz des Sensors und bietet die Möglichkeit ihn an die zu dämpfende Struktur anzubringen. Hier verwenden wir ein selbst erstelltes Gehäuse (siehe <https://www.openadaptronik.de/2016/09/26/3d-druck-von-gehaeusen-fuer-beschleunigungssensoren/>) aus dem 3D-Drucker, siehe Abbildung 3.

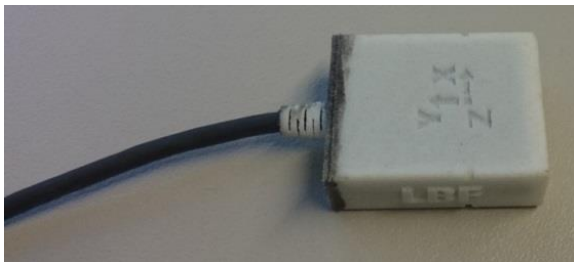


Abb. 3: Sensor in Sensorgehäuse

Das Gehäuse besitzt eine Beschriftung mit den Richtungen der einzelnen Achsen und wird mittels Wachs an der Struktur befestigt. Das Kreismuster auf der Rückseite dient dem besseren Halt des Waxes. Alternativ zu Wachs kann auch eine mechanische Verbindung (wie Schrauben) verwendet werden, oder man klebt den Sensor an die Struktur.

### Schritt 6: Erstellung des Schaltplans

Als nächstes folgt der Aufbau der Elektronik, die das Sensorsignal aufbereitet und im Anschluss auf den Audioverstärker gibt. Die hier zu konstruierende Elektronik soll folgende Aufgaben erfüllen:

- Versorgung des Sensors mit 5 V
- Aufbereitung und Integration des Sensorsignals
- Möglichkeit zum ein und ausschalten der Dämpfung mit LED zum derzeitigen Status
- LED zum Prüfen der Spannungsversorgung
- *Versorgung einer externen Laserdiode (Dies benötigen wir für eine bestimmte Anwendung. In der nachfolgenden Schaltung kann dieser Punkt ausgelassen werden)*

Um diese Aufgaben handlich und ohne viel Verkabelung zu erfüllen, erstellen wir eine Platine. Hierfür wird die Open Source Software „KICAD“ ([als Verlinkung](#)) verwendet. Alternativ kann die Schaltung auch händisch auf einer Lochrasterplatine oder dergleichen erstellt werden.

Zunächst werden die einzelnen Glieder der Schaltung aufgezeigt:

Die Spannungsversorgung der Elektronik erfolgt über ein einfaches 5 V Steckernetzteil. Somit kann der Sensor direkt und die drei LEDs (Spannungsversorgung, Laser und die Anzeige ob die Dämpfung aktiviert ist) über Vorwiderstände versorgt werden (siehe Abbildung 4 am Beispiel der Spannungs-LED).

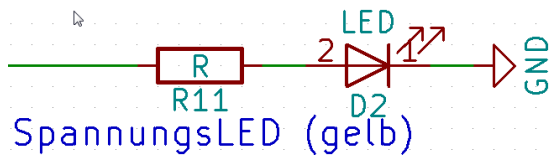


Abb. 4: Vorwiderstand mit LED in KICAD

Der Operationsverstärker benötigt  $\pm 15$  V. Dies wird über einen DCDC-Wandler vom Typ TRA-1-0523 realisiert, der die 5 V in  $\pm 15$  V wandelt. In der Datenbank von KICAD ist dieses Bauteil nicht vorhanden und muss daher selbst definiert werden (siehe Abbildung 5).

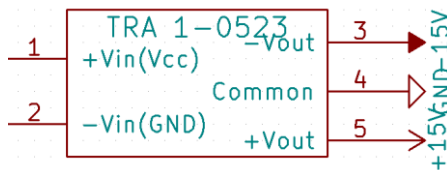


Abb.5:DCDC-Wandler in KICAD

Der Sensor liefert ein analoges Spannungssignal von 0 – 3,3 V für eine Beschleunigung von -3 bis 3 g. Bei 0 g (ohne Beschleunigung) liegt eine Spannung von 1,65 V vor. Dieses Spannungsoffset muss zu Beginn eliminiert werden, bevor das Signal weiter verarbeitet werden kann. Dazu reicht ein einfacher RC-Hochpass. Dieser besteht aus einem Kondensator, mit parallel geschaltetem Widerstand (siehe Abbildung 6).

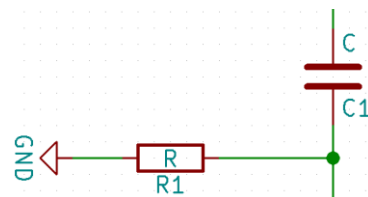


Abb. 6: RC-Hochpassfilter in KICAD für die Aufbereitung des Sensorsignals

Das Ein - und Ausschalten des Dämpfungssystems erfolgt über die Spannungsversorgung des Sensors. Hierfür wird ein Schalter in die Leitung der Spannungsversorgung des Sensors eingebaut.

Für die Integration des aufbereiteten Sensorsignals werden neben den Integrator noch andere Schaltungen benötigt. Hierfür verwenden wir den Operationsverstärkerchip TL084IN. Der Chip besitzt insgesamt vier einzelne Operationsverstärker. Den Anfang macht ein Transimpedanzwandler (siehe Abbildung 7). Dieser setzt den Eingangswiderstand der Schaltung gegen 0 und trennt somit die Schaltung vom Sensor.

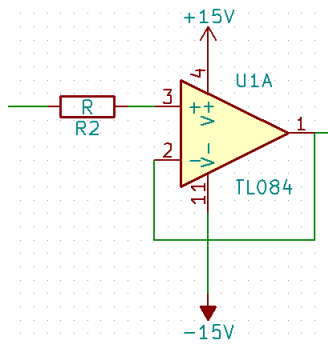


Abb. 7: Transimpedanzwandler in KICAD

Danach folgt ein Tiefpassfilter (siehe Abbildung 8). Mit ihm können zu hohe Frequenzen gefiltert werden. Er ist zwar nicht unbedingt notwendig, aber so können alle vier Kanäle des Operationsverstärkers genutzt werden.

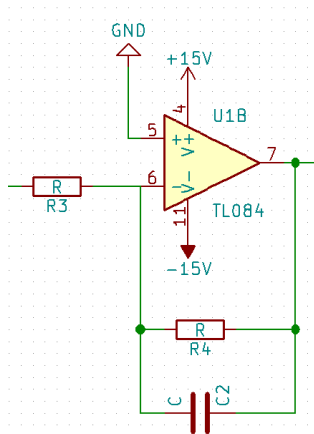


Abb. 8: Tiefpassfilter in KICAD

Als nächstes folgt der eigentliche Integrator (siehe Abbildung 9), das Herzstück der Schaltung. Er integriert die gemessene Beschleunigung in eine Geschwindigkeit. Aufgebaut ist er wie ein Tiefpassfilter mit hochohmigem Widerstand. Über den Eingangswiderstand R5 kann die Verstärkung der gesamten Elektronik angepasst werden.

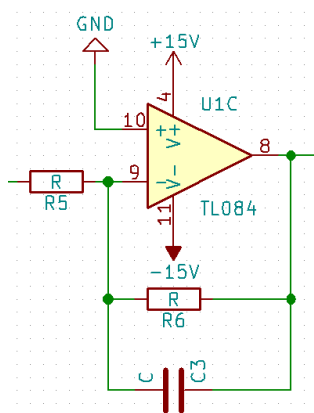


Abb. 9: Integrator in KICAD

Den Abschluss der Schaltung bildet ein Impedanzwandler (siehe Abbildung 10). Dieser setzt den Ausgangswiderstand hoch, sodass die Schaltung nicht von der nachfolgenden Elektronik beeinflusst wird.

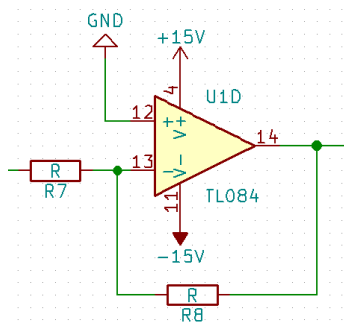


Abb. 10: Impedanzwandler in KICAD

Aus den einzelnen Elementen ergibt sich in KICAD der in Abbildung 11 gezeigte Schaltplan. Zur besseren Übersicht wurden die einzelnen Elemente markiert. Die zugehörigen Nummern sind in Tabelle 1 und die Werte der Bauteile in Tabelle 2 zu finden.

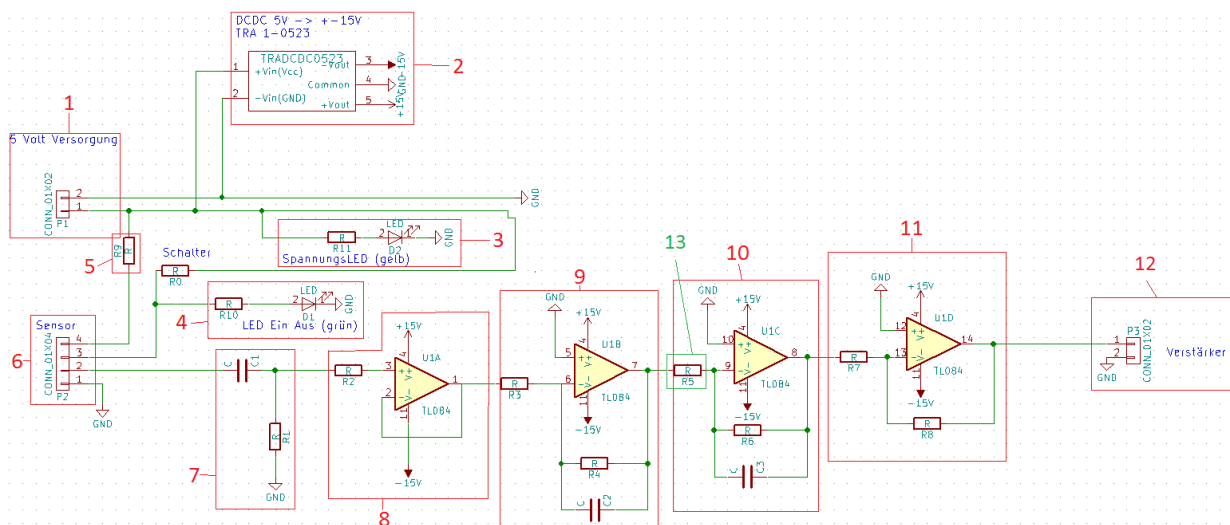


Abb. 11: Schaltplan der Elektronik in KICAD

Tbl. 1: Zuordnung der einzelnen Elemente

Nr.	Name
1	5 V Spannungsversorgung
2	DCDC Wandler (TRA 1-0523)
3	LED gelb
4	LED grün
5	Versorgung Laser
6	Anschlussstecker Sensor
7	Hochpassfilter (fgrenz = 0,36 Hz)
8	Transimpedanzwandler
9	Tiefpassfilter
10	Integrator
11	Impedanzwandler
12	Leitung zum Aktorverstärker
13	Anpassen der Verstärkung

Tbl. 2: Verwendete Werte für die Bauelemente

R0	Schalter	
R1	Widerstand des HP-Filters	2 Meg $\Omega$
R2	Widerstand Transimpedanzwandler	20 k $\Omega$
R3	Eingangswiderstand TP-Filter	100 k $\Omega$
R4	Widerstand TP-Filter	91 k $\Omega$
R5	Eingangswiderstand Integrator	18 k $\Omega$ ?
R6	Widerstand Integrator	2 Meg $\Omega$
R7	Eingangswiderstand Impedanzwandler	120 k $\Omega$
R8	Widerstand Impedanzwandler	120 k $\Omega$
R9	Vorwiderstand des Lasers	62 $\Omega$
R10	Vorwiderstand LED grün	62 $\Omega$
R11	Vorwiderstand LED gelb	62 $\Omega$
C1	Kondensator TP-Filter	220 pF
C2	Kondensator HP-Filter	220 nF
C3	Kondensator Integrator	220 nF
DCDC-Wandler	TRACO POWER TRA 1-0523	
Operationsverstärker	TL084	Enthält 4 Operationsverstärker

## Schritt 7: Aufbau der Platine

Aus dem Schaltplan wird als nächstes ein Platinendesign in KICAD erstellt. Dazu werden den Bauelementen sogenannte „Footprints“ zugeordnet, die den benötigten Anschluss auf der Platine erhalten. Für alle Elemente bis auf den DCDC-Wandler sind die benötigten Footprints in der Datenbank erhalten. Für den DCDC-Wandler muss dieser selbst erstellt werden, siehe Abbildung 12.

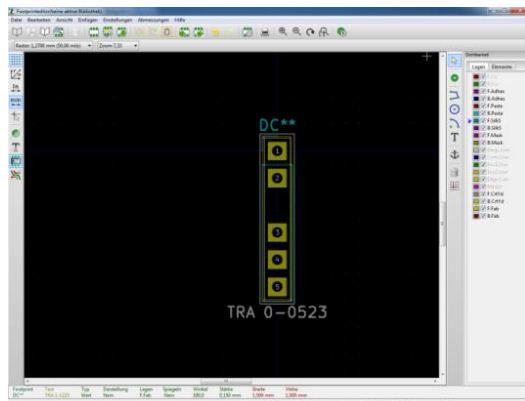
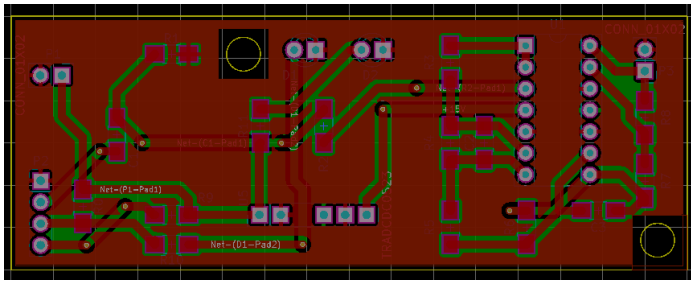


Abb. 12: Footprint für den DCDC-Wandler TRA 0—0523

Für die Erstellung der Platine in KICAD wird der Schaltplan geladen und die einzelnen Bauteile angeordnet und miteinander verbunden. Das Anzeigen der benötigten Verbindungen und die Prüfung finden durch KICAD statt. Die fertig designte Platine ist in Abbildung 13 zu sehen. In den Abbildungen 14 und 15 sind nochmals 3D-Ansichten der Platine dargestellt.



*Abb. 13: Platinendesign in KICAD im Editormodus*

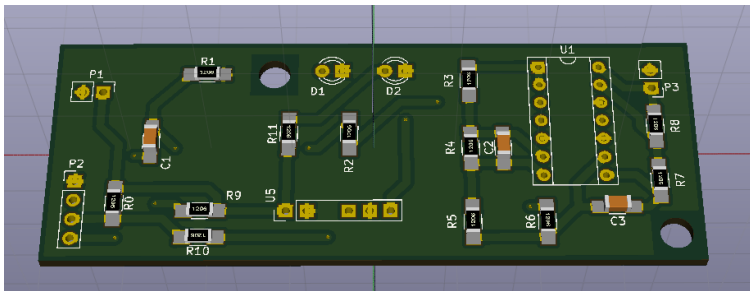


Abb. 14: 3D-Ansicht der Vorderseite der Platine in KICAD

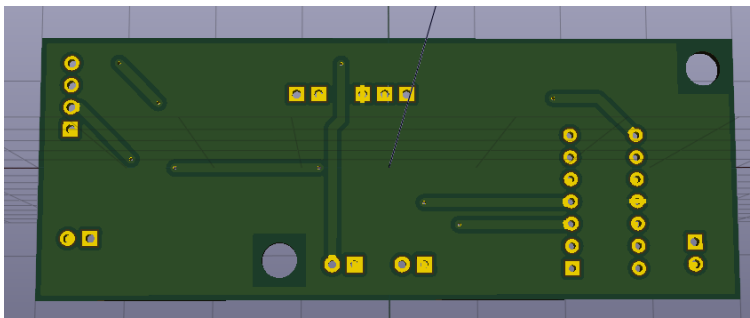


Abb. 15: 3D-Ansicht der Vorderseite der Platine in KICAD

Im Internet findet man diverse Auftragsfertiger, wo auch Privatpersonen selbst erstellte Platinen fertigen lassen können. Dazu importiert man in KICAD die erstellte Platine in das gewünschte Format und schickt es dem Fertiger. Nach ein paar Tagen erhält man die Platine.

Zum Schluss werden die elektrischen Komponenten noch händisch auf die Platine gelötet. In Abbildung 16 ist die fertige Platine mit allen aufgelöteten Komponenten zu sehen. Für die Anschlüsse werden 2,54 mm Stiftleisten verwendet. Außerdem wird der Widerstand R5, mit dem sich die Verstärkung der Schaltung einstellen lässt, mit einem Potentiometer parallel geschaltet. Somit kann die Ausgangsspannung der Elektronik variabel eingestellt werden.



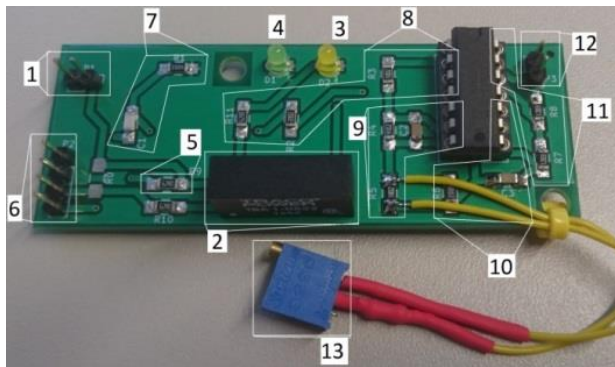


Abb. 16: Fertige Platine der Regelelektronik

### Schritt 8: Auswahl des Aktors

Das nächste Glied im Regelkreis ist der Verstärker. Bevor aber ein passender Verstärker gewählt wird, muss ein geeigneter Aktor gefunden werden. In unsrem Blog ([link](#)) finden sich einige günstige Aktoren mit technischen Daten. In dieser Postreihe sind außerdem Vermessungen einiger Aktoren, sowie ein Fazit zu finden.

Bei der Wahl des richtigen Aktors gilt es auf Größe, Form, Kraft und Auslenkung des Aktors zu achten. Wenn der Aktor fest zwischen einer Struktur und einer Halterung zum Abstützen verbunden ist (wie hier im Regelkreis), spielt die Resonanzfrequenz keine Rolle.

*Sollte der Aktor aber als sogenannter Inertialmassenaktor verwendet werden (Das heißt, der Aktor befindet sich frei schwingend an der Struktur), dann ist die Resonanzfrequenz des Aktors wichtig. Diese muss dann höher sein, als die Frequenzen der Struktur.*

Wir verwenden in diesem Beispiel den Blanko Bass Shaker, siehe Abbildung 17.



Abb. 17: Blanko Bass Shaker

### Schritt 9: Auswahl des Verstärkers

Nach der Wahl des Aktors wird noch ein passender Audioverstärker benötigt. Dieser sollte genug Leistung und eine passende Impedanz besitzen, um den gewählten Aktor zu treiben.

Auch ist die untere Grenzfrequenz wichtig. Audioverstärker haben durch einen Hochpassfilter am Eingang eine untere Grenzfrequenz. Diese liegt je nach Verstärker bei bis zu 20 Hz (untere Hörschwelle des Menschen). Bei der Grenzfrequenz kommt es allerdings zu einer Phasenverschiebung. Somit muss die Grenzfrequenz des Verstärkers kleiner sein, als die Frequenzen der zu dämpfenden Struktur.

Hier verwenden wir den Sure Electronics TPA250 Verstärker, siehe Abbildung 18. Dieser hat eine Grenzfrequenz von \_\_\_\_ Hz und wird mit 24 V versorgt.



Abb. 18: Sure Electronics TPA250 Verstärker

### Schritt 10: Aufbau des Regelkreises

Nachdem nun alle Komponenten vorhanden sind, kann der Regelkreis aufgebaut werden. In Abbildung 19 ist der prinzipielle Aufbau des Regelkreises zu sehen. Zwischen dem Aktor und dem Sensor liegt dann das zu dämpfende System.

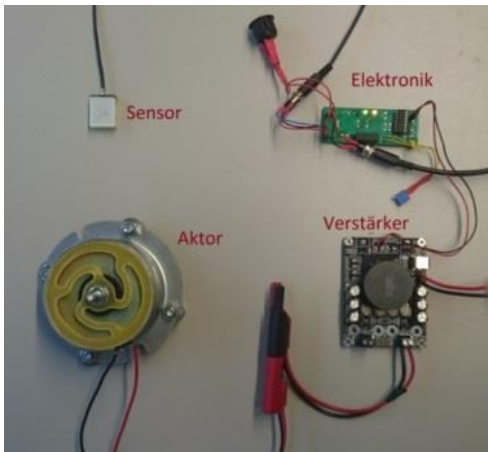


Abb. 19: Aufgebauter Regelkreis

Der Aufbau erfolgt in mehreren Montageschritten:

- a) Anbringen des Sensors an die Struktur
- b) Befestigung des Aktor zwischen der Struktur und einer festen Stütze
- c) Anschluss des Sensors an die Elektronik
- d) Versorgung der Elektronik mit 5 V
- e) Anschluss des Verstärkers an die Elektronik
- f) Versorgung des Verstärkers mit 24 V

g) Anschluss des Aktors an den Verstärker

### **Schritt 11: Einstellung und Inbetriebnahme des Regelkreises**

Als letztes erfolgt das Einstellen und Prüfen des Regelkreises:

Dazu stellt man die Verstärkung an der Platine (oder auch am Verstärker, falls vorhanden) möglichst klein. Anschließend wird ein Testsignal auf die Struktur gegeben und die Verstärkung langsam erhöht. Wird die Schwingung gedämpft, sind die Aktoranschlüsse richtig herum angeschlossen. Wird die Schwingung verstärkt und schaukelt sich das System aus, müssen die Aktoranschlüsse am Verstärker vertauscht (umgepolt) werden. Zum Schluss erhöht man langsam die Verstärkung, bis die gewünschte Dämpfung erreicht wird. Dabei sollte man die Temperatur, die maximale Spannung des Aktors und die Auslenkung am Aktor im Auge behalten und bei kritischen Werten die Verstärkung reduzieren. Wenn die gefundene Dämpfung nicht ausreichend ist, muss ein stärkerer Aktor und möglicherweise ein stärkerer Verstärker verwendet werden.

### **Optionaler Schritt 12: Einhausung der Elektronik**

Die Elektronik (Verstärker, Platine, Stecker, Schalter), kann zur besseren Übersicht, weniger Kabelsalat und zum Schutz noch eingehaust werden. Hier verwenden wir eine Box mit durchsichtigem Deckel, siehe Abbildung 20.



*Abb. 20: Box mit der Elektronik. Der Runde Schalter dient dem Ein – und Ausschalten des Systems, der längliche Schalter dem Ein und Ausschalten des Lasers*

An der Seite befinden sich die Stecker für die Kabel, siehe Abbildung 21.

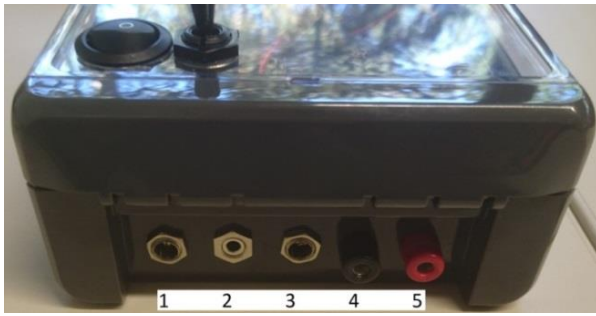


Abb. 21: Anschlüsse der Box (1: 5 V Spannungsversorgung, 2: Sensor- und Laseranschluss, 3: 24 V Spannungsversorgung des Verstärkers, 4 und 5: Anschluss des Aktors)

Die Stecker für die beiden Spannungsversorgungen bilden zwei Hohlstecker. Die 5 V haben einen Hohlstecker mit 2,5 mm und die 24 V, für den Verstärker, haben 2,1 mm, sodass diese nicht ausversehen an die Elektronik gesteckt werden können. Als Anschluss des Aktors dienen zwei Bananenstecker. Der Sensor und der Laser verlaufen über eine Leitung. Hierfür wird ein 4-Kanal 3,5 mm Klinkenstecker (+5 V, Sensorsignal, Laserspannung + und GND) verwendet.

Die verkabelte Box ist in Abbildung 22 zu sehen. Die Platine ohne Stecker ist nochmals mit der passenden Nummerierung in Abbildung 23 zu sehen.

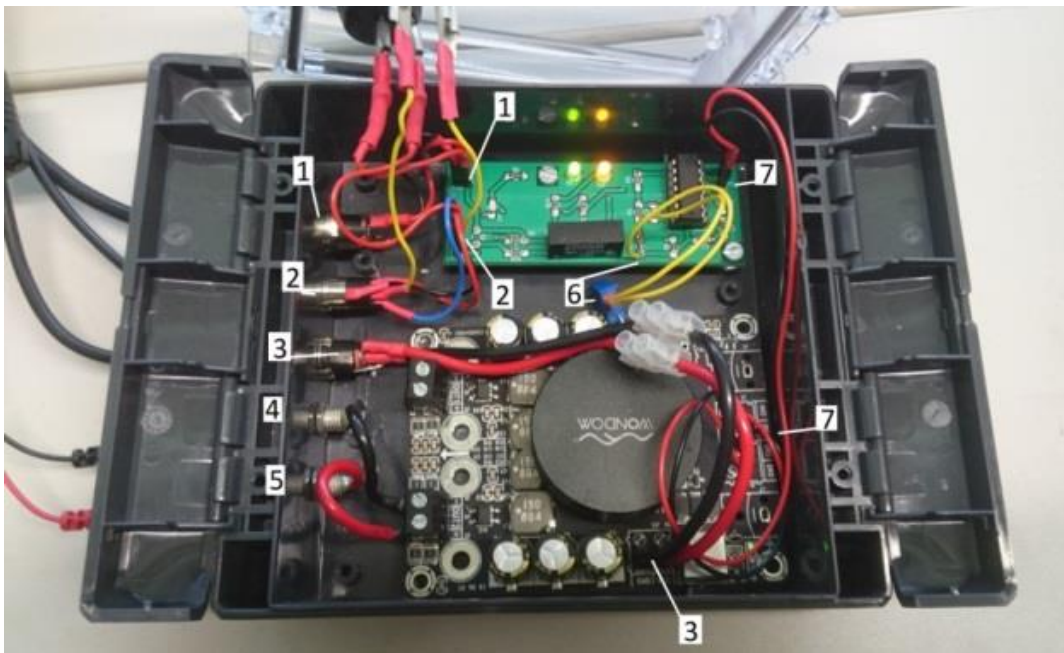


Abb. 22: Verkabelung der Box (1: 5V Spannungsversorgung, 2: Sensor- und Laseranschluss, 3: 24 V Spannungsversorgung des Verstärkers, 4 und 5: Anschluss des Aktors, 6: Potentiometer zum Anpassen der Verstärkung, 7: Anschluss der Elektronik an den Verstärker)

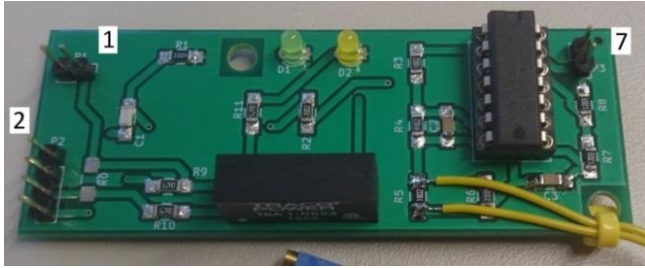


Abb. 23: Platine ohne Stecker; Nummeriert sind die drei Stecker mit der Anschlussbelegung

To Do: Auswertung des selbstgebauten Schaltkreises. Mithilfe der Website?