

Bau- und Bedienungsanleitung für die phyphox-Sensorkette

Die in dieser Anleitung vorgestellte Sensorkette ist als möglichst einfaches DIY-Projekt entworfen. Sie dient der orts aufgelösten Messung physikalischer Größen.

Die Kette besteht aus bis zu zehn Sensorboxen sowie einer sogenannten *ESP-Box*. In den Sensorboxen ist ein Beschleunigungssensor verbaut und es kann zudem pro Box ein externer Sensor angeschlossen werden. Die ESP-Box beinhaltet einen ESP32-Microcontroller, welcher die von den Sensorboxen erhaltenen Datenpakete an *phyphox* sendet.

Inhaltsverzeichnis

1	Komponenten und Werkzeug	3
1.1	Sensorbox	3
1.2	ESP-Box	4
1.3	Externer Temperatursensor (optional)	5
1.4	Verbinden und Befestigen	5
1.5	Spannungsversorgung	6
1.6	Werkzeug	6
1.7	Software	7
2	3D-Druck der Boxen	8
3	Vorbereiten der fertigen 3D-Drucke	11
4	Programmierung der Microcontroller	15
4.1	Raspberry Pi Pico	15
4.2	ESP32	15
5	Zusammenbau: Die Sensorbox	18
5.1	Der Beschleunigungssensor	19
5.1.1	Löten der Steckerleiste	19
5.1.2	Einbau	19
5.2	Einbau und Verkabelung der restlichen Bauteile	20
5.2.1	Hinweise	20
5.2.2	Bauschritte	21
6	Zusammenbau: Die ESP-Box	27

7	Externe Sensoren	28
7.1	Temperatursensor	28
7.2	Weitere Sensoren	31
8	Einsatz und Messung	32
8.1	phyphox-Experiment	32
8.2	Aufbau der Sensorkette	32
8.3	Starten einer Messung	33
8.4	Beschleunigungsmessung	33
8.4.1	Allgemeine Hinweise	33
8.4.2	Graphische Darstellung der Messwerte	34
8.5	Temperaturmessung	34
8.5.1	Allgemeine Hinweise	34
8.5.2	Graphische Darstellung der Messwerte	34
9	Weitere Hinweise	35
9.1	Belegung der Anschlüsse	35
9.2	Massen der gedruckten Komponenten	35
9.3	Kostenabschätzung	35

1 Komponenten und Werkzeug

Da die Sensorbox als druckfertiges 3D-Modell konzipiert wurde, müssen bei den Bauteilen (insbesondere bei Platinen) die Maße sowie ggf. die Positionen von Steckerleisten und Schraublöchern eingehalten werden. Alle relevanten Spezifikationen sind unten gelistet. Zu den 3D-Drucken siehe Kapitel 2. Zu einer Kostenabschätzung siehe Kapitel 9.3.

1.1 Sensorbox

Pro Sensorbox werden die folgenden Komponenten benötigt:

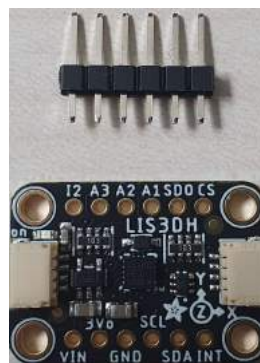
- 4 3D-Drucke (die 3D-Modell-Dateien (.stl) sind verfügbar unter <https://github.com/phyphox/sensor-array>):
 - 1 3D-Druck von *Sensorbox V4.1 Gehäuse*
 - 1 3D-Druck von *Sensorbox V4.1 Deckel*
 - 2 3D-Drucke von *Sensorbox V4.1 Sensorbrücke*
- 1 Raspberry Pi Pico H
 - Maße $51,0 \times 21,0$ mm
 - angelötete Steckerleiste wie in Abb. 1b
- 1 Adafruit 2809 3-Achsen-Beschleunigungsmesser LIS3DH
 - Maße $25,9 \times 18,0$ mm
 - Beiliegende Steckerleiste
 - Konfiguration der Schraublöcher wie in Abb. 1c



(a) Raspberry Pi Pico H (oben)



(b) Raspberry Pi Pico H (unten)



(c) Beschleunigungssensor/ „-messer“ von Adafruit



(d) Terminal-Block

Abbildung 1: Elektr(on)ische Komponenten der Sensorbox.

- 3 Goobay 76746 Terminal-Block 3-pin (Buchse, siehe Abb. 1d)
- Steckbrückenkabel (Länge: 10 cm)
 - 4 Female-Female
 - 6 Female-Male
 - 2 Male-Male
- 8 RUTHEX GE-M3X57-001 Gewindeeinsätze (M3-Innengewinde)
- 8 M3 × 10 mm-Zylinderschrauben (vorzugsweise Innensechskant)
- 8 ø3,2 mm-Unterlegscheiben

1.2 ESP-Box

Für die ESP-Box werden die folgenden Komponenten benötigt:

- 2 3D-Drucke (die 3D-Modell-Dateien (.stl) sind verfügbar unter <https://github.com/phyphox/sensor-array>):
 - 1 3D-Druck von *ESP-Box V1 Gehäuse*
 - 1 3D-Druck von *ESP-Box V1 Deckel*
- 1 Joy-it NodeMCU ESP32
 - Maße 51,6 × 28,4 mm
 - angelötete Steckerleiste wie in Abb. 2.
 - Schraublöcher mit ø3 mm
- 1 Goobay 76746 Terminal-Block 3-pin (Buchse, siehe Abb. 1d)
- 3 female-male-Steckbrückenkabel (Länge: 10 cm)
- 4 RUTHEX GE-M3X57-001 Gewindeeinsätze (M3-Innengewinde)
- 4 M3 × 10 mm-Zylinderschrauben (vorzugsweise Innensechskant)
- 4 ø3,2 mm-Unterlegscheiben



(a) oben



(b) unten

Abbildung 2:
ESP-32-
Microcontroller



(a) Temperatursensor



(b) 3-poliger Klinkenstecker



(c) 4,3 kΩ-Widerstand.

Abbildung 3: Elektr(on)ische Komponenten des externen Temperatursensors.

1.3 Externer Temperatursensor (optional)

Pro Temperatursensor werden die folgenden Komponenten benötigt (siehe Abb. 3):

- 1 Tru Components TC-9445340 Temperatursensor
- 1 3-poliger 3,5 mm-Stereo-Klinkenstecker
- 1 Widerstand mit ungefähr 5 kΩ. Gängig sind bspw. 4,7 kΩ-Widerstände. Bei der Entwicklung wurden 4,3 kΩ-Widerstände verwendet.
- Isolierband

1.4 Verbinden und Befestigen

- Die Signalweitergabe zwischen den Sensorboxen erfolgt über dreipolige 3,5 mm-Klinkenkabel (male-male) mit einer zu bevorzugenden Länge von jeweils 50 cm.
- Die Signalweitergabe zur ESP-Box erfolgt ebenfalls über ein solches Klinkenkabel, allerdings mit einer Länge von 100 cm, um auch Aufbauten in einer Höhe von bis zu 90 cm zu ermöglichen.
- Externe Sensoren müssen entweder über dreipolige 3,5 mm-Klinkenstecker verfügen oder an entsprechende Stecker angelötet werden (siehe Kapitel 7).
- Zur Befestigung der Sensorboxen (z.B. an einer Slackline) sind pro Box je zwei Klettbander mit Umlenköse und den Maßen 40 × 2 cm vorgesehen. Die Bänder dürfen hierbei geringfügig länger oder kürzer sein, sollten allerdings um höchstens 5 cm von der Vorgabe (40 cm) abweichen. Die Breite der Bänder ist nicht variabel.

1.5 Spannungsversorgung

Für die Spannungsversorgung werden die folgenden Komponenten benötigt:

- 1 Powerbank mit einer Nennspannung von $U_{\text{nenn}} = 5 \text{ V}$
- 1 MicroUSB-Kabel

1.6 Werkzeug

Für den Bau der Boxen sind die folgenden Geräte/Werkzeuge unabdingbar:

- 1 Computer
- 1 3D-Drucker
 - Minimale Auflösung $\leq 0,20 \text{ mm}$
 - Mindestmaße des Druckbereichs: $119 \times 64 \times 45 \text{ mm}$
 - Empfohlenes Material: PLA
- 1 Hand-Entgrater mit Klinge
- 1 Nagelfeile
- 1 Hammer
- 1 Lötkolben mit Lötzinn
- 1 2,5 mm-Innensechskantschlüssel
- 1 3 mm-Phillips-Kreuzschlitzschraubendreher

Zudem werden die folgenden Werkzeuge unbedingt empfohlen:

- 1 Spachtel
- 1 Kegel-Senker-Einsatz für den Hand-Entgrater
- 1 Platinenhalter zum Löten
- 2 Lötpinzetten

1.7 Software

Es wird die folgende Software benötigt (downloadbar unter <https://github.com/phyphox/sensor-array>):

- Die Datei `accelerometer_array_2023-07-14.uf2`
- Die Datei `esp32-acc-array-receiver_2023-07-14.ino`

2 3D-Druck der Boxen

Für den Druck wurde die frei verfügbare Slicer-Software *UltiMaker Cura* verwendet. Diese hat die Aufgabe, aus den 3D-Modell-Dateien (.stl) für den jeweiligen Drucker lesbare, sogenannte G-Code-Dateien zu erstellen. Für den Druck der Boxen müssen die folgenden Schritte durchlaufen werden:

1. Installation und Öffnen von *Cura*.
2. Auswahl des für den Druck gedachten Druckermodells.
3. Einstellen des gewünschten Materials (empfohlen: Generic PLA) und des Print-Cores (empfohlen: AA 0.4).

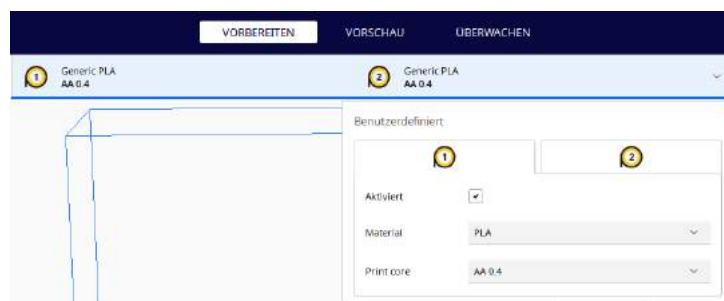
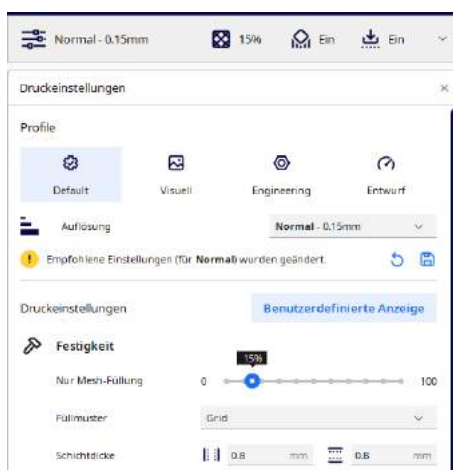
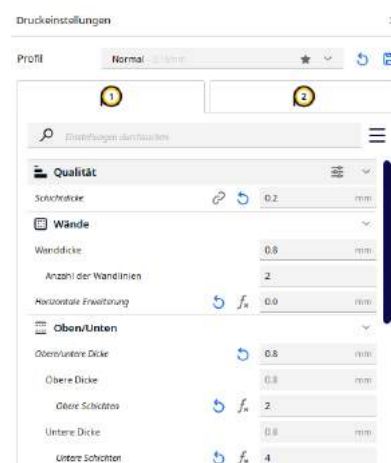


Abbildung 4: Material- und Print-Core-Einstellungen in *Cura*.

4. Konfigurieren der Druckeinstellungen: Die empfohlenen Einstellungen sind auf der nächsten Seite aufgelistet. Sie werden in der *Benutzerdefinierten Anzeige* ausgewählt (siehe auch Abb. 5). Nicht gelistete Einstellungen können auf dem jeweiligen Default-Wert belassen werden.



(a) Default-Anzeige. Rechts befindet sich der Button zum Wechsel zur benutzerdefinierten Anzeige



(b) Benutzerdefinierte Anzeige

Abbildung 5: Druckeinstellungen in *Cura*

Profil: 0,15 mm

Qualität

Schichtdicke: 0,15 mm

Wände

Wanddicke: 0,8 mm

Anzahl der Wandlinien: 2

Horizontale Erweiterung: 0,0 mm

Oben/Unten

Obere/untere Dicke: 0,8 mm

Obere Schichten: 2

Untere Schichten: 4

Füllung

Fülldichte: 15,0%

Füllmuster: Gitter

Geschwindigkeit

Druckgeschwindigkeit: 50,0 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$

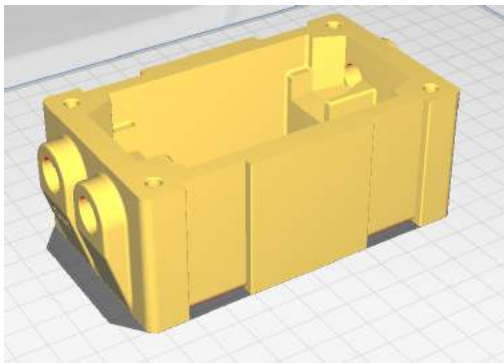
Stützstruktur

Stützstruktur generieren: ✓

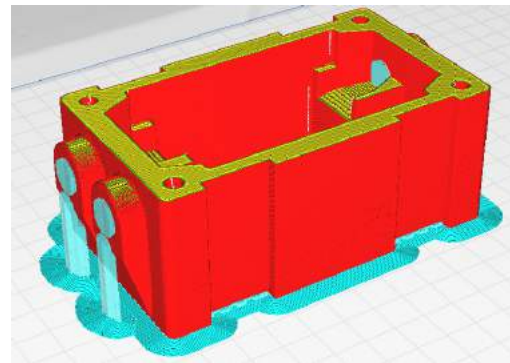
Extruder für Stützstruktur: Extruder 1

Winkel für Überhänge Stützstruktur: 30,0%

5. Öffnen der STL-Datei des zu druckenden Objekts in *Cura*.
6. Slicen des Objekts (Schaltfläche unten rechts im Fenster). Nach dem Slicen wird unten rechts im Fenster das berechnete Gewicht des Objekts und die voraussichtliche Druckzeit angegeben.
7. Speichern des gesliceten Objekts als G-Code-Datei auf einem vom jeweiligen 3D-Drucker akzeptierten Speichermedium (SD-Karte oder USB-Stick).
8. Drucken der G-Code-Datei (hierzu wird auf die Bedienungsanleitung des Druckers verwiesen).
9. Vorsichtiges Lösen der 3D-Drucke von der Auflagefläche des Druckers. Insbesondere bei flachen oder kleinen Bauteilen ist ein Spatel hilfreich.



(a) Sensorbox vor dem Slicen.



(b) Sensorbox nach dem Slicen. Man sieht die hinzugefügten Ränder und Extrusionen.

Abbildung 6: Vorher-Nachher-Vergleich des Slice-Vorgangs.

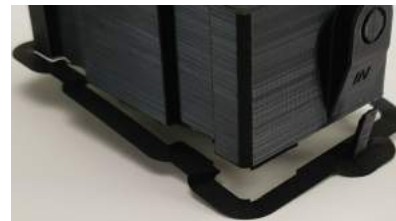
3 Vorbereiten der fertigen 3D-Drucke

Bevor die 3D-Drucke für den Bau der Sensorkette verwendet werden können, müssen zunächst die folgenden Schritte durchgeführt werden:

1. Vorsichtiges Entfernen des Randes an der Auflagefläche des 3D-Drucks (siehe Abb. 7).



(a) vollständig



(b) teils entfernt

Abbildung 7: Rand an der Auflagefläche des 3D-Drucks.

2. Entgraten der Kanten an der Auflagefläche des 3D-Drucks.

Entgraten

???

Bevor die fertigen 3D-Drucke im Zusammenbau verwendet werden können, müssen sie entgratet werden. Dies erfolgt mithilfe eines Hand-Entgraters mit Klinge, die mit moderatem Druck an den betroffenen Kanten entlanggeführt wird (siehe Abb. 8), sodass dünne Streifen Kunststoff abgestriffen werden. Hierbei ist darauf zu achten, beim Entgraten nicht abzurutschen, da die dünne und scharfe Klinge tiefe Schnitte verursachen kann.



Abbildung 8: Entgraten einer Kante

3. Entfernen der Füllstrukturen in den Durchführungen der Gehäuse.

Entfernen von Füllstrukturen

???

Die Durchführungen in Sensor- und ESP-Box müssen beim Druck mit einer Füllstruktur versehen werden (siehe Abb. 9). Um diese zu entfernen, wird empfohlen, eine Stange mit ungefähr passendem Durchmesser oder ein ähnliches Werkzeug aus Stahl mit einem Hammer in die Durchführung zu schlagen und so die Füllung zu verdrängen. Alternativ kann statt dem Werkzeug auch einer der Terminal-

Blöcke verwendet werden, da diese notwendigerweise den richtigen Durchmesser haben.



Abbildung 9: Durchführungen mit Füllstruktur.



Abbildung 10: Durchführungen ohne Füllstruktur.

4. Einschmelzen der Gewinde in die dafür vorgesehenen Löcher in den Gehäusen.

- Sensorbox: 8 Gewindeeinsätze
 - 4 im Gehäuserand
 - 4 im Gehäuseinneren
- ESP-Box: 4 Gewindeeinsätze im Gehäuserand

Vor dem nächsten Schritt müssen die Gewinde abkühlen, da diese sonst verkippen können.

Einschmelzen von Gewindeeinsätzen

???

Sollten Sie noch nie Gewinde eingeschmolzen haben, lesen Sie diese Hilfestellung bitte *vor* der Durchführung *vollständig* durch!

Die in Kapitel 1 erwähnten Gewindeeinsätze werden in vorgedruckte Löcher eingeschmolzen. Hierzu setzt man die Gewindeeinsätze mit der engeren Seite in die Löcher hinein (siehe Abb. 11 und 12). Gelingt dies aufgrund von Druckungenauigkeiten nicht, kann man die Lochränder mit einem Schraubenzieher leicht weiten. Anschließend platziert man den vorgeheizten LötKolben ($225^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$ für PLA, typischerweise $10^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ höher als die Drucktemperatur) vertikal von oben in dem Gewinde, sodass das Gewinde durch den Kontakt an den Innenwänden erhitzt wird (siehe Abb. 13). Ohne Wartezeit drückt man das Gewinde mit dem LötKolben vorsichtig nach unten in das Loch hinein. Hierbei sind die folgenden Dinge zu beachten:

- Das Gewinde kann von erhitzter Luft wieder nach oben gedrückt werden, d.h. es ist ggf. ein Nachdrücken notwendig, damit das Gewinde wie vorge-

sehen (s.u.) sitzt. Das Nachdrücken erfolgt kurz und stoßartig, damit die Struktur um das Loch intakt bleibt und nicht schmilzt (die Konsequenz wäre ein schräg sitzendes Gewinde).

- Beim Einschmelzen kann sich insbesondere bei zu hohen Temperaturen ein Ring aus verdrängtem Material um das Loch bilden (siehe Abb. 14). Der obere Rand des Gewindeeinsatzes sollte allerdings plan mit der ursprünglichen Oberfläche sitzen und nicht mit dem Ring.
- Sitzt das Gewinde etwas zu tief, wirkt sich das nicht negativ aus. Es darf allerdings nicht zu hoch und auch nicht schräg sitzen.



Abbildung 11: Platzierung der Gewinde im Gehäuse der Sensorbox.



Abbildung 12: Closeup der Platzierung.



Abbildung 13: Einschmelzen eines Gewindes.

5. Entfernen der Schmelzringe um die Gewinde (nicht notwendig bei den Gewinden zur Sensorbefestigung).

Entfernen von Schmelzringen

???

Nachdem die Gewinde abgekühlt sind, lassen sich etwaige Schmelzringe am besten mithilfe eines Kegel-Senker-Einsatzes für den Entgrater entfernen. Falls der Entgrater über eine hinreichend schmale Klinge verfügt, die sich mit der Spitze im Gewinde ansetzen lässt, kann auch diese genutzt werden. Der hierbei entstehende Trichter kann dann leicht mit der Nagelfeile weggeschliffen werden (siehe Abb. 15).

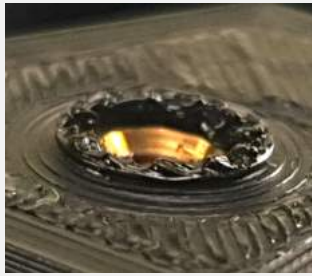


Abbildung 14: Ring aus verdrängtem Material um das eingeschmolzene Gewinde.

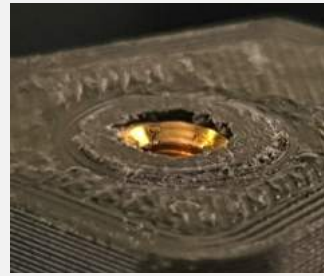


Abbildung 15: Einschmelzstelle nach Wegfeilen des Rings.

4 Programmierung der Microcontroller

4.1 Raspberry Pi Pico

Die Programmierung des Raspberry Pi Pico sollte unbedingt *vor* dem Einbau in die Sensorbox durchgeführt werden, da nach Einbau dessen Micro-USB-Anschluss nicht mehr zugänglich ist!

1. Knopf auf Oberseite des Microcontrollers drücken und bis einschließlich Schritt 3 durchgängig gedrückt halten.
2. Microcontroller mit einem MicroUSB-Kabel an einen Computer anschließen.
3. Sobald der Microcontroller erkannt wurde, kann der Knopf losgelassen werden.
4. Die Datei `accelerometer_array_2023-07-14.uf2` auf dem Microcontroller ablegen.
5. Das Fenster sollte sich nun automatisch schließen und die grüne LED des Microcontrollers sollte nun leuchten.
6. Microcontroller vom Computer trennen. Hierbei den Knopf *nicht* drücken.

4.2 ESP32

Für die Programmierung des ESP32 müssen die folgenden Schritte durchgeführt werden:

1. Den ESP32 mit einem MicroUSB-Kabel an den Computer anschließen.
2. Installation des ESP32-Treibers:
 - a) Unter <https://www.silabs.com/developers/usb-to-uart-bridge-vcp-drivers?tab=downloads> den dem verwendeten Betriebssystem zugeordneten ZIP-Ordner herunterladen.
 - b) Der Anleitung für den *Manual Install* in den im ZIP-Ordner enthaltenen Release-Notes (Textdatei) Schritt für Schritt folgen.
3. Die Arduino IDE (Entwicklungsumgebung für die Programmiersprache *Arduino*) von der offiziellen Arduino-Website herunterladen und installieren (siehe <https://www.arduino.cc/en/software>).
4. Die Arduino-IDE öffnen. Sämtliche Pakete, die zur Installation vorgeschlagen werden, installieren.

5. Den ESP32 als Board auswählen:

- Im *File*-Dropdown-Menü das Feld *Preferences* auswählen.
- Im sich öffnenden Fenster unter *Additional board manager URLs* die URL https://espressif.github.io/arduino-esp32/package_esp32_index.json eintragen und auf *OK* klicken.
- Im *Tools*-Dropdown-Menü unter *Board* das Feld *Board-Manager* wählen.
- Im Board Manager links das Paket *esp32* suchen und installieren. Sollten mehrere Pakete angezeigt werden, das Paket von *Espressiv Systems* wählen.
- Im *Tools*-Dropdown-Menü unter *Board* und *esp32* das Board *ESP32 Dev Module* auswählen.

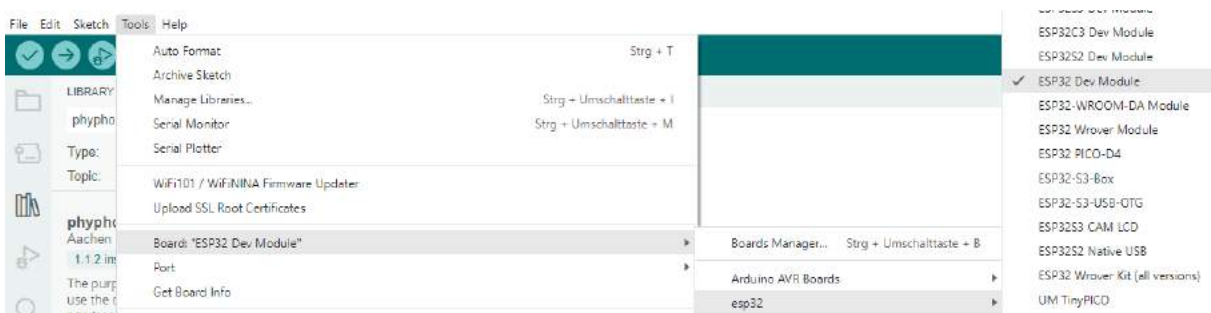


Abbildung 16: Geöffnetes *Tools*-Dropdown-Menü mit der Auswahl des Boards.

6. phyphox-Bibliothek herunterladen:

- Im *Tools*-Dropdown-Menü das Feld *Manage Libraries* wählen.
- Im Library Manager links nach dem Paket *phyphox BLE* suchen und dieses installieren.

7. Die Datei `esp32-acc-array-receiver_2023-07-14.ino` über das Feld *Open* im *File*-Dropdown-Menü öffnen. Wenn sich nun ein neues Fenster öffnet, in dem neuen Fenster weiterarbeiten.

8. Im *Tools*-Dropdown-Menü unter *Port* den untersten COM-Anschluss wählen.

9. Im *Sketch*-Dropdown-Menü *Upload* auswählen.

Nach dem letzten Schritt kompiliert die IDE zunächst den Code und beginnt anschließend den Upload auf den Microcontroller. Während des Uploads sollte eine Kommandozeile im unteren Bereich des Fensters eine Fortschrittsanzeige geben. Ist dies nicht der Fall oder schlägt der Upload fehl, wurde in Schritt 8 der falsche Anschluss ausgewählt. In diesem Fall ist ein anderer Anschluss zu wählen und der Upload zu wiederholen. Der Upload ist

beendet, wenn in der Kommandozeile der Satz *Hard-Resetting via RTS-Pin* steht. Der ESP32 kann dann vom Computer entfernt werden.

Im Falle einer eventuellen erneuten Programmierung sind lediglich die Schritte 1 sowie 7 - 9 auszuführen, da die Schritte 2 - 6 lediglich der Einrichtung des Computers und der Arduino IDE dienen.

```
22 unsigned long t0 = 0;
23
24 void loop() {
25     while (Serial2.available()) {
26         package[packageIndex++] = Serial2.read();
27         if (aligned && packageIndex == packageSize) {
28             if (
29                 package[0] == 0xf0 &&
30                 package[1] == 0x0f
31             // package[0] == 0xa0 &&
```

Output

```
Wrote 18960 bytes (13073 compressed) at 0x00001000 in 0.4 seconds (effective 379.5 kbit/s)...
Hash of data verified.
Compressed 3072 bytes to 146...
Writing at 0x00008000... (100 %)
Wrote 3072 bytes (146 compressed) at 0x00008000 in 0.1 seconds (effective 464.4 kbit/s)...
Hash of data verified.
Compressed 8192 bytes to 47...
Writing at 0x0000e000... (100 %)
Wrote 8192 bytes (47 compressed) at 0x0000e000 in 0.1 seconds (effective 663.7 kbit/s)...
Hash of data verified.
Compressed 1080560 bytes to 681394...
Writing at 0x00010000... (2 %)
Writing at 0x0001ab57... (4 %)
Writing at 0x00026acd... (7 %)
```

Abbildung 17: Fortschrittsanzeige während des Upload-Vorgangs.

5 Zusammenbau: Die Sensorbox

Löten



Durch den Verbau von Entwicklerboards und Steckbrückenkabeln wurde der Löt-aufwand für den Bau der Sensorkette auf ein Minimum reduziert. Nach aktuellem Stand müssen pro Sensorbox lediglich eine Steckerleiste an den Beschleunigungs-sensor sowie ein Klinkenstecker an den Temperatursensor gelötet werden. Hierzu gibt es an den entsprechenden Stellen der Anleitung *bauteilspezifische* Tipps zum Löten.

Allgemein sind beim Löten die folgenden Punkte zu beachten:

- Es ist für eine gute Durchlüftung der Räumlichkeiten zu sorgen.
- Es sollte eine Schutzbrille getragen werden, um sich vor spritzendem Lötzinn zu schützen.
- Bei bleifreiem Lötzinn liegt die Schmelztemperatur typischerweise zwischen 218°C und 230°C.
- Die zu verlötenden Bauteile sollten nicht länger als vier bis sechs Sekunden am Stück erhitzt werden, um Schäden vorzubeugen.

Falls das erste Mal gelötet wird, sollte dies zunächst geübt werden, z.B. indem zwei Drahtenden oder Steckbrückenkabel zusammengelötet werden.

Für die entsprechenden Bauschritte dieser Anleitung wird die Verwendung eines *Platinenhalters* empfohlen, in den z.B. der Beschleunigungssensor eingespannt werden kann. Ebenfalls empfohlen werden *Lötpinzetten* zur Handhabung von erhitzten Bauteilen und zur Fixierung.

Für weitere Tipps zum Löten wird an dieser Stelle auf geeignete Online-Guides verwiesen, wie z.B. dieser: <https://www.jh-profishop.de/profi-guide/richtig-loeten/>

5.1 Der Beschleunigungssensor

5.1.1 Löten der Steckerleiste

1. Sechs verbundene(!) Pins von der mitgelieferten Steckerleiste abbrehen.
2. Steckerleiste wie auf Abb. 18a an der Seite des VIN-Kontakts am Sensor anbringen und wie auf Abb. 18b mit der Unterseite nach oben festklemmen. Hierzu wird ein Aufbau mit Platinehalter und Lötpinzette wie in Abb. 18c empfohlen.

Wichtig! Steckerleiste an der Oberseite anbringen!

3. Die Kontakte einzeln löten, sodass die Kontakte vollständig von Lötzinn bedeckt sind. Am einfachsten ist es, wenn der Sensor leicht zu Ihnen geneigt ist und der LötKolben wie in Abb. 18d zwischen zwei Pins gesetzt wird. Das Lötzinn wird von links an die Kontaktstelle geführt. Für Linkshänder gilt die Abbildung gespiegelt.

Wichtig! Die Lötstellen dürfen sich nicht berühren!

5.1.2 Einbau

Für den Einbau des Beschleunigungssensors werden die Sensorbrücken benötigt.

1. Sensor in dafür vorgesehenem Kästchen auf dem Gehäuseboden platzieren (siehe Abb. 19a).
2. Die Sensorbrücken wie in Abb. 19b platzieren.
3. Mit $M3 \times 10$ mm-Schrauben und Unterlegscheiben verschrauben.

Wichtig! Um ein spielfreies Befestigen des Sensors zu gewährleisten, sind die Sensorbrücken so entworfen, dass sie *nicht* auf den Flächen um die Gewinde aufliegen. Daher wölben sich die Sensorbrücken beim Festziehen leicht nach oben.



(a) Positionierung der Steckerleiste



(b) Positionierung des Sensors zum Löten



(c) Aufbau zum Festklemmen des Sensors

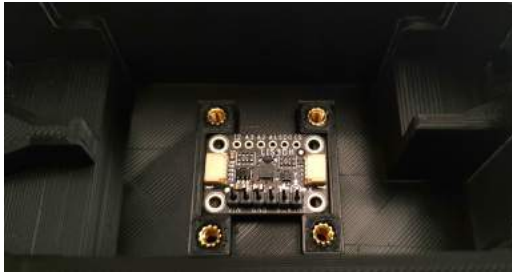


(d) Positionierung des LötKolbens

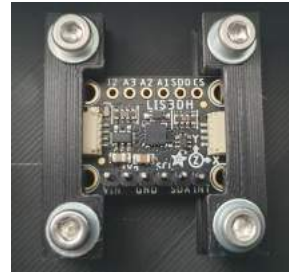


(e) Fertige Lötstellen

Abbildung 18:
Positionierung von Steckerleiste und Beschleunigungssensor zum Löten.



(a) Platzierung des Sensors



(b) Platzierung und Verschraubung der Sensorbrücken

Abbildung 19: Einbau des Beschleunigungssensors

5.2 Einbau und Verkabelung der restlichen Bauteile

5.2.1 Hinweise

Die folgenden Schritte sind unter anderem aufgrund der Pinbezeichnungen und verschiedenen Kabelarten komplex. Die folgenden Hinweise sollen deren Beschreibung und somit auch den Bau vereinfachen:

- *Raspberry Pi Pico*: Die Pins sind auf der Oberseite von 1 beginnend aufsteigend durchnummeriert, auf der Rückseite allerdings mit einer Bezeichnung versehen. Pins werden daher im Folgenden im Format *Oberseite/Unterseite* bezeichnet, also z.B. 1/GP0 oder 36/3V3.
- *Terminal-Blöcke*: Diese verfügen abgesehen von der Klinkenbuchse über drei mit L, R und \perp (Ground) bezeichnete Anschlüsse, welche mit einem Kreuzschlitzschraubendreher geöffnet und geschlossen werden müssen. Die Blöcke werden im Folgenden kurz als *Terminals* bezeichnet. Kabel im L-Anschluss werden im Folgenden auch als L-Kabel bezeichnet, Kabel im R-Anschluss dementsprechend als R-Kabel und Kabel im \perp -Anschluss als \perp -Kabel.
- *Steckbrückenkabel*: Im Folgenden werden female-female-Steckbrückenkabel als ff-Kabel bezeichnet, female-male-Steckbrückenkabel als fm-Kabel und male-male-Steckbrückenkabel als mm-Kabel.
- Nicht genannte Pins werden nicht verkabelt.

Die folgenden Bauschritte werden mithilfe der sich unterhalb des jeweiligen Bauschritts befindenden Abbildungen illustriert und beziehen sich teils auch darauf. Die Abbildungen orientieren sich hierbei an den jeweiligen Unterschriften. Aufgrund der Kabeldichte im Gehäuse beschreiben die Unterschriften unter anderem die Positionierung und Führung der Kabel (teils unterstützend anhand der hier verwendeten Kabelfarben). Diese ist enorm wichtig, damit alle Bauteile ohne Beschädigung im Gehäuse untergebracht werden können!

5.2.2 Bauschritte

1.) Verkabelung des Beschleunigungssensors und der Terminals

a) Beschleunigungssensor:

VIN: ff-Kabel
 GND: ff-Kabel
 SCL: ff-Kabel
 SDA: ff-Kabel

b) Erstes Terminal (links):

L: mm-Kabel
 R: fm-Kabel
 \perp : mm-Kabel

c) Zweites Terminal (rechts):

L: fm-Kabel
 R: fm-Kabel
 \perp : fm-Kabel

Anschließend werden die mm-Kabel des ersten Terminals so mit dem zweiten Terminal verbunden, dass jeweils die L-Eingänge und die \perp -Eingänge miteinander verbunden sind (siehe Abb. 22). Die Kabel werden *nicht* mit anderen Kabeln verbunden, sondern direkt in das Terminal eingesteckt. Es wird empfohlen, die mm-Kabel auf der Innenseite der entsprechenden Anschlüsse einzustecken (siehe ebenfalls Abb. 22). Hierzu müssen sich die mm-Kabel kreuzen.

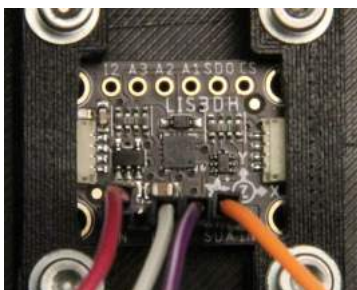


Abbildung 20: Verkabelung des Beschleunigungssensors.

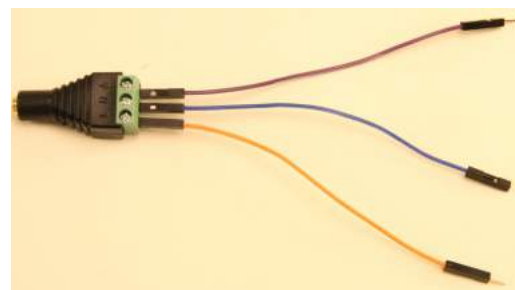


Abbildung 21: Verkabelung des Ausgang-Terminals.



Abbildung 22: Verkabelung beider Terminals. Die die Terminals verbindenden Kabel (orange und violett) verlaufen über Kreuz.

2.) Einbau der Terminals

- a) Das Gehäuse der Sensorbox so platzieren, dass die Seite mit den zwei Durchführungen nach links gerichtet ist. Anschließend die Terminals in die linke und rechte Hand nehmen und wie in Abb. 23 das R-Kabel des linken Terminals durch die Anschlüsse des rechten Terminals führen.
- b) Das rechte Terminal von innen in die IN-Durchführung im Gehäuse schieben.
- c) Das linke Terminal vorsichtig näher an das rechte Terminal bringen. Hierbei bilden die zwei mm-Kabel Schlaufen. Diese mit einem Schraubenzieher wie in Abb. 25 nach vorne links führen. Durch die Schlaufen darf kein Kabel verlaufen!
- d) Das linke Terminal von innen in die OUT-Durchführung im Gehäuse schieben.

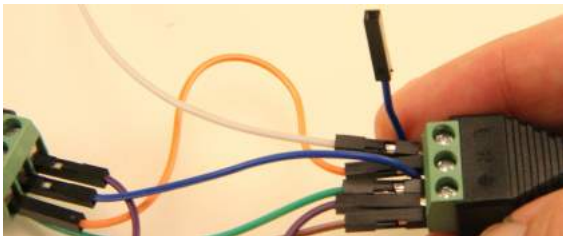


Abbildung 23: Kabelverlegung vor dem Einbau der Terminals.



Abbildung 24: Einbau des Eingang-Terminals.



Abbildung 25: Einbau des Ausgang-Terminals Schritt 1.

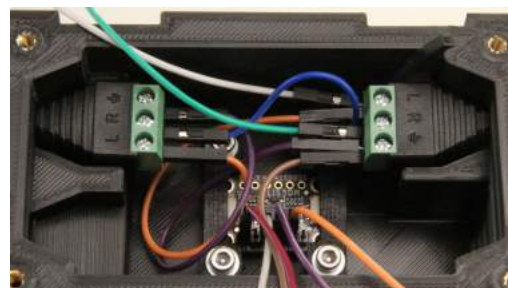


Abbildung 26: Einbau des Ausgang-Terminals Schritt 2.

3.) Einbau des Raspberry Pi Pico H

- a) Das freie L-Kabel (weiß) und das R-Kabel (grün) des rechten Terminals so nach hinten links führen, dass die Kabelenden knapp über dem Gehäuserand sitzen. Hierbei hilft erneut ein Schraubenzieher, um mit den Kabeln unter dem linken Terminal eine Schlaufe zu bilden (siehe Abb. 27).

- b) Anschließen des Raspberry Pi Pico an die Terminals:

39/VSYS: freies L-Kabel des rechten Terminals (weiß)
 27/GP21: R-Kabel des linken Terminals (blau)
 26/GP20: R-Kabel des rechten Terminals (grün)

Hierbei sollte das R-Kabel des linken Terminals *hinter* dem R-Kabel des rechten Terminals verlaufen (wie in Abb. 28).

- c) Anschließen des Raspberry Pi Pico an den Beschleunigungssensor:

1/GP0: SDA
 2/GP1: SCL
 3/GND: GND
 4/GP2: VIN

Die Kabel sollten hierbei so gelegt werden, dass sie eine Schlaufe bilden wie in Abb. 30.

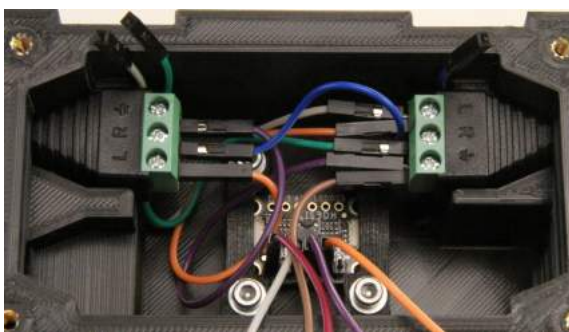


Abbildung 27: Kabelverlegung vor dem Einbau des Microcontrollers.

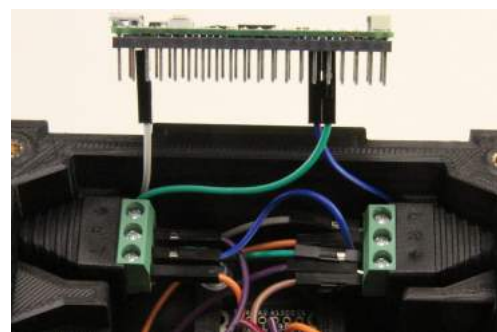


Abbildung 28: Anschluss des Microcontrollers an die Terminals (Teil 1).

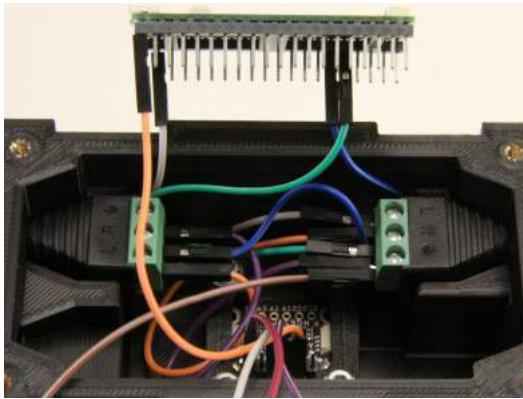


Abbildung 29: Anschluss des Microcontrollers an den Beschleunigungssensor (Teil 1).

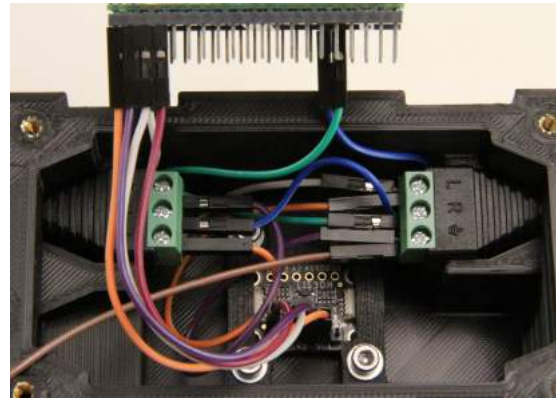


Abbildung 30: Anschluss des Microcontrollers an den Beschleunigungssensor (Teil 2).

4.) Einbau des Sensor-Terminals und Platzierung des Raspberry Pi Pico

- a) Führen der Schlaufe aus dem vorherigen Schritt nach vorne rechts unten (siehe Abb. 31).
- b) Anschließen der letzten Kabel an den Raspberry Pi Pico (siehe Abb. 32):
 - Das \perp -Kabel des rechten Terminals (braun) gegen den Uhrzeigersinn um die Schlaufe des vorherigen Schritts führen und am 8/GND-Pin anschließen.
 - Anschließen neuer weiterer Kabel:

9/GP6:	fm-Kabel (gelb)
13/GND:	fm-Kabel (schwarz)
36/3V3:	fm-Kabel (rot)

Die ersten beiden Kabel sollten hierbei durch die Schlaufe zur noch unbelegten EXT-Durchführung gelegt werden. Das Kabel am 36/3V3-Pin sollte wie in der Abbildung nach oben und über den Raspberry Pi Pico geführt werden. Es ist wichtig, dass das Kabel *zwischen Knopf und schwarzem Quadrat* verläuft, da sich sonst später der Deckel nicht schließen lässt.

- c) Den Raspberry Pi Pico vorsichtig auf/zwischen den Terminals platzieren, sodass er links und rechts flach aufliegt. Hierbei dürfen keine Anschlüsse an den Terminals umknicken!
- d) Die drei noch freien Kabel an ein neues Terminal anschließen und dieses von

innen in die EXT-Durchführung schieben:

- L: 36/3V3 (rot)
R: 9/GP6 (gelb)
⊥: 13/GND (schwarz)



Abbildung 31: Kabelverlegung vor dem Anschluss der restlichen Kabel.

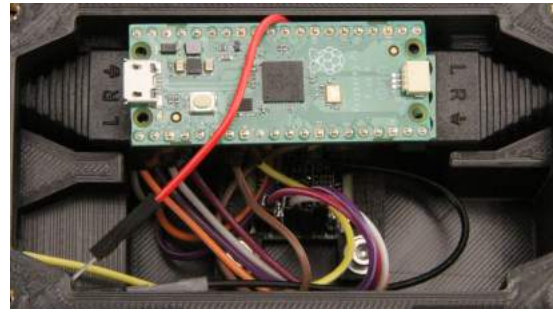


Abbildung 32: Anschluss des Microcontrollers an die Terminals (Teil 2).

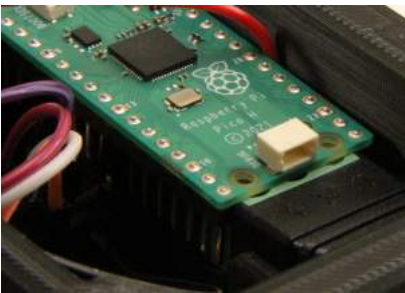


Abbildung 33: Platzierung des Microcontrollers.

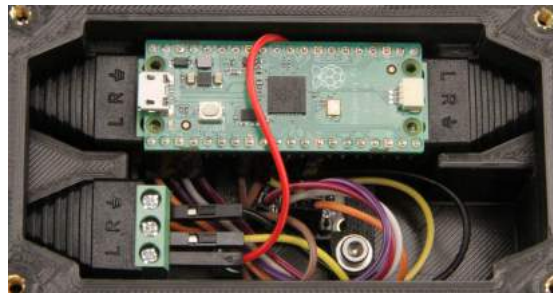


Abbildung 34: Einbau des Sensor-Terminals.

5.) Schließen der Box

- Den Deckel so halten, dass sich die am weitesten aus dem Deckel ragende Rippe auf der linken Seite hinter dem EXT-Anschluss befindet.
- Mit dem Deckel vorsichtig die Box schließen.
- Den Deckel mit vier M3 × 10 mm-Schrauben und Unterlegscheiben verschrauben. Die Schrauben sollten hierbei nur so fest angezogen werden, dass sie sich gerade so nicht mehr per Hand lösen lassen.

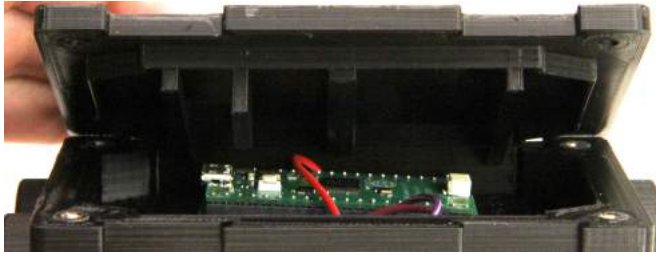


Abbildung 35: Richtige Orientierung des Deckels.



Abbildung 36: Geschlossene Sensorbox mit verschraubtem Deckel.

6 Zusammenbau: Die ESP-Box

Zu Notation und Benennung der Bauteile siehe Kapitel 5.2.1.

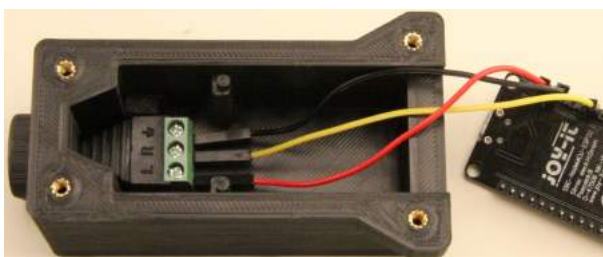
1. Gehäuse so platzieren, dass der Eingang auf der linken Seite ist.
2. Kabel an das Terminal anschließen:

L: fm-Kabel
R: fm-Kabel
⏏: fm-Kabel

3. Terminal an ESP32 anschließen:

L: 3V3
R: RX2
⏏: GND (*der Anschluss neben 3V3*)

4. Das Terminal an den vorgesehenen Platz schieben (siehe Abb. 37a).
5. Den ESP32 so orientieren, dass der MicroUSB-Anschluss auf der rechten Seite ist.
6. Den ESP32 so einbauen, dass er links von den nach oben ragenden Noppen gehalten wird und rechts auf der Gehäusewand aufliegt (siehe Abb. 37b).
7. Vorsichtig die Box mit dem Deckel schließen und mit 4 M3 × 10 mm-Schrauben und Unterlegscheiben verschrauben.



(a) Einbau des Terminals.



(b) Einbau des ESP32.

Abbildung 37: Einbau der Komponenten in die ESP-Box.

7 Externe Sensoren

Pro Sensorbox gibt es die Möglichkeit, einen externen Sensor am EXT-Port anzuschließen.

7.1 Temperatursensor

Um den Temperatursensor verwenden zu können, müssen an diesen ein Klinkenstecker und ein Widerstand gelötet werden:

1.) Vorbereitung

- a) Die Farbcodierung der Kabel des Temperatursensors in Abb. 38 ansehen.
- b) Den Klinkenstecker aus seiner Hülse schrauben (siehe Abb. 39).
- c) Die Codierung der Kontakte des Steckers in Abb. 40 ansehen.
- d) Die Hülse auf das Kabel des Temperatursensors schieben (siehe Abb. 41).

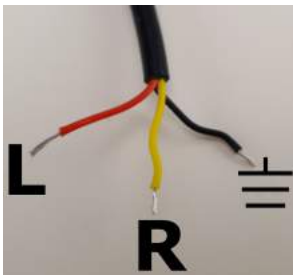


Abbildung 38: Farbcodierung der Kabel des Temperatursensors.



Abbildung 39: Klinkenstecker mit Hülse.



Abbildung 40: Codierung der Kontakte des Klinkensteckers.



Abbildung 41: Platzierung der Hülse vor dem Löten.

2.) Lötén des \perp -Anschlusses

- Klinkenstecker so am Platinenhalter befestigen, dass die Kontakte für Rechtshänder nach rechts und für Linkshänder nach links zeigen.
- Den \perp -Kontakt nach oben drehen.
- Das schwarze \perp -Kabel wie in Abb. 42 von innen nach außen durch den Kontakt führen.
- Das Kabel außen an den Kontakt löten. Hierbei darauf achten, dass die Isolierung des Kabels nicht schmilzt.
- Den Kontakt mit einem ca. 2 cm langen Streifen Isolierband umwickeln (siehe Abb. 45)



Abbildung 42: Kabelführung durch den Kontakt.



Abbildung 43: Lötstelle an Kontaktaußenseite



Abbildung 44: Lötstelle an Kontaktinnenseite.



Abbildung 45: Umwickeln des Kontaktes mit einer Lage Isolierband.

3.) Lötén des R-Anschlusses

- Gelbes R-Kabel so an R-Kontakt löten wie im vorangegangenen Schritt das schwarze Kabel (allerdings ohne Isolierband!).
- Den 4,7 k Ω -Widerstand wie in Abb. 48 mit einem Ende flach auf der Lötstelle platzieren. Hierbei ist eine zweite Lötpinzette zur Fixierung des Kabels hilfreich.
- Den Widerstand an den Kontakt löten. Hierbei darauf achten, das Isolierband möglichst wenig zu erhitzen, damit dieses nicht an den umgebenden Kabeln festklebt. Hierfür können ggf. die Kontakte leicht nach außen gebogen werden, um den Abstand von Lötstelle und Isolierband zu vergrößern.

d) Den Kontakt mit Isolierband umwickeln (siehe Abb. 47)



Abbildung 46: Verlötetes Kabel am R-Kontakt.

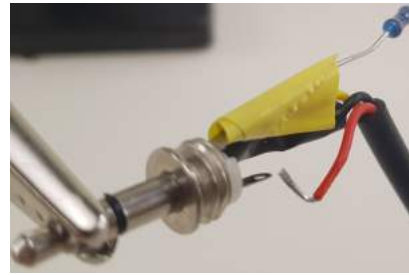


Abbildung 47: Umwickeln des Kontaktes mit einer Lage Isolierband.

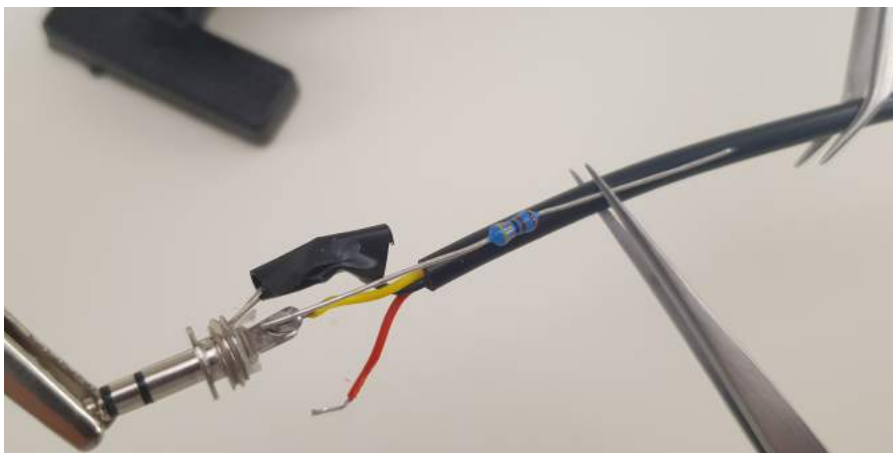


Abbildung 48: Platzierung des Widerstands an der Lötstelle. Für Linkshänder gilt diese Abbildung gespiegelt.

4.) Löten des L-Anschlusses

- a) Rotes L-Kabel an L-Kontakt löten wie im vorangegangenen Schritt das gelbe Kabel.
- b) Den $4,7\text{ k}\Omega$ -Widerstand wie in Abb. 49 platzieren, sodass er entlang des Kabels ausgerichtet ist und das freie Ende die Lötstelle umschließt.
Das freie Ende darf auf keinen Fall das andere Ende des Widerstands berühren, da es sonst zum Kurzschluss zwischen L-Anschluss und R-Anschluss kommt!
- c) Den Widerstand an den Kontakt löten.
- d) Den Kontakt mit Isolierband umwickeln (siehe Abb. 51)
- e) Die Hülse vorsichtig auf den Stecker schrauben. Hierbei wenn nötig die Kontakte am Isolierband etwas zusammendrücken.

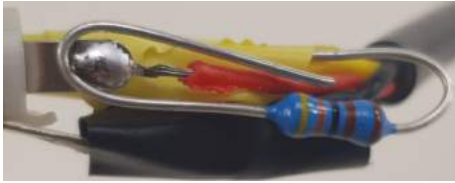


Abbildung 49: Platzierung des Widerstands.

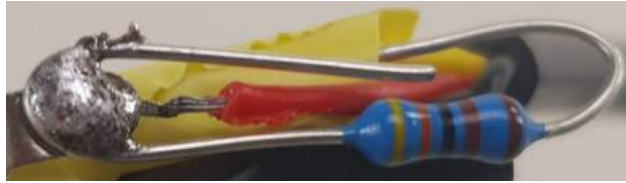


Abbildung 50: Angelöteter Widerstand.



Abbildung 51: Umwickeln des Kontaktes mit einer Lage Isolierband.

7.2 Weitere Sensoren

Zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Anleitung können keine weiteren Sensoren an die Sensorbox angeschlossen werden. Eine Erweiterung der Optionen ist allerdings geplant.

8 Einsatz und Messung

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Experimentierenden mit der App *phyphox* hinreichend vertraut sind.

8.1 phyphox-Experiment

Um mit der Sensorkette messen zu können, wird das jeweilige phyphox-Experiment für die orts aufgelöste Beschleunigungs- oder Temperaturmessung benötigt. Hierzu wird die entsprechende phyphox-Datei (verfügbar unter <https://github.com/phyphox/sensor-array>) auf das gewünschte Smartphone oder Tablet geladen und mit der App *phyphox* geöffnet. Alternativ kann das Experiment mit den untenstehenden QR-Codes in die App geladen werden. Das Experiment kann nun entweder in der Sammlung gespeichert oder einmalig durchgeführt werden. Wird es in der Sammlung gespeichert, erscheint es ab nun in der Liste gespeicherter Experimente unter der Rubrik *Sensorkette*.



phyphox-Experiment zur Beschleunigung



phyphox-Experiment zur Temperatur

8.2 Aufbau der Sensorkette

Jede Sensorbox verfügt über drei Anschlüsse: OUT bezeichnet den Datenausgang, IN den Dateneingang und EXT den Anschluss für externe Sensoren. Um die Sensorkette aufzubauen, wird der jeweilige Datenausgang einer Box mit dem Dateneingang der nächsten Box mithilfe eines Klinkenkabels verbunden. An die letzte Sensorbox wird die ESP-Box angeschlossen, welche nur über einen Eingang verfügt.

Die Spannungsversorgung erfolgt über den MicroUSB-Anschluss der ESP-Box, an den die Powerbank angeschlossen wird ($U_{\text{nenn}} = 5 \text{ V}$).

Wichtig:

- Die Sensorkette darf erst mit Spannung versorgt werden, nachdem sämtliche benötigten Boxen angeschlossen wurden!
- Vor einer Änderung der Anzahl an Sensorboxen in der Kette muss die ESP-Box von der Spannungsversorgung getrennt werden!

Hierdurch wird eventuellen Schäden durch kurzzeitige Kurzschlüsse beim Ein-/Ausstecken der Klinkenstecker vorgebeugt. Zudem registriert die Sensorkette nur bei einem Neustart die Anzahl der angeschlossenen Sensorboxen. An die mit Spannung versorgte Sensorkette angeschlossene Boxen werden somit zwar ebenfalls mit Spannung versorgt, die gemessenen Daten werden allerdings nicht weitergegeben.

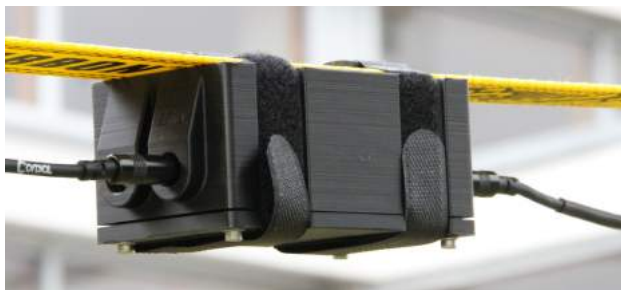
8.3 Starten einer Messung

Die Verbindung von mobilem Endgerät und Sensorkette erfolgt über Bluetooth. Zunächst wird die Sensorkette durch das Anschließen an die Spannungsversorgung gestartet. Anschließend wird das gewünschte Experiment in *phyphox* gestartet. Das Experiment sucht nun nach dem Gerät „phyphox Sensor Chain“. Wird dieses gefunden, wird der Name angezeigt und muss zum Verbinden angetippt werden. Nach dem Verbinden der Sensorkette wird die Messung wie gewohnt in der App gestartet.

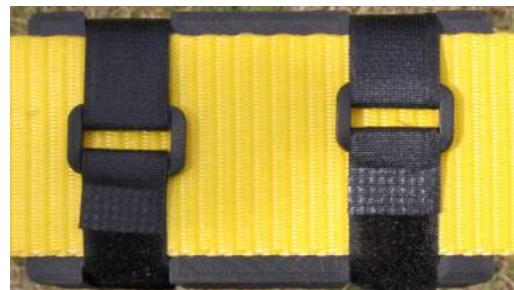
8.4 Beschleunigungsmessung

8.4.1 Allgemeine Hinweise

Die Sensorboxen sind so programmiert, dass stets die Beschleunigung in Richtung der Erdbeschleunigung ausgegeben wird. Dies geschieht mithilfe einer automatischen Kalibrierung unabhängig von der jeweiligen räumlichen Orientierung der Sensorbox. Somit eignet sich die Sensorkette vor allem für Experimente an einer Slackline, an der verschiedene Schwingungsexperimente durchgeführt werden können. Die Sensorboxen sind so konzipiert, dass sie mit jeweils zwei Klettbändern mit der Unterseite nach oben sicher an der Slackline angebracht werden können (siehe Abb. 52). Die Datenrate der Messungen beträgt 50 Hz.



(a) von der Seite



(b) von oben

Abbildung 52: Befestigung einer Sensorbox an einer Slackline. Die Klettbänder sollten hierbei so fest sitzen, dass sich die Box nur schwer verschieben lässt. Die Umlenkösen sollten auf der Slackline positioniert werden, um die Box nicht zu beschädigen.

8.4.2 Graphische Darstellung der Messwerte

Das phyphox-Experiment verfügt über drei Reiter:

- Unter *Lateral* findet sich ein Graph, bei dem der jeweils aktuell gemessene Wert aller Sensoren angezeigt wird.
- Unter *Sensoren* wird zu jedem Sensor der zeitliche Verlauf der Messwerte in einem separaten Graphen angezeigt.
- Unter *Farbdarstellung* findet sich eine zeitliche Erweiterung des Graphen aus *Lateral*. Die Messwerte werden hierbei mithilfe eines Farbverlaufs dargestellt, die Hochachse gibt die Zeit an. Diese Darstellung ist für zwei unterschiedliche Farbverläufe enthalten (blau-grün-gelb-rot und schwarz-orange-weiß).

8.5 Temperaturmessung

8.5.1 Allgemeine Hinweise

Die Temperatursensoren werden am EXT-Anschluss der Sensorboxen eingesteckt. Die jeweilige Sensorbox erkennt dies automatisch. Ein Kalibrieren ist nicht notwendig. Die Datenrate der Messungen beträgt 1 Hz.

Wichtig:

- Ebenso wie die Sensorboxen selbst sollten die Temperatursensoren *vor* der Spannungsversorgung angeschlossen werden!
- Der verwendete Temperatursensor misst im Bereich von -50°C bis 125°C . Ein Unter- und v.a. Überschreiten dieses Temperaturbereichs ist zu vermeiden, um den Sensor nicht zu beschädigen!

8.5.2 Graphische Darstellung der Messwerte

Das phyphox-Experiment verfügt grundsätzlich über die gleichen Darstellungen wie das Experiment zur Beschleunigungsmessung, mit den folgenden Unterschieden:

- Zu den Reitern *Sensoren* und *Farbdarstellung* gibt es jeweils eine Variante, bei der die Hochachse bzw. der Farbverlauf der Graphen fest skaliert ist und von 30°C bis 90°C reicht. Dies soll die Aufnahme von Abkühlkurven erleichtern.
- Jede Farbdarstellung ist zusätzlich mit dem *IBM Color Blind Safe* - Farbverlauf enthalten.

9 Weitere Hinweise

9.1 Belegung der Anschlüsse

Die Pole eines Klinkensteckers sind wie in Abb. 53 angeordnet. In der Sensorkette ist der \perp -Pol sinnvollerweise die Erde. An L liegen 3,3 V zur Spannungsversorgung an. Die Schaltung innerhalb der Sensorboxen ist dabei derart, dass sämtliche Boxen *parallel* geschaltet sind. Über den R-Pol erfolgt (ebenfalls mit 3,3 V) die Datenweitergabe.



Abbildung 53: Polung eines Klinkensteckers

9.2 Massen der gedruckten Komponenten

In Tabelle 1 finden sich die ungefähren Massen der gedruckten Komponenten. Je nach Drucker können sich Abweichungen von einigen Gramm ergeben.

Tabelle 1: *Ungefähre Massen der gedruckten Komponenten.*

Baugruppe	Komponente	Masse
Sensorbox	Gehäuse	76 g
	Deckel	22 g
	Sensorbrücke	~1 g
ESP-Box	Gehäuse	40 g
	Deckel	13 g

9.3 Kostenabschätzung

In Tabelle 2 sind die für die Sensorkette benötigten Komponenten mit dem am **31.07.2023** ermittelten Preis (inkl. 19% Mehrwertsteuer) desjenigen Händlers aufgelistet, bei dem die jeweilige Komponente für die Entwicklung der Kette erworben wurde. Bei den gedruckten Bauteilen wird für das Filament PLA mit einem Preis von $23 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ gerechnet und die einzelnen Preise auf den Zehntelcent gerundet.

Einige Bauteile wurden aus Gründen der Praktikabilität nicht einzeln gekauft. Diese sind separat gelistet. Kosten für Strom und Werkzeug sind in der Abschätzung nicht enthalten.

In Tabelle 3 sind die Kosten für den Bau der optionalen Temperatursensoren in analoger Art und Weise aufgeschlüsselt.

Tabelle 2: *Kostenabschätzung für die Sensorkette auf Grundlage der während der Entwicklung gezahlten Preise.*

Baugruppe	Komponente	Anzahl	Einzelstückpreis	Gesamtpreis	Markt
Sensorbox	Gehäuse	1	1,748 €	1,748 €	-
	Deckel	1	0,506 €	0,506 €	-
	Sensorbrücke	2	0,023 €	0,046 €	-
	Raspberry Pi Pico H	1	5,80 €	5,80 €	reichelt.de
	Adafruit 2809 LIS3DH	1	6,65 €	6,65 €	reichelt.de
	Goobay 76746 Terminal	3	1,90 €	5,70 €	reichelt.de
	Schraube M3 × 10 mm	8	0,20 €	1,60 €	schrauben-frank.de
	Summe: 22,05 €				
ESP-Box	Gehäuse	1	0,920 €	0,92 €	-
	Deckel	1	0,299 €	0,299 €	-
	Joy-it NodeMCU ESP32	1	15,99 €	15,99 €	conrad.de
	Goobay 76746 Terminal	1	1,90 €	1,90 €	reichelt.de
	Schraube M3 × 10 mm	4	0,20 €	0,80 €	schrauben-frank.de
	Summe: 19,91 €				
Weiteres	Steckbrückenkabelset (jew. 20 St. von f-f, f-m, m-m)	4	5,55 €	22,20 €	reichelt.de
	Unterlegscheiben $\varnothing 3,2$ mm (100 St.)	1	3,29 €	3,29 €	OBI
	3,5 mm-Klinkenkabel (3-polig)	10	2,95 €	29,50 €	reichelt.de
	Klettbander 40×2 cm (10 St.)	2	10,99 €	21,98 €	amazon.de
Komplette Sensorkette (10 Sensorboxen)	Summe: 317,38 €				

Tabelle 3: *Kostenabschätzung für die Temperatursensoren auf Grundlage der während der Entwicklung gezahlten Preise.*

Baugruppe	Komponente	Anzahl	Einzelstückpreis	Gesamtpreis	Markt
Sensor	Tru Components TC-9445340	1	10,99 €	10,99 €	conrad.de
	3,5 mm-Klinkenstecker (3-polig)	1	0,29 €	0,29 €	reichelt.de
	4,7 k Ω -Widerstand	1	0,10 €	0,10 €	th-electronic.com
	Summe: 11,38 €				
Weiteres	Isolierband (Farbkit)	1	4,99 €	4,99 €	OBI
Für 10 Sensorboxen	Summe: 118,79 €				