

phyphox: Eine Sensorkette als DIY-Projekt – orts aufgelöste Messung von Beschleunigung und Temperatur

- Vorstellung und Ergebnisse erster Tests -

Johannes Schlaf*, Dominik Dorsel⁺, Sebastian Staacks⁺, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University

⁺II. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen University

schlaf@physik.rwth-aachen.de, dorsel@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Mithilfe der Smartphone-App phyphox wird das eigene Smartphone über die internen Sensoren zum mobilen Messinstrument. Zudem können über Bluetooth Low Energy externe Sensoren verbunden und in Echtzeit ausgelesen werden. Um auch eine orts aufgelöste Messung physikalischer Größen zu ermöglichen, wurde eine an phyphox koppelbare Sensorkette entworfen und erfolgreich getestet. Für jede mit der Kette messbare Größe existiert ein designiertes, hinsichtlich der Darstellung der Messdaten optimiertes phyphox-Experiment. Aktuell sind orts aufgelöste Messungen von Beschleunigung und Temperatur möglich, wofür erste Anwendungsbeispiele (Schwingung einer Slackline, Temperaturgradient) präsentiert werden. Die Einbindung weiterer Sensoren ist geplant. Die Kette ist als DIY-Projekt mit 3D-druckbaren Gehäusen konzipiert, wobei die zugehörige Bauanleitung so ausgelegt ist, dass sie auch für Anfänger im 3D-Druck und im Programmieren leicht zugänglich ist.

1. Hintergrund

1.1. Allgemeines zu phyphox

Smartphones verfügen über verschiedene interne Sensoren, welche von entsprechenden Apps wie z.B. phyphox ausgelesen werden können [1][2][3]. Kombiniert mit ihrer kompakten Größe bieten sie daher vielfältige Möglichkeiten zum Experimentieren. So kann z.B. die Zentripetalbeschleunigung in einer Salatschleuder gemessen werden oder durch die gleichzeitige Verwendung von Lautsprecher und Mikrofon ein Sonar simuliert werden [4]. Im Unterricht bieten Smartphones zudem den Vorteil, dass etwa 96 % aller Jugendlichen zwischen zwölf und 19 Jahren über ein solches Gerät und somit über ihr eigenes mobiles Messinstrument verfügen [5].

Die App phyphox wird an der RWTH Aachen entwickelt. Neben der Bereitstellung und der graphischen Auftragung der Rohdaten bietet sie auch kontextspezifische Experimente, wie z.B. die Bestimmung der Frequenz eines Federpendels [4]. Zudem können über Bluetooth Low Energy (BLE) externe Sensormodule an phyphox gekoppelt werden [6]. Dies bietet den Vorteil, Sensoren auch in Aufbauten zu integrieren, welche für Smartphones nicht geeignet sind. Entsprechende Module können mit etwas Programmierfahrung unter Einsatz der hierfür bereitgestellten Arduino-Bibliothek phyphoxBLE auch selbst kreiert werden. Dies bietet die interessante Option, externe Sensoren als DIY-Projekt (DIY = do it yourself) im naturwissenschaftlichen Unterricht einzusetzen [7]. Dies ist in der Regel preisgünstiger als vergleichbare Instrumente von Lehr-

mittelherstellern, zumal auch ggf. notwendige Reparaturen selbst durchgeführt werden können. Die SuS (Schülerinnen und Schüler) können im Rahmen des Zusammenbaus der Sensormodule an Formgebungsverfahren wie den 3D-Druck sowie an die Programmierung von Mikrocontrollern herangeführt werden. Der Zusammenbau dürfte sich als aktiv-handwerkliche Tätigkeit zudem positiv auf das Schülerinteresse auswirken [8].

1.2. Entwicklung der Sensorkette

Die Idee zur Entwicklung einer Sensorkette entstammt einer Kooperation des phyphox-Teams mit dem Deutschen Museum München, in Zuge derer ein an phyphox koppelbares Instrument zur simultanen Messung der Transversalschwingung an verschiedenen Orten entlang der Längsachse eines Exponats einer Brückenausstellung entwickelt werden sollte. Um die technische Umsetzung möglichst einfach zu halten und gleichzeitig eine zuverlässige Synchronisation der orts aufgelösten Messdaten in phyphox zu erreichen, wurde statt des Einsatzes mehrerer separat gekoppelter Sensoreinheiten der Einsatz einer Sensorkette mit einer zentralen Schnittstelle favorisiert.

Da derzeit kein Lehrmittelhersteller ein ähnliches Produkt anbietet, bot es sich hiervon ausgehend an, die Sensorkette als modulares, mit weiteren Sensoren versehenes System für den Einsatz im Schulunterricht weiterzuentwickeln. Dieses kann orts aufgelöste Messungen verschiedener physikalischer Größen wie Beschleunigung, Temperatur, Druck und Licht sowie von Schallwellen durch das Sammeln der Messdaten

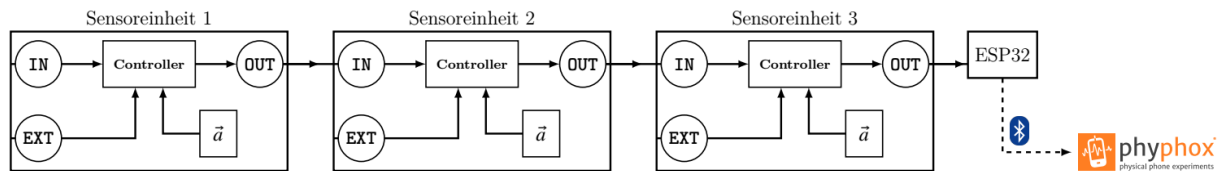


Abb. 1: Datenfluss in der Sensorkette (exemplarisch für drei angeschlossene Sensoreinheiten).

an einer einzigen Schnittstelle und die Visualisierung der Daten auf dem Smartphone der SuS erheblich vereinfachen.

Die Entwicklung des in diesem Beitrag vorgestellten Prototypen geschah im Rahmen einer Masterarbeit. Die Bauanleitung für den Prototypen ist auf Github verfügbar [9].

2. Umsetzung

2.1. Grundlegende Funktionsweise

Die Sensorkette setzt sich aus mehreren sogenannten Sensoreinheiten zusammen, welche wiederum aus einem Mikrocontroller und einem oder mehreren Sensoren bestehen (siehe auch Kapitel 2.4). Jede Sensoreinheit besitzt jeweils einen Dateneingang und einen Datenausgang. Es können bis zu zehn Sensoreinheiten zu einer Kette zusammengeschaltet werden. Am Ende der Kette (d.h. am unbelegten Datenausgang) befindet sich ein einzelner BLE-fähiger ESP32-Mikrocontroller (BLE = Bluetooth Low Energy), der sowohl die Spannungsversorgung als auch die Übertragung der Messdaten an phyphox übernimmt (siehe Abb. 1).

Wird die Sensorkette durch das Anschließen einer Spannungsversorgung eingeschaltet, prüft der Mikrocontroller jeder Sensoreinheit zunächst, ob eine Sensoreinheit am Dateneingang vorgeschaltet ist. Hierbei können zwei Fälle auftreten:

- Die Sensoreinheit befindet sich am Kopf der Kette. Der Mikrocontroller übernimmt dann die Taktung, d.h. Messdaten werden mit einer einprogrammierten Frequenz (50 Hz für die Beschleunigungsmessung, 1 Hz für die Temperaturmessung) aus dem entsprechenden Sensor gelesen und an die nächste Sensoreinheit weitergegeben.
- Die Sensoreinheit befindet sich nicht am Kopf der Kette. Der Mikrocontroller liest dann einen Messwert aus dem entsprechenden Sensor aus und wartet auf ein Datenpaket von der vorgeschalteten Sensoreinheit. Der Mikrocontroller hängt den Messwert an das Datenpaket an und gibt dieses an die nächste Sensoreinheit weiter. Anschließend wird ein weiterer Messwert ausgelesen und auf das nächste Datenpaket gewartet.

Der Mikrocontroller am Ende der Kette gibt die Daten über BLE an phyphox weiter.

2.2. Auslegung aus DIY-Projekt

Da die meisten der bisher vom phyphox-Team entwickelten externen Sensormodule nur ausgeliehen und nicht käuflich erworben werden können, wurde die Sensorkette als DIY-Projekt ausgelegt. Die zuge-

hörige Bauanleitung sowie der für die Programmierung notwendige Code stehen online kostenlos zur Verfügung. Kombiniert mit der passenden Komponentenwahl (siehe Kapitel 2.4) sorgt dies für eine hohe Verfügbarkeit und einen vergleichsweise niedrigen Preis (siehe Kapitel 4.1). Zudem besteht die Möglichkeit, die Sensorkette im Rahmen eines Unterrichtsprojekts zusammenzubauen und den SuS somit die Chance zu geben, sich näher mit Programmierung und 3D-Druck (siehe nächstes Unterkapitel) zu befassen.

2.3. Designentscheidungen

Das Projekt verfolgt das Ziel eines möglichst einfachen, auch für (programmier-)technisch weniger versierte SuS und Lehrkräfte machbaren Zusammenbaus. Zudem soll der Wartungsaufwand möglichst geringgehalten werden. Daher wurde ein Design entwickelt, welches durch die Verwendung von Entwicklerplatinen und Steckbrückenkabeln den Löt Aufwand minimiert und den schnellen Austausch von Bauteilen erleichtert (siehe Abb. 2). Zudem erfolgt die Bauteilfixierung ausschließlich durch Schraub- oder Steckverbindungen (siehe Abb. 3).

Zur Signal- und Spannungsweitergabe zwischen den Boxen werden Klinkenkabel (\varnothing 3,5 mm) verwendet. Diese bieten den Vorteil eines schnellen Auf- und

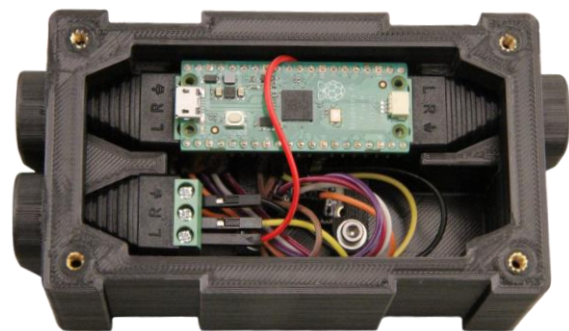


Abb. 2: Sicht von oben auf die offene Sensorbox.

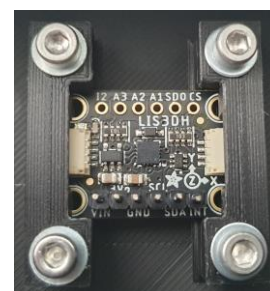


Abb. 3: Befestigung des Beschleunigungssensors durch 3D-gedruckte Schraubklemmen.

Abbaus der Sensorkette und sowohl Kabel, Buchsen als auch anlötbare Stecker (siehe Kapitel 3.2) sind einfach verfügbar.

Um die nachträgliche Anbindung von Sensoren für die Sensorkette zu ermöglichen, wurden die einzelnen Sensoreinheiten mit einer Schnittstelle für externe Sensoren versehen (siehe Abb. 1 und 3). Zudem können auf diese Weise auch Sensoren angebunden werden, deren Unterbringung innerhalb des Gehäuses wenig sinnvoll wäre (z.B. Temperatursensoren). Die Signalweitergabe erfolgt auch hier über Klinkenkabel. Der in der Sensoreinheit verbauete Mikrocontroller erkennt automatisch die Anbindung eines externen Sensors und passt die Datenrate der Messung entsprechend an.

Das Gehäuse der einzelnen Sensoreinheiten („Sensorbox“) wurde als 3D-Druck konzipiert, da mit diesem Verfahren die auf die einzelnen Komponenten angepassten Geometrien zur Realisierung der Steckverbindungen in einem Druck generiert werden können. Zudem weist der 3D-Druck im Schulkontext eine zunehmende Relevanz auf, was beispielsweise von der Herausgabe einer diesbezüglichen Handreichung durch das Landesinstitut für Schule des Landes Nordrhein-Westfalen unterstrichen wird [10].

2.4. Verwendete Komponenten

Bei der Wahl der Komponenten wurde auf eine breite und möglichst beständige Verfügbarkeit geachtet:

Als Spannungsversorgung und Bluetooth-Schnittstelle wurde ein in Arduino programmierbarer ESP32-Mikrocontroller gewählt, da für Arduino bereits eine passende Bibliothek zur Anbindung an phyphox existiert. Als Mikrocontroller für die Sensorboxen wird ein Raspberry Pi Pico genutzt.

Zur Beschleunigungsmessung kommt ein Triaxial-Beschleunigungssensor des Typs LIS3DH zum Einsatz, welcher innerhalb der Sensorboxen verbaut wird. Zur Temperaturmessung wird der TC-9445340-Temperatursensor von Tru Components verwendet. Hierzu muss an den Sensor lediglich ein Klinkenstecker sowie ein Widerstand angelötet werden. Er ist dann als externer Sensor nutzbar.

2.5. Umsetzung in phyphox

Die Ansteuerung der Sensorkette erfolgt über sensor-spezifische phyphox-Experimente. Diese rechnen die über BLE erhaltenen Messdaten von Bits in die jeweilige physikalische Einheit um und visualisieren die Messdaten in messgrößenspezifischen Darstellungen unterschiedlicher Komplexitätsgrade. Letzteres erfolgt mit dem Ziel, die graphische Darstellung für möglichst viele Alters- und Erfahrungsstufen sowohl zugänglich als auch interessant zu gestalten.

2.5.1. Laterale Darstellung

In dieser Darstellung werden die aktuellen Messwerte über der Sensorposition in der Kette (Zahl von 1-10) aufgetragen (siehe Abb. 4). Die favorisierte Darstellungsweise ist hierbei ein Scatterplot, was allerdings für die Darstellung von sich typischerweise schnell

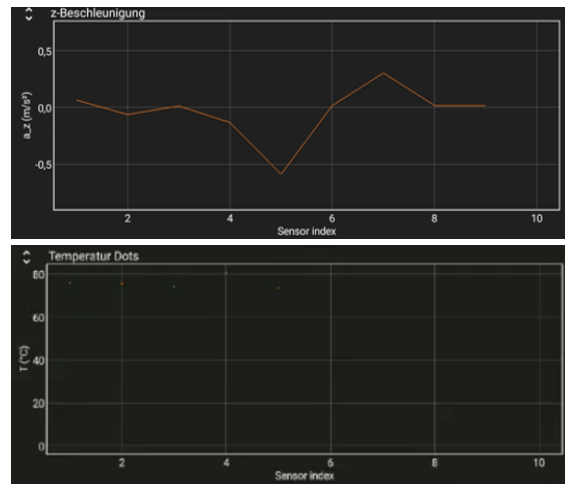


Abb. 4: Laterale Darstellung von Messdaten für Beschleunigung (oben) und Temperatur (unten).

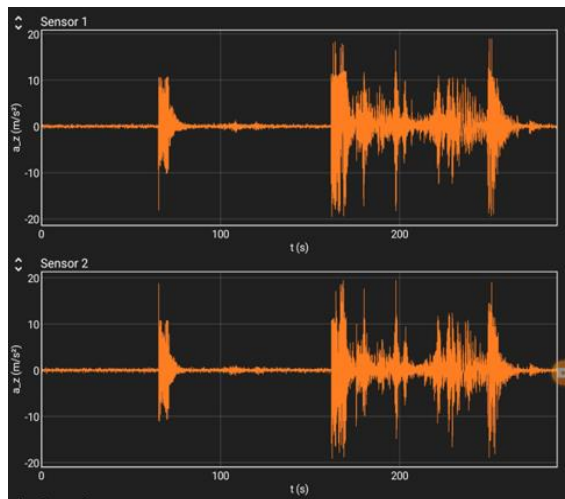


Abb. 5: Zeitliche Darstellung einer Beschleunigungsmessung.

ändernden Signalen (wie bei der Schwingung einer Slackline) unpraktikabel ist. Daher werden die Messpunkte bei der Auftragung von Beschleunigungswerten verbunden.

2.5.2. Zeitliche Darstellung

In dieser Darstellung wird der zeitliche Verlauf der Messdaten jeder Sensoreinheit separat aufgetragen (siehe Abb. 5). Aus Gründen einer besseren Übersicht werden auch hier die Messpunkte miteinander verbunden.

2.5.3. Falschfarbendarstellung

In dieser Darstellung werden die laterale und die zeitliche Darstellung kombiniert. Hierbei wird auf der horizontalen Achse die Sensorposition und auf der vertikalen Achse die Zeit aufgetragen. Der jeweilige Messwert wird anhand einer Farbskala aufgetragen.

Die Standard-Farbskala in phyphox besteht aus einem Schwarz-Orange-Weiß-Verlauf (siehe Abb. 6). Aufgrund der Helligkeitsunterschiede entlang der Skala ist dieser auch für Farbenblinde zugänglich. Für die Darstellung von Temperaturverläufen wurde in dem

entsprechenden phyphox-Experiment zusätzlich eine Darstellung mit dem typischen Blau-Grün-Gelb-Rot-Farbverlauf sowie eine Darstellung im IBM-Farbschema implementiert (siehe Abb. 7). Letztere bietet auch für blau-, grün- und rotblinde Personen einen Verlauf von kühleren zu wärmeren Farbtönen [11].

3. Anwendungen

3.1. Beschleunigungsmessung

Die Sensorkette ist hinsichtlich der Programmierung und des Sensorboxdesigns auf die Messung von Schwingungen passender Objekte optimiert:

Anhand der Messwerte entlang aller drei Raumachsen wird die Ausrichtung des Sensors zur vertikalen Achse (d.h. zur Richtung der Erdbeschleunigung) ermittelt. Anschließend wird von der Beschleunigungskomponente entlang dieser Achse die Erdbeschleunigung abgezogen und das Ergebnis als Messwert an die nächste Sensoreinheit bzw. den ESP32 weitergegeben. So lassen sich Transversalschwingungen von entlang der vertikalen Achse auslenkenden Objekten zuverlässig messen, ohne eine exakte Ausrichtung der Sensoreinheiten vornehmen zu müssen.

Ein Beispiel für ein solches Objekt ist eine Slackline, für deren Anwendungsfall die Sensorboxen optimiert wurden. Jede Box verfügt über zwei Aufnahmen für Klettbänder, mit welchen sie an der Slackline befestigt werden kann (siehe Abb. 8). Zudem werden die Klinkenstecker durch Ausstülpungen vor einem Abknicken unter Belastung geschützt.

3.2. Temperaturmessung

Mit dem verwendeten Sensor sind ortsaufgelöste Temperaturmessungen zwischen -50°C und $+125^{\circ}\text{C}$ möglich. Hierbei können z.B. Messungen zur Wärmekapazität durch die simultane Aufnahme von Abkühlkurven bei unterschiedlichen Füllhöhen in Bechergläsern durchgeführt werden (siehe Abb. 9). Eine weitere Anwendungsmöglichkeit sind Messungen zur Wärmeleitfähigkeit durch Positionierung der Temperatursensoren entlang eines einseitig erhitzten langen Gegenstandes mit guter Wärmeleitung.

3.3. Geplante Anwendungen

Die Einbindung weiterer externer Sensoren ist in Planung. Denkbar wäre beispielsweise der Einsatz von Lichtsensoren, Mikrofonen und Drucksensoren:

Mit Lichtsensoren könnten Lichtschranken-Ketten aufgebaut werden, um z.B. die Stokes-Reibung einer fallenden Kugel zu messen. Mikrofone könnten für ortsaufgelöste Messungen zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien genutzt werden. Ein Beispiel für die Anwendung von Drucksensoren in der Sensorkette wäre die Untersuchung von stehenden Wellen im offenen Rohr.

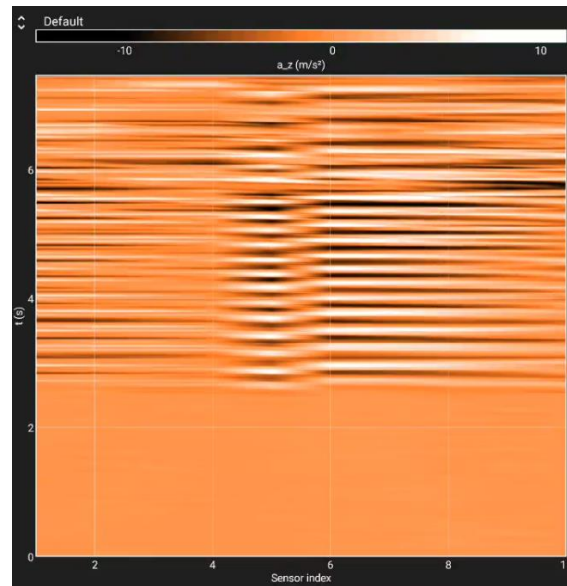


Abb. 6: Falschfarbendarstellung einer Beschleunigungsmessung im Standardfarbschema von phyphox.

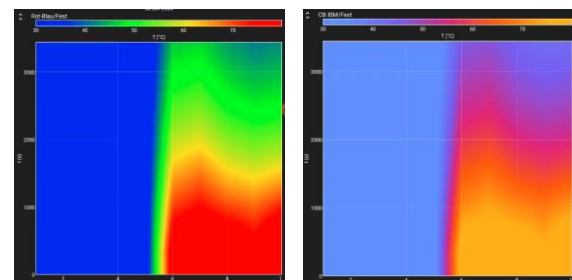


Abb. 7: Darstellung eines Temperaturverlaufs im Rot-Blau-Schema (links) und im IBM-Farbschema (rechts).



Abb. 8: An einer Slackline mit Klettbändern befestigte Sensorbox.

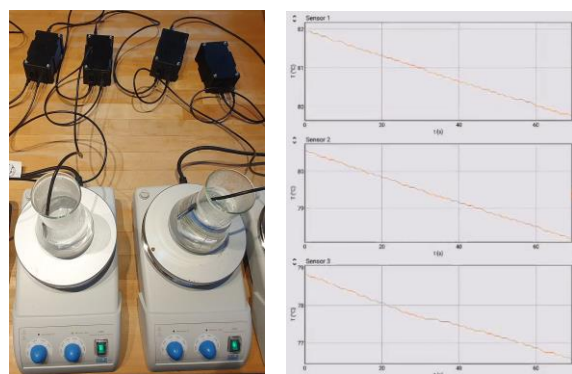


Abb. 9: Aufnahme von füllstandspezifischen Abkühlkurven. Links: Aufbau. Rechts: Exemplarische Darstellung von Messdaten.

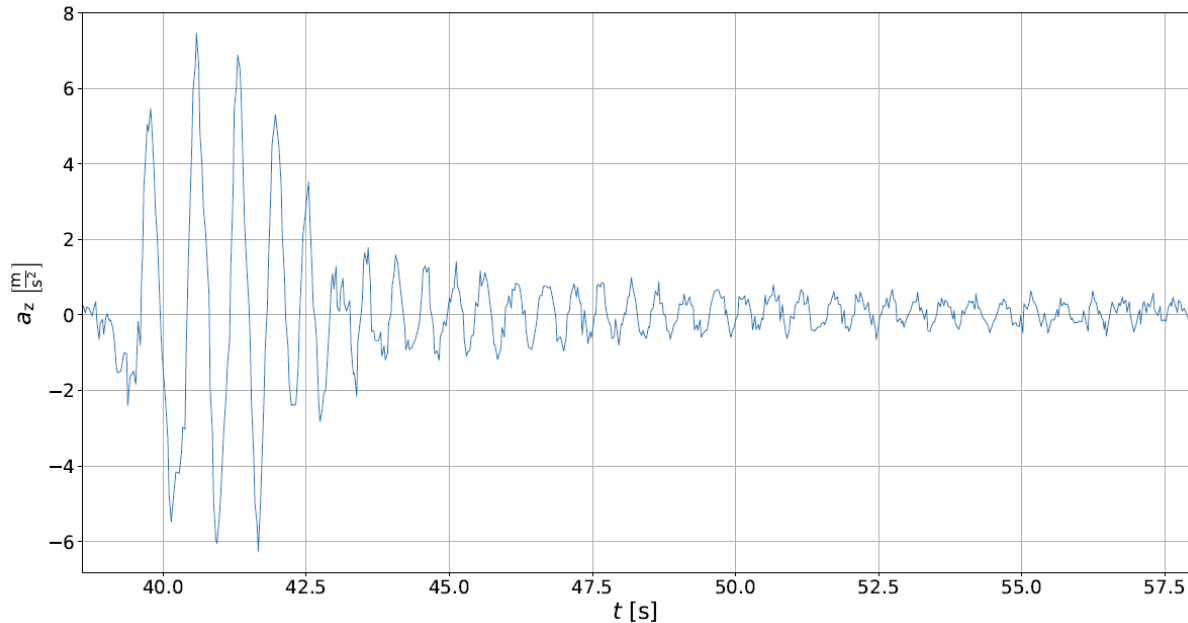


Abb. 10: Typisches Signal einer Schwingungsmessung mit der Sensorkette.

4. Fazit zum entwickelten Prototyp

4.1. Eckdaten

Der Preis für den im August 2023 fertiggestellten Prototypen mit zehn Sensoreinheiten lag inklusive der Materialkosten für die Gehäuse bei etwa 320 €. Mit zehn externen Temperatursensoren erhöht sich der Preis auf etwa 440 €, was für ein zur orts aufgelösten Messung von Beschleunigung und Temperatur fähiges Messinstrument einen annehmbaren Preis darstellen dürfte. Eine nach Komponenten aufgeschlüsselte Kostenauflistung findet sich in der in Kapitel 1 verlinkten Bauanleitung.

Die Sensorboxen sind mit den Maßen $113 \times 64 \times 50$ mm kompakt und auch für kleinere Hände gut zu greifen und haben eine Masse von jeweils etwa 165 g. Die Sensorkette sollte daher mit einem Gesamtgewicht von unter 2 kg auch von Schülern im physikalischen Anfangsunterricht ohne Weiteres transportierbar sein.

4.2. Zeitaufwand bei Druck und Bau

Der Zeitaufwand beim Druck des Gehäuses einer Sensoreinheit ist stark von dem verwendeten 3D-Drucker abhängig. Aktuell sind bereits Drucker für unter 1000 € auf dem Markt, die den Druck in weniger als fünf Stunden schaffen. Mit einem solchen Drucker lassen sich parallel zum regulären Schulbetrieb bis zu zehn Gehäuse pro Woche drucken, d.h. die maximal mögliche Anzahl für eine Sensorkette. Der für die Vorbereitung des Drucks aufzubringende Zeitaufwand beträgt je nach Drucker und individueller Erfahrung schätzungsweise zwischen fünf und 20 Minuten.

Der Zusammenbau der einzelnen Sensoreinheiten führt aufgrund der zahlreichen Bauschritte zu einem zusätzlichen deutlichen Zeitaufwand. Erste Tests der in Kapitel 1.2 erwähnten Bauanleitung ergaben pro

Sensoreinheit zunächst einen Zeitbedarf zwischen 90 und 180 Minuten, welcher sich aber nach mehreren erstellten Boxen auf unter 30 Minuten reduzieren ließ. Unter der Annahme eines affinen Zusammenhangs zwischen der Zahl zusammengebaute Boxen und dem jeweiligen Zeitbedarf beträgt die Obergrenze der für den Bau von zehn Sensorboxen benötigten Zeit 17,5 Stunden. Inwiefern und in welchem Rahmen der Zusammenbau der Sensorkette in den Schulalltag integrierbar ist, muss die interessierte Lehrkraft anhand dieser Daten selbst entscheiden.

4.3. Beschleunigungsmessung

Es wurden erste Testmessungen an einer Slackline vorgenommen. Währenddessen wurde die Zuverlässigkeit der Steckverbindungen innerhalb der Sensorboxen sowie die Zuverlässigkeit der Befestigung der Sensorboxen an der Slackline überprüft: Die Steckverbindungen haben bei geschlossenem Deckel kein Spiel und halten die Komponenten zuverlässig an ihrem Platz. Während sämtlicher Test kam es zudem nur einziges Mal dazu, dass sich ein Steckbrückenkabel von einem Kontakt löste. Die Befestigung an der Slackline bewährte sich ebenfalls in den Tests. Die Fixierung mit Klettbändern verhindert ein Verutschen der Boxen während der Messungen, lässt aber genug Spiel, um die Boxen zwischen zwei Messungen entlang der Slackline zu repositionieren.

Während der Testmessungen wurde zudem die Güte der Messdaten überprüft. Die gewählte Abtastfrequenz von 50 Hz erwies sich für Messungen an der Slackline grundsätzlich als ausreichend. Die Schwingungsfrequenz lässt sich klar aus den Daten ablesen und deutlich abgeschnittene Peaks treten nur vereinzelt auf. In Abb. 10 ist ein typisches Beispiel einer Schwingungsmessung dargestellt.

4.4. Temperaturmessung

Auch mit den externen Temperatursensoren wurden erste Testmessungen durchgeführt. Hierfür wurden mehrere Abkühlkurven sowie Temperaturverläufe entlang einer einseitig erhitzten Kupferplatte aufgenommen (vgl. Kapitel 3.2). Für die Messung erwies sich die gewählte Abtastfrequenz von 1 Hz als vollkommen ausreichend.

Die Falschfarbendarstellungen erwiesen sich in beiden zusätzlichen Farbschemata als gut ablesbar (siehe Abb. 7).

4.5. Aufgetretene Schwierigkeiten

4.5.1. Verformungen der Sensorboxen

Während der Tests kam es bei einigen direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzten Sensorboxen zu Verformungen. Diese wirkten sich allerdings nicht auf die Funktion der Sensoreinheiten aus. Insbesondere ließen sich die Komponenten der Sensoreinheiten weiterhin problemlos austauschen.

Für den Druck der Sensorboxen wurde aufgrund der Einsteigerfreundlichkeit das Filament PLA verwendet. Dieses ist bis zu einer Temperatur von etwa 60°C wärmeformbeständig [12], welche offenbar innerhalb der Füllstruktur der Wände erreicht wurde. Um Verformungen vorzubeugen, kann stattdessen das Filament PETG verwendet werden, welches ähnlich einsteigerfreundlich ist, aber eine Erweichungstemperatur von 80-90°C aufweist [12].

4.5.2. Kurzschluss in den Temperatursensoren

Während der Tests kam es im angelöteten Klinkenstecker eines Temperatursensors zu einem Kurzschluss. Da in den Klinkenstecker ein Widerstand eingelötet werden muss, laufen die drei Kontakte des Steckers bei nicht hinreichender Isolierung Gefahr, kurzgeschlossen zu werden. Auf entsprechende Kontaktstellen muss während des Zusammenbaus geachtet werden.

4.5.3. Ausfälle von Sensoreinheiten

Während der Tests fielen mehrere Sensoreinheiten aus und ließen sich auch durch einen Austausch von Kabeln und Klinkenadaptern nicht wieder funktionsfähig machen. Eine Messung der Ausgangssignale der betroffenen Boxen mit einem Oszilloskop lässt auf einen Defekt der Mikrocontroller schließen. Derzeit ist noch nicht geklärt, was diesen Defekt verursacht.

5. Ausblick

Zunächst gilt es, die Ursache der Ausfälle der Sensoreinheiten zu finden und zu beheben. Anschließend kann eine Weiterentwicklung des Projekts in drei Richtungen stattfinden:

a) Technische Optimierung der Sensorkette: Hierzu wird zukünftig der BLE-fähige Raspberry Pi Pico W zum Einsatz kommen, der dann gleichzeitig als Mikrocontroller einer Sensoreinheit und als BLE-Schnittstelle fungiert. So kann der ESP32 eingespart werden, der im Augenblick das einzige nicht

fixierbare Element der Sensorkette darstellt. Zudem resultiert dieser Austausch in einer Vereinfachung der Programmierung.

- b) Anbindung weiterer externer Sensoren: Die bereits angedachten Sensoren sind in Kapitel 3.3 näher beschrieben. Die Erweiterung des Portfolios externer Sensoren setzt die vorherige Schaffung einer Möglichkeit der manuellen Auswahl der Sensorart oder zumindest der gewünschten Abtastrate voraus. Denkbar wäre die Entwicklung eines an den Kopf der Sensorkette anschließbaren Schalters.
- c) Entwicklung von Experimenten und Arbeitsblättern: Zu den einzelnen Sensoren können noch weitere Experimente entwickelt und passende Arbeitsblätter erstellt werden. Anschließend kann die Sensorkette erstmalig im Schulunterricht getestet und evaluiert werden.

6. Literatur

- [1] Dorsel, Dominik: Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten, Dissertation, RWTH Aachen University (2023), S. 7-8. Verfügbar unter: <https://www.institut-1a.physik.rwth-aachen.de/go/id/huji/lidx/1/file/964136>.
- [2] Staacks, Sebastian; Hütz, Simon; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education 53 (2018), Nr. 4. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e>
- [3] Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Smarte Experimente. In: Physik Journal 17 (2018), Nr. 11.
- [4] Phyphox: Experimente (Stand 05/2024). URL: <https://phyphox.org/de/experimente/>.
- [5] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest: JIM-Studie 2023: Jugend, Information, Medien (2023). Verfügbar unter: <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2023/>.
- [6] Phyphox: Bluetooth Low Energy (Stand 05/2024). URL: <https://phyphox.org/de/ble-de/>.
- [7] Siehe hierzu auch: Dorsel, Dominik; Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph; Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas: Visualisierung von Messdaten eigener Sensormodule mit phyphox. In: Physik unserer Zeit 53 (2023), Nr. 3, S. 151-152.
- [8] Herbst, Markus; Fürtbauer, Eva-Maria; Strahl, Alexander: Interesse an Physik. DPG-Frühjahrstagung, Hannover (2016).
- [9] Phyphox: Bau- und Bedienungsanleitung für die phyphox-Sensorkette (Stand 05/2024). Verfügbar unter:

<https://github.com/johannesschlaf/phyphox-Sensor-Chain>.

- [10] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur – Landesinstitut für Schule: 3-D-Druck in der Schule: Informationen und Orientierung für den Einstieg in den Unterricht (Stand 05/2024).

Verfügbar unter:

<https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/faecher/faecheruebergreifend/3d-druck-in-der-schule.html/>.

- [11] Zur Veranschaulichung sei an dieser Stelle verwiesen auf:

Nichols, David: Coloring for Colorblindness: We see colors differently (Stand 05/2024).

URL:

<https://davidmathlogic.com/colorblind/#%23D81B60-%231E88E5-%23FFC107-%23004D40/>.

- [12] Rewex GmbH: Materialien für den 3D-Druck (Stand 05/2024). URL:

<https://rewex.de/materialien/>.