

Informationen für Lehrkräfte

Allgemeine Informationen

Zielgruppe: Schülerinnen und Schüler der Stufen 8 -13

Physikalischer Inhalt: Mechanik (Kinematik, Dynamik, Kreisbewegung, Schwingungen)

Nature of Science – Fokus: Beobachtung & Schlussfolgerung, das Experiment als Methode der Erkenntnisgewinnung, Umgang mit Messwerten, Kreativität in den Naturwissenschaften

Methodik: Experimentieren mit Blackboxen

Materialaufwand: Blackboxen / 3D-Drucker, Metallkugeln, Muttern

Erprobungsgrad: einzelne Klassen



Fachlicher Hintergrund: Blackboxen im Physikunterricht

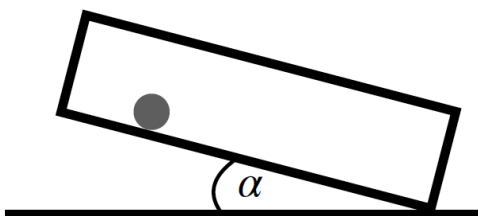
Blackboxen sind kleine Schachteln oder Boxen, deren Inhalt unbekannt ist (z.B. Kugeln und Formen; Spiegel oder elektrische Schaltungen). Wichtig ist, dass den Schüler:innen das Innere einer Blackbox auch nach dem Unterricht nicht offenbart wird. So sollen sie „nur“ mithilfe ihres fachlichen Vorwissens und durch systematisches Experimentieren an der Box Schlussfolgerungen zu dessen Inhalt ziehen. Dieser Prozess kann dann als eine Analogie zum wissenschaftlichen Arbeiten aufgefasst und entsprechend reflektiert werden (s. Höttecke & Schecker, 2021 oder Günther, 2008).

Die hier entwickelten Blackboxen sind für den Mechanikunterricht der Sek I und Sek II konzipiert und adressieren sieben verschiedene physikalische Inhaltsbereiche und Schwierigkeitsstufen:

1. Kippstufe (Kinematik/Bewegungsgleichungen/Schiefe Ebene)

Schwierigkeitsstufe: leicht bis mittel

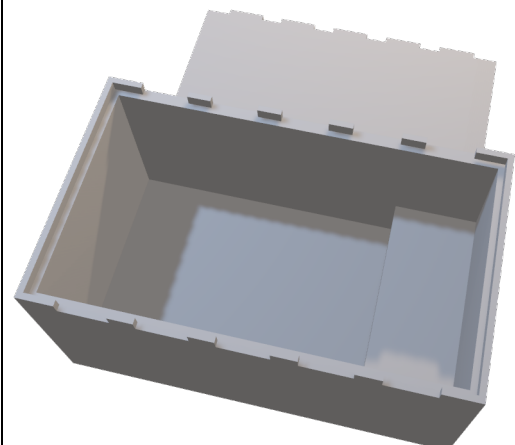
Diese Blackbox verfügt über eine Stufe und eine Kugel. Um die Kantenlängen im Inneren der Box zu bestimmen, können beispielsweise bei leichter Neigung der Box die Rollzeit t der Kugel und der Neigungswinkel α der gesamten Box bestimmt werden:



Dann gilt:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a_{II} \cdot t^2$$

$$\text{mit } a_{II} = \sin(\alpha) \cdot g$$



Alternativ kann die Kugel mithilfe eines Magneten an der Decke der Blackbox fixiert und durch ihren anschließenden freien Falls eine Bestimmung der inneren Längen gemäß den Gesetzmäßigkeiten des freien Falls vorgenommen werden.

2. Rutsche (Schiefe Ebene/Haftreibung)

Schwierigkeitsstufe: mittel

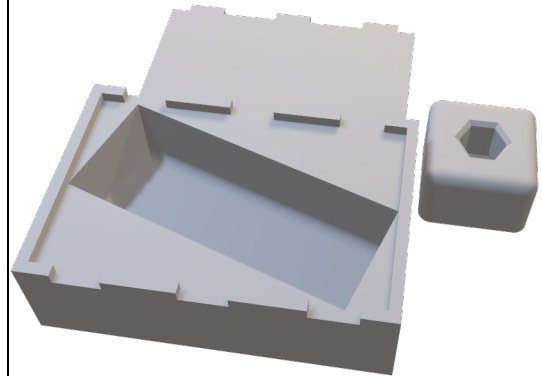
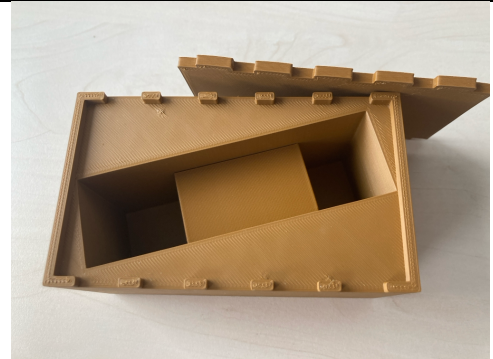
Im Inneren dieser Blackbox befindet sich eine Kiste, die auf einer schrägen Ebene rutschen kann. Messungen der beiden Winkel $\alpha_{1/2}$, ab denen die Kiste im Inneren zu rutschen beginnt, können durch Differenzbildung Aufschluss über den Steigungswinkel β der Ebene liefern.

Zudem ist es möglich, Aussagen über den Haftreibungskoeffizienten zu treffen:

Wird der Steigungswinkel β innerhalb der Kiste nun mit dem (kleineren) Winkel α_1 , bei dem die Kiste zu rutschen beginnt, addiert, ergibt sich ein Gesamt-Steigungswinkel von Kiste und Ebene γ . Mithilfe der Gleichung

$$\mu_{HR} = \tan(\gamma)$$

lässt sich somit der Haftreibungskoeffizient abschätzen.



3. Halfpipe (Fadenpendel)

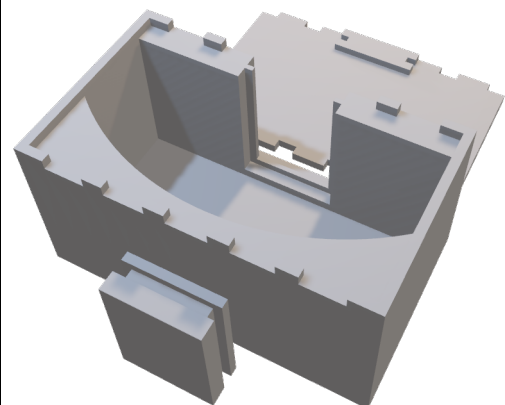
Schwierigkeitsstufe: mittel

Eine der inneren Wände ist als Kreisbogen mit dem Radius r geformt, auf dem eine Kugel rollen kann. Die Bewegung der durch Gravitation zum Schwingen gebrachten Kugel kann als Fadenpendel beschrieben werden. Die Schüler:innen können die Schwingung akustisch wahrnehmen und mit Hilfe einer Stoppuhr die Periodendauer T bestimmen. Der Radius r lässt sich dann wie folgt beschreiben:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r}{g}}$$

$$\Leftrightarrow r = g \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

Durch eine zusätzlich eingebaute bewegliche Wand kann auch die Masse m der Kugel ermittelt werden: Dazu wird die Blackbox so über eine Waage gehalten, dass nur die bewegliche Wand aufliegt, ohne Kontakt zur restlichen Box. Wird dieser Vorgang wiederholt, während sich die Kugel in der vorgesehenen Vertiefung auf der beweglichen Wand befindet, ergibt sich die Kugelmasse aus der



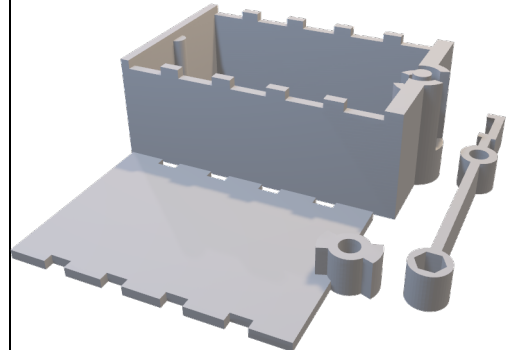
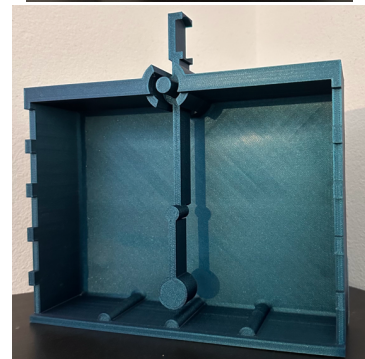
Differenz der beiden Messwerte. Diese Blackbox gibt es in drei Varianten mit jeweils unterschiedlichem Radius r .

5. Glocke (Hebel und Pendel)

Schwierigkeitsstufe: leicht bis mittel

Die Blackbox besteht aus einem an einer Außenwand gelagerten Hebelarm, der sich einige Zentimeter sowohl ins Innere als auch ins Äußere der Box erstreckt. Am Ende des sich im Inneren befindlichen Teils des Arms ist eine Mutter befestigt. Platziert man Massestücke in eine dafür vorgesehene Aussparung am äußeren Ende des Hebelarms, so lässt sich – in Verbindung mit einer Messung der Armlänge – eine Beziehung zwischen Masse und Länge des inneren Hebelarms herleiten oder zumindest verschiedene mögliche Konfigurationen im Inneren der Blackbox angeben.

Ist den Schüler/innen bereits das Fadenpendel bekannt, kann der Hebel durch Aufrichten der Box als solches approximiert werden. So lässt sich die Länge des Pende- bzw. Hebelarms bestimmen (vgl. 2.5 Halfpipe) und damit auch die Masse am Hebelende. Zur Steigerung der Komplexität steht eine zweite Version der Blackbox mit einem Doppelpendel zur Verfügung.



5. Rotation (Drehpendel)

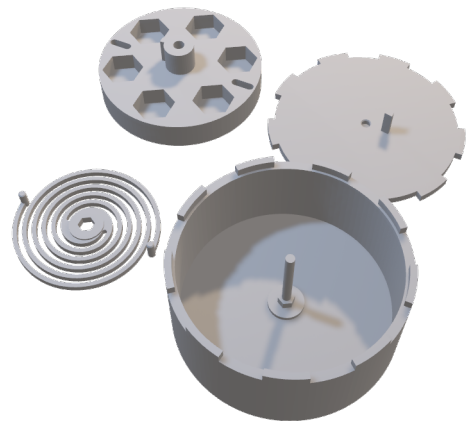
Schwierigkeitsstufe: schwierig

Die Blackbox zum Drehpendel enthält einen zylindrischen Schwungkörper, der über eine Spiralfeder auf einer senkrechten Achse in seiner Ruhelage gehalten wird. Wird die Blackbox rotiert, gerät der Schwungkörper aus der Ruhelage und beginnt zu schwingen. Diese Schwingung ähnelt der eines Federpendels mit Schraubenfeder. Durch Messung der Schwingungsdauer T lässt sich das Verhältnis zwischen Trägheitsmoment J und Federkonstante D bestimmen:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}}$$



Möglich wäre zudem die Bestimmung einer unteren Schranke für die Federkonstante D , indem die maximale Masse des Schwungkörpers abgeschätzt wird. Diese kann näherungsweise mit der Gesamtmasse der Blackbox gleichgesetzt werden, die messbar ist. Zur Berechnung ist lediglich die Formel für das Trägheitsmoment eines Schwungkörpers der angenommenen Form (entsprechend der Vorstellung der Schüler/innen) zu recherchieren und anzuwenden. Um die Schwingungsdauer zu verändern und für Messungen ausreichend groß zu machen, kann das Trägheitsmoment des Schwungkörpers durch das Einfügen handelsüblicher M12-Muttern erhöht werden. Dabei wird empfohlen, mindestens zwei Muttern zu verwenden.



6. Röhre (Zentripetalkraft)

Schwierigkeitsstufe: **sehr** schwierig

Die Blackbox besteht aus einer Kugel und einem zylindrischen Körper, dessen Innenwände leicht angewinkelt sind, sodass der Innenraum einem Trichter ähnelt. Der Neigungswinkel kann – analog zur **Blackbox „Glocke“** (vgl. 2.2) – über die Differenz der beiden Winkel bestimmt werden, bei denen die Kugel im Inneren zu rollen beginnt. Anschließend lässt sich durch eine Beziehung zwischen dem Radius und der Geschwindigkeit bestimmen.

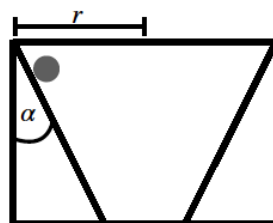
Mithilfe der Komponenten der Gewichtskraft und Zentripetalkraft parallel zur geneigten Wand ergibt sich:

$$F_{ZP,||} = \sin(\alpha) \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$F_{G,||} = \cos(\alpha) \cdot m \cdot g$$

$$F_{G,||} = F_{ZP,||}$$

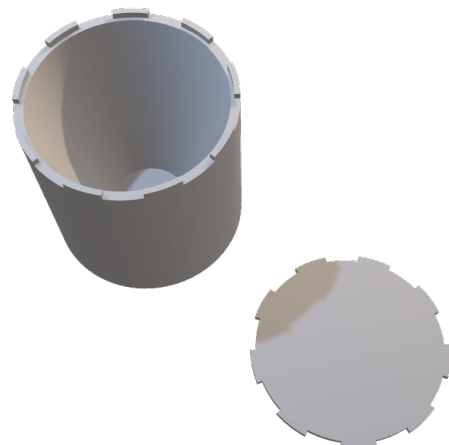
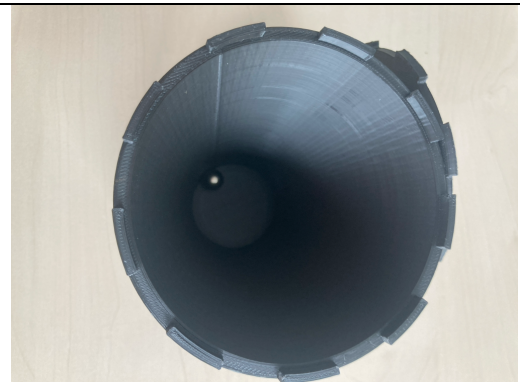
$$\Leftrightarrow r = \frac{\tan(\alpha)}{g} \cdot v^2$$



Wird im Anschluss die Formel $v = \frac{2\pi r}{T}$ in die hergeleitete Formel eingesetzt, ergibt sich für den Radius r :

$$r = \frac{gT^2}{\tan(\alpha) \cdot 4\pi^2}$$

So kann allein über die Messung der Schwingungsdauer T der Bahnradius r – beispielsweise am Boden oder an der Decke – bestimmt werden.



7. Viele Fäden (Flaschenzug)

Schwierigkeitsstufe: leicht bis mittel

Aus diesen Blackboxen hinaus ragen für die Schüler:innen sichtbar drei bis sechs Fäden mit Ösen an den Enden. Im Inneren sind diese über freie und feste Rollen miteinander verbunden. Dadurch ergibt sich beispielsweise, dass beim Ziehen an einem der Fäden ein anderer möglicherweise nur halb so weit in die Blackbox bewegt, wie der erste hinausgezogen wurde.

Werden die Blackboxen nun noch mit Massen und Kraftmessern untersucht, so können die Schüler:innen Rückschlüsse über den Aufbau der Blackboxen ziehen.

Genutzt und angewandt wird dabei stets die goldene Regel der Mechanik:

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$$

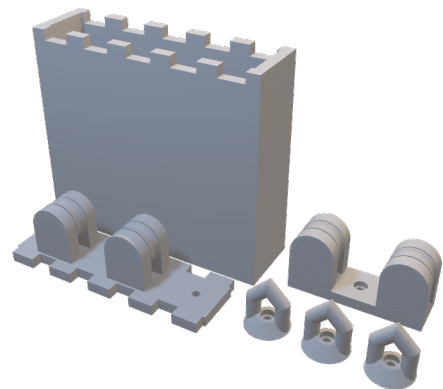
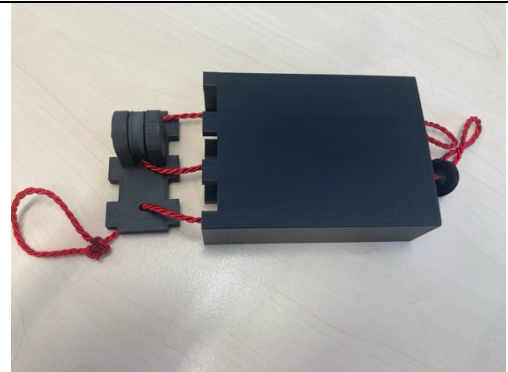


Tabelle 1: Übersicht über alle sieben Blackboxen und ihre physikalisch-inhaltliche Verortung

Lernziele für alle Blackboxes

Die Schüler:innen...

- stellen begründete Vermutungen über den Inhalt der jeweiligen Blackbox auf
- planen Experimente zur Überprüfung ihrer Vermutung(en) und zur Bestimmung physikalisch relevanter Größen in der Blackbox
- wählen die für die entsprechende Blackbox relevanten physikalischen Inhalte aus und wenden diese zielführend an
- begründen die aus den Beobachtungen/Messungen gezogenen Schlussfolgerungen
- vergleichen das Arbeiten mit den Blackboxes mit dem naturwissenschaftlichen Arbeiten (Gemeinsamkeiten sind z.B. die Empiriebasierung, der Zusammenhang von Beobachtung und Schlussfolgerung, Kreativität bei der Planung von Experimenten oder die Nichtbeweisbarkeit von Vermutungen)

Aufbau des Unterrichtsmaterials

Das Material besteht aus:

- **sieben unterschiedlichen Blackboxes** aus dem 3D-Drucker (vorliegend als .stl-Dateien)
- **Arbeitsblätter**, die im Rahmen der Gruppenarbeit bearbeitet werden können

Vorschlag für die Einbindung in den Unterricht

Die hier vorgestellten Blackboxes sind für die gymnasiale Oberstufe konzipiert. Der Zeitaufwand beträgt etwa 2-3 Unterrichtsstunden. Für die Einbindung in den Physikunterricht sollten die Schüler:innen das für die jeweilige Blackbox notwendige **Vorwissen** mitbringen. Um die Diskussion unter Schüler:innen zu fördern, ist die Arbeit in Gruppen (jede Gruppe bekommt die gleiche Blackbox) sinnvoll. Außerdem können so die eigenen Messungen und Schlussfolgerungen im Anschluss mit denen anderer Gruppen verglichen und diskutiert werden. Prinzipiell ist es auch möglich, den Gruppen verschiedenen Blackboxes zu geben. Aufgrund der unterschiedlichen, physikalischen Themen ist dies jedoch eher für sehr starke Lerngruppen empfehlenswert.

Möglicher Stundenverlauf beim Einsatz einer Blackbox

Phase	Unterrichtliche Handlung	Sozialform
Einstieg Aktivierung des Vorwissens	An dieser Stelle ist es empfehlenswert, dass die Schüler:innen zunächst ihr Vorwissen zur Wissensgenese in den Naturwissenschaften aktivieren: (Mögliche Impulse: Wie kommen Naturwissenschaftler:innen zu ihrem Wissen? Wie können sie sich sicher sein, dass sie „Recht“ haben? Welche Rolle spielen die Vermutungen von Naturwissenschaftler:innen?) Im Anschluss: Stundenziel herausstellen, Arbeitsauftrag erläutern, Blackboxes an Schüler:innengruppen verteilen	Plenum
Erarbeitung I	Bearbeitung von Aufgabe 1 auf dem AB: Erste Ideen und Fragen entwickeln	Einzel- und Gruppenarbeit
Erarbeitung II	Bearbeitung der Aufgaben 2-4: Entwicklung, Durchführung und Interpretation der Experimente, Unterstützung durch Lehrkraft	Gruppenarbeit
Sicherung	Gruppenweises Präsentieren der Arbeitsergebnisse	Plenum
Transfer	Moderierte Diskussion, mögliche Aspekte: • Austausch von Kritik an verschiedenen Vorgehensweisen • Vergleich (unterschiedlicher) Ergebnisse, Messdaten oder Schlussfolgerungen (bzw. Vermutungen über den Inhalt der Blackbox) • Bewertung von Schlussfolgerungen • Falsifizierbarkeit (nicht: Verifizierbarkeit) von Ergebnissen • Vergleich mit dem Arbeiten in den Naturwissenschaften (Wieso wird die Box nicht geöffnet?) •	Plenum
Weiterführung	Bearbeitung von Aufgabe 5 auf dem Arbeitsblatt: Ableitung von allgemeinen Hinweisen beim Arbeiten mit der Blackbox (bzw. beim wissenschaftlichen Arbeiten)	Einzel- oder Gruppenarbeit

Hilfestellungen zu den einzelnen Blackboxes

Im Folgenden werde eine Reihe von möglichen Hilfestellungen bei der Bearbeitung des Arbeitsblattes aufgelistet:

Aufgabe auf dem AB	Mögliche Hilfestellungen / Fragen / Denkanstöße
1	- Beschreibt, was in der Blackbox passiert! - Welche Komponenten könnten sich in der Blackbox befinden?
2	- Welches bekannte physikalische Phänomen, ähnelt dem, was dort in der Blackbox passiert? - Was passiert in der Box und an welches Experiment, zu welchem Phänomen erinnert euch das? - Was wisst Ihr schon über das vorliegende physikalische Phänomen? - Welche Gesetze kennt ihr, die das physikalische Phänomen beschreiben? - Welche geometrischen Beziehungen könnten hilfreich sein? - Welche physikalischen Größen sind relevant? - Welche dieser physikalischen Größen ist (wie) messbar? - Welche dieser Größen könnt ihr rechnerisch bestimmen?
3	- Welche physikalische Größe soll in Eurem Versuch bestimmt werden? - Welche schon bekannten Versuche sind dabei vielleicht hilfreich? - Welche Größen wollt ihr (wie oder womit) messen? - Wie muss der Versuch aufgebaut sein, damit ihr diese Größen bestimmen könnt? - Kann Euch vielleicht eine andere Gruppe weiterhelfen?
4	- Tragt in die Skizze ein, was sich – ausgehend von Euren Erkenntnissen – in der Blackbox befinden könnte. - Welche Informationen solltet ihr präsentieren, damit die Vorstellung Eurer Arbeitsergebnisse für Eure Mitschüler:innen überzeugend ist?
5	- Worauf sollte beim Experimentieren geachtet werden? - Ist Euch im Nachhinein aufgefallen, was ihr falsch oder richtig gemacht habt? - Was hat Euch in der Diskussion besonders überrascht? - Wie seid Ihr auf Eure Vermutungen und Ergebnisse gekommen? Was würdet ihr im Nachhinein anders machen?

Hinweise zum 3D-Druck

Die hier angegebenen Daten zum 3D-Druck der verschiedenen Blackboxen beziehen sich auf einen Druck mit einer **0,40 mm Düse**, einer **Extrusionsdicke von 0,1 mm** und einem **Infill (Dreiecke) von 10%** und benötigen eine **Druckbettgröße von 210x210 mm**. Die Druckzeit kann noch deutlich verringert werden, indem die Extrusionsdicke von 0,1 mm zu 0,3 mm gewechselt wird. Beispielhaft kann so die Druckzeit einer Blackbox von 13 Stunden auf 4 Stunden und 25 Minuten verringert werden. Jedoch ist an dieser Stelle die Warnung auszusprechen, dass die Blackboxen so einerseits ein größeres Erscheinungsbild haben werden und vor allem die Aussparungen für beispielsweise Muttern oder bewegliche Komponenten potenziell nicht mehr die nötigen Toleranzen haben werden. Da somit die **Funktion der Blackboxen beeinträchtigt** werden kann, wird empfohlen diese Einstellungen nur vorsichtig abzuändern.

Es wird insbesondere empfohlen für den Druck der Blackboxen **kein weißes** Filament zu benutzen, da sonst der Inhalt einsehbar wird, sobald die Blackboxen gegen eine Lichtquelle gehalten wird.

Blackbox	Material- bedarf	Zeit für den Druck	Weitere Hinweise
1. Kippstufe	ca. 243 g	ca. 11 h 30 Min	Nach Fertigstellung des Drucks müssen lediglich der Brim entfernt, eine (Stahl-) Kugel hinzugefügt und der Deckel mit Kleber aufgesteckt und befestigt werden.
2. Rutsche	ca. 211 g	ca. 9 h 6 Min	Nach Fertigstellung des Drucks müssen lediglich der Brim entfernt, nach Belieben eine M12 Mitter in den Beweglichen Klotz eingeklebt und der Deckel mit Kleber aufgesteckt und befestigt werden.
3. Halfpipe	ca. 211 bis 248 g	ca. 10 h 17 Min bis 10 h 39 Min	Nach Fertigstellung des Drucks müssen lediglich der Brim entfernt, eine (Stahl-) Kugel hinzugefügt und der Deckel mit Kleber aufgesteckt und befestigt werden, nachdem die Bewegliche Wand an die vorgesehene Stelle eingesetzt wurde.
4. Glocke	ca. 211 g	ca. 11 h 5 Min	Nach Fertigstellung des Drucks müssen lediglich 1 - 2 M8 Muttern in die dafür vorgesehene Stelle des Hebelarms eingeklebt werden. Anschließend wird der Hebelarm noch auf die Achse gesteckt und der Deckel ausgesteckt und verklebt.
	ca. 354 g	ca. 16 h 42 Min	Die Box mit dem Doppelpendel ist deutlich größer und muss dabei in zwei getrennten Dateien gedruckt werden. Der Aufbau ist analog zur Box mit dem einfachen Pendelarm mit dem Zusatz, dass das Doppelpendel noch zusammengesteckt und mit der kleinen Endkappe und Kleber fixiert werden muss.
5. Rotation	ca. 124 g	ca. 6 h 56 Min	Nach Fertigstellung des Drucks muss zunächst der Brim entfernt werden, welches durch die komplizierte Form der Spiralfeder etwas schwieriger ist. Die Spiralfeder muss durch die Achse hindurch am Boden der Box fixiert werden. Nachdem die gewünschte Anzahl an M12 Muttern in den Schwungkörper eingeklebt wurde, wird diese auf die Achse montiert. Anschließend wird der Deckel auf die Kiste gesteckt und verklebt. Dabei ist zu beachten, dass der Stift am Deckel, welcher die Auslenkung des Schwungkörpers beschränkt, an der richtigen Stelle platziert wird.

6. Röhre	ca. 191 g	ca. 8 h 0 Min	Nach Fertigstellung des Drucks müssen lediglich der Brim entfernt, eine (Stahl-) Kugel hinzugefügt und der Deckel mit Kleber aufgesteckt und befestigt werden.
7. Viele Fäden	ca. 50 g bis 116 g	ca. 3 h 13 Min bis 7 h 3 Min	Nach Fertigstellung des Drucks muss zunächst der Brim entfernt werden. Die Rollen des Flaschenzugs kommen bereits funktionsfähig aus dem Druck, wobei nur etwas Supportmaterial unterhalb der Rollen mit einer Spitzzange entfernt werden muss. Bevor die Blackbox mit Kleber fest verschlossen wird, müssen die Fäden durch die einzelnen Rollen geleitet und durch die Öffnungen in der Box nach außen gezogen werden. Nachdem die Blackbox verschlossen wurde, müssen die Ösen nun fest an die Enden der Fäden geklebt werden. Bei Bedarf können die Fäden vorab auf eine angemessene Länge gekürzt werden.

Weiterführende und genutzte Literatur

- Günther, J. (2008). Black Boxes. Analogien zu Problemstellungen in der Naturwissenschaft. In *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* (Bd. 19, Nummer 103, S. 24–28).
- Höttecke, D., & Schecker, H. (2021). Unterrichtskonzeptionen für Nature of Science. In T. Wilhelm, H. Schecker, & M. Hopf, *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht* (S. 401–433). Springer-Verlag GmbH.