

Experimentiermaterial aus dem 3D-Drucker Relevante Kriterien zur Konzeption am Beispiel eines Flaschenzuges



NILS HAVERKAMP – ALEXANDER PUSCH

Mit Hilfe der 3D-Druck-Technologie können Lehrkräfte vergleichsweise einfach Experimentiermaterial erstellen. In diesem Artikel diskutieren wir am Beispiel des Flaschenzuges allgemeine Kriterien für die Konstruktion, die dabei beachtet werden sollten.

1 Einleitung

Flaschenzüge sind ein wichtiger Teil des Mechanikunterrichts bei der Erarbeitung von einfachen Maschinen und der goldenen Regel der Mechanik. Sie können in Schülerexperimenten und Tafeldemonstrationen (Abb.1) eingesetzt werden. Die allermeisten Schulen haben sicherlich bereits verschiedene Flaschenzüge für den Unterricht. Diese können aber zum Teil verschlissen oder für den Schuleinsatz suboptimal sein. Manchmal sind Flaschenzüge auch nicht in ausreichender Menge für Schülerversuche vorhanden.

Wir zeigen in diesem Beitrag zunächst allgemein und anschließend am Beispiel Flaschenzug, auf welche Kriterien es bei der (Weiter-)Entwicklung, Konzeption und Konstruktion von schulischem Experimentiermaterial aus dem 3D-Drucker ankommt.

2 Welche Kriterien sind für 3D-gedruckte Experimentiermaterialien relevant?

Für die Gestaltung von (low-cost) Experimenten gibt es verschiedene Kriterien die sich in unserer Erfahrung (z. B. HAVER-

KAMP & PUSCH, 2020; HAVERKAMP, HAVEMANN, HOLZ, UBBEN, SCHLUMMER & PUSCH, 2020) als besonders relevant gezeigt haben.

Funktion

Selbstverständlich müssen Experimente gut „funktionieren“. Das Experimentiermaterial aus dem 3D-Drucker muss daher primär funktionsorientiert hinsichtlich *Stabilität*, *Sicherheit* und auch *Ergebnisqualität* designed und konstruiert werden (HAVERKAMP & PUSCH, 2021). Dazu gehört zum Beispiel, dass scharfe Kanten vermieden werden und dass das Experimentiermaterial für die vorgesehene Anwendung stabil genug ist und bei sachgemäßem Gebrauch nicht kaputtgeht (vgl. dazu z. B. KMK, 2019, 79 & 105).

Sichtbarkeit

Bei Experimenten sollte darauf geachtet werden, dass wichtige Elemente des Aufbaus gut zu erkennen und nachzuvollziehen sind (GIRWIDZ, 2020, 276). Dabei kann der Blick der Lernenden durch gezielte Akzentuierung (bspw. durch farbliche Hervorhebung der wichtigen Bestandteile) gelenkt werden (ebd.). Besonders wichtig ist, dass auch das Ergebnis des Experiments gut zu erkennen und nachvollziehbar ist. „Schmückendes Bei-

Kriterium	Lösungsansätze und Umsetzung
Sichtbarkeit	Die Schüler/innen sollen direkt erkennen können, wie der Flaschenzug aufgebaut ist, wie viele Rollen aktuell verwendet werden und wie er funktioniert. <ul style="list-style-type: none"> • Die Rollen sind (v. a. beim Tafelset) deutlich hinter den Halteklammern zu sehen. • Die Rollen sind übereinander und nicht hintereinander positioniert, so dass jede einzelne Rolle gut zu sehen ist. • Die Rollen heben sich farblich gut von den Halteklammern ab.
Benutzbarkeit	Beim Flaschenzug kommt es darauf an, dass die Anzahl der festen und losen Rollen einfach zu variieren sind. Das Seil muss leicht einzulegen sein. <ul style="list-style-type: none"> • Ein magnetisch gehaltener Verschluss ermöglicht den schnellen und frustfreien Wechsel des Seils. • Eine Halterung für die Tafel ermöglicht die gut sichtbare Demonstration. Die Tafel kann für Markierungen von z. B. der Strecke verwendet werden. • Durch ein Hakensystem können einfach weitere Rollen ergänzt oder der Flaschenzug mit Stativmaterial verbunden werden
Funktion	Für die Funktion eines Flaschenzugs sind besonders die Stabilität und geringe Reibung wichtig. Bereiche besonderer Belastung sollten durch entsprechendes Design und/oder Druckeinstellungen verstärkt werden. <ul style="list-style-type: none"> • Die Haken können unabhängig von den Halteklammern gedruckt werden, sodass hier durch Anpassung der Wandstärke und des Infills für höhere Stabilität gesorgt werden kann (z. B. fünf Wände und 40% Füllgrad (Infill)). • Die Rollen werden durch (metrische) Metallschrauben gehalten. Dies sorgt für besondere Stabilität. • Der Flaschenzug soll eine geringe Reibung aufweisen, damit die berechneten Werte nicht stark von den gemessenen Werten abweichen. • Die bereits geringe Reibung zwischen den Schrauben aus Metall und Rollen aus Plastik kann durch Schmiermittel wie z. B. Graphit optimiert werden (Abrieb vom Bleistift).
Druckbarkeit	Das Design des Flaschenzugs wird auf bestmögliche Druckbarkeit ausgelegt. <ul style="list-style-type: none"> • Überhänge werden soweit möglich vermieden sowie abgerundet, sodass keine Stützstruktur benötigt wird. • Die Sets sind aus einzelnen, gut druckbaren Einzelkomponenten konzipiert. Das größte Bauteil des Tafelsets ist 185 mm x 20 mm groß und passt dadurch gut auf ein durchschnittlich großes Druckbett. Das größte Bauteil des Schülersets ist 125 mm x 16 mm groß und passt damit sogar auf die meisten kleinen Drucker.
Materialverfügbarkeit	Das Design wird darauf ausgelegt, dass es mit PLA oder PETG gedruckt werden kann und Normteile verwendet werden. <ul style="list-style-type: none"> • Zusätzlich zu den gedruckten Bauteilen werden nur metrische Schrauben, Muttern und Neodymmagnete benötigt (s. Kriterium Preis). • Es können verschiedene Seile bis zu einem Durchmesser von 10 mm verwendet werden.
Preis	Beim Flaschenzug wird darauf geachtet, dass ein Set möglichst wenig Druckmaterial benötigt, ohne dass die Stabilität leidet. Die zusätzlich verwendeten Teile sollten günstig erhältlich sein. <ul style="list-style-type: none"> • Ein Tafelset benötigt etwa 200 g Druckmaterial, was bei einem Preis von 25 €/kg etwa 5 € entspricht. Zusätzlich werden 15 M5 x 40 Schrauben mit Muttern á 7 ct/st. und 14 Neodym Magnete á 22 ct/st. verwendet, so dass ein Set insgesamt etwa 10 € kostet. • Ein Schülerexperimentierset benötigt 100 g Druckmaterial, was bei einem Preis von 25 €/kg etwa 2,50 € entspricht. Zusätzlich werden 14 M5 x 40 Schrauben mit Muttern á 7 ct/st. und 8 Neodym Magnete á 22 ct/st. verwendet, so dass ein Set insgesamt etwa 6 € kostet. Der Flaschenzug ist damit günstig genug, um auch mehrfach für Schülerexperimente angeschafft zu werden.

Tab. 1. Lösungsansatz und Umsetzung der Kriterien für Experimentiermaterial aus dem 3D-Drucker am Beispiel Flaschenzug

werk“ ist als mögliche Ablenkung zu vermeiden. Oftmals erfüllen einfache Konstruktionen ihren Zweck am besten.

Benutzbarkeit

Für Lernende ist das Experimentieren häufig eine Herausforderung, weil der Umgang mit dem unbekanntem Material noch erlernt werden muss. Um den Einstieg und die Benutzung für die Lernenden (und Lehrenden) zu vereinfachen, sollte das

Experimentiermaterial möglichst einfach und intuitiv in der Bedienung sein.

Aus pragmatischer Sicht ist ebenfalls eine hohe Fehlertoleranz bei der Bedienung (z. B. dass man es nur schwer „falsch“ zusammenbauen und bedienen kann) und zugleich vielseitige Verwendbarkeit, z. B. für andere Varianten, Komponenten oder Experimente, wichtig.

Relevante Masse	Gemessene Kraft	Berechnete Kraft	Verhältnis
2 kg Massestück + 0,075 kg lose Rollen	3,85 N (± 0,15 N)	4,07 N	0,95
1 kg Massestück + 0,075 kg lose Rollen	1,85 N (± 0,15 N)	2,11 N	0,88
0,5 kg Massestück + 0,075 kg lose Rollen	0,90 N (± 0,15 N)	1,13 N	0,80

Tab. 2. Messungen am Tafelset

Relevante Masse	Gemessene Kraft	Berechnete Kraft	Verhältnis
2 kg Massestück + 0,05 kg lose Rollen	3,8 N (± 0,15 N)	4,02 N	0,95
1 kg Massestück + 0,05 kg lose Rollen	1,8 N (± 0,15 N)	2,06 N	0,87
0,5 kg Massestück + 0,05 kg lose Rollen	0,90 N (± 0,15 N)	1,08 N	0,83

Tab. 3. Messungen am Schülerexperimentierset

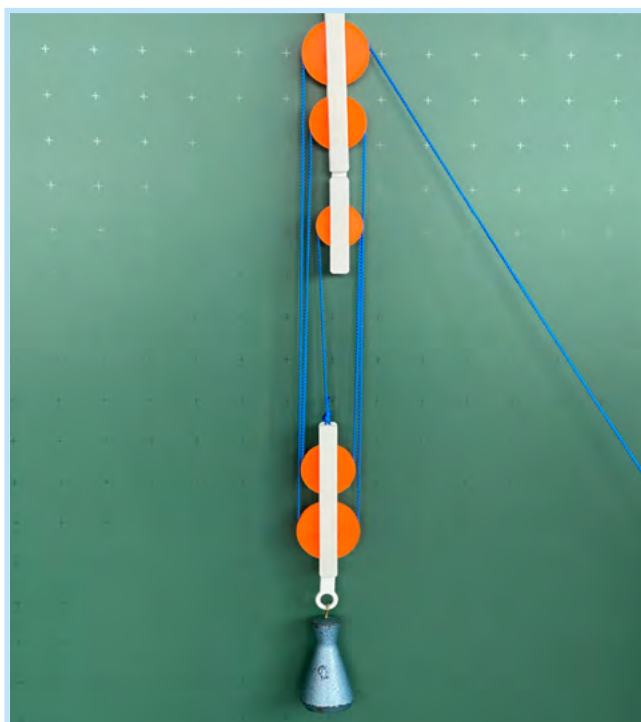


Abb. 1. Flaschenzug an der Tafel

Druckbarkeit

Damit Experimentiermaterial an verschiedenen Schulen mit unterschiedlicher technischer Ausstattung gedruckt werden kann, kommt es bei Design und Konstruktion vor allem darauf an, dass die Komponenten auf verschiedenen Druckern ohne größere drucktechnische Herausforderungen ausdrückbar sind. Druckprobleme wie z. B. geringe Anhaftungen in der ersten Schicht sowie Überhänge können durch Konstruktionsdetails vermieden werden (HAVERKAMP & PUSCH, 2021). Mit Stützstrukturen lassen sich Überhänge zwar drucken, diese müssen aber nach dem Druck entfernt werden und können scharfe Kanten hinterlassen. Besonders wenn Material in Klassenstärke hergestellt wird, ist es außerdem sinnvoll, wenn am ausgedruckten Material keine Nachbearbeitungen, wie das Entfernen von Stützstruktur oder zusätzliche Details wie nachträglich hinzugefügte Bohrungen notwendig sind (ebd).

Materialverfügbarkeit

Damit Experimentiermaterial möglichst einfach an Schulen hergestellt werden kann, sollten für den Druck nur einfach zu druckende Materialien wie PLA und PETG verwendet werden (PUSCH, HOLZ & HEUSLER, 2020). Wenn zusätzlich zum Druck weitere Komponenten benötigt werden, dann sollten diese einfach und günstig zu beschaffen sein (z. B. Normteile, s. a. Kriterium Preis).

Preis

Im schulischen Kontext sind der Preis und eine Kosteneffizienz relevant. Durch einen geringen Preis kann gewährleistet werden, dass Material für Schülerexperimente in Klassenstärke angeschafft werden kann. Auch wenn 3D-Druck von den Energie- und Materialkosten her ein eher günstiges Verfahren ist, bietet eine geschickte Konstruktion deutliches Einsparpotential. Bei zusätzlich benötigten Teilen sollte darauf geachtet werden, dass auf günstig zu beschaffene Normteile, wie z. B. bestimmte Standardmaße von Schrauben, Muttern oder Neodymmagneten, zurückgegriffen wird (s. Materialverfügbarkeit), an die die Konstruktion dann angepasst wird.

3 Der Flaschenzug aus dem 3D-Drucker

Flaschenzüge können Schüler/innen außerhalb des Unterrichts z. B. von Kränen, Geräten im Fitnessstudio oder von Segelbooten kennen (s. a. HEINICKE & PUSCH, 2019). An Flaschenzüge in Kränen oder in Fitnessgeräten werden aber andere Anforderungen gestellt, als an Flaschenzüge für den Mechanikunterricht. Wesentliche Aspekte der Konzeption und Gestaltung für den Flaschenzug aus dem 3D-Drucker für den Einsatz im Unterricht lassen sich aus den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Kriterien ableiten und werden in Tabelle 1 diskutiert.

Der hier vorgestellte Flaschenzug aus dem 3D-Drucker ist in zwei Versionen verfügbar: Das *Schülerexperimentierset* zeichnet sich dadurch aus, dass es wenig Druckmaterial benötigt und gut in großer Stückzahl hergestellt werden kann. Es lässt sich mit schulüblichem Stativmaterial kombinieren. Die Größe ist so gewählt, dass der Flaschenzug auch auf kleineren Druckern gedruckt werden kann. Das *Tafelset* (Abb. 1 & 2) ist größer als das Schülerexperimentierset. Es können Rollen bis 70 mm

Durchmesser verwendet werden und der Flaschenzug kann an der Tafel befestigt werden. Typischerweise werden mit Flaschenzügen in verschiedenen „Konfigurationen“ (Anzahl fester und loser Rollen, verschiedene Rollendurchmesser) Experimente zur goldenen Regel der Mechanik durchgeführt (Physikalische Arbeit kann nicht „gespart“ werden). Die jeweilige physikalische Arbeit, das Produkt einer Kraft entlang eines Weges, ist identisch ($W = \vec{F} \cdot \vec{s}$).

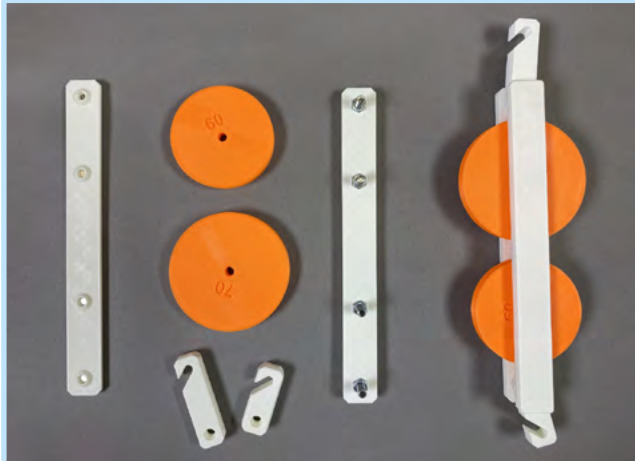


Abb. 2. Einzelteile des Tafelsets

Relevant zur Beurteilung der Güte quantitativer Messungen am Flaschenzug ist die Reibung der Komponenten, v. a. der Rollen in der Lagerung sowie Reibungen des Seils (diese ist auch abhängig vom verwendeten Seil!). Sie bedingen eine Abweichung zwischen gemessener Kraft und theoretisch zu erwartender Kraft.

Im „statischen Fall“ hängt ein Massestück am Flaschenzug und mit einem Kraftmesser wird die resultierende Kraft am Halteseil bestimmt. Die Haftreibung verringert die abzulesende Haltekraft. Zur besseren Einschätzung haben wir beide Flaschenzüge mit der maximalen Anzahl loser Rollen ($r_{lose} = 2$) und fester Rollen ($r_{fest} = 3$) mit Massen zwischen 0,5 kg und 2 kg belastet, und die jeweilige aufzubringende Haltekraft mit einem Kraftmesser abgelesen. Diese Konfiguration ergibt $n = 5$ tragende Seile (Abb. 1) und damit ein theoretisches Verhältnis von 1 zu 5 zwischen Zugkraft und Last ($F_{Zug} = \frac{F_{last}}{n}$) bzw. Faktor 5 zwischen Hubstrecke und Zugstrecke ($s_{Zug} = n \cdot s_{Hub}$). Das Verhältnis von gemessenem Wert zu theoretischem Wert der Kräfte beträgt im ungünstigsten Fall 0,8 und im besten Fall 0,95 (Tab. 2 & 3). Auf eine Betrachtung der Kräfte im „dynamischen Fall“, d. h. beim Ziehen, wird verzichtet, da Gleitreibung in der Regel geringer als Haftreibung ist und das Ablesen eines Kraftmessers während einer Bewegung sehr ungenau ist.

4 Fazit

Vorhandene Experimente und Experimentiermaterialien können durch Einsatz des 3D-Druckers innovativ und kostengünstig ergänzt, optimiert und weiterentwickelt werden. Großes Potential für den Unterricht und die Lernenden liegt vor allem auch darin, dieses gemeinsam mit den Schüler/ine/n zu tun.

Durch die hier beschriebene kriteriengeleitete Entwicklung kann viel über die zugrundeliegende Physik, die verwendete Fertigungstechnologie sowie das Wechselspiel zwischen den Kriterien Funktion, Sichtbarkeit, Benutzbarkeit, Druckbarkeit, Materialverfügbarkeit und Preis bei der Findung und Bewertung der Lösungsoptionen gelernt werden.

Die Dateien und Materialliste finden sich unter <https://physikkommunizieren.de/3d-druck/flaschenzug/>.

Literatur

- GIRWIDZ, R. (2021). Experimente im Physikunterricht. In: E. KIRCHER, R. GIRWIDZ, H. E. FISCHER (Hg.), *Physikdidaktik Grundlagen*, 4. Auflage. Springer: Heidelberg.
- HAEVERKAMP, N., HAVEMANN, J., HOLZ, C., UBBEN, M., SCHLUMMER, P. & PUSCH, A. (2021). A new implementation of Kundt's tube: 3D-printed low-cost set-up using ultrasonic speakers. *Physics Education*, 56(2) doi: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/abd0d7>.
- HAEVERKAMP, N., HOLZ, C., UBBEN, M. & PUSCH, A. (2020). Measuring Wavelengths with LEGO® Bricks: Building a Michelson Interferometer for Quantitative Experiments. *The Physics Teacher*, 58. 652–655 doi: <https://doi.org/10.1119/10.0002734>.
- HAEVERKAMP, N. & PUSCH, A. (2020). 3D-Dateien selber konstruieren. Prinzipien und Vorgehensweise am Beispiel einer Magnetfeldsonde. *Plus Lucis*, 4, 10–13.
- HAEVERKAMP, N. & PUSCH, A. (2020). Einmal Erdmagnetfeld zum Mitnehmen. Ein Low-Cost-Schülerexperiment. *MNU Journal*, 73, 26–30.
- HEINICKE, S. & PUSCH, A. (2019). Einfache Maschinen im Alltag. Klassifizierung, Beispiele und ein Kartenspiel für den Unterricht. *Naturwissenschaft im Unterricht Physik*, 169, 18–23.
- KMK (2019). Empfehlung der Kultusministerkonferenz: Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (RISU). https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf (14.04.2021).
- PUSCH, A., HOLZ, C. & HEUSLER, S. (2020). 3D-Druck im Physikunterricht. Von den Grundlagen zu vielfältigen Anwendungsfeldern. *Plus Lucis*, 4, 4–9.
- NILS HAEVERKAMP studiert Physik und Mathematik auf Lehramt für die Sek. II an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. nils.haverkamp@wwu.de
- Dr. ALEXANDER PUSCH lehrt und forscht am Institut für Didaktik der Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. alexander.pusch@wwu.de ■