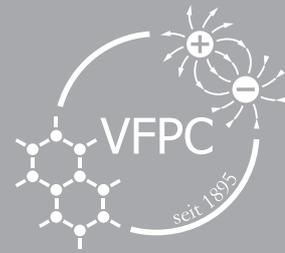
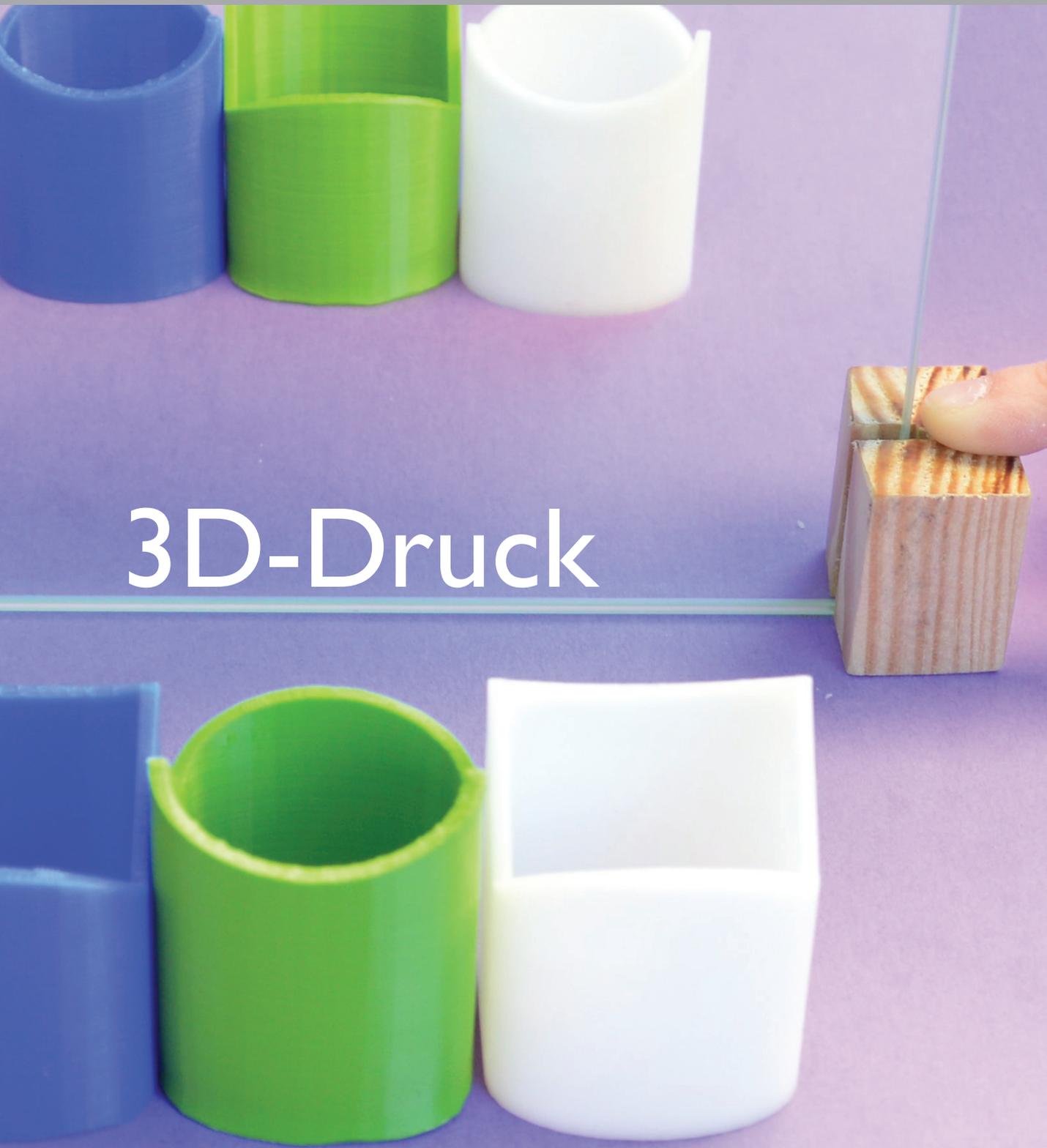


plusLucis



Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts



3D-Druck

Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729)
Erscheint vierteljährlich

Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts
Adr.: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien
Web: <https://www.pluslucis.org>
Mail: schriftenleitung@pluslucis.org

Redaktion:

Mag. Dr. Thomas Plotz (Leitung)
Mag. Sarah Zloklikovits

Verantwortlicher Herausgeber dieser Ausgabe:

Martin Hopf
Universität Wien, AECC Physik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at

HerausgeberInnenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer
Universität Graz, Physikdidaktik
E-Mail: claudia.haagen@uni-graz.at

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien, Physikdidaktik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at

Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens
Universität Wien, Chemiedidaktik
E-Mail: anja.lembens@univie.ac.at

Prof. Dr. Thomas Wilhelm
Universität Frankfurt, Physikdidaktik
E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.

Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und ChemielehrerInnen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten AutorInnen verantwortlich.

Titelbild (Umschlag):

Optische Täuschung. Foto Martin Hopf

Inhalt

3D-Druck im Physikunterricht – von den Grundlagen zu vielfältigen Anwendungsfeldern.....	4
<i>Alexander Pusch, Christoph Holz & Stefan Heusler</i>	
3D-Dateien selber konstruieren	10
<i>Nils Haverkamp & Alexander Pusch</i>	
Was bringt uns Grundlagenforschung?.....	13
<i>Leo Ludick</i>	
Luftballongleiter mit seitlicher Düse.....	14
<i>David Schaubmair</i>	
Stoßversuche mit 3d-gedruckten Experimentierwägen.....	16
<i>Judith Kühleitner & Florian Damböck</i>	
3d-gedruckter Schussapparat.....	18
<i>Michael Lattner & Daniel Weikartschläger</i>	
Ein 3d-gedrucktes Resonanzmodell	20
<i>Magdalena Wiedemaier</i>	
Das 3d-gedruckte Kapillarmodell.....	21
<i>Kerstin Lindmaier</i>	
Das hydrostatische Paradoxon – ein 3d-gedrucktes Demonstrationsmodell.....	22
<i>Irene Baldauf & Maximilian Suppan</i>	
Multifunktionelle Lochkamera selbst gedruckt	24
<i>Matthias Fasching</i>	
3d-gedrucktes Augenmodell mit akkommodationsfähiger Linse	26
<i>Anna Kaiser</i>	
3D-gedrucktes Streuexperiment à la Rutherford.....	28
<i>Julia Woithe</i>	
3D-gedruckte Experimente zur modernen Physik.....	33
<i>Fabian Bernstein, Thomas Wilhelm & Sascha Schmeling</i>	
Da irrt so manches Physikbuch (Teil 4).....	40
<i>Rainer Pippig</i>	
Bild der Wissenschaft.....	41
<i>Simon Plätzer</i>	
Rezension zum Heft.....	42
<i>Marianne Korner</i>	
Fortbildungswoche 22.2.2021 bis 24.2.2021.....	43

Editorial

Liebe Leser*innen,

Haben Sie schon einen? Oder wenigstens Zugriff auf einen? Haben Sie schon herumgefragt? Sonst lohnt vermutlich ein Gespräch mit der Direktion oder dem Elternverein. Die älteren unter uns erinnern sich sicher noch an den Siegeszug der Tintenstrahldrucker. Noch vor 30 Jahren war es ein wirklich teures Vergnügen, Ausdrücke zu bekommen, die auch ästhetisch ansprechend waren und vielleicht sogar noch Grafiken oder Formeln enthielten. Und dann kamen die Tintenstrahldrucker. Und in kurzer Zeit konnten hochwertige Ausdrücke relativ kostengünstig und schnell zu Hause gemacht werden. Eine ähnliche Entwicklung steht mit den 3D-Druckern ins Haus. Sie sind gerade dabei, Teil unseres Alltags zu werden. Die Preise für akzeptable Geräte sind schon bei 300 Euro angelangt. Es ist also zu erwarten, dass wir uns in Zukunft kleine Teile selbst ausdrucken werden. Das ist ein Glücksfall für den Physikunterricht!

Was dazu kommt ist, dass 3D-Druck leichter geht als erwartet. Ja, man muss zunächst ein CAD-Modell des Gegenstands haben, um ihn drucken zu können. Aber es gibt inzwischen große Portale im Internet, auf denen man viele Vorlagen findet und diese kostenfrei herunterladen kann. Und selbst wenn man das benötigte nicht findet, helfen solche Sammlungen: Man kann dann leicht ähnliche Objekte verändern und so zu dem Modell kommen, das man benötigt.

Seit einigen Jahren widmen sich immer mehr Kolleg*innen der Frage, wie man 3D-Drucker sinnvoll für den Physikunterricht einsetzen kann. Und sie haben sicher schon viele interessante Anschauungsmodelle gesehen, z. B. ausgedruckte Potentialflächen. Es werden immer mehr Anregungen dafür geteilt, welche Objekte zum Experimentieren gedruckt werden könnten. Letzteres war auch der Fokus einiger Seminare im Lehramtsstudium an der Universität Wien. Viele der Beiträge dieses Hefts stammen aus den Arbeiten der Studierenden in diesen Seminaren. Es war beeindruckend zu sehen, wie schnell sich die Studierenden in diese Technik eingearbeitet haben.

Das vorliegende Heft soll Ihnen Anregungen für den Einsatz eines 3D-Druckers geben. Sie finden zwei Überblicksartikel und dann viele Beiträge zu konkreten Objekten. Stets gibt es fertige Druckdateien, die Sie herunterladen, drucken und im Unterricht verwenden können.

Zu Beginn erläutern *Pusch, Holz und Heusler* den Hintergrund des 3D-Drucks und erläutern kurz seine Geschichte. Sie geben auch einen Ausdruck über die verschiedenen Programme und die jeweiligen Vor- und Nachteile. Danach diskutieren sie, mit welchen Materialien überhaupt gedruckt werden kann. Im zweiten Beitrag erklären *Haverkamp und Pusch* am Beispiel einer Magnetfeldsonde, wie ein 3D-Objekt erstellt und anschließend gedruckt wird. Sie greifen dabei ein vorliegendes Design auf und erläutern detailliert die verschiedenen Schritte von der Idee bis zum fertigen Objekt.



Martin Hopf

Schaubmair hat den Luftballongleiter weiterentwickelt: es wurde eine seitliche Luftdüse hinzugefügt. So kann eine Bewegung mit einer Kraft quer zur Bewegungsrichtung demonstriert werden. Dies ist eine Bereicherung bei der Arbeit mit dem 2DD-Curriculum. *Kühleitner und Damböck* stellen anschließend die Hitcars vor. Mit diesen Rollwägen kann man hervorragend zum dritten Newtonschen Gesetz experimentieren, ohne teure Lehrmittel zukaufen zu müssen. Einen Schussapparat haben *Lattner und Weikartschläger* entworfen. Mit Materialkosten von wenigen Euro entsteht ein Gerät, das die Untersuchung von Wurfbewegungen mit kontrollierten Ausgangsbedingungen erlaubt. Eine ebenfalls tolle Erweiterung der Sammlung ist das Resonanzmodell von *Wiedemaier*. Seien Sie nur ein wenig vorsichtig mit den Amplituden, nicht dass ein Arm des Modells abbricht.

Auch zur Mechanik von Flüssigkeiten können Geräte gedruckt werden. *Lindmair* stellt dazu ein Kapillargerät vor. Die üblichen Glasgeräte sind ja leider sehr zerbrechlich. Um so besser ist es, dass hier ein einfaches Modell existiert, das gute experimentelle Ergebnisse liefert. *Baldauf und Suppan* diskutieren ein Gerät zum hydrostatischen Paradoxon. Der Kreativität für den Entwurf weiterer Rohre für diese Anordnung sind nur durch drucktechnische Beschränkungen Grenzen gesetzt.

Aus der Optik gibt es zwei Entwürfe. *Fasching* hat einen Aufsatz entworfen, der eine Chips-Dose zu einer multifunktionellen Kamera macht. Und *Kaiser* hat das Augenmodell mit der adaptierenden Augenlinse als 3D-Druck-Modell designt.

Ein Analogieexperiment zum Rutherford'schen Streuversuch steht im Fokus des Beitrags von *Woitbe*. So können Schülerinnen und Schüler nachvollziehen, wie aus Streuung von Teilchen an Objekten auf das Objekt selbst rückgeschlossen werden kann. *Bernstein, Wilhelm und Schmeling* präsentieren ein 3D-gedrucktes Interferometer. Sie geben konkrete Anregungen für verschiedene Experimente, die mit diesem Gerät durchgeführt werden können. Es ist verblüffend, welche hohe Präzision mit einfachen Mitteln erreicht werden kann.

Ich glaube, dass der 3D-Druck die kommende Technologie auch und gerade für die Physiksammlung sein wird. Und ich würde mich freuen, bald wieder ein solches Heft herauszugeben in dem dann Ihre Vorschläge vorgestellt werden.

Martin Hopf

3D-Druck im Physikunterricht – von den Grundlagen zu vielfältigen Anwendungsfeldern

Alexander Pusch, Christoph Holz & Stefan Heusler

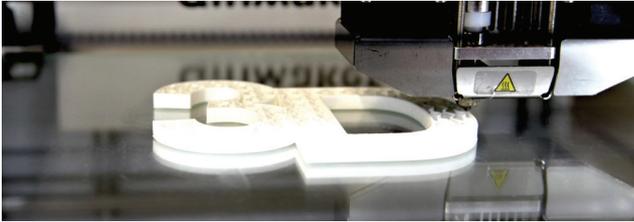


Abbildung 1: Ein 3D-Modell während des Druckes. Zu erkennen ist, dass die meisten Objekte innen nur teilweise gefüllt sind. Die Stabilität ist dabei oft ähnlich hoch wie bei vollständig gefüllten (soliden) Objekten, sie benötigen aber deutlich weniger Material und Druckzeit (Bild: Alexander Pusch).

1. Einleitung

Die immer stärker auftretende automatisierte Fertigung durch Maschinen prägt und wandelt die industrielle Produktion bereits seit den 70er Jahren, was als dritte industrielle Revolution bezeichnet wird. Viele Autor*innen sehen in der aktuellen Digitalisierung von bislang analogen Techniken, der Nutzung cyber-physischer Systeme, sowie Produktion in Abhängigkeit von tatsächlichen Aufträgen (just-in-time) wesentliche Merkmale der vierten industriellen Revolution [z. B. 1, 2]. Neben der Informatisierung (durch Computer und Internet), spielt Robotik hier eine große Rolle, sowie in immer stärkerem Maße auch 3D-Druck (Abb. 1). Der 3D-Druck erlangte zwar erst in den letzten Jahren auch allgemeine Aufmerksamkeit, prägt aber bereits jetzt ganze Berufsfelder wie z. B. Design, Ingenieurwesen und Medizintechnik. Wesentlich hierfür ist der Übergang vom reinen „rapid prototyping“, also lediglich der schnellen Fertigung von Prototypen, hin zu einem tatsächlichen Werkzeug bei der kostengünstigen und individuellen just-in-time Produktion mit einer immer weiter wachsenden Anzahl unterschiedlicher Werkstoffe. Aufgrund dieser zunehmenden Bedeutung ist in vielen Ländern wie z. B. USA und England der 3D-Druck nicht nur selbstverständlicher Teil der Ausbildung in Studiengängen, sondern bereits auch Bestandteil des Curriculums allgemeinbildender Schulen [z. B. 3, 4, 5]. Berufsausbildungen im Konstruktions- und Designbereich setzen vermehrt 3D-Konstruktion und additive Fertigung ein [6].

Auch in Deutschland und Österreich bieten sich gerade im Physikunterricht viele direkte und indirekte Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, wobei im internationalen Vergleich aufgrund der rasanten Entwicklung auf diesem Gebiet sicherlich Nachholbedarf besteht.

Dieser Artikel liefert einen kurzen Überblick über die Entstehung des 3D-Druckes, sowie einem Einblick in sinnvolle und kostengünstige Einsatzmöglichkeiten von 3D-Druck im Unterricht.

2. Überblick über die 3D-Druck-Technologien

3D-Druck ist allgemein ein Verfahren der additiven Fertigung, bei dem im Gegensatz zu etwa Fräs- oder Drehteilen im Fertigungsprozess kein Material abgetrennt wird und das Werkstück auch nicht umgespannt werden muss. Beim 3D-Druck wird das Material Schicht für Schicht additiv verbunden und oft komplett „in einem Stück“ gefertigt. Die gedruckten Teile können anschließend auch verklebt, verschraubt oder ineinandergesteckt werden.

Einige der gebräuchlichsten Technologien werden nachfolgend kurz vorgestellt. Es gibt im Bereich 3D-Technologie allerdings verschiedene, unterschiedliche Begriffe und Marktbezeichnungen, daher werden hier die nach VDI 3405 genormten Bezeichnungen verwendet [vgl. 7, S. 19f.]. Details sowie weitere Verfahren finden sich bspw. auch in [8, S. 33ff.]:

- 1. Stereolithographie (SL):** Aushärten von flüssigem, photosensitivem Kunststoff durch Belichtung oder mit Lasern (in der Regel im UV-Bereich).
- 2. Laser Sintern (LS):** Verschmelzen von pulverförmigen Thermoplasten mittels Laser (Abb. 2).
- 3. Laser Schmelzen (LBM)** Verschmelzen von pulverförmigen Metallen mittels Laser (oder mittels Elektronenstrahl, dann EBM).
- 4. Fused Layer Modelling (FLM):** Aufschmelzen, Extrudieren und schichtweise Auftragen von Thermoplasten (Abb. 2).

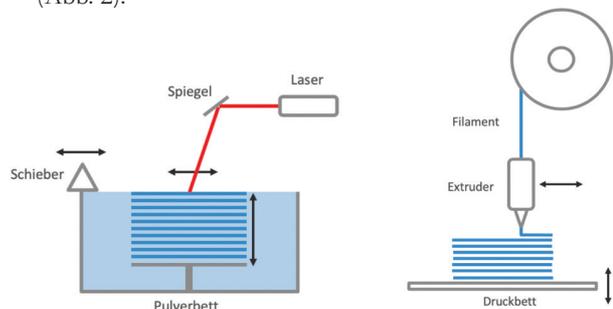


Abbildung 2: Vereinfachtes Prinzip additiver Fertigung mit LS/LBM (links) und FLM (rechts). (Bild: Alexander Pusch)

Schüler*innen kennen auch weitere additive Fertigungsverfahren wie das Verkleben von Bauteilen oder das Zusammensetzen, z. B. von LEGO®-Steinen.

3. Eine kurze Geschichte des 3D-Drucks

Obwohl es fast so scheint, dass 3D-Druck ein sehr neues Verfahren ist, ist die wesentliche Idee des 3D-Drucks – die computergesteuerte additive Fertigung – schon fast 40 Jahre alt. Streng genommen ist die Fertigung von Objekten durch Maschinen, die einen Programmcode ausführen, sogar noch deutlich älter. Als einer der ersten Vorläufer von 3D-Druckern kann im weitesten Sinne der mechanische Webstuhl von *Joseph-Marie Jacquard* um 1805 [9] angesehen werden. Dieser tastete den Programmcode mechanisch von Lochkarten ab und steuerte die Schuss- und Kettfäden (Abb. 3). Das Resultat war z. B. ein Teppich oder eine Stoffbahn mit Muster.

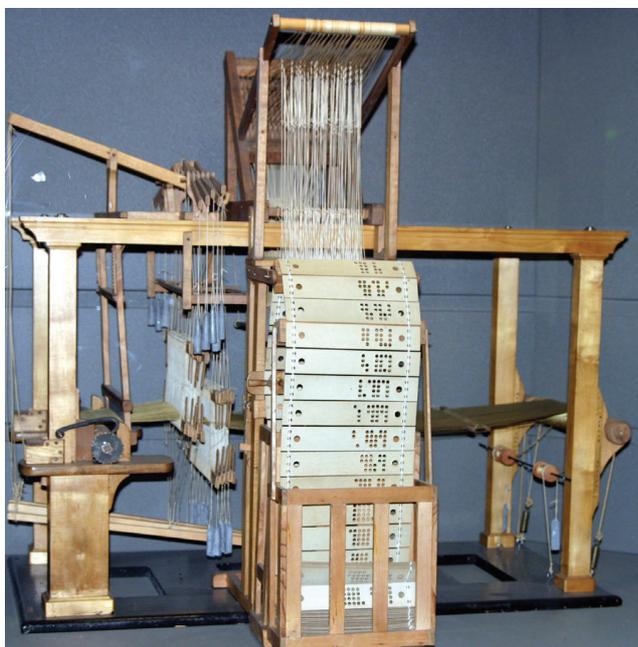


Abbildung 3: Der Jacquard-Webstuhl ist eine der ersten Maschinen die mit einem Programmcode (hier auf Lochkarten) gesteuert werden. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Jacquardwebstuhl#/media/Datei:CNAM-IMG_0527.jpg (Quelle: Wikimedia - Foto aus Musée des Arts et Métiers - Author: Rama - License: This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 France license)

Die Idee der Computersteuerung wurde in den folgenden Jahrhunderten aufgegriffen und weiterentwickelt: Programmcode auf Lochkartenbasis wurde bspw. für Fräsmaschinen genutzt, vor allem aber bei der Entwicklung von Rechenmaschinen. In den 1970er Jahren wurde der Programmcode vermehrt elektronisch gespeichert und die Entwicklung von Computern sowie die Ansteuerung von Maschinen durch Computer ebneten den Weg für die dritte industrielle Revolution.

Auch der 3D-Druck ist Teil der dritten industriellen Revolution, wo nun computergesteuerte, additive Fertigung in drei

Dimensionen realisiert wurde. In den frühen 1980er Jahren wurde die Stereolithographie (SL) durch *Charles Hull* publik. Er gilt weithin als einer der Erfinder des 3D-Druckes und patentierte 1984 das Verfahren [10]. Die Idee der Aushärtung einer photosensitiven Flüssigkeit wurde allerdings bereits in den 1950er Jahren von *Otto Munz* beschreiben, das zugehörige Patent wurde bereits 1951 eingereicht [11]. In den späten 1980ern folgten Publikationen und Patente von *Carl Deckard* und *Joseph Beaman* zum Verfahren des Selektiven Laser Sinterns (LS), bei dem statt einer Flüssigkeit pulverförmige Werkstoffe aufgeschmolzen wurden (Patent 1989; [12]).

Das heutzutage im Privat- und Bildungsbereich populärste und verbreitetste Verfahren, das Aufschmelzen und Extrudieren eines strangförmigen Filaments („Fused Layer Modeling“, FLM) geht auf *Scott* und *Lisa Crump* in den späten 1980ern zurück (Patent 1992; [13]).

4. Anwendungsgebiete des 3D-Drucks in der Industrie

Eine der ersten Anwendungen des 3D-Drucks war die schnelle Herstellung von Design- oder Funktionsprototypen (Rapid Prototyping / Functional Prototyping) wie bspw. Armaturen, Computermäuse oder Handyhüllen. Diese Idee des Rapid Prototyping geht auf den japanischen Wissenschaftler *Hideo Kodama* im Jahr 1980 zurück.

Der nächste Schritt ist die tatsächliche Produktion („Direct Manufacturing“), für den die Erweiterung der druckbaren Werkstoffe nötig war. Seit der Jahrtausendwende werden z. B. Fahrwerkskomponenten oder Scharniere für Flugzeuge aus Metall gedruckt. Durch eine für die Aufnahme von Kräften und Momenten optimierte und dadurch oft „bionische“ Geometrie können gedruckte Objekte im Vergleich zu herkömmlichen Gussteilen oder Frästeilen bei gleicher Festigkeit deutlich geringeres Gewicht aufweisen ([8] S. 13).

Spektakuläre Einsätze von 3D-Druck-Technologie sind zudem vermehrt in den Medien: Die Firma SpaceX stellte die Brennkammern für die Raketentriebwerke der Dragon 2 im 3D-Druck-Verfahren her [14]. Auch Brücken und Gebäude [15] (z. B. als Vorbereitung für Weltraummissionen) oder gar künstliche Nieren oder Herzen können mittlerweile „gedruckt“ werden [16].

5. Boom des 3D-Drucks nach Ablauf des Patentschutzes

Während die Industrie die Technologien bereits seit einigen Jahrzehnten nutzt, startete der wahre Boom des 3D-Druckes erst nach Auslaufen einiger wichtiger Patente in den letzten Dekaden. 2004 gründete *Adrian Bowyer* das RepRap-Projekt (Replicating Rapid-Prototyper) und stellte im Zuge dessen die Pläne eines sich selbst „replizierenden“ 3D-Drucker nach dem FLM-Verfahren (Abb. 4.) unter eine Opensource-Lizenz [17].

Die Materialkosten zur Herstellung eines FLM-3D-Druckers nach diesen Plänen beliefen sich damals auf ca. 500€. Aus diversen Weiterentwicklungen stammt u. a. auch das Konzept des aktuell sehr beliebten und durch viele Nachbauten stark verbreiteten Prusa i3 von *Josef Průša* [18]. Die technischen Weiterentwicklungen (v.a. Robotik und Mikrocontroller) sowie das RepRap-Projekt boten so die Möglichkeit, vergleichsweise günstig selber einen 3D-Drucker zu bauen bzw. zu kaufen. Anleitungen und druckbaren Dateien wurden in verschiedenen Internetportalen zur Verfügung gestellt. Es entstand ein wachsender Markt für z. B. Druckdüsen, Schrittmotoren und das auf Rollen gewickelte Ausgangsmaterial (Filament). Mittlerweile gibt es ein großes Angebot an 3D-Drucker in Online-Versandhäusern, bei Lehrmittelherstellern und sogar Discountern.

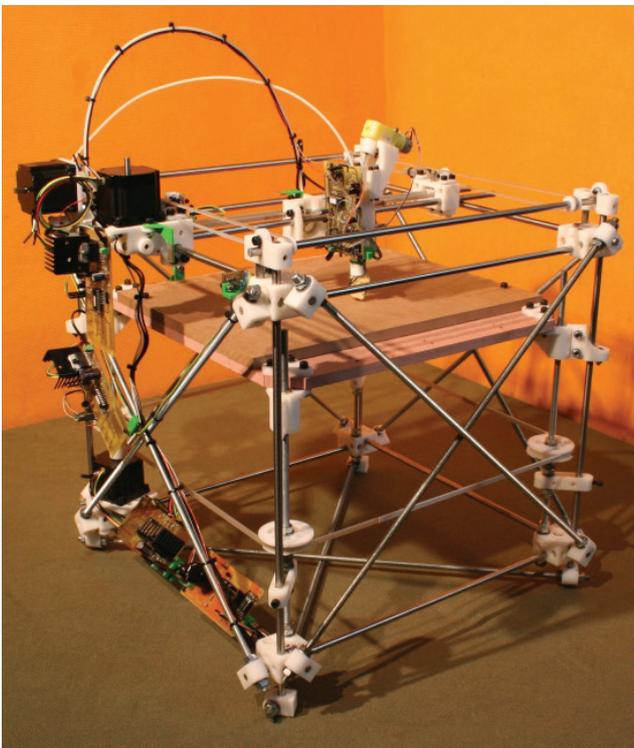


Abbildung 4: Einer der ersten 3D-Drucker unter OpenSource-Lizenz. Der RepRap 1.0. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/RepRap#/media/Datei:Reprap_Darwin.jpg (Charles C auf English Wikipedia wurde auf Wikipedia Commons transferiert - Lizenz: Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported)

6. Was braucht man für den 3D-Druck?

Der Einstieg in den 3D-Druck mittels der populären FLM-Technologie ist vergleichsweise günstig und einfach. Es existieren verschiedene (kommerzielle) Lösungen in unterschiedlichen Preisklassen. Neben dem 3D-Drucker und dem Filament wird noch eine Software zur Vorbereitung der 3D-Dateien für den Drucker benötigt (sogenannte Slicer, siehe Abb. 5). Diese Software wird meist mitgeliefert und es können kostenfreie Varianten verwendet werden. Sie stellen in der Regel keine besonderen Anforderungen an moderne Computer.

Es finden sich in Zeitschriften und im Internet immer wieder Vorschlagslisten zur Auswahl eines passenden 3D-Druckers [z. B. 19 und 20]. Zum jetzigen Stand kann vereinfacht gesagt werden, dass der Gerätepreis in der Regel mit einer besseren Gerätequalität, Druckergebnis und vor allem mehr Bedienkomfort und dadurch Zeitersparnis im Betrieb einhergeht. Verschiedene Beispiele zeigen aber auch, dass oftmals auch mit günstigen Geräten durch z. B. im Internet beschriebene Modifikationen Ergebnisqualitäten teurerer Modelle erreicht werden können [z. B. 21]).

Für den produktiven Praxiseinsatz in Schule und Universität sind aber vor allem Sicherheit, Zuverlässigkeit, geringer Wartungseinsatz und Bedienbarkeit von Bedeutung. Unter diesen Gesichtspunkten sind aus unserer Sicht aktuell zum Beispiel die Modelle der Firma *Ultimaker* zu empfehlen. Diese zeigen sich in unserem Einsatz als robust und können von Schüler*innen sowie Studierenden nach kurzer Einweisung eigenständig bedient werden. Die vorbereitete Datei (s. nächster Abschnitt) wird vom Drucker in der Regel von einem USB-Stick ausgelesen. Das Gelingen eines 3D-Drucks hängt von vielen Faktoren ab. Entscheidend ist vor allem der richtige Abstand der Druckdüse zur Druckplatte. Diese muss bei manchen Druckern jeweils per Hand präzise eingestellt werden, teurere Modelle können dies oft automatisch. Im unteren Preissegment wird häufig der *Creativity Ender 3* empfohlen, wobei hier ohne Modifikationen die o.g. Abstriche eingegangen werden müssen. Ein guter Kompromiss aus Preis und Leistung ist in unseren Augen der originale *Prusa MK3s*, der u. a. eine automatische Kalibrierung sowie einen Filamentsensor bietet [22].

7. Wie kommt man an ein ausgedrucktes Objekt?

Der Prozess des Druckens gliedert sich in drei Abschnitte (Abb. 5, siehe auch [23]). Zunächst wird ein dreidimensionales Modell benötigt. Dieses kann z. B. im Internet von Webseiten wie *thingiverse.com*, *youmagine.com* oder *myminifactory.com* (meist kostenlos) geladen werden. Weitere Möglichkeiten sind das Einscannen oder Konstruieren (s. Tabelle 1 für eine Übersicht über mögliche CAD-Programme). Im Beitrag *3D-Dateien selber konstruieren* [24] in diesem Heft wird exemplarisch das Vorgehen zur Konstruktion eigener 3D-Objekte mit der Software *Autodesk Fusion 360* beschrieben.

Mit der 3D-Datei (Dateiendung meist .stl) kann ein Drucker aber noch nichts anfangen. Es fehlen geräte- und materialspezifische Anweisung zum Ausführen des Druckes. Diese werden im so genannten Slicer (z. B. die kostenfreie Programme *Ultimaker Cura*, *PrusaSlicer* oder *Slic3r*) festgelegt. Wie der englische Name schon sagt, „zerschneidet“ der Slicer die 3D-Datei in Schichten und erstellt daraus eine Befehlsfolge, die der Drucker nacheinander ausführt. Im Slicer werden verschiedene Einstellungen wie Größe des Objekts und Position auf dem Druckbett festgelegt. Weitere Parameter sind die materialspezifische Temperatur an Extruder und Druckbett,

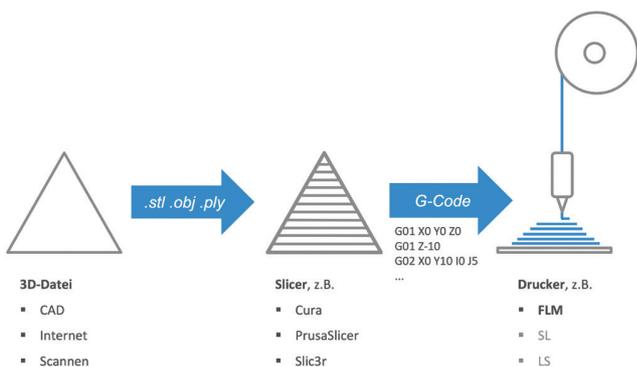


Abbildung 5: Schritte von der 3D-Datei zum Ausdruck. (Bild: Alexander Pusch)

die Anzahl der Wände, Decken- und Bodenschichten oder Art der Füllung (sog. „Infill“; vgl. Abb. 1. und 6). Der dabei entstehende druckerspezifische Maschinencode (G-Code) enthält vor allem einfache Befehle, an welche Raumkoordinate der Druckkopf bewegt wird und wie viel Filament dabei extrudiert wird. Die Datei wird dann in der Regel per USB-Stick auf den Drucker übertragen und dort das festgelegte Programm ausgeführt. Mehr zum Vorgehen, Einstellungen und Betrieb findet sich z. B. in [25] oder [26].

8. Wo sind die Grenzen?

Prinzipiell kann alles, was als 3D-Datei vorliegt, auch ausgedruckt werden. In der Praxis liegen die Grenzen aber in dem Verfahren selber: Beim Verfahren FLM ist die Auswahl an

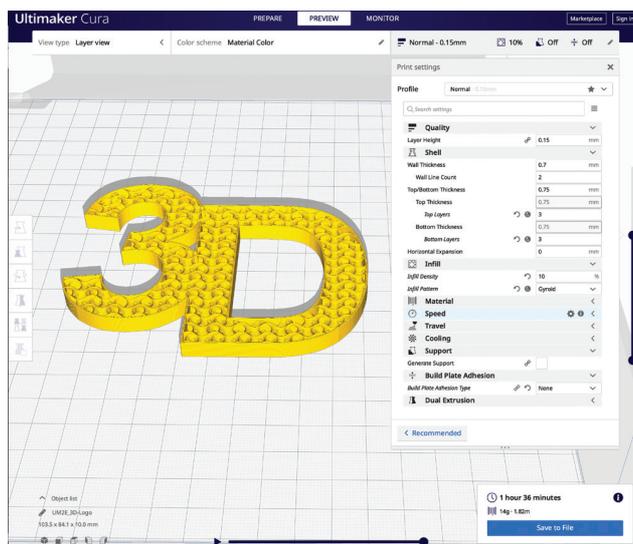


Abbildung 6: Einstellungen in der Slicer-Software Cura. Links wird die Größe und die Position auf dem Druckbett eingestellt. Rechts im Fenster werden Einstellungen wie Anzahl der Wände, Auflösung und Füllung vorgenommen. Zu sehen ist links eine Druckvorschau im Schnitt. (Bild: Alexander Pusch)

verschiedenen thermoplastischen Filamenten groß (Tabelle 2), aber sie müssen alle schichtweise auf die Druckplatte oder auf bereits bestehende Schichten gedruckt werden. Überhänge und „Decken“ sind je nach Drucker und Einstellungen bis zu einem gewissen Maß möglich, bevor Stützstrukturen („Baugerüste“) im Slicer hinzugefügt werden müssen. Die Stützstrukturen müssen aber nach dem Druck aufwendig entfernt und die Stellen ggf. nachbearbeitet werden. FLM-Drucker mit

Tabelle 1: Übersicht über gängige CAD-Programme.

Name	Quelle	Betriebssystem	Besonderheit	Kosten	Bedienung
Autodesk Fusion 360	https://www.autodesk.de/products/fusion-360/students-teachers-educators	Windows, MacOS	Profi-Software aus dem Ingenieur- und Designbereich	kostenlos für Bildungszwecke	Komplexes Programm, aber schnell erlernbar. Konstruktion z. B. mittels technischer Skizzen
Openscad	https://www.openscad.org	Windows, MacOS, Linux	Besonderes für parametrisierte Formen geeignet, aber nicht für alle Projekt empfehlenswert	kostenlos	Schwieriger Einstieg, text- / formelbasierte Konstruktion
Autodesk Tinkercad	https://www.tinkercad.com	Browserbasiert	Besonders für untere Jahrgangsstufen und einfache Projekte geeignet	kostenlos	Sehr einfache Bedienung, Drag & Drop von vorgefertigten Formen
XYZmaker	https://apps.apple.com/us/app/xyzmaker-3dkit-model-design/id1191666002	iOS	Besonders für untere Jahrgangsstufen und einfache Projekte geeignet	kostenlos	Sehr einfache Bedienung, Drag & Drop von vorgefertigten Formen
Blender	https://www.blender.org	Windows, MacOS, Linux	z. B. für Funktionen oder Verteilungen geeignet	kostenlos	Vergleichsweise schwieriger Einstieg und Bedienung, formelbasierte Konstruktion sowie Sculpturing
Wolfram Mathematica	http://www.wolfram.com/products/mathematica	Windows, MacOS, Linux	z. B. für Funktionen oder Verteilungen geeignet	kommerziell	Schwieriger Einstieg, aber mächtiges Werkzeug für formelbasierte Konstruktion

mehreren Düsen oder Materialwechsellmagazin ermöglichen aber auch den Druck von auswaschbarem Filament oder sogar verschiedene Farben in einem Druckobjekt. Die Möglichkeiten des Verfahrens begrenzen außerdem u. a. der Durchmesser der Druckdüse (in der Regel 0,4 mm), die durch Schrittmotoren erreichbare Auflösung sowie die Lüfter zur Kühlung des extrudierten Filaments.

Bei der Anschaffung eines 3D-Druckers ist auch das maximale Bauvolumen relevant. Dieses kann zwar theoretisch vollständig genutzt werden, da mit steigendem Volumen die Druckzeit und der Materialverbrauch stark zunehmen, werden in der Praxis eher kleinere Objekte gedruckt. Bei längeren Druckzeiten und größeren Objekten kommt es zudem vermehrt zu Problemen, wie dem Ablösen von der Druckplatte oder dem „Verziehen“ der Drucke durch ungleichmäßige Temperaturen.

Die gängigen Druckmaterialien wie PLA und PETG bieten in der Regel für die meisten Anwendungen akzeptable Materialeigenschaften und Druckergebnisse. Sie sind als Thermoplaste allerdings nicht sehr temperaturbeständig. Das deutlich härtere und beständigere ABS (aus denen z. B. auch LEGO®-Steine bestehen) ist aber deutlich schwieriger zu drucken und entwickelt beim Drucken gesundheitsschädliche Dämpfe. Flexible Materialien (z. B. TPE) stellen besondere Anforderungen an den Drucker und die Einstellungen im Slicer.

Tabelle 2: Übersicht über für den Privateinsatz gängige FLM-Filamente. Die Durchmesser sind in der Regel 1.75 oder 2.85 mm. Filamente benötigen verschiedene materialspezifische Temperaturen an Extruder sowie Druckbett (meist 200-260°C bzw. 50-110°C).

Abkürzung	Material	Eigenschaften
PLA	Polylactide	gut zu verarbeiten, umweltfreundlich, industriell kompostierbar
PETG	Glycol modifiziertes Polyethylenterephthalat	relativ gut zu verarbeiten, Witterungsbeständig (leicht modifizierte Form von PET, dem Material aus dem bspw. Getränkeflaschen hergestellt werden)
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere	hohe Oberflächenhärte, Zähigkeit und Festigkeit, gesundheitsschädliche Dämpfe beim Drucken, schwierige Verarbeitung (gleiches Material wie LEGO®-Steine)
PA „Nylon“	Polyamid	gute mechanische Beanspruchbarkeit, Flexibilität
PS	Polystyrol	beständig gegen Säuren, Laugen und Mineralöl
PVA	Polyvinylalkohol	wasserlöslich, z. B. für auswaschbare Stützstrukturen

9. Möglichkeiten für den Physikunterricht

3D-Druck bietet verschiedene Anknüpfungsmöglichkeiten in einem modernen (Physik)Unterricht.

- (1) **Haptische Modelle** wie bspw. Atommodelle [27] oder Nuklidkarte [28] können mit 3D-Druckern kostengünstig hergestellt werden und als Lernmaterial verwendet werden.
- (2) Die Herstellung von (Low-Cost) **Experimentiermaterial** ist ebenfalls ein prädestiniertes Einsatzgebiet. Die Smartphonelupe [29] oder aufsteckbare Spulen für die indirekte Messung der Stromstärke fürs Smartphone [30] sind sehr günstige und bereits in Schule und Hochschule erprobte Experimentiermaterialien. Weitere erprobte Best-Practice-Beispiele werden diesem Heft vorgestellt.
- (3) Auch **fachübergreifende Projekte** wie bspw. Robotik [31, 32], künstlerische oder mathematische Anwendungen bieten sich beim Einsatz von 3D-Druck in der Schule an.
- (4) Im Hobby-Bereich sind der Bau von Halterungen oder Ersatzteilen ein beliebtes Einsatzgebiet von 3D-Druckern. Auch in der Schulsammlung können mit 3D-Druckern bspw. **Halterungen** für Spiegel, Polfilter oder für die optische Bank erstellt werden. Die Umsetzung dieser Anknüpfungsmöglichkeiten kann sowohl im Regelunterricht, als AG-Projekt oder gar Schülerfirma [33] erfolgen.
- (5) Die Lehrpläne im Fach Physik sehen 3D-Druck aktuell zwar nicht explizit als Thema vor, dennoch gibt es aber verschiedene Anknüpfungspunkte gerade für den **Kompetenzerwerb** im Bereich Erkenntnisgewinnung und Kommunikation, indem die Lernenden bspw. die oben angesprochenen 3D-Objekte selber entwerfen, ausdrucken und verwenden.
- (6) Die **Drucktechnik** des 3D-Druckes selber bietet verschiedene Aspekte, die im Physikunterricht aufgegriffen werden können: z. B. die Funktionsweise der Schrittmotoren (Elektromagnetismus), Zahnräder und -riemen (Getriebe und Übersetzungsverhältnisse), Sensoren wie z. B. Schalter, Temperatursensoren, (meist) optische Filamentsensoren, induktive Abstandssensoren oder die Aushärtung von flüssigen Resin durch UV-Licht in SL-Druckern. Fächerübergreifend mit Technik, Informatik und Mathematik kann das gesamte Gerät als exemplarischer Lerngegenstand behandelt werden, da es z. B. auch die Themenbereiche Ansteuerung von Maschinen und kartesische Raumkoordinaten beinhaltet.

Dr. Alexander Pusch WWU Münster,

Institut für Didaktik der Physik

Christoph Holz WWU Münster,

Institut für Didaktik der Physik

Prof. Dr. Stefan Heusler WWU Münster,

Institut für Didaktik der Physik

Literatur

- [1] Bauernhansl, T. 2017. Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Hompel, M. ten et al. (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0*. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg. 1-31.
- [2] Roth, A. 2016. Industrie 4.0 – Hype oder Revolution? In: Roth, A. (Hrsg.), *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Berlin: Springer Gabler. 1-15.
- [3] Pilotprojekt UK. 3D printers in schools: uses in the curriculum [online]. Verfügbar unter <https://www.gov.uk/government/publications/3d-printers-in-schools-uses-in-the-curriculum> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [4] Morgan, C. Case Study: 3D Printing in K-12 and Higher Education | MatterHackers [online]. Verfügbar unter <https://www.matterhackers.com/articles/case-study-3d-printing-in-k-12-and-higher-education> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [5] Lernmaterialien. 3d printing curriculum for schools [online]. Verfügbar unter <https://www.learnbylayers.com/> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [6] Künne, B. et al. 2016. Konstruktionen „greifbar“ machen - Einsatz von 3D-Druckern in der Ausbildung von Technischen Produktdesignern/-innen. 68(7/8): 262-265.
- [7] Berger, U. et al. 2017. 3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 2. Auflage. Haan-Grünten: Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.
- [8] Gebhardt, A. 2014. 3D-Drucken. Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). München: Hanser.
- [9] Bohnsack, A. 1993. *Der Jacquard-Webstuhl*. München: Deutsches Museum.
- [10] Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereolithography. Erfinder: C. W. Hull. 4,575,330.
- [11] 1951. Photoglyph Recording. Erfinder: O. J. Munz. 2,775,758.
- [12] Selective Laser Sintering with Assisted Powder Handling. Erfinder: J. J. Beaman und C.R. Deckard. 4,938,816.
- [13] Modeling apparatus for three-dimensional Objects. Erfinder: S. S. Crump. 5,340,433.
- [14] SpaceX Launches 3D-Printed Part to Space, Creates Printed Engine Chamber [online]. Verfügbar unter <https://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [15] 3D Druck Häuser: Die wichtigsten Unternehmen und Hersteller. 2019 [online]. Verfügbar unter <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-haeuser-unternehmen-hersteller-170620191/> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [16] Noor, N. et al. 2019. 3D Printing of Personalized Thick and Perfusable Cardiac Patches and Hearts [online]. *Advanced science*. doi: 10.1002/adv.201900344.
- [17] About - RepRap. 2020 [online]. Verfügbar unter <https://reprap.org/wiki/About> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [18] What's up with Original Prusa i3? - Prusa Printers. 2016 [online]. Verfügbar unter <https://blog.prusaprinters.org/whats-up-with-original-prusa-i3/> [abgerufen am 13. Februar 2020].
- [19] Behling, H. 2019. So finden Sie den richtigen 3D-Drucker. In: *Make*. 2019(5): 8-17.
- [20] König, P. 2019. 3D-Drucker für Maker. In: *Make*. 2019(5).
- [21] Behling, H. 2018. Qualitäts-3D-Drucker unter 250 Euro. In: *Make*. 2018(1): 34-43.
- [22] Besonders bei Druckern im unteren und mittleren Preissegment wie z. B. dem Prusa i3 (original zu beziehen unter shop.prusa3d.com/de), existieren vielerlei günstige Nachbauten, bei denen die Qualität der verbauten Materialien aber nicht immer zufriedenstellend ist.
- [23] Pusch, A. & Bruns, C. 2018. Von der Idee zum Produkt - Experimente aus dem 3D-Drucker. In: *MNUJournal*, 71(1): 14-19.
- [24] Haverkamp, N. & Pusch, A. 2020. 3D-Dateien selber konstruieren. Prinzipien und Vorgehensweise am Beispiel der Magnetfeldsonde. In: *Plus Lucis* 4/2020.
- [25] Prusa Research. 2019. Basics of 3D Printing with Josef Prusa.
- [26] MakerBot Industries. 2018. *Makerbot Educators Guidebook*. Der umfassende Leitfaden für 3D-Druck im Klassenzimmer.
- [27] Ubben, M. & Heusler, S. 2018. A haptic model of vibration modes in spherical geometry and its application in atomic physics, nuclear physics and beyond. In: *European Journal of physics* 39 (4) 2018
- [28] Hein, M, Heusler, S. & Pusch, A. TBP
- [29] Hergemöller, T. & Laumann, D. 2017. Smartphone Magnification Attachment: Microscope of Magnifying Glass? In: *The Physics Teacher*, 55(6), 361-364, DOI: 10.1119/1.4999732
- [30] Holz, C. & Pusch, A. 2019. Stromstärke und Permeabilitätszahl mit dem Smartphone messen. Ein Spulencilp aus dem 3D-Drucker für Phyphox-Experimente. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 169, S. 46-47.
- [31] Bäumer, H. & Pusch, A. 2018. Roboter-Navigation - Arduino findet durch Labyrinth. In: *Make*, 1/18, S. 114-123.
- [32] <https://www.ottodiy.com>
- [33] <https://www.euregio-gymnasium.de/index.php/nachrichten/809-schülerfirma-eugytec>

3D-Dateien selber konstruieren

Prinzipien und Vorgehensweise am Beispiel der Magnetfeldsonde

Nils Haverkamp & Alexander Pusch

1. Einleitung

Das Erstellen von 3D-Dateien erscheint Einsteigenden oft auf den ersten Blick sehr kompliziert, da ein neues Computerprogramm erlernt und eine „neue“ Denk- und Vorgehensweise verwendet werden muss. Beides kann aber erfahrungsgemäß recht schnell zu Beginn z. B. durch Nachkonstruieren verschiedener Objekte anhand von Tutorials entwickelt werden.

Im Überblicksartikel in diesem Heft von Pusch, Holz & Heusler wurden bereits verschiedene Programme zum Erstellen von 3D-Dateien vorgestellt [1]. In diesem Artikel stellen wir die prinzipiellen Schritte bei der Konstruktion eines 3D-Objekts mit der Software Autodesk Fusion 360 vor. Fusion 360 lässt sich vergleichsweise einsteigsfreundlich bedienen, bietet umfangreiche Möglichkeiten sowie viele professionelle Funktionen und ist für den Gebrauch im Bildungskontext kostenlos [2].

Unter [3] ist eine ausführliche Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Nachkonstruktion einer Magnetfeldsonde verfügbar. Aus dem dort beschriebenen Konstruktionsprozess werden in diesem Beitrag einige Schritte herausgegriffen, kommentiert und begründet.

2. Worum geht's bei der Magnetfeldsonde?

Eine Magnetfeldsonde (s. Abb. 1) ist ein einfaches, aber in der Beschaffung vergleichsweise teures Lehrmittel. Es handelt sich dabei um einen kardanisch gelagerten Probemagneten am Stiel, der sich entlang der magnetischen Feldlinien ausrichtet



Abbildung 1: Experiment mit Magnetfeldsonde an einem Modell des Erdmagnetfeldes. Im Inneren der Schaumstoffkugel befindet sich ein langer Neodymmagnet (mehr zum Experiment in [5], Bauanleitung unter [3])

und somit Rückschlüsse auf die Gestalt des magnetischen Feldes zulässt. Die Idee, eine solche Sonde mit einem 3D-Drucker herzustellen stammt aus [4]. Mögliche schulische Einsatzmöglichkeiten sind z. B. die Vermessung der Gestalt eines (unbekannten) Magnetfeldes (s. Abb. 1; s.a. [4] und [5]) oder Experimente zur Abschirmung magnetischer Felder [3]. Durch die Herstellung mit einem 3D-Drucker kann der Materialpreis inkl. Neodymmagnet bei unter 50 Cent liegen, sodass mit geringem Kostenaufwand Experimentiermaterial für Lernendenexperimente in Klassenstärke hergestellt werden kann.

3. Welche Aspekte sind bei der Konstruktion zu berücksichtigen?

Bereits im Vorfeld der Konstruktion sollten einige wichtige Rahmenbedingungen bedacht und Überlegungen berücksichtigt werden:

- Vor der Konstruktion ist es hilfreich, sich eine einfache Handskizze zu erstellen und wichtige Funktionsmaße herauszustellen. Bei einem Smartphoneaufsatz [z. B. 6 oder 7] ist das Ausmessen der Smartphonedicke inkl. Hülle relevant, um den Aufsatz überhaupt aufsetzen zu können. In dem Fall der Magnetfeldsonde sind Funktionsmaße die Aufnahme für den Probemagnet (z. B. 4 x 12,5 mm) sowie das Spiel im Lager der kardanischen Achsen (0,1 mm). Der Radius des Magneten bestimmt auch die Dicke der Sonde, sie ist nach oben und unten je 0,5 mm dicker (insg. also 5 mm). Auch die gewünschten oder maximal druckbaren Abmessungen müssen ermittelt werden.
- Speziell beim FLM-3D-Druck (auf den wir uns bei den Überlegungen in diesem Artikel beziehen) gibt es Einschränkungen, die schon vor oder beim Konstruieren bedacht werden sollten. Der FLM-Drucker kann nicht „in die Luft“ drucken und auch Überhänge (also „Material schräg über Material“) kann er nur in begrenztem Umfang (max. meist ca. 60°) ohne Stützstruktur und Qualitätseinbußen drucken. Werden dennoch Stützstrukturen benötigt, lassen diese sich später im Slicer hinzufügen. Neben einer schlechteren Oberflächenqualität an den Berührungsstellen führt die Verwendung von Stützstruktur zu zusätzlichem Material-, Zeit- und Nachbearbeitungsaufwand. Die elegantere Alternative ist deshalb Modelle so zu konstruieren und im Druckraum zu orientieren, dass man beim Druck mit wenig oder bestenfalls ohne Stützstruktur auskommt (s. Abb. 2). Schon während der Planung und Konstruktion sollte man daher - wenn möglich - eine Seite

festlegen, von der aus später das ganze Modell gedruckt wird und die Elemente entsprechend auslegen, dass sie idealerweise ohne Stützen gedruckt werden können. Im Fall der Magnetfeldsonde bilden Stiel und Lagerringe eine Ebene. Wäre der Stiel z. B. dünner oder die Ringe hochkant, würde es beim Drucken vermeidbare Probleme geben.

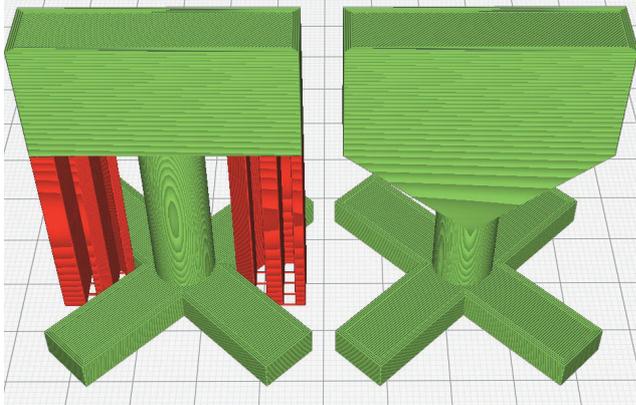


Abbildung 2: Beispiel für notwendige Stützstrukturen an einem fiktiven Bauteil (links). Durch Gestalterische Maßnahmen, in diesem Fall Schrägen, kann auf Stützstrukturen verzichtet werden (rechts).

- Objekte, die zu groß für das zur Verfügung stehende Druckvolumen sind, können z. B. in mehreren Teilen konstruiert, gedruckt und anschließend verschraubt, verklebt oder gesteckt werden. Die Slicer-Programme bieten außerdem die Möglichkeit, Objekte zu teilen und in mehreren Durchgängen zu drucken.
- Ein wichtiger Aspekt ist auch die Belastbarkeit des Objektes. Wird größere Festigkeit benötigt, können z. B. Streben und Knoten, sowie Abrundungen an belasteten Kanten helfen, die Stabilität zu erhöhen (s. Abb. 3). Auch eine im Slicer-Programm eingestellte höhere Wandstärke (Anzahl der Wände) sowie Füllung erhöht die Festigkeit.

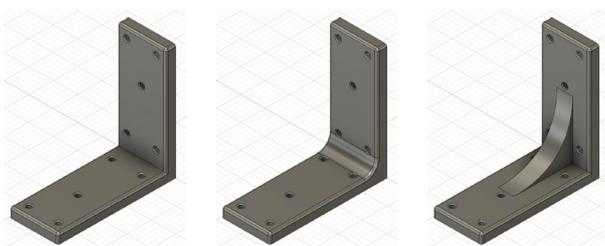


Abbildung 3: Dem Bauteil (links) sollten bei Biegebelastungen zur Verstärkung Abrundungen (Mitte) oder Streben (rechts) hinzugefügt werden.

4. Wie lässt sich ein 3D-Objekt in Fusion 360 konstruieren?

Es gibt viele verschiedene Vorgehensweisen bei der Konstruktion von 3D-Dateien. Diese ergeben sich aus Präferenzen oder Erfahrung der Anwender*innen und durch den Workflow des CAD-Programmes.

Typischerweise wird in Fusion 360 mit einer 2D-Zeichnung angefangen, die im Anschluss ins Dreidimensionale erweitert („extrudiert“) wird. Am nun 3-dimensionalen Objekt sind dann weitere Schritte, wie das Hinzufügen von Bohrungen, Abrundungen oder auch weiteren Skizzen mit darauf folgenden Extrusionsschritten möglich. Man kann sich dieses Vorgehen vorstellen wie ein Stück Holz, auf dem nach jedem Bearbeitungsschritt weitere Markierungen für Sägeschnitte oder Bohrungen gezeichnet werden. Das Vorgehen vom 2-Dimensionalen zum 3-Dimensionalen ist, wie auch der Ursprung von Autodesk Fusion 360, in einer typischen Vorgehensweise im Ingenieurbereich begründet. Dort werden Zeichnungen klassischerweise zunächst im 2-Dimensionalen angelegt und mit den entsprechenden 3D-Informationen ergänzt (bspw. Tiefe oder Rotationssymmetrie). Eine sehr nützliche Funktion von Fusion ist außerdem eine Art „Zeitleiste“ in der für Änderungen zu vorherigen Schritten gesprungen werden kann.

a) Eine 2-dimensionale-Skizze anlegen

Im ersten Schritt wird zunächst eine Skizze angelegt (Abb. 4). Innerhalb einer Skizze gibt es verschiedene Funktionen, wie z. B. Linien, Rechtecke oder Kreise. Eine sehr nützliche Programmfunktion ist dabei die Bemaßungsfunktion. Mit ihr können die gezeichneten Elemente in ihrer Länge oder Abhängigkeit untereinander per Klick (auch nachträglich) festgelegt oder verändert werden.

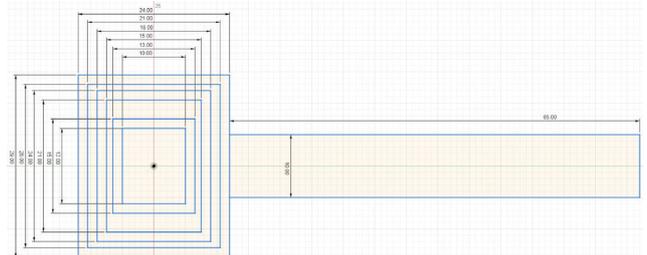


Abbildung 4: Bei der Erstellung der 2D-Skizze ist es hilfreich, die wichtigsten Funktionsmaße bereits zu kennen. Beim Erstellen der Skizze oder auch nachträglich können die Maße festgelegt bzw. geändert werden.

b) Von 2D auf 3D durch Extrusion

Im zweiten Schritt wird die 2D-Skizze in ein 3D-Objekt überführt. Dazu wird die Skizze per Programmbefehl linear Extrudiert (Abb. 5). Alternative Möglichkeiten sind z. B. die Extrusion um eine Achse bei rotationssymmetrischen Körpern, wie z. B. bei einer „Luftkissenscheibe“ [8].

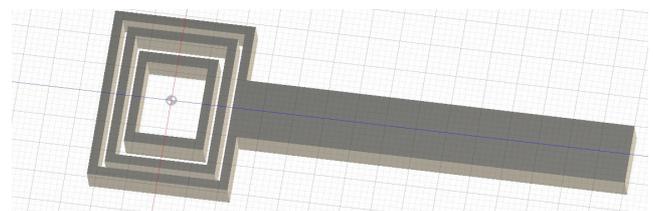


Abbildung 5: Nach der Extrusion der 2-dimensionalen Skizze ist ein 3-dimensionales Objekt entstanden.

c) Hinzufügen der kardanischen Lagerung und Halterung für den Magneten

Im dritten Schritt werden die einzelnen Segmente durch eine kardanische Lagerung verbunden. Die Lager bestehen aus kegelförmigen Erhebungen, die in kegelförmige Vertiefungen greifen (vgl. Abb. 6). Um die Erhebungen zu erstellen, wird auf den vorgesehenen Stellen jeweils eine Skizze mit einem Kreis erstellt. Die Funktion Extrusion lässt daraus eine 3-dimensionale Form, einen Zylinder, entstehen. Die Extrusion lässt sich aber auch um einen Winkel verjüngen und ergibt somit die Form eines Kegels. Die Kegelform hat die Vorteile, dass die Reibungsfläche im Lager möglichst geringgehalten wird und die Form später ohne Stützstrukturen (Support) gedruckt werden kann.

Eine Aufnahme für den Magneten wird in diesem Schritt ebenfalls ergänzt. Dazu werden, ähnlich wie bei den kegelförmigen Vertiefungen, Skizzen von Kreisen erstellt und anschließend negativ extrudiert. Der Abstand zwischen den Vertiefungen sollte etwas geringer als die Länge des Magneten sein („Presspassung“).

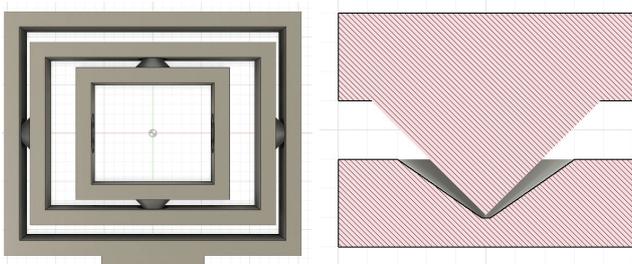


Abbildung 6: Links: Segmente der kardanischen Lagerung. Rechts: Schnitt durch Lagerung.

d) Zuletzt Optik und Benutzbarkeit

Nachdem in der Regel zunächst die Funktion des Objekts umgesetzt wird, widmet man sich im letzten Schritt meist der Optik sowie der Verbesserung der Benutzbarkeit, Gewichtsreduktion und Stabilität. In diesem Fall werden die Kanten der Sonde abgerundet (Abb. 7), um die Optik zu verbessern. Um dem Griff eine bessere Haptik zu verleihen, werden die Kanten mit einer 45° Fase versehen. Die dadurch entstehenden Überhänge lassen sich in der Regel gut drucken.

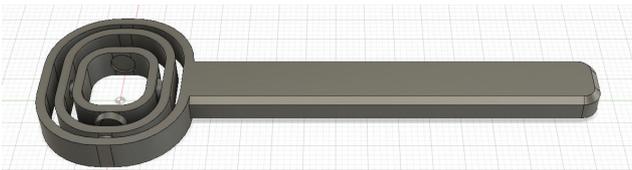


Abbildung 7: Fertige Konstruktion der Magnetfeldsonde.

e) Export und Druckvorbereitung im Slicer-Programm

Aus dem Konstruktionsprogramm muss die Datei in einem geeigneten Format exportiert werden (z. B. meist .stl). Im

Slicer-Programm wird diese Datei dann für den Druck vorbereitet. Neben einigen wichtigen anderen Parametern (z. B. Wanddicke, Anzahl Decken- und Bodenschichten; Abb. 8) kann dort auch die Auflösung in Z-Richtung und die Erstellung von Stützstrukturen gesteuert werden (mehr zur Druckvorbereitung im Slicer-Programm [z. B. 8, 9 oder 10]). Für die Sonde sollte eine hohe Auflösung in Z-Richtung (z. B. 0,1 mm) verwendet werden, auf Stützstruktur kann verzichtet werden.

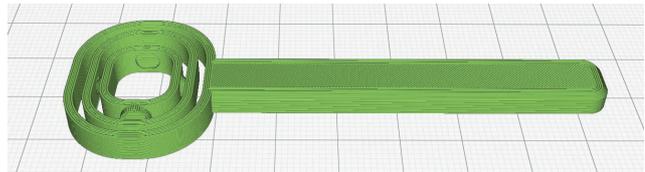


Abbildung 8: Die Magnetfeldsonde im Slicer-Programm. Fahrwege, Wände und Füllung können in der Druckvorschau überprüft werden.

f) Nach dem Ausdruck

Im letzten Schritt wird das gedruckte Objekt vom Druckbett entfernt und ggf. nachbearbeitet. Bei der Sonde werden die einzelnen Segmente einige Male gegeneinander gedreht. Dadurch werden kleine Unebenheiten in den Lagern verringert und die Leichtgängigkeit verbessert. Als Schmiermittel kann Graphitstaub (z. B. Bleistiftabrieb) verwendet werden. Zuletzt wird der Magnet eingesetzt (Abb. 9).



Abbildung 9: Fertige Magnetfeldsonde mit eingesetztem Magneten.

5. Ausblick

Am Beispiel der Magnetfeldsonde wurden Konstruktionsüberlegungen sowie die prinzipiellen Schritte bei der Konstruktion mit Fusion 360 gezeigt und diskutiert. Es gibt in Fusion 360 und anderen Programmen aber nicht nur eine Variante und „Lösung“, sondern verschiedene Vorgehensweisen. Sie werden bei Verwendung der Schritt-für-Schritt-Anleitung [3] sicherlich Ideen für andere Projekte oder Modifikationen (bspw. Hinzufügen von Beschriftungen) bekommen und diese prinzipiellen Schritte dort anwenden können.

Nils Haverkamp *WWU Münster, Institut für Didaktik der Physik*
 Dr. Alexander Pusch *WWU Münster,*
Institut für Didaktik der Physik

Literatur

- [1] Pusch, A., Holz, C. & Heusler, S. (2020). 3D-Druck im Physikunterricht – von den Grundlagen zu vielfältigen Anwendungsfeldern. In: Plus Lucis 4/2020.
- [2] <https://www.autodesk.de/products/fusion-360/students-teachers-educators>
- [3] <http://physikkommunizieren.de/magnetfeldsonde/>
- [4] Feistmantl, A. & Woithe, J. (2017). Elektromagneten der Teilchenphysik hands-on – das ATLAS-Magnetsystem. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 66, 1, 21-28.
- [5] Haverkamp, N. & Pusch, A. (2020). Einmal Erdmagnetfeld zum Mitnehmen. Ein Low-Cost-Schülerexperiment. In: MNUJournal 73, 03, S. 26-30
- [6] Laumann, D. & Hergemöller, T. (2017). Von der Natur lernen Experimente zur Untersuchung bionischer Phänomene mit dem Smartphone. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik. 159/160, S. 49-55
- [7] Holz, C. & Pusch, A. (2019). Stromstärke und Permeabilitätszahl mit dem Smartphone messen. Ein Spulencclip aus dem 3D-Drucker für Phyphox-Experimente. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 169, S. 46-47.
- [8] Pusch, A. & Bruns, C. (2018). Von der Idee zum Produkt - Experimente aus dem 3D-Drucker. In: MNUJournal, 71, 1, S. 14-19.
- [9] Prusa Research. 2019. Basics of 3D Printing with Josef Prusa. <https://www.prusa3d.de/grundlagen-des-3d-drucks-von-josef-prusa/>
- [10] MakerBot Industries. 2018. Makerbot Educators Guidebook. Der umfassende Leitfaden für 3D-Druck im Klassenzimmer <https://www.makerbot.com/de/education/3d-printing-guidebook/>

Was bringt uns Grundlagenforschung?

Leo Ludick

Grundlagenforschung schafft Elementarwissen ohne Anwendungszielsetzung. Gerade diese „Anwendungslosigkeit“ von Grundlagenforschung führt immer wieder dazu, dass sich – vor allem naturwissenschaftliche – Grundlagenforschung rechtfertigen muss. Grundlagenforschung ist jedoch unabdingbar notwendig, weil ohne das Forschen nach den Grundlagen keine Weiterentwicklung möglich ist. Dies soll an einigen Beispielen verdeutlicht werden. Zunächst aber sei darauf hingewiesen, dass der Mensch als denkendes Wesen „alles“ wissen will. Wissbegierde als etwas Urmenschliches wird daher niemals aufhören. Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung hat außerdem viele Anwendungen gebracht, die ohne diese Basisforschung schwer gefunden worden wären. Einige solcher „Abfallprodukte“ seien erwähnt:

Conrad Wilhelm Röntgen experimentierte mit Kathodenstrahlen und stellte fest, dass auch dann, wenn die Kathodenstrahlröhre schwarz ummantelt ist, ein Leuchtschirm zu leuchten beginnt und dass X-Strahlen, wie er sie nannte, einige Materialien durchdringen und andere nicht. Die Röntgenstrahlendiagnostik lieferte der Medizin einen nicht unwesentlichen Impuls der Weiterentwicklung.

Als Max Planck sich 1900 mit dem höchst abstrakten und rein theoretischen Problem der Strahlung eines schwarzen Körpers beschäftigte und damit die Grundlage der Quantenmechanik schuf, hätte sicherlich niemand damit gerechnet, dass sie Jahrzehnte später die Basis für Produkte wie Computer, Digitalkameras oder DVD-Player bilden wird.

Jede angewandte Forschung – zum Beispiel die Entwicklung eines Medikaments – basiert auf Grundlagenwissen. Nur wenn man weiß, wie eine Krankheit entsteht, kann man diese

behandeln. Es ist deshalb die Aufgabe der Grundlagenforschung zugrundeliegende Mechanismen aufzuklären, ohne dabei direkt auf eine Therapieanwendung zu zielen. Nur mit einem grundlegenden Verständnis, was bei einer Erkrankung abläuft, kann man in der angewandten Forschung gezielt nach wirksamen Substanzen suchen. Dementsprechend ist die Grundlagenforschung die Voraussetzung für anwendungsorientierte Entwicklungen und technische Innovationen.

Auch das „World-Wide-Web“ verdankt seine Entstehung der Grundlagenforschung. Am CERN stand man nämlich vor dem Problem, dass Wissenschaftler*innen mit den Daten, die die Beschleunigerexperimente lieferten, weiterarbeiten mussten. Tim Berners-Lee entwickelte den sogenannten Hypertext, ein Format, das es erlaubt, Webseiten vernetzt abzurufen. 1989 stellte er dieses WWW am CERN vor. Ohne diese Menge an Daten, die am CERN anfallen bzw. ohne diese Wissenschaftscommunity, die hier tätig ist, wäre diese Problemstellung, weltweit sich schnell untereinander auszutauschen, gar nicht entstanden. Mit MedAustron steht in Wiener Neustadt das weltweit fünfte Therapiezentrum für spezielle Tumorbehandlung, das auf Protonenbeschleunigerbasis arbeitet. Hier nutzt Österreich die Grundlagenforschung am CERN direkt aus. Noch etwas ist nicht zu unterschätzen: Grundlagenforschung betritt jeweils Neuland. Dazu sind Prototypen an Geräten zu bauen, wodurch Know-how in Firmen kommt, das sich dann in verbesserten oder sogar neuen Produkten wiederfindet.

Mag. Leo Ludick ist pensionierter AHS-Lehrer für Physik und war Fachdidaktiker an der Johannes Kepler Universität, Linz. Er ist derzeit pädagogischer Berater des oö Science Centers Welios.

Luftballongleiter mit seitlicher Düse

David Schaubmair

1. Einleitung

Stoßversuche und die darauffolgenden Bewegungsvorgänge stellen ein bedeutendes Thema im Physikunterricht dar, die Untersuchung dieser erfolgt in der Schule meist eindimensional und mithilfe kleiner Wagen. In Universitäten kann hierbei etwa auf Luftkissentische zurückgegriffen werden, welche einen nahezu reibungsfreien Vorgang gewährleisten und zudem die Untersuchung von zweidimensionalen Bewegungsvorgängen in einer Ebene ermöglichen. Der Einsatz solcher Luftkissentische ist für Schulen aufgrund hoher Anschaffungskosten allerdings kaum realistisch, weswegen im Folgenden eine kostengünstige Alternative mittels 3D-Druck vorgestellt werden soll, welche die oben genannten Vorteile aufweist und mit ein paar Zusatzmaterialien aus dem Alltag einige verschiedene Experimente ermöglicht. Die Anordnung ist eine Weiterentwicklung einer bekannten Anordnung (vgl. z. B. [1]).

2. Realisierung

Der Grundkörper eines solchen Gleiters ist in Abb. 1, links (in blau) zu sehen. Hierbei wird ein Luftballon am oberen Ende übergestülpt, wodurch die Luft durch einen Kanal nach unten entweichen kann, um so ein nahezu reibungsloses Gleiten zu ermöglichen. Außerdem am Bild zu erkennen sind sechs kreisrunde Vertiefungen am Boden, welche eine Möglichkeit bieten sollen, den Gleiter mit zusätzlichen Massestücken belegen zu können, um so bei etwaigen Experimenten auch die Masse variieren zu können. Vorgesehen ist hier der Einsatz von handelsüblichen M12-Gewindemuttern, da durch eine Belegung mit drei bzw. sechs Muttern die Gesamtmasse des Gleiters verdoppelt bzw. verdreifacht werden kann, um möglichst ganzzahlige Verhältnisse zwischen Stoßpartnern zu schaffen.

Außerdem zu sehen ist eine kleine seitliche Düse. Diese kann zum Beispiel zum Untersuchen zweidimensionaler Bewegungen oder als seitlicher Antrieb genutzt werden (s. unten).

Um diesen seitlichen Ausstoß und das Strömen der Luft generell kontrollieren zu können, wurde zudem ein (ebenfalls gedrucktes) Ventil im Gleiter inkludiert (siehe Abb. 1, rot). Zum Einbau dieses Ventilstücks, das selbst aus drei kleinen Teilen besteht und zunächst verklebt werden muss, ist der gesamte Grundkörper zweigeteilt (siehe Abb. 1, rechts). Mithilfe des Ventils kann durch die vorgesehenen Kanäle im Ventilstück dann wahlweise die Art des Betriebs (mit oder ohne seitlichem Ausströmen) festgelegt, oder auch etwa beim Pausieren eines Experiments der Luftstrom abgeregelt werden.

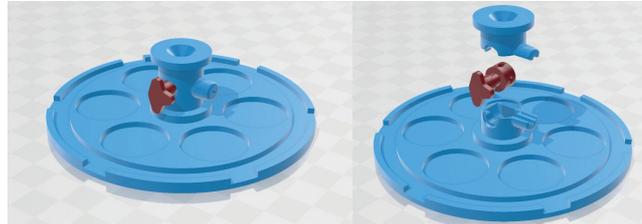


Abbildung 1: Grundkörper mit Ventilstück im Zusammenbau (links) und auseinandergenommen (rechts)

Um bei Stoßversuchen anstatt der Luftballons tatsächlich die Gleiter aneinander stoßen zu lassen, wurde zudem ein Aufsatz entwickelt (siehe Abb. 2, in dunkelblau), welcher den Durchmesser des Gleiters vergrößern soll. Dieser wird vom Gleiter getrennt gedruckt, um bei etwaigen Schäden am Ring nicht den gesamten Gleiter ersetzen zu müssen. Beim Zusammenbau kann dieser einfach auf den Grundkörper gesteckt werden.

Weiters ist eine Hülse am Luftballon (siehe Abb. 2, in grau) zu erkennen, welche diesen umschließt und im Bedarfsfall Stabilität verleihen soll, da das Kippen eines Luftballons Versuchsdurchführungen behindern kann. Durch den seitlichen Schlitz lässt sich der Luftballon darin einfädeln.

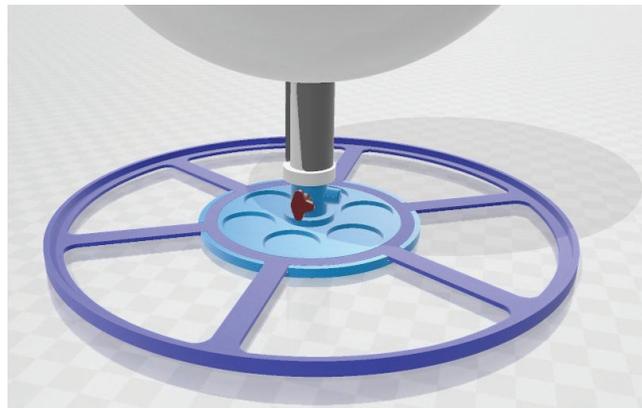


Abbildung 2: Gleiter mit Ring (dunkelblau) und Hülse (grau)

Alle Druckdateien sind online verfügbar [2].

Beim Zusammenbau eines solchen Gleiters ist zunächst darauf achtzugeben, den Grundkörper mit dem eingeschlossenen Ventilstück nicht sofort zu verkleben, sondern zuvor noch auf die Bedienbarkeit des Ventils zu achten. Da ein unkontrolliertes Entweichen der Luft im geschlossenen Zustand nicht erwünscht ist, sind die Bauteile entsprechend knapp dimensioniert, deshalb können hier im Bedarfsfall Nachbearbeitungen oder das Verwenden von etwas Schmiermittel nötig sein.

3. Anwendung

Für eine aussagekräftige Versuchsdurchführung ist natürlich eine möglichst glatte, ebene Oberfläche ideal, um tatsächlich eine nahezu reibungsfreie Bewegung zustande zu bringen.

Im Allgemeinen empfiehlt es sich außerdem, mit den Stellungen des Ventils zu Experimentieren. Die Form des Ventilstücks weist zwar auf die momentane Stellung dessen und den Verlauf der Kanäle hin, allerdings können optimale Ventilstellungen durch das Achten auf Geräusche beim Entweichen der Luft gefunden werden.

Wie eingangs erwähnt, liegt die Hauptmotivation hinter diesen Gleitern darin, Stoßversuche auch im Unterricht interessanter zu gestalten. Durch Adjustierungen am Ring, wie z. B. das Anbringen von federnden Elementen oder Klettverschlussband, können elastische und inelastische Stöße untersucht werden.

Durch das verschiedenartige Beladen mit Zusatzmassen kann so eine Vielzahl an Experimenten realisiert werden, zudem sind durch die mögliche zweidimensionale Bewegung der Gleiter sowohl zentrale als auch schiefe Stöße durchführbar. Hier ist darauf zu achten, dass die gerichtete Bewegung eines Gleiters beim Anstoßen am besten über das Bewegen des Luftballons zu kontrollieren ist. Ein Beispiel für so eine Versuchsdurchführung ist in Abb. 3 zu sehen.



Abbildung 3: Bewegung zweier Gleiter bei Stoßversuchen: vor dem Stoß (links) und nach dem Stoß (rechts), Stroboskopaufnahme wurde mit MotionShot erstellt.

Literatur

[1] Schlummer, P. & Pusch, A. (2019). Low Cost Kinematik-Experimente - Mit Luftkissenscheiben aus dem 3D-Drucker. In: V. Nordmeier & H. Grötzebauch (Hrsg.) PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Aachen 2019. Berlin.

Verwendet man auch den seitlichen Kanal, ergeben sich neue Möglichkeiten zur Versuchsdurchführung. So ist es z. B. möglich, die Bewegung der Gleiter aus dem Stillstand heraus zu beobachten, auch hier kann wieder die unterschiedliche Beladung mit Zusatzmassen und deren Auswirkungen analysiert werden.

Ebenso lässt sich auch hier eine zweidimensionale Bewegung analysieren, indem man dem Gleiter zunächst einen Stoß in eine Richtung derart gibt, dass das seitliche Ausströmen orthogonal zu dieser Richtung stattfindet. Hier ist allerdings anzumerken, dass hierzu einiges an Geschick notwendig ist, da die Gleiter sehr empfindlich reagieren und es oftmals passieren kann, dass der Gleiter zusätzlich zum Impuls auch einen Drehimpuls erhält. Hier empfiehlt es sich, sie am Ring in die gewünschte Richtung zu ziehen und achtsam loszulassen. Auf diese Weise ergeben sich dann parabelförmige Bahnen, wie in Abb. 4 zu erkennen ist, und anhand derer man die vektorielle Geschwindigkeit thematisieren kann oder auch das Münchner Mechanikkonzept [3] mit Zusatzgeschwindigkeit anwenden kann.

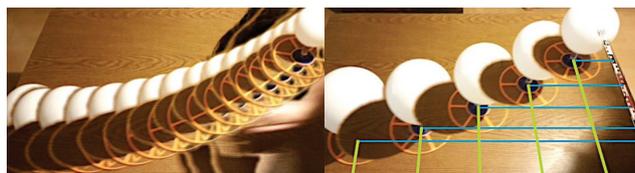


Abbildung 4: zweidimensionale Bewegung durch seitliches Ausströmen; die Aufnahmen wurden mit MotionShot erstellt und mit Linien zur Visualisierung der zurückgelegten Strecken ergänzt.

David Schaubmair studiert Mathematik und Physik für Lehramt an der Universität Wien und befindet sich derzeit im Masterstudium.

[2] Die STL-Dateien zum Gleiter stehen Online zur Verfügung unter <https://www.thingiverse.com/thing:4517773>

[3] <http://www.thomas-wilhelm.net/2dd.htm> (Stand Juni 2020).

Stoßversuche mit 3d-gedruckten Experimentierwägen

Judith Kühleitner & Florian Damböck

1. Einführung

HitCars können als kostengünstige Alternative zu kommerziell verfügbaren Rollenfahrbahnen im Physikunterricht zum Einsatz gebracht werden. Sie dienen der schnellen und einfachen Veranschaulichung von Stoßversuchen. Es hat sich dabei bewährt, Experimentierwägen zu verwenden, deren Massen leicht verändert werden kann.

HitCars wurden nach dem Vorbild kommerzieller Vorbilder folgendermaßen konzipiert (Abb. 1):

- HitCars haben eine Vertiefung auf der Oberseite, in die Zusatzmassen eingebracht werden können.
- An der Seitenfläche wird ein Klettverschluss angebracht, um unelastische Stöße durchzuführen. Ebenfalls befindet sich dort eine Halterung/Öse sowie eine Vertiefung die dazu dient, eine Druckfeder aufzunehmen.

Um möglichst geringe Reibung zu gewährleisten, wurde entschieden, kugelgelagerte Räder aus dem Baumarkt zu verwenden.



Abbildung 1: Hitcar

2. Realisierung

2.1 Was ist notwendig, um ein HitCar fertigzustellen?

Die Druckdateien für die Wägen stehen online zur Verfügung [2]. Der Druck ist allerdings zeitaufwändig (6-7 Tage). Weitere Materialien sind im Baumarkt zu beschaffen:

- 8 Kugellager – ABEC Kugellager – Speed Bearings 8 x 608 ZZ
- 6 Senkschrauben - DIN 963, 3x3 Messing
- 8 Muttern - DIN 934, M8, verzinkt
- 8 Sechskantmuttern – DIN 934; M 3,0
- 2 Gewindestangen M12, 1m
- 1 Gewindestange M8, 1m
- 4 Anti-Rutsch-Gummi, selbstklebend (25x25mm)
- Klettverschluss (ca. 8cm)
- Druckfeder 19,0x75,0x1,25

Die M12-Gewindestangen werden auf eine Länge von je 138 mm zugeschnitten. Je drei davon werden in die vorgefertigten Rillen des HitCars gelegt (Abb. 2a) und mit der Heißklebepistole fixiert. Der Deckel sollte sofort darübergelegt und zentriert werden (Abb. 2b).

Die M8-Gewindestange dient als Achse. Dafür werden pro Achse ein Stück zu je 88 mm zugeschnitten. Diese werden zentriert in die seitlichen, zylinderförmigen Löcher des Autos geschraubt. Anschließend wird ein Kugellager auf jedes Ende gesteckt und mit einer weiteren Mutter fixiert (Abb. 2c). An das Ende des HitCars mit Federhalterung wird ein Klettverschluss-Quadrat angeklebt (Abb. 2d). Auf dem anderen Ende werden zwei Anti-Rutsch-Gummis angebracht (Abb. 2e).

Zusätzlich wird ein Massestück vorbereitet. Dazu werden je drei M12 Gewindestangen (133mm) in Dreiecksanordnung in die vorgefertigten Rillen gelegt und mit Heißkleber befestigt (Abb. 3a). Der Deckel sollte wieder direkt nach Auftragen des Klebers auf die Box gesetzt werden (Abb. 3b). Anschließend wird der Deckel mit zwei Senkkopfschrauben (25mm) und passenden Muttern fixiert (Abb. 3c).

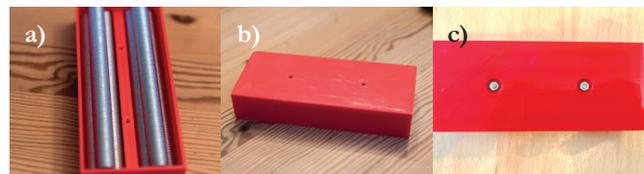


Abbildung 3: Zusammenbau des Massestücks



Abbildung 2: Zusammenbau des Hitcars

Eine Fahrbahn für die Hitcars kann aus Metallprofilen und einem möglichst glatten, ebenen Brett leicht hergestellt werden.

3. Anwendung

Im Allgemeinen werden Stoßversuche im Zuge des Mechanik-Unterrichts durchgeführt. Mit den HitCars kann man verschiedene Versuche durchführen:

Versuch 1: Wechselwirkungsprinzip

Die Hitcars werden so auf die Schiene gestellt, dass die Enden mit der Vertiefung zueinander zeigen und die Mitte zwischen den beiden HitCars genau in der Mitte der Schiene liegt. Dann wird die Druckfeder in die Vertiefungen gelegt und die HitCars zusammengedrückt. Wenn man nun loslässt, so rollen die beiden HitCars an die beiden Schienenenden.

Man kann den Versuch noch optimieren, wenn man den Auslöseprozess nicht von Hand durchführt, sondern die Hitcars mit einem Faden verbindet, der dann durchschnitten oder durchbrannt wird (Abb. 4)



Abbildung 4: Die beiden Hitcars sind mit einem Faden verbunden. Wird der Faden durchgebrannt, so werden die beiden Wägen durch die Feder beschleunigt.

Literatur

- [1] Die STL-Dateien zu den HitCars stehen Online zur Verfügung unter <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/fuer-den-unterricht/>.

Der Versuch wird im Anschluss wiederholt. Dieses Mal wird aber das Massenstück auf einen der beiden HitCars gelegt. So besitzt dann dieses HitCar genau die doppelte Masse des anderen. Man sucht nun die Position, aus der bei diesem Experiment beide HitCars wieder gleichzeitig das Schienenende erreichen. Es zeigt sich, dass dann die Wegstücke (und damit das Tempo) sich genau umgekehrt wie die Massen verhalten.

Versuch 2: Unelastischer Stoß

Die HitCars werden nun so auf der Schiene positioniert, dass die beiden Seiten mit den angebrachten Klettverschluss-Quadraten zueinander zeigen. Im Anschluss können die beiden Autos zusammengestoßen werden, welche daraufhin aneinanderhaften. Auch hier können die Massen variiert und das resultierende Tempo nach dem Stoß beobachtet werden.

Verwendet man die andere Seite der HitCars, so können elastische Stöße demonstriert werden.

Judith Kühleitner, B.Ed. M.Ed. hat Lehramt für Physik und Mathematik an der Universität Wien studiert. Sie arbeitet jetzt als Lehrerin am Mary Ward Privatgymnasium und Oberstufenrealgymnasium St. Pölten

Florian Damböck, B.Ed. M.Ed. hat Lehramt für Physik und Mathematik an der Universität Wien studiert. Er arbeitet jetzt als Lehrer am BG/BRG Lilienfeld.

3d-gedruckter Schussapparat

Michael Lattner & Daniel Weikartschläger

1. Einführung

Schussapparate für den Physikunterricht gibt es im Lehrmittelhandel zuhauf. Die Kosten für ein solches Gerät beginnt bei ca. 300 Euro. Zusatzausstattungen können zusätzlich gekauft werden, die aber den Gesamtpreis auf bis zu 800 Euro steigen lassen. Dass dieses Lehrmittel für den Physikunterricht einen großen Mehrwert darstellt, ist kaum zu bestreiten, denn es können verschiedene physikalische Gesetze adäquat demonstriert bzw. durch Schüler*innen selbst erarbeitet und bestätigt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, den Apparat zur Verdeutlichung der zusammengesetzten Bewegung einzusetzen. Dazu kann bei waagrechttem Abschuss mit Hilfe von Videoanalysesoftware gezeigt werden, dass die Bewegung aus einer (nahezu) gleichförmigen waagerechten und einer beschleunigten senkrechten Bewegung besteht. Alternativ kann gezeigt werden, dass eine waagrecht abgeschossene und eine aus gleicher Höhe gleichzeitig fallen gelassener Kugel zur selben Zeit am Boden aufschlagen. Eine Abwandlung dieses Experiments ist der sogenannte „Affenschuss“. Die zweite Einsatzmöglichkeit bietet sich im Bereich des waagerechten, senkrechten und schiefen Wurfs. Auch hier kann in Kombination mit Videoanalysesoftware die Bewegung genauer analysiert werden. Rein qualitativ lässt sich auch die Winkelabhängigkeit der Schussweite sehr einfach demonstrieren. Die dritte Option ist die Verwendung des Schussapparates für die qualitative, oder wieder in Verbindung mit Videoanalyse, quantitative Auswertung von Stoßprozessen. Hier können sowohl zentrale Stöße wie auch dezentrale Stöße untersucht werden. Eine Umsetzung als 3d-gedruckter Apparat ermöglicht eine einfache und kostengünstige Beschaffung für den Unterricht und für Schülerexperimente.

2. Realisierung

Der Schussapparat wurde mit dem CAD-Programm Solid Edge designt. Das Grundsystem besteht aus 6 Teilen, die mit einem 3D-Drucker gedruckt werden müssen (Abb. 1).

Die STL-Dateien des Apparats stehen online zur Verfügung [1]. Da den Teilen auch eine gewisse Belastung zukommt, ist es wichtig, das Druckprogramm einen „Volldruck“ ausführen zu lassen. Als Druckmaterial haben wir mir PVA gute Erfahrungen machen können, was jedoch nicht bedeutet, dass andere Materialien nicht geeignet sind. Die Schichtdicke wurde minimal eingestellt, da es vor allem beim Kanonenläufer wichtig ist, dass die Abmaße möglichst genau sind. Nach dem Druck müssen von der Kanone, der Magnethalterung und der Stativhalterung noch die Unterstützungsstrukturen entfernt werden. Zusätzlich muss eine Stahlfeder mit gewünschter Federkonstante (die jedoch einen Durchmesser zwischen

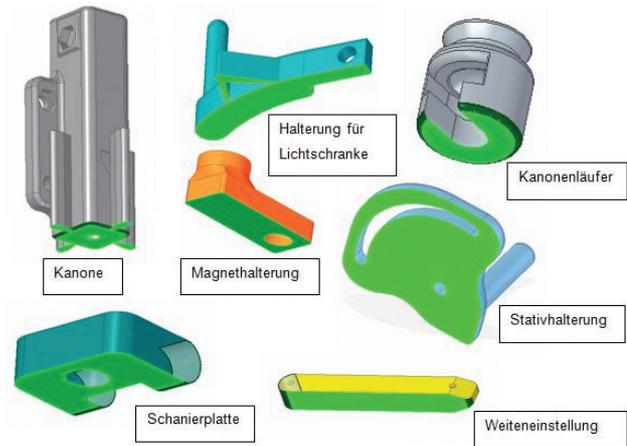


Abbildung 1: Teile des Schussapparats

5,5 und 12 mm und maximal 50 mm Länge haben darf), ein paar M5 Standardmuttern, eine Standardstahlkugel mit 12,7 mm Durchmesser, eine M5 Außensechskantschraube (ca. 80 mm lang) und ein Neodym Flachmagnet angeschafft werden. Außerdem werden noch eine Büroklammer und ein Stück Bindfaden benötigt, um den Apparat auslösen zu können. Zwei M5 Muttern müssen noch an den Außenflächen der Kanone eingeklebt werden. Dazu am besten die Mutter in eine Schraube drehen, so, dass sie bündig abschließt. Kleber in die Aussparung der Kanone geben und die Mutter einsetzen. Nachdem der Kleber getrocknet ist und der Rest wie am Bild zusammengesetzt ist, ist der Schussapparat einsatzbereit (Abb. 2). Eine ausführliche Anleitung zum Druck, Bau und Einsatzgebiet gibt es auf Thingiverse.com. Link ist am Ende des Artikels.



Abbildung 2: Fertig zusammengesetzter Schussapparat auf einem Stativ.

Die Zusatzausstattung, mit der weitere Experimente realisiert werden können, kann gleich mitgedruckt werden, wenn es die Größe der Druckplatte zulässt. Sie können natürlich auch im Nachhinein gedruckt werden. Es wird empfohlen

diese Zusätze unbedingt zu realisieren, da diese Experimente die Impulserhaltung, den dezentralen Stoß, oder auch den „Affenschuss“, der den simultanen Fall zeigt, demonstrieren. Es wird lediglich ein handelsüblicher flacher Knopfmagnet, vorzugsweise aus Neodym benötigt, der in die Magnethalterung eingesetzt wird.

3. Anwendung

Der Schussapparat wird mit einer Muffe an einem Standardstativ befestigt. Es können damit alle Experimente durchgeführt werden. Der waagerechte Wurf eignet sich sehr gut zur Berechnung der Wurfweite bzw. um das Unabhängigkeitsprinzip der Bewegung zu zeigen. Durch Variation der Parameter können die Schüler*innen selbst experimentieren und den Einfluss auf z. B. die erzielte Weite erkennen. Mit der Zusatzausstattung kann, sofern die Schule einen Sensor (Gabellichtschranke) und Aufprallplatte besitzt, sowohl die Geschwindigkeit als auch die Flugzeit ermittelt werden.

Mit dem Magnetaufsatz und einer zweiten Stahlkugel können sowohl Experimente zur Fallzeit und zum zentralen und dezentralen Stoß gemacht werden.

Als dritte Variante der Würfe kann der schiefe Wurf betrachtet werden. Gerade durch die komplexere Berechnung des schiefen Wurfes (unter Umständen noch mit einer Abwurfhöhe größer Null), kann hier eine experimentelle Unterstützung besonders wertvoll sein. Die Schüler*innen können selbstständig die Abhängigkeiten der maximalen Wurfweite messen. Dabei leistet der Schussapparat wieder den Vorteil einer nachvollziehbaren und wiederholbaren Messung (Abschussgeschwindigkeit, Winkel, Abschusshöhe). Auch hier kann wieder eine Kombination mit Sensoren, wie Lichtschranken zur Geschwindigkeitsmessung, genutzt werden.

Die für Schüler*innen wahrscheinlich beste Methode zur Auswertung ist ein Stroboskopbild (Bild 6). Dies kann sehr einfach mit der App „Motion Shot“ realisiert werden [2]. Diese Freeware steht sowohl im Playstore von Android, wie auch

im Appstore von Apple zu Verfügung. Durch aufgenommene Videos im Kameraprogramm, vorzugsweise mit 60 fps, können diese dann in der App zu einem Stroboskopbild verarbeitet werden. Mithilfe eines Lineals oder mit einem durchsichtigen Millimeterpapier können die Abstände pro Zeiteinheit gemessen und danach ausgewertet werden. Ein Paradebeispiel ist der schräge Wurf: Man sieht klar, dass der horizontale Abstand zweier Bilder annähernd gleichbleibt, aber der vertikale Abstand aufgrund der Erdbeschleunigung zunimmt.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist der dezentrale Stoß, wo mithilfe eines Stroboskopbildes von Oben und des Impulsparallelogramms (Abb. 3) die Impulserhaltung gezeigt werden kann.



Abbildung 3: Versuch mit dem Schussapparat. Das Stroboskopbild wurde mit MotionShot aufgenommen.

Dabei sollte die Federkraft eher gering sein, um mehr Kugeln auf dem Stroboskopbild zu erhalten. Es kann auch eine schwere Kugel auf die Magnethalterung platziert werden, um die Impulserhaltung zu zeigen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der Abstand der Magnethalterung so verändert wird, dass die größere Kugel wieder zentral angeschossen wird.

Michael Lattner studierte Lehramt Physik und Sport

im Bachelor an der Universität Wien. Studiert zurzeit

Sportwissenschaften im Bachelor an der Universität Wien.

Florian Weikartschläger studierte Physik

auf Lehramt an der Universität Wien

Literatur

[1] Die STL-Dateien zum Schussapparat stehen Online zur Verfügung unter <https://www.thingiverse.com/thing:4569907>.

[2] Ivanjek, L., Hopf, M. & Wilhelm, T. (2019). Ivanjek, L., Hopf, M. & Wilhelm, T. (2019). Motion Shot friert Bewegungen ein: Smarte Physik. Physik in unserer Zeit 50.1, 44-45.

Ein 3d-gedrucktes Resonanzmodell

Magdalena Wiedemaier

1. Einführung

Im Rahmen eines Bachelorseminars an der Universität wurden von den Teilnehmer*innen unterschiedliche 3D-Druckmodelle entwickelt und erprobt. Ziel hierbei war es, Material für den Physikunterricht zu erstellen. Um allen Physiklehrer*innen, denen an ihrer Schule ein 3D-Drucker zur Verfügung gestellt wird, zu ermöglichen, Material mit wenig Kostenaufwand und fertig perfektionierten Vorlagen herzustellen, ist es besonders wichtig, darauf zu achten, dass die Modelle auch in der Praxis funktionstüchtig sind und dass keine teuren Zusatzmaterialien für das Modell benötigt werden. Ein weiterer Faktor ist, dass dies das Schulbudget auf lange Sicht entlasten würde, da ein einzelner Druck nicht teuer ist im Gegensatz zu vielen Lehrmitteln und die Anschaffungskosten eines 3D-Druckers bei häufiger Verwendung nach kurzer Zeit abgezahlt wären. Außerdem können leichter und kostengünstiger mehrere Exemplare gedruckt werden, was dazu führt, dass mehr Einzel- oder Gruppenarbeiten durchgeführt werden können, was heute noch oftmals einfach nicht möglich ist, da zu wenig Material an den Schulen vorhanden ist. In den nächsten Abschnitten wird ein in diesem Seminar entwickeltes Blattfeder-Resonanzmodell vorgestellt.

2. Realisierung

Nach mehreren Probeversionen hat sich ein Modell mit nur zwei Blattfedern (17cm und 27cm) am besten bewährt. Abb. 1 zeigt den Entwurf.



Abbildung 1: Entwurf Blattfeder-Resonanzmodell

Dieses Modell wird in einem Stück mit dem 3D-Drucker hergestellt [1]. Nach dem Druck muss das zylinderförmige Loch am unteren Teil des Modells mit einem 4mm-Bohrer von den restlichen Füllmaterialresten befreit werden, Anschließend wird in diesem Loch ein handelsüblicher 4mm-Bananenstecker (ohne Plastikhülle) mit Alleskleber befestigt.

Literatur

- [1] Die STL-Datei zum Blattfeder-Resonanzmodell steht Online zur Verfügung unter <https://aecp.univie.ac.at/lehrer-innen/fuer-den-unterricht/>.

In vielen Druckvorgängen wurden verschiedene Versionen dieser Anordnung mit unterschiedlichen Materialien gedruckt. Empfehlenswert ist nach meiner Erfahrung ein Druck mit PET. Das Modell funktioniert auch, wenn mit PLA gedruckt wurde, Nylon war in Tests zu wenig stabil. Es wird zudem empfohlen, ein weißes Material zu verwenden, da sich dann das Modell von einem dunklen Hintergrund sehr gut unterscheiden lässt. Abb. 2 zeigt die beste Version.



Abbildung 2: gedrucktes Modell

3. Anwendung

Mit dem Blattfeder-Resonanzmodell ist es möglich, Eigenschwingungen und Oberschwingungen zu zeigen. Das Modell wird dazu auf einen Schwingungserzeuger aufgesteckt. Mit einem Frequenzgenerator erzeugt man Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen am Schwingungsgenerator. Trifft man beim Einstellen der Frequenz der erzeugten Schwingung genau die Eigenfrequenz der jeweiligen Blattfeder, so fängt diese zu schwingen an. Es war sogar möglich, Oberschwingungen der einzelnen Blattfedern erzeugen (Abb. 3). Zudem sind hierbei die Knotenpunkte, beziehungsweise die Schwingungsmoden sehr deutlich erkennbar.

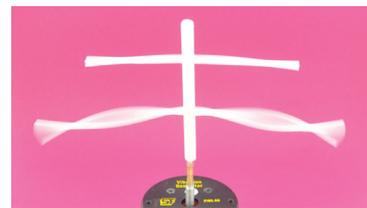


Abbildung 4: Darstellungen von Schwingungen mithilfe des Blattfeder-Resonanzmodells

Magdalena Wiedemaier, B.Ed. studiert Lehramt Physik und Mathematik im Master an der Universität Wien.

Das 3d-gedruckte Kapillarmodell

Kerstin Lindmaier

1. Einführung:

Im Rahmen eines Bachelorseminars mit Schwerpunkt Fachdidaktik wurde ein Modell zur Darstellung des Kapillareffekts entworfen. Dieses ist mittels 3D-Drucker herstellbar und soll es den Lehrer*innen ermöglichen, kostengünstig und dennoch effektiv das Phänomen der Kapillarwirkung sichtbar zu machen.

Herkömmliche Modelle zeigen, dass der Flüssigkeitsstand in verbundenen Röhren mit abnehmendem Durchmesser steigt. Das hier vorgestellte 3D-Modell beweist zusätzlich, dass dies nur bei ausreichend dünnen Röhren der Fall ist und idente Gefäße denselben Wasserpegel aufweisen, sofern sie in Verbindung stehen.

2. Realisierung:

Beim 3D-Druck gilt es zunächst zu beachten, dass keine Hohlräume gedruckt werden können, bzw. nur mit Hilfe einer herauslösbaren Stützstruktur gearbeitet werden kann. Für dieses Modell hat es sich daher als sinnvoll erwiesen es in zwei Teile aufzuspalten. Es wurde eine Schale entworfen, auf die eine Aufsatz mit den Steigzylindern gesetzt wird.

Beim Entwerfen der oberen Hälfte wurde zunächst eine Platte mit sieben linear angeordneten Zylindern darauf gezeichnet. Anschließend wurde diese Konstruktion mittels einer Funktion des Zeichenprogramms sieben Mal durchstanzt, so dass Löcher mit nahtlosen Übergängen entstanden, die beim späteren Gebrauch des Modells gewährleisten sollten, dass kein Wasser ausrinnt. Für das Unterteil wurde ebenfalls eine Grundplatte gezeichnet. Auf diese wurde im Anschluss ein Rahmen, sowie Auflageflächen für das Oberteil gesetzt. Erste Tests haben gezeigt, dass die dünnen Röhren beim Druck zu instabil waren und sehr leicht abbrechen, daher wurden Zwischenwände eingefügt, die eine rein stützende Funktion haben sollten (Abb.1). Zur Stabilisierung des Unterteils wurden



Abbildung 1: Oberteil des Apparats. Zwischen die Steigrohre wurden stabilisierende Zwischenwände eingefügt.

Literatur

- [1] Die STL-Datei zum Kapillarmodell steht Online zur Verfügung unter <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/fuer-den-unterricht/>.



Abbildung 2: Unterteil des Apparats

noch zwei weitere Auflageflächen eingesetzt (Abb. 2). Alle Druckdateien sind online verfügbar [1].

Der Apparat wurde mit farblosem, durchsichtigem PET-Filament gedruckt. Es wurde mit einem Material Flow von 107%, der maximal zulässigen Materialtemperatur, einer 100% Füllung und einer Druckgeschwindigkeit von 70% gearbeitet. Nach dem Druck empfiehlt es sich die Röhren auf Durchfluss zu überprüfen und gegebenenfalls mit einem Draht oder Ähnlichem nachzuhelfen, um evtl. vorhandene Druckreste oder Stützstrukturen zu entfernen. Anschließend können Ober- und Unterteil mit einem wasserfesten Klebstoff verbunden werden. Ab dann ist das Modell einsatzbereit.

3. Anwendung:

Um Überschwemmungen auf Tischen zu vermeiden, ist es hilfreich, sich einen wasserfesten Untergrund zu wählen, da es beim Einfüllen der Flüssigkeit durchaus dazu kommen kann, dass etwas verschüttet wird. Für bestmögliche Sichtbarkeit des Kapillareffekts empfiehlt sich eine starke Einfärbung des Wassers. Das war auch das Ergebnis einer Evaluation unter Lehrkräften. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse: In den ersten Rohren steht das Wasser praktisch gleich hoch, erst bei zunehmende dünneren Rohren ist der Kapillareffekt sichtbar.



Abbildung 3: Das Versuchsmodell in Verwendung

Kerstin Lindmaier, B.Ed. studiert Lehramt Physik, Deutsch und Inklusive Pädagogik. Sie wusste schon in frühester Kindheit, dass sie Lehrerin werden wollte und hat großen Spaß daran, neue Unterrichtsmaterialien zu entwickeln.

Das hydrostatische Paradoxon – ein 3d-gedrucktes Demonstrationsmodell

Irene Baldauf & Maximilian Suppan

1. Motivation

Wasser begleitet uns täglich auf unserem Weg. In den unterschiedlichsten Formen profitieren wir von den Eigenschaften des Wassers. So vertraut es uns auch scheint, hat diese Substanz doch viele Eigenheiten, die verblüffen können. Die überaus starke Kohäsionskraft der Wassermoleküle resultiert in den verschiedensten Phänomenen: Tiere, die in Regentropfen gefangen sind, Tiere, die über das Wasser laufen können oder natürlich der Lotoseffekt. Auch lässt sich Wasser nicht höher als 10,33 Meter saugen. Man spricht von der *Geodätischen Saughöhe*. Dabei spielt es keine Rolle, welchen Durchmesser das Saugrohr hat. Wird der Druck betrachtet, der sich am Boden einer Wassersäule aufbaut, stößt man erneut auf eine Tatsache, die der ersten Intuition widersprechen würde. Entgegen häufig auftretender Vorstellungen von Schüler*innen ist der hydrostatische Höhendruck nicht vom Volumen oder dem damit verknüpften Gewicht abhängig, sondern tatsächlich nur von der Höhe. Verbreitet ist auch die Vorstellung, dass der Druck nur von der direkt über dem Angriffspunkt liegenden Wassersäule stammt [1]. Um diese Vorstellungen zu konfrontieren und experimentell aufzuklären, entwickelten wir eine Version des Bodendruckapparates, die mit dem 3D-Drucker ausgedruckt werden kann.

2. Aufbau

Die Basis des Bodendruckapparates bildet ein Gestell, in das unterschiedliche Rohre eingesetzt werden können. Dies ermöglicht Wassersäulen unterschiedlicher Formen zu produzieren, die aber die gleiche Grundfläche haben. Wie in Abb. 1 ersichtlich ist, wird das Gestell durch einen als Membran verwendeten Luftballon abgedichtet. Der Luftballon wurde mit einem Gummiring möglichst gleichmäßig fixiert (siehe Abb. 2).

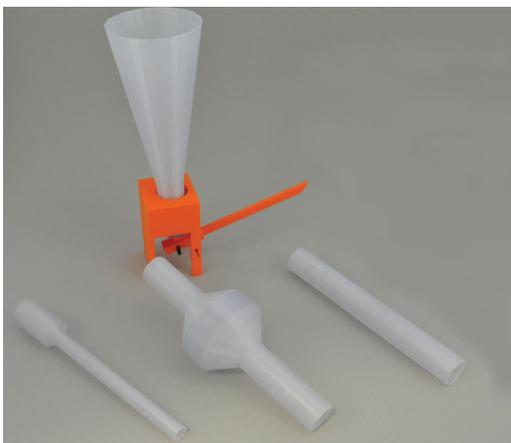


Abbildung 1: Bodendruckapparat aus dem 3D-Drucker



Abbildung 2: Unterseite des Gestells von unten

3. Funktionsweise

Die Membran an der Unterseite des Gestells wird je nach Wasserstand im Rohr stärker oder schwächer gewölbt. Um diese kleinen Unterschiede sichtbar zu machen, wird das Hebelgesetz verwendet. Der Zeiger ist (bei leerem Rohr) so austariert, dass er gerade horizontal liegt. Sobald Wasser in das Rohr gefüllt wird, bildet sich eine kleine Wölbung an der Membran, die das an der Membran aufliegende Plättchen nach unten drückt. Dieses Plättchen ist durch einen Nagel mit der kürzeren Seite des Hebels verbunden. Der Nagel erlaubt dem Plättchen eine horizontale Ausrichtung beizubehalten. Durch das Hinunterdrücken des Plättchens, wird der gegenüberliegende Arm des Hebels hinaufgedrückt. Hier dient ein weiterer Nagel als Drehpunkt. Eine schematische Darstellung wird in Abb. 3 gezeigt.

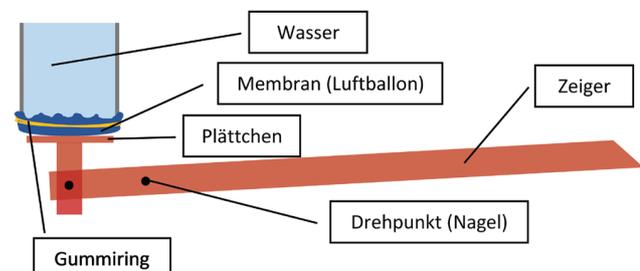


Abbildung 3: Funktionsweise

Das Anheben des Zeigers wird mithilfe einer Skala quantifiziert. Diese kann beliebig gestaltet werden. Wir haben für unser Modell einfach einen Fehldruck eines Gestells verwendet und eine Skala aufgeklebt.

4. Herausforderungen

Bei der Herstellung des Geräts wurde auf Unkompliziertheit geachtet. Was nicht gedruckt werden konnte, wurde mit alltäglichen Materialien ergänzt. So nahmen wir für die Membran beispielsweise einen haushaltsüblichen Luftballon. Wir achteten lediglich darauf das benötigte Stück aus der Seite herauszuschneiden, um eine möglichst homogene Membran zu erhalten. Die meisten Luftballons haben an der Spitze eine produktionsbedingte Wölbung, die ein flaches Spannen über das Gestell verhindern oder die Ergebnisse verfälschen würde. Um die Luftballonmembran zu befestigen, wurde ein gewöhnlicher Gummiring verwendet. Das Gestell hat eine leichte, gewindeähnliche Erhebung, die ein Verrutschen verhindert. Die Drehachsen hätten rein theoretisch gedruckt werden können. Hier wollten wir aber einem unnötig hohen Materialverschleiß aus dem Weg gehen und verwendeten deshalb Nägel.

Wir hatten zwei größere Herausforderungen zu lösen. Die erste Schwierigkeit bestand darin, eine möglichst dichte Verbindung zwischen dem Gestell und den Rohren herzustellen, sodass das Wasser nicht seitlich an den Rohren entweicht und sich auf der Oberseite des Gestells verteilt. Wir mussten einige Probedrucke durchführen, um schließlich zu unserem endgültigen, und sehr gut dichten Modell zu gelangen. Diese Konstruktion ermöglichte das Einsetzen eines Dichtungsringes mit einem Durchmesser von 3,55mm und einem Innendurchmesser von 25mm. Die STL-Dateien unseres Modells stehen online zur Verfügung und enthalten alle Maße [2]. Bei der Konstruktion der Rohre wurde bei der Planung ebenfalls darauf geachtet, dass die Steigung der Rohrwände maximal 45° beträgt, um die Notwendigkeit von Stützstrukturen zu umgehen. Dies sollte bei der Konstruktion eigener Rohre beachtet werden.

Die zweite Schwierigkeit war die Transparenz der Wasserrohre. Für die Durchführung des Experiments ist die Sichtbar-

keit der Höhe der Wassersäule wichtig. Dies wollten wir mit transparentem Filament erreichen. Bei den ersten Druckversuchen der Rohre waren die Ergebnisse jedoch eher weniger zufriedenstellend und die Wassersäule durch das Druckmaterial nur schwer ersichtlich. Wir variierten die Parameter der Temperatur, Druckgeschwindigkeit und Wanddicke. Das beste Ergebnis erzielten wir mit relativ geringer Druckgeschwindigkeit und hoher Temperatur. Zusätzlich wurde die Wanddicke der Rohre auf 1,2 mm festgesetzt und eine Einspritzdüse mit einem Durchmesser von 0,6 mm verwendet, damit keine Zwischenräume entstehen. Zur Erhöhung der Sichtbarkeit kann das Wasser natürlich mit Tinte eingefärbt werden.

5. Anwendung

Das Gerät wird als Bodendruckapparat verwendet. Es kann keine quantitativen Messergebnisse liefern, aber es vergleicht den Bodendruck der verschiedenen Gefäße. Das Ziel der Anwendung ist, dass die Durchführenden während des Vergleichs des Bodendrucks zu der Erkenntnis gelangen, dass der Bodendruck nur von der Höhe abhängig ist. Hier können natürlich auch mehrere Apparate gedruckt werden und so ein Parallel-Experiment vorgeführt werden. Ebenso können leicht andere Rohrformen (unter Beachtung der Rahmenbedingungen des Drucks) auch nach Vorschlägen von Schülerinnen und Schülern gedruckt werden.

Irene Baldauf MEd *studierte Lehramt Mathematik und Physik an der Universität Wien. Seit September 2020 unterrichtet sie im BG/BRG Perchtoldsdorf.*

Maximilian Suppan BEd *studiert Lehramt Mathematik und Physik auf Master an der Universität Wien. Er unterrichtet im BG/BRG Lilienfeld.*

Literatur

[1] Ugo Besson (2004) Students' conceptions of fluids, International Journal of Science Education, 26:14, 1683-1714, DOI: 10.1080/0950069042000243745

[2] <https://www.thingiverse.com/thing:4492464>

Multifunktionelle Lochkamera selbst gedruckt

Matthias Fasching

1. Einführung

Die Herstellung von 3D-gedruckten Experimentiermaterialien eignet sich besonders für den Optikunterricht, da sie in diesem Themenbereich keiner hohen mechanischen Beanspruchung oder Hitze ausgesetzt sind und durch die geringe Größe der Experimentiermaterialien kein großer Materialaufwand notwendig ist. Häufig wird zum Experimentieren im Optikunterricht die Lochkamera eingesetzt, z. B. im „Münchner Konzept der geometrischen Optik“ [1, 2]. Dabei halten die aus Karton hergestellten Lochkameras den Beanspruchungen des Schulalltags oft zu wenig stand, die gebastelten Geräte verschleifen und werden dadurch schwieriger zu handhaben, was sich wiederum negativ auf die gewünschten Unterrichtserfolge auswirkt. Ziel der Entwicklung einer 3D-gedruckten Lochkamera war es, ein für herkömmliche Chipsdosen kompatibles Experimentiermaterial herzustellen, mit dem Versuche zur Variation der Lochgröße und Lochform, sowie zum Einsatz einer optischen Linse im Unterricht leichter durchführbar werden. Die 3D-gedruckte Lochkamera wurde dabei besonders hinsichtlich der folgenden Anforderungen entwickelt:

- **Passgenauigkeit:** Das System sollte leicht an der Chipsdose anzubringen, die unterschiedlichen Moden leicht einstellbar sein. Dennoch sollte die Vorrichtung an den Schnittstellen für ausreichende optische Abdichtung sorgen.
- **Einfachheit:** Das System sollte möglichst selbsterklärend sein. Der Herstellungsaufwand sollte möglichst gering sein.
- **Robustheit:** Das System sollte den Beanspruchungen des Schulalltags standhalten.
- **Geringer Materialaufwand:** Das System sollte mit möglichst wenig Materialaufwand herstellbar sein, um Ressourcen und Produktionszeit zu sparen.

2. Realisierung

Die Entwicklung der Experimentiermaterialien erfolgte mit der Software „Autodesk Fusion 360“ [3]. Mit dem Druckertreiber „Ultimaker Cura“ und dem 3D-Drucker „Ultimaker 2+“ wurden die Materialien ausgedruckt. Die entwickelten Experimentiermaterialien setzen sich aus zwei Komponenten zusammen: Aufsatz und Schiebepatte. Der Aufsatz besteht aus einem dicken Ring, vier Füßen und zwei Führungen. Der Ring passt exakt in die Einsenkung der Bodenplatte einer handelsüblichen Chipsdose (Durchmesser: ca. 75 mm; Bodenplatte möglichst stabil, z. B. Aluminium) (Abb. 1).

Die Füße liegen an der zylindrischen Außenwand der Chipsdose an und sorgen für zusätzliche Stabilität. Die Führung dient dazu, dass Schiebepatten am Aufsatz angebracht werden

können. Bei den Schiebepatten handelt es sich um simple Platten, in die entweder Löcher unterschiedlicher Durchmesser (1.5, 4.0 und 10.0 mm) und Formen (Kreis, Dreieck und Quadrat), oder eine Vorrichtung zum Einsetzen einer optischen Linse (Durchmesser: 34.5 mm, Dicke: 5 mm, Brennweite: +106 mm) eingebaut sind (Abb. 1).

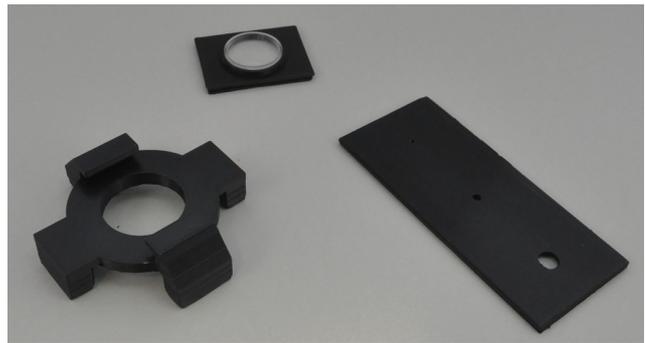


Abbildung 1: Aufsatz für die Chipsdose sowie zwei verschiedene Einsätze

Um den Innenraum der Chipsdose möglichst von Restlicht abzuschirmen, wurde bei der Herstellung schwarzes Druckfilament verwendet, welches gegenüber farbigem (z. B. blau oder grün) deutlich schönere Beobachtungsergebnisse zeigt. Wir haben mit Filament aus PLA gute Erfahrungen gemacht. Die Passgenauigkeit und eine zusätzliche optische Abdichtung werden durch Bekleben des Chipsdosenzylinders (im Bereich der Füße) und der einzelnen Schiebepatten mit schwarzem Moosgummi (Dicke: 2 mm) gewährleistet. Die Chipsdose wird zur Vorbereitung mit einem großen Loch (Durchmesser: ca. 40 mm) in der Bodenplatte versehen. Möglich ist dies, indem kreisförmig in kleinen Abständen ein



Abbildung 2: Gesamte Lochkamera

Nagel in die Platte gehämmert und wieder herausgezogen wird, sodass sich die Platte anschließend leicht herauslösen lässt. Der Schirm wird gemäß [2] aus Karton und Transparentpapier hergestellt (Abb. 2).

Alle Druckdaten stehen online zur Verfügung [4]

3. Anwendung

Die 3D-gedruckte Lochkamera kann auf unterschiedlichste Weisen im Physikunterricht eingesetzt werden. In allen Formen der Anwendungsmöglichkeiten bleibt die prinzipielle Handhabung der Lochkamera gleich: Der Aufsatz wird an der präparierten Chipsdose montiert, ein Schirm wird in die Chipsdose eingesetzt und Schiebepplatten werden am Aufsatz befestigt. Im Versuchsverlauf bleibt der Aufsatz fest auf der Chipsdose, verändert werden können jedoch die (Positionen der) Schiebepplatten. Folgend sind für die bestehenden Schiebepplatten Anwendungsmöglichkeiten skizziert, welche auf dem „Münchner Konzept der geometrischen Optik“ [1] basieren. Die Variation der Lochgrößen bezieht sich auf das Problem der Optimierung der Lochkamera [1, S. 30]: Ein kleines Loch führt zu einem scharfen, aber dunklen Bild am Schirm. Zur Verbesserung des Lochkamera-Bildes wird der Versuch gestartet, das Loch zu vergrößern. Dabei ist jedoch feststellbar, dass mit größerem Loch das Bild zwar heller, aber unschärfer wird. Das Erforschen der Zusammenhänge zwischen Lochgröße und Eigenschaften des Bildes der Lochkamera eignet sich dafür forschend zu experimentieren. Die Schüler*innen kennen bereits das Konzept der Fleck-zu-Fleck-Abbildung, können darauf aufbauend am Beginn der Phase Vermutungen über die Veränderung des Bildes aufstellen und diese experimentell überprüfen.

Es ist leicht, diese Lochkamera mit einer Sammellinse zu verbessern. Dazu wird in die entsprechende Platte eine optische Linse (Acrylglas, Brennweite: + 106 mm, Durchmesser: 34,5

mm, Dicke: 5 mm [5]) eingesetzt. Der Einsatz der optischen Linse schließt direkt an die Variation der Lochgrößen an [1, S. 30ff.]. Nachdem bei größeren Löchern das Bild zwar heller, aber unschärfer ist, sollte thematisiert werden, dass nun ein Gerät für die Bündelung des auseinanderlaufenden Lichtkegels notwendig wäre. Darauf wird die Sammellinse „ad hoc als optisches Gerät eingeführt, das genau dies leistet“ [1, S. 31]. Tatsächlich ließe sich in dieser Form das erstmalige Aufgreifen einer optischen (Sammel-)Linse umsetzen. Dabei kann durch die Bildoptimierung bei der Lochkamera einerseits an den vorherigen Unterricht angeknüpft werden, andererseits wirft das Einsetzen der Sammellinse in die Schiebepplatte mehrere Fragen auf (z. B. Was ist das für ein Gerät? Wie funktioniert es? Warum wird das Bild dadurch scharf? etc.).

Die Schiebepplatte mit drei verschiedenen Lochformen findet in dieser Form keine Verankerung im „Münchner Konzept zur geometrischen Optik“. Die Variation der Lochformen kann jedoch an die Erarbeitung der „Leuchtfleck-zu-Bildfleck-Abbildung“ [1, S. 28] angegliedert werden. Durch die verschiedenen Formen des Lochs könnte sich nach Ansicht der Schüler*innen das Bild am Schirm der Lochkamera merklich ändern. Die Konstruktion der Fleck-zu-Fleck-Abbildung würde dieser These weitestgehend widersprechen (solange die Größe des Loches etwa gleichbleibt). Bei der Überprüfung mit dem Lochkamera-Modell wird bestätigt, dass sich die Abbildung nicht merklich verändert und die Tragfähigkeit des Konzeptes der Fleck-zu-Fleck-Abbildung wird bestätigt.

Matthias Fasching studiert das Lehramt für die Unterrichtsfächer Physik und Geographie & Wirtschaftskunde im Master an der Universität Wien. Er ist zudem Studienassistent in der Arbeitsgruppe Fachdidaktik für Geographie und wirtschaftliche Bildung.

Literatur

- [1] Wiesner, H., Engelhardt, P., Herdt, D., Born, G. & Harreis, H. (Hrsg.) (1995). Lichtquellen, Reflexion, Köln: Aulis-Verlag Deubner.
- [2] Hopf, M.; Haagen-Schützenhöfer, C. & Heran-Dörr, E. (2011). Low-Cost im Optikunterricht. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, 6, 24-29.
- [3] Für Akteur*innen im Bildungsbereich (Schüler*innen, Student*innen) ist es möglich, eine kostenfreie 3-Jahres-Lizenz zu erhalten (vgl. Autodesk Inc., 2019 <https://www.autodesk.de/products/fusion-360/> (16.2.2019)).
- [4] Die STL-Dateien zu Aufsatz und Schiebepplatte stehen Online zur Verfügung unter <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/fuer-den-unterricht/>.
- [5] Astromedia Kunststofflinse Nr. 7, erhältlich über Opitec, <https://www.opitec.at/Kunststofflinse-Nr-7-34-5-Brennweite-106-mm.html>

3d-gedrucktes Augenmodell mit akkommodationsfähiger Linse

Anna Kaiser

1. Einführung

Im Rahmen eines Bachelorseminars wurde das bekannte Augenmodell mit akkommodationsfähiger Linse [1] in eine Version entwickelt, die selbst mit dem 3D-Drucker gedruckt werden kann. Das gedruckte Augenmodell ist einem realen Auge aufgrund seiner Form und Gestaltung sehr ähnlich. Die Bestandteile des Auges können durch entsprechende Färbung und Beschriftung verständlich gestaltet werden (Abb. 1). Ebenso hilft die wassergefüllte Linse des Modells dabei, die Funktion der akkommodationsfähigen Linse zu veranschaulichen und ebenso auf Sehfehler näher einzugehen.

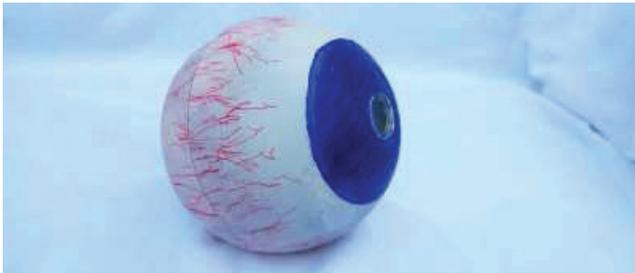


Abbildung 1: bemaltes Augenmodell

2. Bauanleitung

Der Zusammenbau des 3D gedruckten Augenmodells ist aus Abb. 2 ersichtlich. Außer den gedruckten Teilen [2] wurde Transparentpapier, eine Acrylglas-Linse [3], eine Gummimembran (Kondom) sowie eine 20ml-Spritze, ein Schlauch und ein Stopfen mit Luer-Lock-Verbindungen verwendet.

Das Augenmodell besteht aus einer Korpus-Rückseite (1) und -Vorderseite (2). Diese Bestandteile haben Durchmesser von ca. 110 mm, wodurch das Modell besser in der Hand liegt. Diese werden zusammengesteckt und bilden dadurch eine stabile Hülle. Um die Außenhülle zu vervollständigen, wird mithilfe einer Halterung (4) und deren kleinen Noppen ein transparentes Papier angeheftet (siehe Abbildung 3: Fixierung für den transparenten Schirm). Auf der Vorderseite der Hülle wird die Acrylglas-Linse eingesetzt und bei Bedarf mit einem Kleber fixiert. Hier ist jedoch zu beachten, dass die glatte Seite der Linse nach außen gerichtet werden muss.

Die variable Linse (3) ist eine eigene Baugruppe und besteht aus dem Grundring und jeweils auf einer Seite einem Halterungsring mit welchem die Silikonmembran gespannt bzw. fixiert werden. Die variable Linse ist so konzipiert, dass ein einfacher Anschluss durch das Gewinde an beiden Öffnungen

mit dem Luer-Lock-System erfolgen kann. An einer Öffnung wird der Schlauch mit der Spritze montiert und die andere Öffnung kann mit einem Verschlussstopfen dicht verschlossen werden. Die variable Linse kann nach dem Zusammenbau mit Wasser gefüllt werden. Um eine optimale Funktion zu erreichen, sollte so wenig Luftpneinschluss wie möglich in der Linse entstehen.

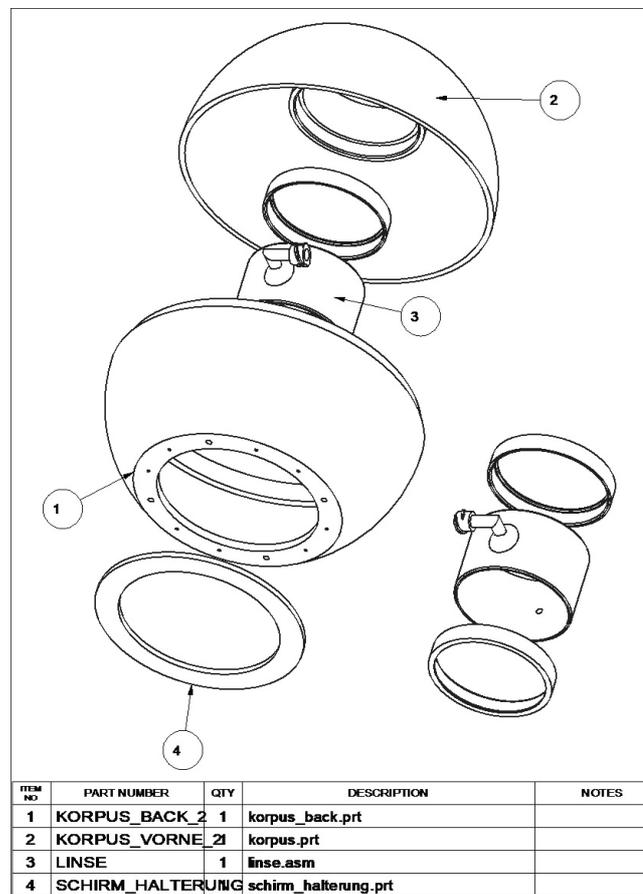


Abbildung 2: Explosionszeichnung des Augenmodells



Abbildung 3: Fixierung für den transparenten Schirm

Diese zwei Bauelemente (Korpus und variable Linse) können sowohl getrennt als auch gemeinsam verwendet werden. Dazu ist im vorderen Teil des Korpus eine Halterung vorgesehen. In dieses vordere Element muss zusätzlich noch ein Loch (ca. 10 mm) gebohrt werden, damit der Schlauch mit dem Luer-Lock-Anschluss aus dem Modell geführt werden kann (Abb. 4).



Abbildung 4: Augenmodell/ variable Linse

3. Anwendungen

Mit dem Augenmodell kann nun ein Objekt beobachtet werden. Hier eignet sich besonders gut ein beleuchteter Bildschirm mit schwarzem Hintergrund und weißer, großer Schrift.

Anwendungen wären:

- Man kann die Entfernung zwischen dem Schirm und dem Augenmodell so variieren, bis ein scharfes Bild auf dem

transparenten Papier (Netzhaut) des Augenmodells erkennbar ist. Hier sollten die Schüler*innen herausfinden, in welcher Entfernung ein scharfes Bild auf der Netzhaut entsteht.

- Man platziert das Augenmodell ca. 30 cm vor dem Objekt und versucht mithilfe der variablen Linse bzw. der Spritze das Bild auf der Netzhaut scharf abzubilden.
- Mithilfe des akkommodationsfähigen Augenmodells, kann auf die Kurz- und Weitsichtigkeit näher eingegangen werden, z. B. welche Ursachen bzw. Korrekturmöglichkeiten es bei der jeweiligen Fehlsichtigkeit gibt.
- Hierzu kann ein weit entferntes Objekt mit dem Augenmodell betrachtet werden. Man kann nun verschiedene Sammel- und Zerstreuungslinsen vor das Modell halten und beobachten, bei welcher Linse sich das Bild verbessert. Denselben Versuch kann man mit einem sehr nahe liegenden Objekt durchführen.

Anna Kaiser studiert Lehramt Mathematik und Physik. Sie ist besonders daran interessiert, das alltägliche Leben verständnisvoll in den Physikunterricht zu verpacken und die Prinzipien den Schüler*innen so gut als möglich zu veranschaulichen.

Literatur

- [1] Colicchia, G. & Wiesner, H. (2004). Akkommodationsfähige Augenmodelle für den Unterricht. In Unterricht Physik 82, S. 165-167
- [2] Die STL- Teile des Augenmodells sind unter <https://www.thingiverse.com/thing:4517062> zu finden. (Juli 2020)
- [3] Astromedia Acrylglaslinse Nr. 6, Brennweite +120 mm, Durchmesser 16,5 cm, erhältlich über Opittec.

3D-gedrucktes Streuexperiment à la Rutherford

Julia Woithe

1. Einleitung

Streuexperimente stellen einen wichtigen Typus von Experimenten in der Hochenergiephysik dar. Mit der Hilfe von Streuexperimenten untersuchen Wissenschaftler*innen die innere Struktur von Teilchensystemen, wie zum Beispiel Atomen oder Protonen, oder die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilchen. Dabei wird ein Strahl einer bestimmten Teilchensorte auf ein Streuobjekt gerichtet. Durch die Wechselwirkung zwischen den sogenannten Projektil-Teilchen und den Teilchen innerhalb des Streuobjektes kommt es dann zu Richtungsänderungen (elastische Streuung) oder Teilchenumwandlungen (inelastische Streuung), die mit der Hilfe von Detektoren aufgezeichnet werden. Je kleiner die zu untersuchenden Streuobjekte, desto höheren Energien benötigt man, um diese Strukturen aufzulösen. Daher wurden in der Vergangenheit immer bessere Teilchenbeschleuniger entwickelt, die hochenergetische Projektil-Teilchen für verschiedenste Streuexperimente zur Verfügung stellen. Eine detaillierte Beschreibung zur Physik von Streuexperimenten in der Hochenergiephysik findet sich zum Beispiel in [1].

Eines der berühmtesten Beispiele eines elastischen Streuexperimentes ist das sogenannte Goldfolien-Experiment. Geiger, Marsden und Rutherford untersuchten 1909 die Streuung von Heliumkernen an sehr dünnen Goldfolien. Dabei analysierten sie die Winkelverteilung der gestreuten Heliumkerne und Rutherford modellierte daraufhin die elektrische Ladungsverteilung im Atom. Die Beobachtungen widerlegten die Annahme, dass die positiven Ladungen im gesamten Volumen des Atoms gleichmäßig verteilt seien. Stattdessen ließen sich insbesondere große Streuwinkel besser mit einem kompakten zentralen Coulomb-Feld modellieren [2]. Die Erklärung ihrer Beobachtungen trug damit wesentlich zur Entwicklung des Rutherford'schen und später des Bohr'schen Atommodells bei.

Das Goldfolien-Experiment stellt damit nicht nur einen Meilenstein der Atomphysik dar, sondern auch ein eindrucksvolles Beispiel der Modellbildung. Nicht zuletzt aus diesen Gründen wird das Goldfolienexperiment in gängigen Physiklehrbüchern erklärt und sogar die Verteilung der gestreuten Projektil-Teilchen interpretiert [3, 4]. Es ist leider relativ aufwändig und kostenintensiv, das Experiment real nachzustellen. Der Versuchsaufbau von LD Didactic beinhaltet zum Beispiel eine Vakuumpumpe sowie ein 330 kBq Americium-Präparat [5]. Allerdings lassen sich die Grundprinzipien einfach anhand eines mechanischen Modellversuchs nachvollziehen.

2. Mechanisches Modell und physikalische Konzepte

In mechanischen Modellen stellen oft Stahlkugeln oder Murmeln die Projektil-Teilchen dar, die an verschiedenartigen Streuobjekten (mechanischen Potentialen) gestreut werden. Die Form der Streuobjekte reicht dabei üblicherweise von Prismen über Zylinder zu rotationssymmetrischen „Potentialhügeln“. Insbesondere spezielle Potentialhügel sind hier interessant, weil deren zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge sehr ähnlich zu den Grundlagen der Coulomb-Streuung sind. Die Höhe solcher Potentialhügel ändert sich dabei in der Regel umgekehrt proportional zum Radius. Mit Hilfe der Gravitation bieten diese mechanischen Potentiale damit für die Kugeln ein ähnliches $1/r$ Potential, wie das Coulomb-Potential eines Atomkerns für elektrisch geladene Projektil-Teilchen. Ein solches Modellexperiment mit einem Potentialhügel aus Aluminium wurde von Heptin and Fromme vorgestellt, die auch die zugrundeliegenden physikalischen Konzepte detailliert erläuterten und Beispielmessungen zeigten [6, 7]. Daher werden im Folgenden die wichtigsten Konzepte nur kurz zusammengefasst basierend auf der entsprechenden Darstellung in [7]. Auf eine mathematische Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet, diese lässt sich aber im Rahmen der Masterarbeit von Heptin [6] nachlesen und ist zum Teil auch für interessierte Jugendliche zugänglich.

Die folgenden Zusammenhänge beziehen sich jeweils auf den Stoßparameter b eines Projektil-Teilchens und den zugehörigen Ablenkwinkel θ . Diese beiden Parameter sind in Abbildung 1 am Beispiel der Streuung einer Kugel an einem Kreiszyylinder veranschaulicht. In der Abbildung ist neben Winkel θ auch ein Winkel θ^* eingezeichnet sowie ein großer graugefärbter Kreis, der das Streuobjekt umgibt. Diese Darstellung bezieht sich auf den 3D-gedruckten Versuchsaufbau, der später vorgestellt wird. Dort wird vereinfacht der Winkel immer

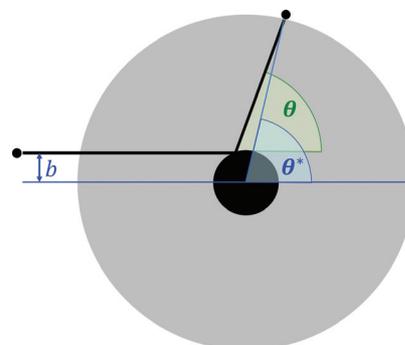


Abbildung 1: Stoßparameter eines Projektil-Teilchens und zugehöriger Ablenkwinkel bei der Streuung einer Kugel an einem Kreiszyylinder. Der Winkel relativ zum Auftreffpunkt auf das Streuobjekt θ und der Winkel relativ zum Zentrum des Streuobjektes θ^* sind eingezeichnet.

relativ zum Streuzentrum gemessen (θ), und nicht relativ zum Auftreffpunkt auf das Streuobjekt (θ^*). Diese Vereinfachung stört bei halbquantitativen Messungen nicht und macht das Ablesen der Winkel deutlich einfacher. Beim Vergleich von quantitativen Zusammenhänge müsste dies allerdings strenggenommen korrigiert werden, da der Unterschied zwischen θ und θ^* durch die relativ kleinen Abmaße der Streu-Apparatur nicht vernachlässigbar ist.

2.1 Streuung am 1/r-abhängiges Coulomb-Potential

Für Heliumkerne, die am 1/r-abhängigen Coulomb-Potential eines Atomkerns gestreut werden, gilt:

$b = \frac{Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot E_{kin,\alpha}} \cdot \cot \frac{\theta}{2}$ <p>(Herleitung in [6, S. 13-16])</p>	<p>b ... Stoßparameter</p> <p>Z ... Kernladungszahl des Streuatoms</p> <p>e ... Elementarladung</p> <p>ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante</p> <p>$E_{kin,\alpha}$... kinetische Energie des Heliumkerns</p> <p>θ ... Streuwinkel relativ zur Strahlrichtung</p>
--	---

2.2 Streuung am 1/r-abhängiger mechanischer Potentialhügel

Für Kugeln, die an einem rotationssymmetrischen 1/r-abhängigen mechanischen Potentialhügel gestreut werden, gelten folgende Zusammenhänge für das Potential $E_{pot,Modell}$ des Potentialhügels sowie den Stoßparameter b :

$E_{pot,Modell} = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot \frac{k}{r}$ $b = \frac{m \cdot g \cdot k}{2 \cdot E_{kin,P}} \cdot \cot \frac{\theta}{2} \text{ (für } b \leq R)$ <p>(Herleitung in [6, S. 17-19])</p>	<p>m ... Masse der Kugel (Projektil)</p> <p>g ... Gravitationskonstante</p> <p>h ... Höhe des Potentialhügels</p> <p>k ... Konstante der gewählten Potentialhügelform</p> <p>r ... Radius des Potentialhügels (abhängig von Höhe)</p> <p>b ... Stoßparameter</p> <p>$E_{kin,P}$... kinetische Energie der Kugel (Projektil)</p> <p>θ ... Streuwinkel relativ zur Strahlrichtung</p> <p>R ... Maximaler Radius des Potentialhügels</p>
--	--

Dabei bewegen sich die Kugeln auf annähernd Hyperbelförmige Bahnkurven. Für $b > R$ gilt allerdings $\theta = 0^\circ$, denn die Kugel rollt ungehindert am mechanischen Potentialhügel vorbei. Insgesamt sollte man folgende Grenzen des Modells beachten: Die Reichweite des mechanischen Modells ist im Gegensatz zum Coulomb-Potential endlich und hängt vom maximalen Radius des Potentialhügels ab. Außerdem tritt Reibung auf und die Bahn der Kugel hängt auch von der Beschaffenheit der Streu-Apparatur ab. Außerdem besitzen die Kugeln zusätzlich Rotationsenergie und das mechanische Potential besitzt im Vergleich zum Coulomb-Potential eine Raumdimension weniger. Im Gegensatz zu einem Heliumkern, der am kugelsymmetrischen Coulomb-Potentials eines Atomkerns in alle drei Raumrichtungen gestreut werden kann, bewegen sich die Kugeln auf einer zweidimensionalen Oberfläche.

2.3 Streuung am Kreiszyylinder

Für Kugeln, die an einem festen Hindernis mit kreisförmigem Querschnitt (Kreiszyylinder) gestreut werden, gilt:

$b = R \cdot \cos \frac{\theta}{2} \text{ (für } b \leq R)$ <p>(Herleitung in [6, S. 7])</p>	<p>b ... Stoßparameter</p> <p>R ... Radius des Hindernisses mit kreisförmigem Querschnitt</p> <p>θ ... Streuwinkel relativ zur Strahlrichtung</p>
--	---

Für $b > R$ gilt wieder $\theta = 0^\circ$, denn die Kugel rollt ungehindert am Hindernis vorbei. Bei diesem Streuobjekt gilt Einfallswinkel = Ausfallswinkel und der Streuwinkel hängt nicht von der kinetischen Energie der Kugel ab.

2.4 Andere Streuobjekte

Zusätzlich kann man Kugeln an einem Dreiecksprisma streuen, wobei eine Spitze der Dreiecksgrundfläche in Richtung der Kugelrampe zeigt. Hier gilt ebenfalls Einfallswinkel = Ausfallswinkel aber der Einfallswinkel bleibt konstant und hängt nur vom Design und der Ausrichtung des Streukörpers zur Kugelrampe ab.

Auch kompliziertere Streukörper mit einer inneren Struktur (z. B. drei sehr kleine Streuzentren nebeneinander) sind denkbar. Bei solchen Objekten würden viele Kugeln mit unterschiedlichen Stoßparametern unbehindert durch das Streuobjekt hindurchrollen. Einige Kugel würden allerdings stark abgelenkt werden.

3. 3D-gedrucktes Streuexperiment

Auch wenn sich mechanische Potentiale auf verschiedensten Arten fertigen lassen, bieten 3D-Design und 3D-Druck hier interessante Möglichkeiten. Insbesondere wird die Fertigung deutlich weniger aufwändig, sodass sich das Experiment vom Demonstrationsexperiment zum Lernendenexperiment entwickeln lässt. Dabei lässt sich die Größe des Modells einfach variieren und Details, wie zum Beispiel winkelabhängige Auffangtaschen für abgelenkte Kugeln, lassen sich einfach einarbeiten. Auch die Form der Streuobjekte kann man problemlos modifizieren. Es ist sogar denkbar, dass Jugendliche ihren eigenen Streukörper entwerfen und dann 3D drucken und im Streuexperiment testen. Im Rahmen des Teilchenphysik-Lernlabors S'Cool LAB am CERN [8] wurde ein 3D-gedrucktes Streuexperiment entwickelt. Das Modell besteht aus den folgenden Komponenten, siehe auch Abbildung 2.

a) Grundplatte: Die kreisförmige Grundplatte hat einen Durchmesser von 18 cm und beinhaltet 16 Auffangtaschen für die abgelenkten Stahlkugeln, womit sich das Ablesen der Streuwinkel vereinfacht. Jede Auffangtasche deckt $22,5^\circ$ des Streuwinkels ab. Zwei Taschen werden allerdings von der Kugelrampe überdeckt. Somit können Ablenkungswinkel von 0° bis $\pm 157,5^\circ$ gemessen werden.

- b) **Kugelrampe:** Die Rampe ist für Stahlkugeln mit 5 mm Durchmesser ausgelegt und beinhaltet sieben Startplätze im Abstand von jeweils 7 mm, die ein zügiges Experimentieren mit verschiedenen Stoßparametern erleichtern. In einer zusätzlichen Version der Rampe lässt sich der jeweilige Startpunkt auf drei verschiedene Höhen adjustieren, sodass die kinetische Energie der Kugeln variiert werden kann.
- c) **Streuobjekte:** Die Streuobjekte können auf die Grundplatte gesteckt werden. Die folgenden Formen wurden gestaltet: Kreiszyylinder (Durchmesser: 4 cm), Dreiecksprisma (Seitenlängen der gleichseitigen Grundfläche: 3,5 cm), 1/r Potentialhügel (maximaler Radius: 3,5 cm), Quader (Seitenlänge der quadratischen Grundfläche: 3 cm) und ein Objekt mit Substruktur (3 kleine Kreiszyylinder mit je 1 cm Durchmesser).
- d) **Deckel:** Der Deckel kann auf die Streuobjekte gesteckt werden, um sie damit zu verbergen.
- e) **Stahlkugeln:** Die Stahlkugeln (Durchmesser: 5 mm) müssen separat gekauft werden. Passende Stahlkugeln finden sich in diversen Online-Shops, insbesondere im Zusammenhang mit Kugellagern.

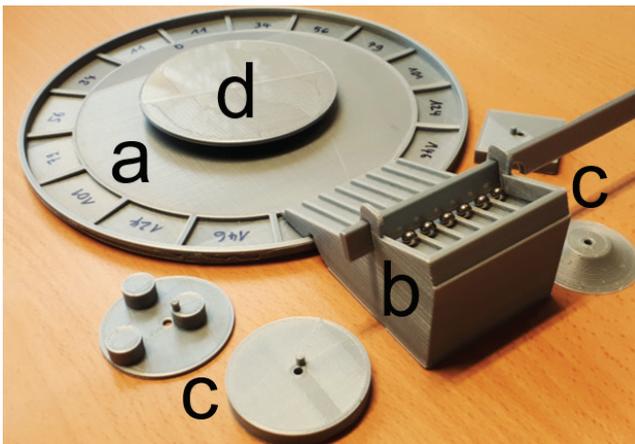


Abbildung 2: Überblick über das 3D-gedruckte Streuexperiment mit den Komponenten a) Grundplatte, b) Kugelrampe, c) verschiedene Streuobjekte und d) Deckel.

Die 3D-Druck-Komponenten wurden mit der 3D-Design Software Fusion 360 entwickelt. Für die meisten Komponenten konnte auf Kombinationen aus Standardformen zurückgegriffen werden. Nur das Design der 1/r-Potentials war etwas umständlicher. Tatsächlich besteht der Potentialhügel aus aufeinandergesetzten Kreiszyindern mit jeweils einer Höhe vom 0,2 mm, die einer Lage PLA Material entspricht, und einem Radius, der umgekehrt proportional zur Höhe schrittweise abnimmt (hier war eine Excel-Tabelle nützlich). Alle 3D-Designs dieser Komponenten sind auf Thingiverse frei verfügbar [9]. Die Designs wurden mit einem 3D-Drucker der Marke Ultimaker (Modell 2+) mit PLA Material in ca. 20 Stunden gedruckt, dabei betrug die Schichtdicke 0,2 mm und die Füllichte 20%. Nach Abschluss des jeweiligen Drucks müssen die Oberflächen nicht nachbearbeitet werden. Es kann allerdings hilfreich sein, die Grundplatte mit Sandpapier

etwas zu glätten. Sonst werden manchmal die Kugeln nicht von Streuobjekt abgelenkt, sondern von den Rillen, die durch den 3D-Druck entstehen. Alternativ eignen sich diese Rillen vorzüglich für eine Fehlerbetrachtung.

4. Mögliche didaktische Strukturierung

Es bieten sich verschiedene Möglichkeiten und Schwierigkeitsstufen, ein solches Streuexperiment im Unterricht einzusetzen. Der Grad der Mathematisierung kann dabei flexibel an die jeweilige Gruppe von Lernenden angepasst werden.

4.1 Qualitativ

Im einfachsten Fall werden die Streumuster verschiedener Streuobjekte nur qualitativ interpretiert. Die Jugendlichen können sich ggf. die verschiedenen Streuobjekte vorher anschauen, und verstecken dann gegenseitig ein Objekt unter dem Deckel. Nachdem sie einige Kugeln gestreut haben, versuchen sie zu erraten, welches Objekt sich unter dem Deckel verbirgt. Damit lässt sich beispielsweise verdeutlichen, dass die Physik oft auf indirekte Beobachtungen angewiesen ist. Im echten Leben haben wir allerdings keine Möglichkeit, die Streuobjekte vorher anzuschauen oder den Deckel zu lüften. Hier kann man auch die Bedeutung von Modellen und die Natur der Naturwissenschaften besprechen.

Bei dieser Variante kann man auch zunächst auf den 1/r-abhängigen Potentialhügel verzichten. Erst später fügt man den Potentialhügel hinzu und kann dies zum Anlass nehmen, den Unterschied zwischen mechanischen Streuobjekten und realen Coulomb-Streupotentialen zu diskutieren.

4.2 Semiquantitativ

Das Experiment lässt sich erweitern, indem die Jugendlichen systematisch Daten aufnehmen und die gemessenen Streuwinkel über mehrere Messungen mitteln. Damit lassen sich die verschiedenen Streumuster in einem Diagramm vergleichen. Abbildung 3 zeigt drei Streumuster, bei denen der durchschnittliche Ablenkwinkel für zehn Messungen mit jeweils sieben Stoßparametern dargestellt ist. Als Streuobjekte dienten der Kreiszyylinder, der 1/r-abhängige Potentialhügel und das Dreiecksprisma. Als Winkel wurden hier jeweils die Zentren der Winkelintervalle aufgetragen, die mit der jeweiligen Auffangtasche gemessen werden konnten. Damit beziehen sich die Winkel jeweils auf das Zentrum des Streukörpers.

Dabei müssen für die Interpretation der Streumuster keine Formeln herangezogen werden. Stattdessen kann man argumentieren, dass der Streuwinkel beim Dreiecksprisma konstant sein sollte, da der Einfallswinkel nur vom Design der Grundfläche des Prismas und deren Ausrichtung abhängt. Dann gilt Einfallswinkel = Ausfallwinkel. Nur wenn die Kugel auf die Spitze des Prismas trifft (Stoßparameter $b = 0$ mm), wird sie sehr stark abgelenkt.

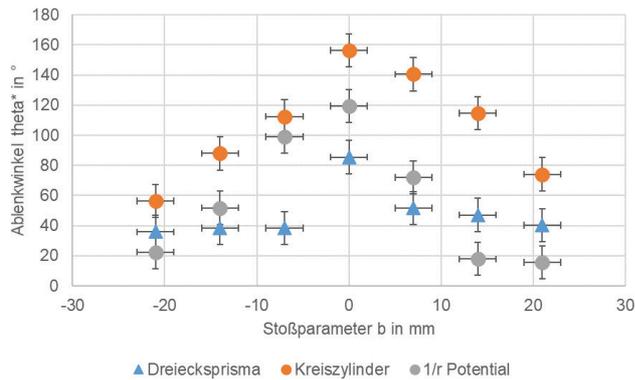


Abbildung 3: Messung mit drei verschiedenen Streuobjekten und jeweils zehn mal sieben Stahlkugeln. Dargestellt sind die mittleren Ablenkwinkel für die sieben verschiedenen Stoßparameter. Die Fehlerbalken spiegeln die systematischen Ablese-Unsicherheiten der Winkelabschnitte dar ($\pm 11^\circ$ wegen der Größe der Winkeltaschen) sowie die systematische Adjustier- Ungenauigkeit der Kugelrampe relativ zum Streuobjekt (ca. $\pm 2\text{mm}$)

Auch beim Kreiszyylinder gilt Einfallswinkel = Ausfallswinkel, aber der Einfallswinkel hängt vom Stoßparameter ab. Je weiter entfernt vom Zentrum des Kreiszyinders eine Kugel auftrifft, desto weniger stark wird sie abgelenkt.

Beim $1/r$ -abhängigen Potentialhügel ist die Betrachtung zunächst ähnlich zum Kreiszyylinder. Allerdings sollte es für Jugendliche verständlich sein, dass der effektive Radius des Potentialhügels etwas kleiner ist, als der maximale Radius. Deshalb ist das Streumuster etwas schmaler. Außerdem kommt die Energieabhängigkeit dazu: Kugeln mit höherer potentieller Energie am Startpunkt treffen mit höherer kinetischer Energie auf das Streuobjekt. Schnellere Kugeln rollen dabei höher auf den Potentialhügel hinauf und treffen dort effektiv auf ein „kleineres“ Streuobjekt, weil der Radius des Potentialhügels mit der Höhe abnimmt. Hier lässt sich auch die Bedeutung der Teilchenenergien in der Hochenergiephysik thematisieren: Möchte man zum Beispiel die Substrukturen von Atomkernen auflösen, dann muss das Projektil-Teilchen genug Energie besitzen, um das Coulomb-Potential des Kerns zu überwinden. Erst dann gelangt das Projektil-Teilchen in den Bereich der starken Kernkräfte.

4.3 Quantitativ

Das Experiment lässt sich noch weiter erweitern, indem man die theoretisch erwarteten Zusammenhänge mit den empirischen Daten vergleicht. Jugendliche können zum Beispiel überprüfen, ob sich beim Kreiszyylinder der Zusammenhang zwischen Stoßparameter und Ablenkwinkel $b \sim \cos \frac{\theta}{2}$ ergibt. Hier stellt man nicht den Ablenkwinkel sondern den Kosinus des halben Ablenkwinkels zusammen mit dem jeweiligen Stoßparameter dar und überprüft einen linearen Zusammenhang, siehe Abbildung 4. In der Tat reichen schon zehn Messungen mit jeweils sieben Kugeln aus, um einen linearen Zusammenhang nachzuweisen.

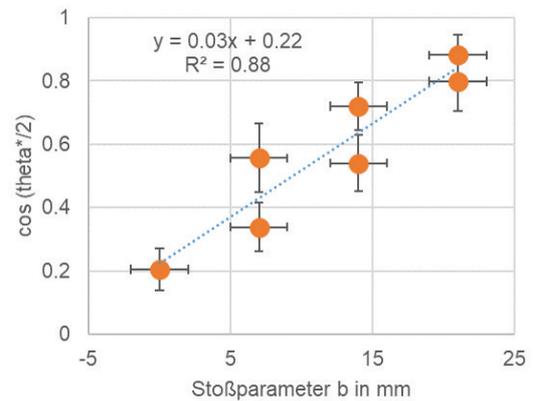


Abbildung 4: Messung mit Kreiszyylinder als Streuobjekt mit zehn mal sieben Stahlkugeln. Dargestellt ist der Kosinus des halben mittleren Ablenkwinkels für den Betrag des jeweiligen Stoßparameters der sieben verschiedenen Kugelrampenpositionen. Die Fehlerbalken spiegeln die systematischen Ablese-Unsicherheiten der Winkelabschnitte dar ($\pm 11^\circ$ wegen der Größe der Winkeltaschen) sowie die systematische Adjustier- Ungenauigkeit der Kugelrampe relativ zum Streuobjekt (ca. $\pm 2\text{mm}$). Ein linearer Zusammenhang ist mit Hilfe einer Trendlinie visualisiert.

Analog kann man den $1/r$ -abhängigen Potentialhügel untersuchen und sogar mit dem Zusammenhang für einen Heliumkern, der am Coloumb-Potential eines Atomkerns gestreut wird, vergleichen. Auch die Energieabhängigkeit der Streuung können Jugendliche quantitativ untersuchen. In jedem Fall sollte eine Fehlerbetrachtung durchgeführt werden, insbesondere um die oben erwähnten Grenzen des mechanischen Modells zu thematisieren.

Die mathematische Herleitung der theoretisch erwarteten Zusammenhänge ist für den Kreiszyylinder (analog zu [6, S. 7]) und das Dreiecksprisma einfach möglich. Zusätzlich lässt sich am $1/r$ -abhängigen Potentialhügel Rutherfords Abschätzung einer oberen Schranke des Atomradius nachvollziehen (siehe auch hierzu [6, S. 52-53]). Auch die Hyperbelform der Kugelbahnen kann man untersuchen. Beispielsweise lassen sich mit Smartphone Apps wie Motion Shot Bahnkurven aufnehmen und visualisieren [10]. Dafür könnten interessierte Jugendliche eine Smartphone-Halterung designen und drucken, sodass das Smartphone direkt über dem Streuobjekt angebracht werden kann.

5. Zusammenfassung

Moderne Physik macht es Lehrpersonen nicht immer leicht, Experimente im Unterricht durchzuführen. Ziel dieses Beitrags war es, ein 3D-druckbares Modell vorzustellen, mit dessen Hilfe Jugendliche mehr über die Grundprinzipien von Streuexperimente lernen können. Mit Hilfe von 3D-Druckern wird es insbesondere leichter, einen $1/r$ -abhängigen Potentialhügel zu drucken. Dadurch wird der Vergleich zu einem der berühmtesten Streuexperiment, dem Goldfolien-Experiment von Geiger, Marsden und Rutherford, erleichtert. Zusätzlich eröffnet der Einsatz des 3D-druckbaren Streuexperimentes als Lernendenexperiment vielfältige Möglichkeiten

mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden. Falls Jugendliche selbst Zugang zu einem 3D-Drucker haben, können sie das Experiment leicht modifizieren und zum Beispiel neuartige Streuobjekte entwerfen und testen.

Dr. Julia Woithe *leitet seit 2014 das Teilchenphysik-Lernlabor S'Cool LAB am CERN in Genf.*

Literatur

- [1] Povh, B., et al., Teilchen und Kerne: eine Einführung in die physikalischen Konzepte. 2013: Springer-Verlag.
- [2] Rutherford, E., LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1911. 21(125): p. 669-688.
- [3] Dorn, F. and F. Bader, Physik—Gymnasium Sek. II. 2010: Schroedel-Verlag, Hannover.
- [4] Diehl, B., R. Erb, and H. Heise, Physik Oberstufe. 2010: Cornelsen.
- [5] LD Didactic. Rutherford-Streuung: Messung der Streurate in Abhängigkeit vom Streuwinkel und von der Kernladungszahl P6.5.2.1. Available from: <https://www.leybold-shop.de/physik/versuche-sek-ii-universitaet/atom-und-kernphysik/kernphysik/rutherford-streuung/rutherford-streuung-messung-der-streureate-in-abhaengigkeit-vom-streuwinkel-und-von-der-kernladungszahl/vp6-5-2-1.html>.
- [6] Heptin, V., Demonstrationsversuch zur Rutherfordstreuung. 2013, Masterarbeit, Universität Bielefeld. <https://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Examensarbeiten/MasterarbeitHeptin.pdf>
- [7] Heptin, V. and B. Fromme, Mechanisches Modell zur Rutherfordstreuung. Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule, 2016. 65(5).
- [8] cern.ch/scoollab
- [9] www.thingiverse.com/thing:3136549
- [10] Kostenlos für Android und iOS, <http://x-application.sony.net/motionshot>

3D-gedruckte Experimente zur modernen Physik

Vom Michelson-Interferometer zum Quantenradierer

Fabian Bernstein, Thomas Wilhelm & Sascha Schmeling

Lehrkräfte, die Lernendenexperimente im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe einsetzen wollen, stehen oft vor großen praktischen Herausforderungen: so ist Experimentiermaterial häufig nicht verfügbar, nicht funktionsfähig oder schlecht dokumentiert, es mangelt an Räumen und Platz zum Aufbau oder die notwendige Vorbereitungszeit steht in der Hektik des schulischen Alltags nicht zur Verfügung. In der Folge bleibt vielfach nur, auf Demonstrationsexperimente, Simulationen oder das Lehrbuch zurückzugreifen.

Eine neue Chance, diesen Herausforderungen zu begegnen, ergibt sich durch die zunehmende Verbreitung vergleichsweise günstiger, aber leistungsfähiger 3D-Drucker im schulischen Kontext. Diese ermöglichen, Experimentiermaterial selbst zu drucken und auch komplexe oder aufwändige Versuche

als Lernendenexperimente durchzuführen. Die Designfreiheit der additiven Fertigung kann dazu genutzt werden, Experimentiermaterial gezielt auf praktische Anforderungen abzustellen und das Zusammenspiel mit Mikrocontrollern wie dem Arduino Uno erlaubt darüber hinaus eine sensorgestützte Datenaufnahme und die Durchführung quantitativer Experimente. In Verbindung mit „Microsoft Datastreamer“ – einer nativen Schnittstelle für Microsoft Excel® – können so aufgezeichnete Daten direkt und unkompliziert in Excel eingelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden. Insgesamt können auf diese Weise hochwertige, ansprechende, interaktive und leistungsfähige Experimentierumgebungen kostengünstig realisiert werden.

Wie dies im Einzelnen aussehen kann, wird im Folgenden exemplarisch anhand zweier Schlüsselexperimente der modernen Physik erörtert, dem Michelson-Interferometer einerseits sowie dem Mach-Zehnder-Interferometer in der Variante als Quantenradierer andererseits. Das Michelson-Interferometer ist als Schlüsselexperiment der modernen Physik anzusehen und hat, neben seiner Bedeutung für die spezielle Relativitätstheorie, durch Experimente zur Gravitationswellendetektion in jüngerer Zeit öffentliche Aufmerksamkeit erfahren. Beim Mach-Zehnder-Interferometer handelt es sich um ein interferometrisches Grundexperiment, das in einer Erweiterung zum Quantenradierer als Analogieexperiment eingesetzt wird, um Eigenheiten des quantenmechanischen Messprozesses zu demonstrieren [1]. Beide

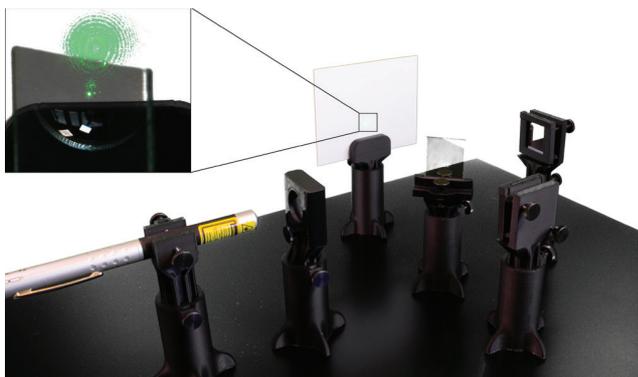


Abbildung 1: 3D-gedrucktes Michelson-Interferometer



Abbildung 2a: Grundhalter



Abbildung 2b: Laserpointer-Halter



Abbildung 2c: Spiegel-Halter



Abbildung 2d: Strahlteiler-Halter



Abbildung 2e: Linsen-Halter



Abbildung 2f: Schirm-Halter

Experimente eint, dass sie aus Kostengründen häufig nicht in schulischen Sammlungen verfügbar sind, so dass auf Lernlabore ausgewichen oder auf eine Durchführung im Unterricht verzichtet werden muss. Selbst im besten Falle ist selten mehr als ein Exemplar in einer schulischen Sammlung vorhanden, so dass der didaktische Spielraum der Nutzung des Experiments im Unterricht stark eingeschränkt ist.

Der 3D-Druck der Interferometer birgt hingegen den großen Vorteil, dass aufgrund der geringen Materialkosten beliebig viele Experimentiersätze ausgedruckt werden können. Zudem wurden praktische Erfordernisse bereits im Entwicklungsprozess berücksichtigt und sind in Designentscheidungen eingeflossen: So wurden die Experimente beispielsweise für einen schnellen, unkomplizierten und reproduzierbaren Aufbau optimiert.

1. Michelson-Interferometer

Eines der wenigen Experimente, die sich im Physikunterricht zur Speziellen Relativitätstheorie durchführen lassen, ist das Michelson-Morley-Experiment. Es zeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht von der Relativbewegung der Messapparatur gegenüber einem gedachten Äther abhängt. Da die Bahngeschwindigkeit der Erde klein gegen die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, war die Entwicklung einer

besonders empfindlichen Messapparatur – des Michelson-Interferometers – erforderlich.

Der prinzipielle Aufbau eines Michelson-Interferometers ist einfach: Ein Laserstrahl hinreichender Kohärenzlänge wird an einem nicht polarisierenden 50:50 Strahlteiler aufgeteilt und die beiden Teilstrahlen auf einem Schirm überlagert (siehe Abbildung 1). Eine in den Strahlengang eingebrachte Linse dient der Aufweitung und damit Sichtbarmachung des resultierenden Interferenzmusters auf dem Schirm. Die experimentelle Herausforderung besteht darin, dass der Aufbau sehr stabil sein muss, da Verschiebungen eines Spiegels um wenige hundert Nanometer zu einer vollständigen Verschiebung der Ringe des Interferenzmusters führen. Mangelnde Stabilität des Aufbaus resultiert demnach in so starken Vibrationen der Spiegel, dass kein Interferenzmuster sichtbar gemacht werden kann.

1.1 Grundsätzliche Vorgehensweise: Zusammenbau, Aufbau, Justage

Zusammenbau und Aufbau des Michelson-Interferometers folgen einem auch für alle anderen beschriebenen Experimente gültigen Dreischritt:

- 1) Zunächst werden die 3D-Halter, die als .stl-Dateien zusammen mit verschiedenen Begleitmaterialien auf der Website des *S’Cool LAB* des CERN veröffentlicht

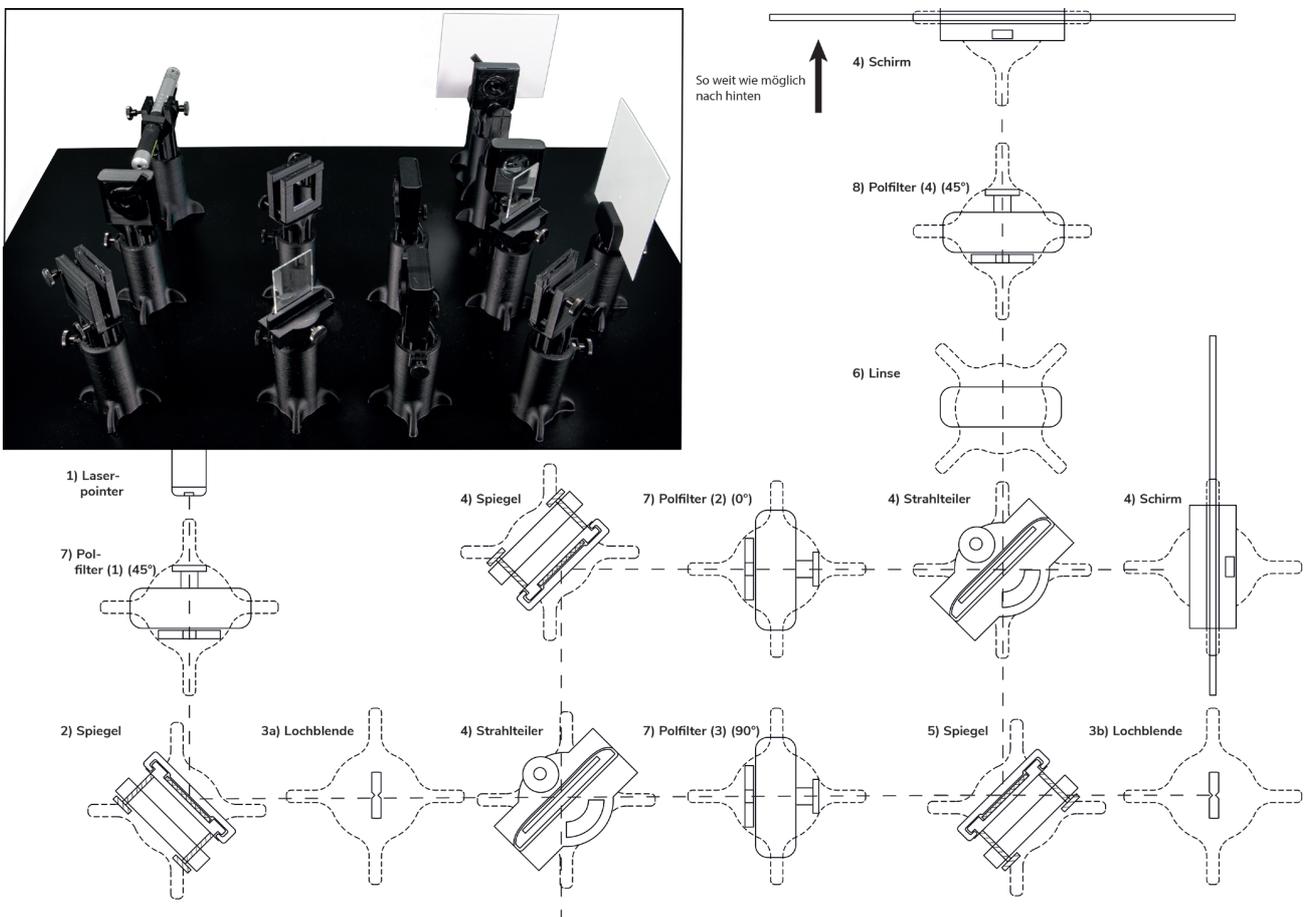


Abbildung 3: 3D-gedruckter Quantenradierer (oben links) und Aufbau-Plan. Der Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers ist – mit Ausnahme der nicht erforderlichen Polarisationsfilm-Halter (7/8) – identisch.

sind [2], auf einem 3D-Drucker ausgedruckt (PLA oder ABS). Im Ergebnis erhält man eine Reihe von Objekten, die die Grundbausteine des Experiments darstellen.

- 2) Diese 3D-Halter werden sodann mithilfe von Standardkomponenten (Schrauben, Muttern, Magneten, optischen Komponenten wie Spiegeln oder Strahlteilern) zu funktionstüchtigen optischen Haltern vervollständigt (siehe Abbildungen 2a-f).
- 3) Zuletzt werden die so fertiggestellten optischen Halter auf einer optischen Platte – einer einfachen Stahlplatte der Maße 60 cm x 40 cm – so angeordnet, wie es für das jeweilige Experiment erforderlich ist, und abschließend einjustiert.

1.2 Zusammenbau der Komponenten

Für das Michelson-Interferometer werden sechs Grundhalter benötigt: ein Laserpointer-Halter, zwei Spiegel-Halter, ein Strahlteiler-Halter, ein Linsen-Halter und ein Schirm-Halter. Als Lichtquelle hinreichender Kohärenz wird ein handelsüblicher grüner Laserpointer [3] verwendet. Alle Halter spezifischer Funktionalität (Laserpointer-Halter, Spiegel-Halter etc., siehe Abbildung 2b-f) werden von einem Grundhalter (siehe Abbildung 2a) aufgenommen, der ihre Positionierung und Höhenverstellung erlaubt.

Der Zusammenbau der Halter erfordert einige einfache Schritte: Zunächst wird in die Grundhalter ein Neodymmagnet der Abmessung 15 mm x 15 mm x 8 mm [4] eingelegt. Dieser dient dazu, die Halter auf der optischen Platte zu stabilisieren und zugleich ihre Verschiebung auf der Platte zu ermöglichen. Die Aussparung am oberen Rand des Grundhalters nimmt eine Mutter (M3) auf, die zusammen mit einer Rändelschraube (M3, Länge: 12 mm) die Befestigung und Höhenverstellung der spezifischen Halter im Grundhalter erlaubt.

Dieselbe Befestigungsmethode wird auch für den Laserpointer-Halter (Abb. 2b) verwendet, der allerdings über zwei Bohrungen verfügt, eine davon, um den Laserpointer zu fixieren, die andere,

um ihn an- und ausschalten zu können, ohne seine Position zu verändern. Letztere besitzt keine Aussparung für eine Mutter; stattdessen genügt es, die Rändelschraube durch die Öffnung hindurchzuschrauben. Die Schraube zieht bei diesem Vorgang automatisch ein Gewinde ins Plastik.

Die Spiegelhalter (Abbildung 2c) nehmen einen Spiegel der Maße 30 mm x 20 mm x 1 mm auf, der für wenige Euro erworben werden kann [5]. Zwei Rändelschrauben, die durch rückwärtige Bohrungen geführt werden, ermöglichen eine Verkipfung des Spiegels um zwei Achsen für die spätere Feinjustage, ein Clip die Befestigung des Spiegels am Halter. Darüber hinaus sind die Füße des Grundhalters so geformt, dass sie leicht angefasst werden können und so eine Rotation des Grundhalters erleichtern.

Der Strahlteiler-Halter (siehe Abbildung 2d) besteht aus zwei Teilen, nämlich einer unteren Basis und einem kleineren Aufnehmer für einen Strahlteiler 40 mm x 30 mm x 1 mm [6]. Der Strahlteiler selbst wird dabei einfach in den Aufnehmer hineingedrückt („press fit“). Die Aussparung an der vorderen Seite des Aufnehmers ist für eine Mutter M3 ausgelegt, die in Verbindung mit einer Rändelschraube die einachsige Verkipfung des Strahlteilers ermöglicht. Der kleinere Aufnehmer wird dann mittels Mutter und Schraube mit der unteren Basis verbunden.

Der Linsen-Halter (siehe Abbildung 2e) setzt sich ebenfalls aus zwei Teilen zusammen, einem unteren Teil, der die Linse ($\varnothing = 25$ mm, $f = 45$ mm [7]) aufnimmt und die Verbindung zum Grundhalter (siehe Abbildung 2a) herstellt sowie einem oberen Teil. Mittig im unteren Teil befindet sich eine Aussparung für eine M3-Mutter, die – in Verbindung mit dem oberen Teil und einer Rändelschraube M3 – der Fixierung der Linse im Halter dient.

Schließlich ermöglicht der Schirm-Halter, ein Stück weißen Kartons fest einzuspannen und als optischen Schirm zur Sichtbarmachung des Interferenzmusters zu verwenden.



Abbildung 4a: Polarisationsfilm-Halter

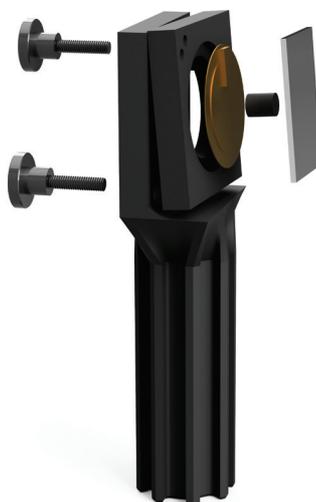


Abbildung 4b: Piezogehaltener Spiegel



Abbildung 4c: Fotowiderstand-Halter

1.3 Aufbau des Michelson-Interferometers

Der Aufbau eines Michelson-Interferometers ist mit den hier vorgestellten optischen Haltern auch ohne Vorerfahrungen problemlos möglich. Zur Erleichterung bzw. Beschleunigung wurde zusätzlich ein Aufbau-Plan oder „cheat sheet“ (ähnlich Abbildung 3, online abrufbar unter [2]) erstellt, das die Positionen aller für das Michelson-Interferometer erforderlichen Komponenten abbildet. Wird es im Format DIN A3 ausgedruckt und auf die optische Platte gelegt, zeigt es an, wo und in welcher Reihenfolge die optischen Halter auf der optischen Platte platziert werden sollen. In der Praxis lässt sich das Interferometer so in wenigen Minuten aufbauen.

Im Einzelnen werden zunächst der Laserpointer, die beiden Spiegel, der Strahlteiler und der Schirm aufgestellt und der Laser mittels der Rändelschraube dauerhaft eingeschaltet. Dann wird der dem Laserpointer gegenüberliegende Spiegel so justiert, dass der Laserstrahl in die Öffnung des Laserpointers zurückreflektiert wird. Schließlich ist der andere Spiegel so einzustellen, dass sich die beiden Teilstrahlen auf dem Schirm überlappen. Stellt man anschließend die Linse an der markierten Position in den Laserstrahl, ist das charakteristische Interferenzmuster erkennbar (siehe Abbildung 1).

2. Mach-Zehnder-Interferometer

Das Mach-Zehnder-Interferometer ist ebenfalls ein Zweistrahlinterferometer, das beispielsweise zur Messung der Brechzahl von Gasen oder zur Beobachtung von Dichteschwankungen eingesetzt wird. Zwar handelt es sich bei diesem Interferometer-Typus mehr um ein Standardexperiment des universitären physikalischen Grundpraktikums als ein genuin schulisches Experiment – es wird aber als „Quantenradierer“ auch im Bereich des schulischen Physikunterrichts eingesetzt [8].

Die optischen Halter, die für den Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers erforderlich sind, gleichen denen des Michelson-Interferometers; Unterschiede bestehen allein hinsichtlich der Anzahl und Anordnung der Komponenten. Aufgrund der verschiedenen Wege der Teilstrahlen ist das Mach-Zehnder-Interferometer allerdings deutlich schwieriger zu justieren, weshalb neben dem „cheat sheet“ eine höhenverstellbare Lochblende als zusätzliches Hilfsmittel entwickelt wurde. Sie erleichtert insbesondere, den Laserstrahl parallel zur Grundplatte einzujustieren.

Zum Aufbau (siehe Abbildung 3) werden zunächst Laserpointer und Spiegel (1) auf der optischen Grundplatte platziert. Spiegel (2) und Lochblende werden dann so einjustiert, dass der Laserstrahl sowohl an Position (3a) als auch (3b) durch die Lochblende fällt. In diesem Fall verläuft der Laserstrahl hinter dem Spiegel (2) auf einer Höhe parallel zur Grundplatte, was die Voraussetzung für eine erfolgreiche Justage ist. Sodann werden die übrigen optischen Elemente (4, 5) mit Ausnahme der Linse (6) auf der Grundplatte positioniert, wobei darauf

zu achten ist, dass der eine der beiden Schirme möglichst nah (ca. 5 cm), der andere möglichst weit (30 - 50 cm) entfernt vom Strahlteiler steht. Im Justage-Prozess werden nun Position und Winkel des Spiegels (5) so lange iterativ verändert, bis die beiden Teilstrahlen sich auf beiden Schirmen gleichzeitig überlagern. Ist dies erreicht, ist das Mach-Zehnder-Interferometer erfolgreich einjustiert. Das Interferenzmuster kann dann sichtbar gemacht werden, indem die Linse (6) in den Strahlengang eingebracht wird. Anders als beim Michelson-Interferometer bildet sich aufgrund der geometrischen Verhältnisse des Aufbaus ein streifenförmiges Interferenzmuster.

3. Quantenradierer

Beim Quantenradierer in der hier vorgestellten Form handelt es sich um ein Analogieexperiment, das dazu dient, Besonderheiten des quantenmechanischen Messprozesses zu verdeutlichen. Den gedanklichen Ausgangspunkt bildet das Doppelspaltexperiment, so wie es z. B. von Richard Feynman in seinen „Lectures on Physics“ [9] diskutiert wird. Demnach erzeugen bspw. Elektronen, die auf einen Doppelspalt treffen, ein Interferenzmuster auf einem dahinterliegenden Schirm. Dies gilt, so lange keine Messung durchgeführt wird, um festzustellen, durch welchen der beiden Spalte sich die Elektronen bewegen. Findet hingegen eine Messung statt, die ermöglicht, zwischen den beiden Alternativen zu entscheiden, verschwindet das Interferenzmuster – die Messung der „Welcher-Weg-Information“ führt zur Auslöschung des Interferenzmusters.

Im Quantenradierer wird nun die Interferenz von Photonen betrachtet, wobei – vergleichbar zum Doppelspaltexperiment – zwei verschiedene und zunächst ununterscheidbare Wege koexistieren, von denen die Photonen von der Quelle aus zu den Schirmen gelangen können. Um diese Wege unterscheidbar zu machen und somit die „Welcher-Weg-Information“ zu messen, werden Polarisationsfilter an geeigneten Stellen in den Strahlengang eingebracht (siehe Abbildung 3). Insgesamt werden vier Polarisationsfilter benötigt: Der erste Polarisationsfilter (1) direkt hinter dem Laserpointer ist erforderlich, um das vom Laserpointer emittierte Licht (üblicherweise elliptisch polarisiert) zu linearisieren.

Die beiden Polarisationsfilter (2) und (3) codieren die Weg-Information mittels des Polarisationszustandes des Lichtes. Diese Polarisationsfilter sind zueinander orthogonal und schließen mit der Achse des Polarisationsfilters (1) jeweils einen Winkel von 45° ein. Die Filter präparieren einen Zustand der Photonen, bei dem Weg und Polarisationszustand miteinander verschränkt sind.

Analog zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen, führt die Codierung der Welcher-Weg-Information mittels des Polarisationszustandes zum Verschwinden des Interferenzmusters auf dem Schirm. Im hier diskutierten Aufbau – insofern handelt es sich um ein Analogieexperiment – ist dies

allerdings auch im Rahmen der klassischen Elektrodynamik verständlich: Die orthogonal polarisierten Teilstrahlen sind nicht interferenzfähig (Fresnel-Arago-Gesetze), daher ist auf dem Schirm kein Interferenzmuster zu sehen (Superposition ist aber durchaus gegeben, nur ist die resultierende Welle zirkular polarisiert).

Setzt man nun einen weiteren Polarisationsfilter (4) gleicher Orientierung wie Filter (1) (45°) vor dem Schirm in den Strahlengang, erscheint das Interferenzmuster erneut. Im Bild der Quantenmechanik wird argumentiert, dass „die Weginformation gelöscht wurde“, die alternativen Pfade wieder ununterscheidbar sind und die Interferenzfähigkeit somit wiederhergestellt wurde. Wird, wie hier, eine Lichtquelle hoher Intensität verwendet, ist dieses experimentelle Resultat wiederum auch im Wellenbild des Lichts erklärbar, wenn man die Projektionen der orthogonal polarisierten Teilstrahlen auf die Polarisationsachse des vierten Filters betrachtet. Verwendet man eine Einzelphotonenquelle – was im schulischen Rahmen allerdings unpraktikabel und schwer realisierbar ist – wird eine genuin quantenmechanische Betrachtung unausweichlich. Eine detaillierte Diskussion des Experiments im Formalismus der Quantenmechanik findet sich bei David Ellerman [10].

Vom experimentellen Standpunkt aus handelt es sich beim Quantenradierer um ein Mach-Zehnder-Interferometer, das um einige Polarisationsfilter erweitert wird. Daher wurde ein zusätzlicher Halter entwickelt, der sich aus fünf gedruckten Einzelteilen zusammensetzt (siehe Abbildung 4a): Einer unteren Basis, einem zweiteiligen drehbaren Filterhalter, in den ein Stück linearer Polarisationsfilterfolie der Abmessungen $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ [11] eingesetzt wird, einem oberen Halter, der den drehbaren Filterhalter aufnimmt sowie einer separaten Skala. Die untere Basis enthält zudem eine Aussparung, die eine Mutter für die spätere Arretierung aufnimmt.

Zusammenbau der Halter sowie Aufbau und Justage des Experiments sind zwar nicht schwierig, aber deutlich aufwändiger als beim Michelson-Interferometer. Daher sei auf eine detaillierte Beschreibung an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf [2] verwiesen, wo diese Informationen zusammen mit den erforderlichen .stl-Dateien abgerufen werden können.

4. Datenerfassung mit Arduino Uno und Microsoft Datastreamer

Michelson-Interferometer, die als Lehrmittel erhältlich sind, weisen zumeist einen feinmechanisch verstellbaren Spiegel auf, der mittels einer Mikrometerschraube verfahren werden kann. Dies kann wahlweise dazu genutzt werden, die Verschiebung des Spiegels bei bekannter Wellenlänge des Lasers zu bestimmen oder umgekehrt die Wellenlänge des Laserlichtes bei bekannter Verschiebung zu berechnen.

Um ein vergleichbares Experiment mit den selbstgedruckten Komponenten durchführen zu können und die Verschiebung des Interferenzmusters auch quantitativ auswerten zu können, wurden zwei weitere Halter entwickelt, ein piezoelementer Spiegel (siehe Abbildung 4b) und ein Halter für ein Fotowiderstandsmodul (siehe Abbildung 4c). Der piezoelementer Spiegel ersetzt hierbei die Feinmechanik und ermöglicht, den Spiegel kleinschrittig durch Anlegen einer Spannung zu verfahren; der Halter für den Fotowiderstand ersetzt den Schirm und macht aus einem qualitativen Experiment, bei dem ein Interferenzmuster auf einem Schirm beobachtet wird, ein quantitatives Experiment, bei dem die am Fotowiderstand abfallende Spannung in Abhängigkeit von anderen Größen studiert werden kann.

Vom Aufbau ähnelt der piezoelementer Spiegel dem einfachen Spiegel-Halter mit dem Unterschied, dass der Spiegel nicht

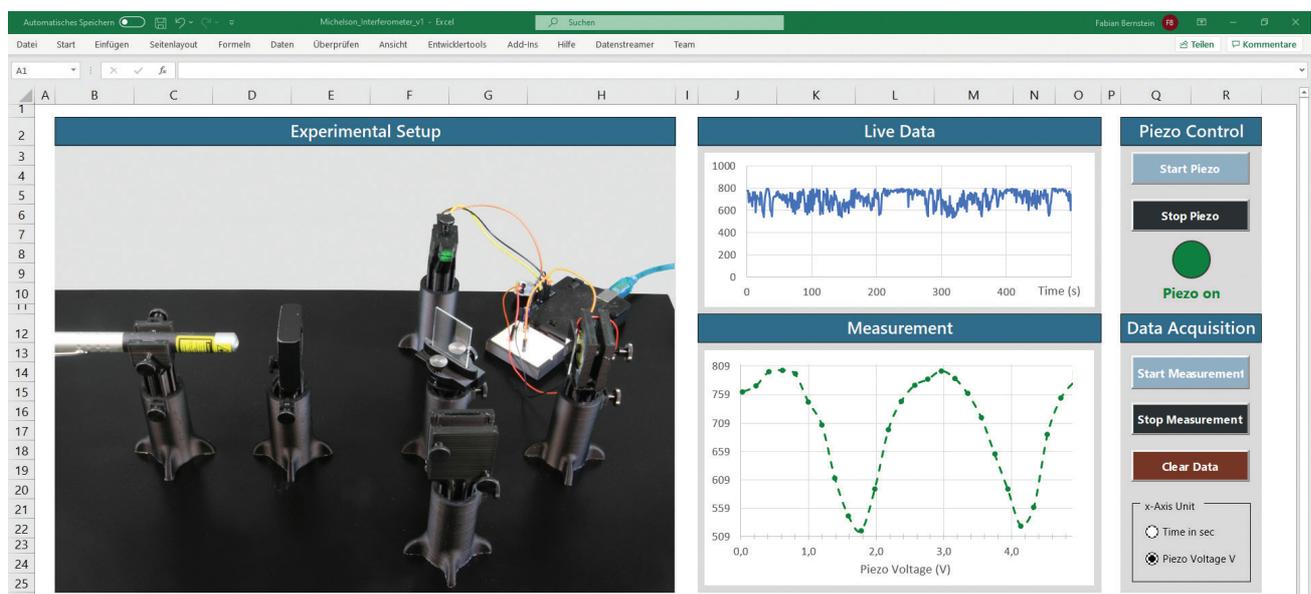


Abbildung 5: Interaktives Excel-Arbeitsblatt zum quantitativen Michelson-Interferometer. Experimenteller Aufbau links.

direkt auf dem 3D-Halter angebracht wird. Stattdessen wird ein Piezolausprecher mit Sekundenkleber auf dem 3D-Halter aufgeklebt, auf den seinerseits ein Abstandshalter geklebt wird. Der Spiegel wird dann auf diesem Abstandshalter mit Sekundenkleber befestigt. Durch diese Vorgehensweise wird eine bewegliche Lagerung des Spiegels erreicht: Piezokristalle verformen sich, wenn eine Spannung angelegt wird. Dies wird hier ausgenutzt und ermöglicht, die Position des Spiegels im Nanometerbereich zu verändern [12].

Die Halterung für den Fotowiderstand ist für ein Standard-Fotowiderstandsmodul des Arduino Mikrocontrollers ausgelegt [13]. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass das Modul weit verbreitet und leicht erhältlich ist, die technischen Spezifikationen des Fotowiderstandes wohldefiniert sind und eine Verbindung mit dem Arduino Uno-Mikrocontroller einfach durch Steckverbindungen erfolgen kann. Dem Arduino kommt in dem Aufbau eine doppelte Funktion zu: einerseits versorgt er den piezogehalterten Spiegel mit einer veränderlichen Spannung und verfährt ihn hierdurch, andererseits dient er dazu, die Sensordaten des Fotowiderstands auszulesen und an den Computer weiterzugeben.

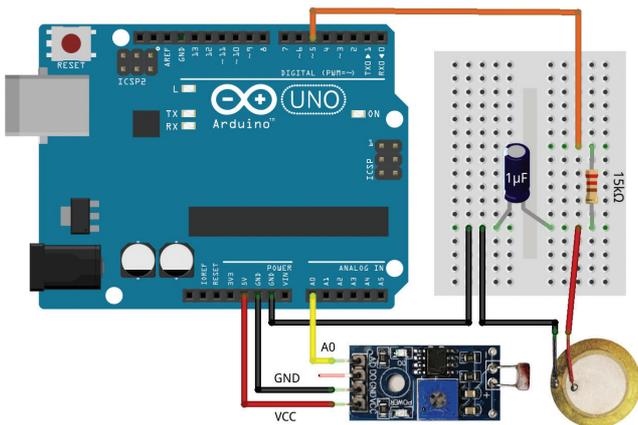


Abbildung 6: Schaltplan zum Auslesen des Fotowiderstands und zur Ansteuerung des Piezo

Der vollständige Aufbau ist in Abbildung 5 links zu sehen, der Schaltplan für Arduino, Piezo und Fotowiderstand in Abbildung 6. Um den piezogehalterten Spiegel anzusteuern, ist zusätzlich eine kleine Schaltung (ein Tiefpassfilter) erforderlich, da der Arduino Uno mangels Digital-Analog-Wandlers keine kontinuierlichen Spannungswerte zwischen 0 V und +5 V ausgeben kann.

Der Vorteil des Arduino Uno besteht – neben seiner universellen Verfügbarkeit – teils darin, dass eine Vielzahl von standardisierten und kostengünstigen Sensoren verfügbar ist, vor allem aber darin, dass Microsoft im Rahmen seiner „Hacking STEM“-Initiative eine native Schnittstelle in Microsoft Excel zur Verfügung stellt, die die unmittelbare Kommunikation zwischen Arduino und Excel erlaubt

[14]. Diese „Datastreamer“ genannte Schnittstelle kann im Menüpunkt Datei | Optionen | Add-Ins unter „Verwalten: COM-Add-Ins“ mit „Los...“ aktiviert werden, wozu dann im nächsten Fenster ein Haken bei „Microsoft Datastreamer for Excel“ gesetzt und dann mit „Ok“ bestätigt wird. In Excel wird dann eine zusätzliche Multifunktionsleiste „Datastreamer“ eingeblendet. Für die Entwicklung eigener Experimente stellt Microsoft die Vorlage eines Arduino-Sketches zur Verfügung. Diese Vorlage wurde für die hier vorliegenden Zwecke angepasst und kann zusammen mit dem interaktiven Excel-Worksheet auf der S’CoolLAB-Website [2] heruntergeladen werden. Bevor das Experiment genutzt werden kann, ist dieser Arduino-Sketch auf den Arduino mithilfe der Arduino-IDE hochzuladen.

Das interaktive Excel-Arbeitsblatt ist in Abbildung 5 abgebildet. Die Live-Sensordaten des Fotowiderstands werden unter „Live Data“ ständig aktualisiert. Mit den Schaltflächen „Start Piezo“ und „Stop Piezo“ kann die Spannungsausgabe an den Piezo gesteuert werden; die Spannung wird dabei in kleinen Schritten von 0 auf 5 V erhöht und dann auf 0 V zurückgesetzt („Sägezahn-Spannung“). „Start Measurement“ und „Stop Measurement“ erlauben, eine Messung aus den Live-Daten aufzuzeichnen. Die grafische Ausgabe des Fotowiderstandswertes kann sowohl über der Zeit als auch über der Spannung, die am Piezo anliegt, erfolgen. Dies ermöglicht, die Verschiebung des Spiegels in Nanometer pro Volt aus den Daten zu berechnen.

5. Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Experimente zeigen exemplarisch, wie Experimente zur modernen Physik mithilfe des 3D-Drucks für den schulischen Unterricht aufbereitet werden können. Sie haben das Potenzial, die Unterrichtsgestaltung positiv zu beeinflussen und die Entscheidung über die jeweils einzusetzende Unterrichtsmethode von den äußeren Rahmenbedingungen zu didaktischen Erwägungen zurückzuverlagern. In Verbindung mit einem mikrocontroller-gestützten System zur Datenerfassung lassen sich so anregende und leistungsfähige Experimente entwickeln, die auf die Bedürfnisse schulischen Unterrichts zugeschnitten sind.

Fabian Bernstein ist Physiklehrer und Physiker und war zuletzt an der Internatsschule Schloss Hansenberg, Hessen, tätig.

Derzeit entwickelt er am CERN im Rahmen seiner Promotion 3D-gedruckte Experimente für den Unterrichtseinsatz.

Dr. Sascha Schmeling ist studierter Physiklehrer und Hochenergiephysiker und leitet das Physics Education Team am CERN in Genf.

Prof. Dr. Thomas Wilhelm war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik und ist Professor für Physikdidaktik an der Goethe-Universität Frankfurt am Main.

Literatur

- [1] <http://psi.physik.kit.edu/42.php>
- [2] <https://cern.ch/laserlab3d>
- [3] Grüner Laserpointer, z. B.: <https://www.conrad.de/de/p/basetech-laserpointer-bt-lp100g-reichweite-max-im-freifeld-100-m-laserfarbegruen-1713919.html>
- [4] Neodymmagnet 15 mm × 15 mm × 8 mm, z. B.: <https://www.supermagnete.de/quadmagnete-neodym/quadmagnet-15mm-15mm-8mm-Q-15-15-08-N>
- [5] Vorderflächenspiegel 30 mm × 20 mm × 1 mm, z. B.: <https://astromedia.de/Vorderflaechen-Glasspiegel-30x20mm>
- [6] Strahlteiler 40 mm × 30 mm × 1 mm, z. B.: <https://astromedia.de/Teildurchlaessiger-Vorderflaechen-Glasspiegel-30x40mm>
- [7] Bikonvexe Linse $\varnothing = 25$ mm, $f = 45$ mm, z. B.: <https://www.skarabaeus-art.ch/produkt/einfachlinse-450-mm-%e2%88%85-250-mm/>
- [8] <http://www.bildungsplaene-bw.de/Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/PH/IK/11-12-BF-QUANTEN/06>
- [9] Feynman, R. P., Sands, M., Leighton, R. B., Feynman-Vorlesungen über Physik 5. Quantenmechanik, 6. Aufl. . 2015, Berlin, Boston: De Gruyter (O), S. 1-16.
- [10] Ellerman, D. , Why delayed choice experiments do Not imply retrocausality. Quantum Stud.: Math. Found., 2015, 2(2), S. 183–199.
- [11] Lineare Polarisationsfolie, z. B.: <https://www.3d-foto-shop.de/pi17/pd128.htm>
- [12] Lloyd, S., Paetkau, M., Characterization of a Piezoelectric Buzzer Using a Michelson Interferometer. The Physics Teacher, 2010, 48(9), S. 610–611.
- [13] z. B.: https://www.amazon.de/dp/B07DP1YM5X/ref=cm_sw_em_r_mt_dp_-WhOFbENZJBVT?_encoding=UTF8&psc=1
- [14] <https://www.microsoft.com/en-us/education/education-workshop>

Da irrt so manches Physikbuch (Teil 4)

Rainer Pippig

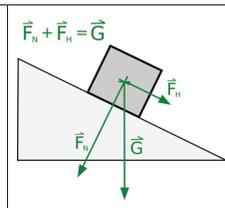
Einleitung Die schiefe Ebene

1. Eine kleine Auswahl der fehlerhaften Texte:

1. „Wird ein Körper auf eine schiefe Ebene gestellt, so wird er aufgrund seiner Gewichtskraft F_G entlang der schiefen Ebene hangabwärts beschleunigt. Dies lässt sich erklären, wenn man die Gewichtskraft in zwei Teilkraften (entlang der schiefen Ebene und senkrecht zu ihr) zerlegt denkt.“ (s. [1]).
2. „Die Schwerkraft muss in zwei **Teilkraften (Komponenten)** zerlegt werden, denn es passieren nun *zwei Dinge*: 1. die Kugel wird den Hang hinunterrollen. Eine Teilkraft wirkt also den Hang abwärts - man nennt sie die **Hangabtriebskraft F_H** . Zweitens drückt die Kugel nach wie vor (senkrecht) auf die Unterlage. Man nennt diese Teilkraft die **Normalkraft F_N** (normal = senkrecht auf).“ (s. [2])
3. „Mit einer „Schiefen Ebene“ bezeichnet man in der Physik eine Ebene, die unter einem Winkel gegen die Horizontale geneigt ist. Hier ist es sinnvoll die vertikale Gewichtskraft G in die Hangabtriebskraft F_H parallel zur Ebene und in die Normalkraft F_N senkrecht dazu zu zerlegen. (s. [3])

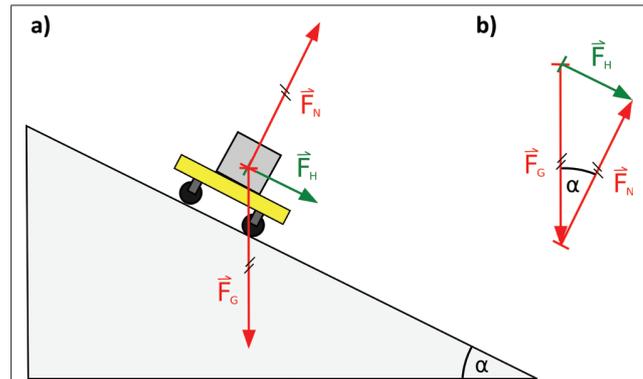
2. Warum es falsch sein muss

Ein Gegenstand wird nach dem Gesetz von Newton in diejenige Richtung beschleunigt, in die die resultierende Kraft zeigt. Diese ist die Summe aller auf den Gegenstand wirkenden Kräfte. Die Vektorsumme der hier eingezeichneten Kräfte ergibt aber nicht die Hangabtriebskraft, sondern die Gewichtskraft, die gerade zerlegt wurde.



3. Wo steckt der Fehler?

Geht man vernünftigerweise davon aus, dass die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten für die Hangabtriebskraft und die Normalkraft wirken, müsste der Gegenstand nicht nur in Richtung der Hangabtriebskraft, sondern genauso in Richtung der Normalkraft beschleunigt werden.



Da in Richtung der Unterlage keine Beschleunigung erfolgt, muss eine exakt gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft zur Normalkraft von der Unterlage auf den Gegenstand wirken (Kräftegleichgewicht senkrecht zur Unterlage). Auf den Gegenstand wirken also in Wahrheit zwei Kräfte: Diese Gegenkraft zur Normalkraft und die Gewichtskraft.

Die Vektorsumme dieser beiden Kräfte ergibt jetzt die Hangabtriebskraft als Richtung der Beschleunigung des Gegenstands.

4. Vorschlag, wie es richtig heißen könnte

Auf einer Schiefen Ebene wirken auf einen Gegenstand die Gewichtskraft und die Gegenkraft zur Normalkraft auf die Unterlage. Der resultierende Summenvektor heißt Hangabtriebskraft und sorgt für die Beschleunigung des Gegenstands.

Viel Spaß beim Nachdenken und Anwenden!

Dr. Rainer Pippig Der Verfasser arbeitete seit 1976 als Gymnasiallehrer für Physik, als Ausbilder für Referendare am Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der LMU München (wo er auch promoviert hat), als Seminarlehrer für Physik am Wittelsbacher-Gymnasium in München sowie bis 2012 als Schulleiter des Gymnasiums Oberhaching. Es ist Autor zahlreicher Schulbücher bei verschiedenen Verlagen wie Oldenbourg und Westermann-Schroedel.

Literatur

- [1] <https://www.grund-wissen.de/physik/mechanik/kraftwandler-und-getriebe/schiefe-ebene.html>
- [2] https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/mechanik_2/bewegung/schiefe_ebene_kraefte.htm
- [3] <https://www.br.de/telekolleg/faecher/physik/trimester2/telekolleg-physik-07-kraft-100.html>

Bild der Wissenschaft

Simon Plätzer

Das Higgs-Teilchen ist ja seit seiner Entdeckung am LHC nicht nur in Physikkreisen bekannt. Die Entdeckung war und ist jedoch nicht der Endpunkt der Entwicklung sondern der Beginn für viele neue Forschungsfragen. Eine davon wurde nun in einer Zusammenarbeit der Fakultät für Physik, der ÖAW und der Universität Graz beantwortet. In ihrem Paper „Constraining the Higgs boson valence contribution in the proton“ [1] präsentieren Sie die eine Erweiterung des bisherigen Modells zur Beschreibung des inneren Aufbaus des Protons.

Ob die Vorhersagen dieses Modells auch im Experiment bestätigt werden können ist noch offen, da dafür der bestehende LHC am CERN noch ausgebaut werden müsste.

Simon Plätzer *Universität Wien, Fakultät für Physik*

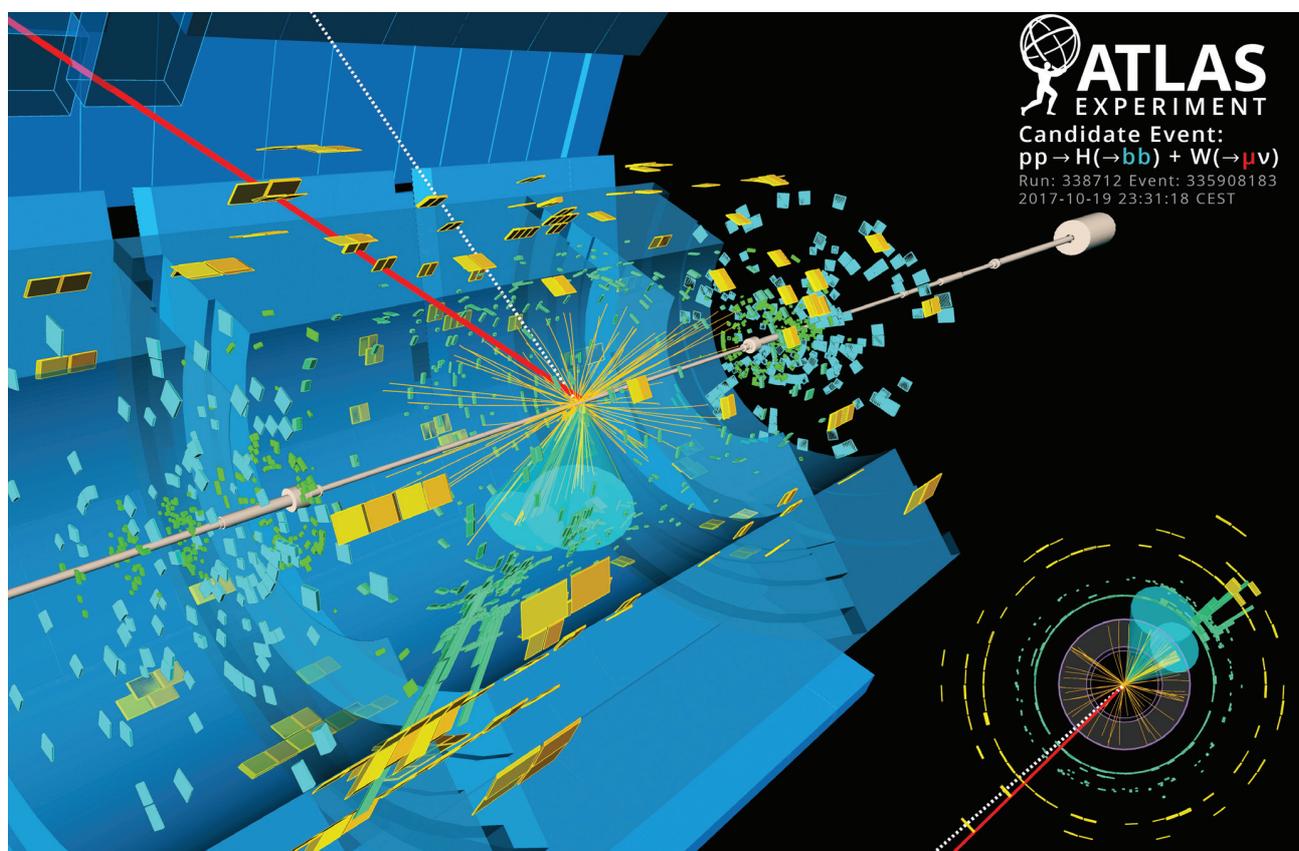


Abbildung 1: Aufnahme eines potentiellen Zerfalls eines Higgsteilchens am CERN. ©Atlas.cern

Literatur

- [1] S. Fembach, L. Lechner, A. Maas, S. Plätzer, R. Schöfbeck, „Constraining the Higgs boson valence contribution in the proton“, *Physical Review D*, Juni 2020, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.101.114018>

Rezension zum Heft

Physik unterrichten. Ein praktischer Leitfaden für Berufseinsteiger. Hrsg.: Michael Sach, Bernhard Sieve, Frank Hilker. (2020). Friedrich Verlag GmbH, Hannover

Marianne Korner

Der Sonderband Physik unterrichten aus dem Friedrich Verlag ist als praktischer Leitfaden konzipiert, um Quer-, aber auch Berufseinsteiger*innen in das Fach Physik zu unterstützen. Inhaltlich wird der Bogen von ersten Planungsschritten für den Unterricht bis zu einzelnen Stundenplanungen und von Aufgaben, die Lernprozesse strukturieren, bis hin zur Leistungsfeststellung gespannt. Auch zur Evaluation des eigenen Unterrichts werden Anregungen gegeben.

Der Band handelt im ersten Teil *Unterrichtsplanung* ab und im zweiten Teil werden *Bausteine des Physikunterrichts* geliefert, jeweils in Form von einzelnen, abgeschlossenen Artikeln. Laut Klappentext ist es ein Ziel der Herausgeber, eine Brücke zwischen forschungsbasierter Physikdidaktik und bewährten schulpraktischen Erfahrungen zu schlagen. Das gelingt in Ansätzen recht gut, indem Schulpraktiker*innen (wobei hier nur einmal eine Frau beteiligt ist – vielleicht ein Grund, warum die Sprache über weite Teile nicht gegendert ist?) und Wissenschaftler*innen in den Artikeln zu Wort kommen. Es könnte noch besser sein, wenn nicht die *Bausteine des Physikunterrichts* fast ausschließlich Physikdidaktiker*innen vorbehalten wären und die Unterrichtsplanung den Praktiker*innen. Wünschenswert wäre hier eine bessere Verzahnung – und nicht nur ein Nebeneinander – der Autorenschaften und somit der Blickwinkel gewesen.

Vom Aufbau her ist das Heft übersichtlich gestaltet. Besonders gefallen mir die blauen Boxen mit geballter *Information – sei es zur Didaktischen Rekonstruktion oder Warum Diagnostik wichtig ist* –, die in die Artikel hineinverwoben sind. Ebenso sprechen mich die Boxen → Zum Weiterlesen am Ende einiger Artikel an, die durch ihre Literaturangaben ein Qualitätsmerkmal darstellen. Um die praktische Komponente abzudecken, gibt es Artikel mit konkreten Planungsbeispielen und Downloadmaterial (→ *Zum Ausprobieren*). Die Lehrpläne, Kompetenzraster und Kontexte der Planungsbeispiele hingegen sind aus meiner Sicht sehr auf den deutschen Markt abgestimmt – ich musste zum Beispiel nachschlagen, wer Betty Heidler ist – eine deutsche Leichtathletin, deren Wurfleistungen mit dem Hammer in diesem Heft als Kontext für den Mechanikunterricht herangezogen werden.

Inhaltlich finde ich die Auswahl an Themen, die in diesem Heft angesprochen werden, gelungen. Sie sind breit gestreut und sprechen die wesentlichen Punkte an, die man bei



Unterrichtsplanung berücksichtigen sollte. Im Detail mag man anmerken, dass die Rolle der Schulbücher für die Planung und Rekonstruktion von Unterricht vielleicht zu prominent dargestellt wird oder dass das fast schon klassische Thema *Experimente im Physikunterricht* sich eher darin erschöpft, wie man Experimente (praktisch) umsetzt und nicht, wie man sie lernwirksam in den Physikunterricht einbettet. Für die Praxis sehr geeignet halte ich den Artikel über Selbstreflexion und Evaluation, da das ein Mittel zur Weiterentwicklung von Unterricht darstellt. Ebenso sind die kommentierten Stundenentwürfe im Sinne eines Scaffoldings interessant zu lesen, auch wenn in den Kommentaren einerseits eine reflektiertere Metaebene wünschenswert wäre, andererseits die Verbesserungsvorschläge dann doch wieder vage bleiben.

Insgesamt bietet dieses Heft breit gestreute Ansatzpunkte, wie man Physikunterricht anpacken kann. Für Quereinsteiger stellt das allerdings viel Information auf einmal dar und es scheint schwierig, hier Prioritäten zu setzen. Eine fundierte physikdidaktische Ausbildung ersetzt das Heft nicht, aber es liefert ideenreiche Ergänzungen und Auffrischungen.

Marianne Korner *Universität Wien; Fakultät für Physik; Experimentelle Grundausbildung und Hochschuldidaktik*

Fortbildungswoche 22.2.2021 bis 24.2.2021

Liebe Vereinsmitglieder, sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

wir alle sind seit dem Frühjahr intensiv mit den Auswirkungen der Covid19-Pandemie beschäftigt. Sie stellt unser Leben auf dem Kopf und alles ist anders als gewohnt. Das gilt leider auch für die Fortbildungswoche. Seit Jahren haben wir schon überlegt, wie wir den runden Geburtstag der Fortbildungswoche feiern könnten. Das wird nun 2021 nicht so klappen.

Wir haben uns aber dafür entschieden, die Fortbildungswoche nicht einfach abzusagen. Stattdessen haben wir ein konzentriertes Programm an Online-Veranstaltungen für drei Nachmittage vorbereitet. Schwerpunkt dabei war Dinge zu

finden, die normalerweise nicht so einfach zugänglich sind. Wir freuen uns sehr darüber, dass uns das auch ganz gut gelungen ist. Wir präsentieren Ihnen also anbei das Programm der 74a-ten Fortbildungswoche. Das Angebot wird über Zoom erfolgen. Den Link erhalten Sie direkt zugesandt, bitte melden Sie sich dazu bei der PH Wien für die Veranstaltung an. Menschen, die sich nicht über PH-Online anmelden können, schicken bitte ein Mail an den Vorstand.

Ich danke den Unterstützern der Fortbildungswoche, besonders der PH Wien.

Viel Spaß auf der Fortbildungswoche
Martin Hopf, Obmann

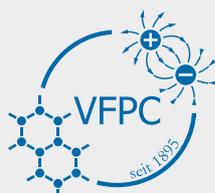
PLUS LUCIS Fortbildungswoche 2021 Online-Angebote, Teilnahme per ZOOM.

Montag, 22.02.2021	
14:00-14:15	Begrüßung und Eröffnung Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf, Obmann
14:15-15:15	Chemie und Physik der Verdauung – soft matter in der Mund-Magen-Darmpassage Prof. Dr. Vilgis, MPI für Polymerforschung, Mainz
15:30-16:30	Quantenexperimente ganz groß. Oder: Wie sieht eigentlich das Gravitationsfeld eines Quantensystems aus? Univ.-Prof. Dr. Markus Aspelmeyer, Universität Wien
17:00-18:00	Besuch am Very Large Telescope der ESO auf Cerro Paranal in Chile Dr. Peter Habison und Kollegen, ESO
18:00-19:30	Online Escape-Room Louisa Morris, Florian Budimaier und das Team der Fortbildungswoche

Dienstag, 23.02.2021	
14:00-15:00	Wie wird eine Kläranlage zum Ökokraftwerk? Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf, Obmann
15:00-16:00	Aktuelle Ergebnisse zur Covid19-Pandemie Univ.-Prof. Dr. Franz Allerberger, AGES
16:30-17:30	Demos to Make You Wonder Paul Nugent, Science on Stage

Mittwoch, 24.02.2021	
14:00-15:00	Interaktive Bildschirmexperimente: Von den Anfängen bis zum Seamless Smart Lab Dr. Jürgen Kirstein, FU Berlin
15:00-16:00	Virtueller Besuch in der VOEST Team der VOEST
16:30-17:30	Virtueller Besuch am CERN Dr. Gerfried Wiener und Kolleg*innen, CERN

In den Pausen besteht die Möglichkeit, an Produktpräsentationen unserer Sponsoren teilzunehmen.



Neues aus dem Verein

Bericht aus der Generalversammlung

Die jährliche Generalversammlung des Vereins fand am Donnerstag 19.11.2020 online via ZOOM statt. Zunächst berichtete der Obmann von einer gelungenen 74. Fortbildungswoche und der Entscheidung im Februar 2021 keine reguläre Fortbildungswoche anzubieten, da das Risiko im Zeichen der Pandemie zu groß ist diese dann kurzfristig absagen zu müssen. Als Alternative gibt es eine Fortbildungswoche die Online stattfinden wird. Das Programm dazu finden Sie im Heft.

Nach dem Obmann berichtet die Kassierin aus dem abgelaufenen Bilanzjahr. Auch wenn der Verein im Vereinsjahr ein leichtes Minus erwirtschaftet hat, liegt dies immer noch im prognostizierten Rahmen.

Der neugewählte, personengleiche Vorstand stellte den Antrag die Mitgliedsbeiträge zu verändern. Die Unterteilung zwischen Studierenden, Pensionären und regulären Mitgliedern soll aufgehoben werden. Der Mitgliedsbeitrag beträgt damit für alle Mitglieder 20€. Dieser Vorschlag wird einstimmig angenommen

Ausschreibung des 5. Werner Rentzsch Fotowettbewerb

Wir möchten nochmal auf den Fotowettbewerb des Vereins hinweisen. Wir suchen das schönste Foto eines selbstaushilfenden Experiments! Auf der Homepage (www.pluslucis.org) finden sich alle Informationen zum Ablauf und den Teilnahmebedingungen, sowie die Gewinnerfotos der letzten Jahre als Inspiration.

Wir freuen uns auf viele spannende Fotos und wünschen viel Freude beim Experimentieren und Fotografieren.

Österreichische Post AG
SP 17Z041123 S

Verein zur Förderung des physikalischen
und chemischen Unterrichts,
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien

DVR 0558567
VRN 668472729