



	Experiment	Haptisches Modell
Lehrer/in	<u>Szenario 1:</u> Die Lehrkraft setzt ein Experiment mithilfe des 3D-Drucks um, indem benötigtes Material vor der Unterrichtsstunde entwickelt und gedruckt wird.	<u>Szenario 2:</u> Die Lehrkraft entwickelt ein haptisches Modell mithilfe des 3D-Drucks und druckt es vor der Unterrichtsstunde.
Schüler/innen	<u>Szenario 3:</u> Die Schüler/innen konzipieren im Unterricht mögliche Experimente und erstellen benötigte Materialien individuell mit dem 3D-Druck.	<u>Szenario 4:</u> Die Schüler/innen entwickeln individuelle haptische Modelle mithilfe des 3D-Drucks im Unterricht.

Tab. 1. Übersicht zu den Einsatzszenarien der 3D-Druck-Technologie im Physikunterricht.

große Potenziale zur Förderung von Lehr-Lern-Prozessen. Im Physikunterricht scheint der Einsatz der Technologie insbesondere zur Entwicklung oder Veränderung von Experimenten und haptischen Modellen sinnvoll zu sein. Der 3D-Druck kann hier die Lehr-Lern-Prozesse bereits auf indirekte Weise fördern, indem günstiges Experimentier- und Anschauungsmaterial in Klassenstärke bereitgestellt werden kann.

Der Prozess der Modell- oder Experimententwicklung kann entweder von der Lehrperson oder von den Lernenden durchgeführt werden (vgl. WITZKE & HEITZER, 2019). Damit entstehen insbesondere vier Einsatzszenarien der 3D-Druck-Technologie im Physikunterricht, die in Tabelle 1 erläutert werden. Die in der Tabelle getroffenen Unterscheidungen sind insbesondere aus Sicht der Astronomie relevant, da hier experimentelle Zugänge überwiegend nicht möglich sind. Diesem Umstand wird hier durch die Gestaltung von haptischen Modellen Rechnung getragen.

Der Einsatz der 3D-Druck-Technologie im Physikunterricht war bereits Gegenstand in verschiedenen Publikationen. Dabei lassen sich die Produkte auf die drei Kategorien (1) haptische Modelle (z. B. LMU München, o. J.; HEUSLER, 2014), (2) eigener und ggf. neuartige Experimente (z. B. HEUSLER, 2014; BERNSTEIN et al., 2018; SCHÜRMAN, 2020) sowie (3) Ersatzteile unterteilen (vgl. LMU München, o. J.).

Bereits etablierte Experimente lassen sich mit dem 3D-Druck auf vielfältige Weise neu gestalten und damit kostengünstiger realisieren oder mit erweiterter Funktionalität ausstatten. Ein Rechenbeispiel: Die Anschaffung 10 Kundtscher Röhren schlägt mit etwa 800 € zu Buche, der Materialbedarf beim 3D-Druck bewegt sich dagegen im Bereich weniger Euro. Dazu kommen die einmaligen Anschaffungskosten, die für zweckdienliche Geräte bereits bei unter 200 € beginnen. So wird es beispielsweise möglich, Experimente an der Luftkissenfahrbahn durch Schülerexperimente zu ersetzen (SCHLUMMER, 2019) oder das verbreitete Kundtsche-Staubrohr in einer kostengünstigen und gleichzeitig – durch den Einsatz von Ultraschalltechnik – unhörbaren Variante zu realisieren (HAVERKAMP et al., 2021).

Die Herstellung von Ersatzteilen oder Zubehör für den Einsatz im Physikunterricht erscheint besonders attraktiv, wenn man die typischerweise hohen Kosten von Lehrmitteln betrachtet. Die flexiblen Möglichkeiten, für Bauteile das jeweils optimale Verhältnis von Gewicht und mechanischer Stabilität auszuwählen, lassen hier reichhaltige Anwendungen möglich erscheinen.

Dieser ausschnittsweise Literaturüberblick deckt einen wesentlichen Unterschied zwischen den Einsatzszenarien des 3D-Drucks im Mathematik- und Physikunterricht auf: Während aus Sicht der Mathematik die prozessbezogenen Lernphasen adressiert werden, werden diese innerhalb des Physikunterrichts praktisch nicht angesprochen. Hier dominieren eindeutig die Szenarien 1 und 2, bei denen die Gestaltung und Herstellung des Materials in der Hand der Lehrkraft liegt.

Das Unterrichten astronomischer Inhalte mit ganz spezifischen didaktischen Herausforderungen einhergeht und somit auch beim Einsatz der 3D-Druck-Technologie unabhängige Wege beschreitet, schlägt sich auch in diesem Beitrag nieder, der in seinen Beispielen gerade auch den Prozesscharakter der Herstellung betont.

Untersuchungen zum 3D-Druck fokussierten sich bisher kaum auf das Themenfeld Astronomie im Physik- oder den reinen Astronomieunterricht. Dabei bieten sich gerade hier viele Anwendungsmöglichkeiten. Während Experimente in der Astronomie nur sehr selten stattfinden können, gehört die Arbeit mit haptischen Modellen genuin zu diesem Unterrichtsfach. So sind Modelle des Sonnensystems oder der Erde-Sonne-Mond-Konstellation fester Bestandteil der Sammlungen an Schulen. Mit Blick auf Material, welches individuell an die Lernvoraussetzungen der Schüler/innen angepasst werden kann, bieten die Szenarien 2 und 4 viele spannende Möglichkeiten, den Unterricht im Bereich der Astronomie individueller und tiefgreifender zu gestalten. In diesem Beitrag sollen einige schulpraktische Ideen aus der Astronomie erläutert werden. Dabei wird der Fokus auf das vierte Nutzungsszenario gelegt, also die Eigenentwicklung von haptischen Modellen bzw. deren Erstellung aus wissenschaftlichen Originaldaten durch die Lernenden im Unterricht, da diese Arbeitsform mit Blick auf die konstruktivistische und prozessbezogene Gestaltung von Lehr-Lern-Phasen nach Auffassung der Autoren den größten Mehrwert bietet. Hierzu werden drei konkrete Beispiele vorgestellt.

### 3 Haptische Modelle in astronomischen Kontexten

Modelle lassen sich einteilen in die Kategorien der theoretischen und gegenständlichen Modelle. Dabei existiert insbesondere in der Astronomie eine lange Tradition mathematisch komplexer und hochgenauer theoretischer Modelle, die sich über die griechische Antike hinaus in der Vergangenheit zurückver-

folgen lässt. Die Astronomie hatte stets zum Ziel, die beobachteten Phänomene zu beschreiben, Vorhersagen zu treffen (z. B. zu Sonnen- und Mondfinsternissen) und einen Beitrag zur Konstruktion eines übergreifenden Weltbildes zu leisten. Gleichzeitig blickt auch die Astronomiedidaktik auf eine lange Tradition der Entwicklung von Gerätschaften zur Veranschaulichung astronomischer Inhalte zurück, deren Einsatz explizit im Schulunterricht vorgesehen war. So gab es bereits Mitte des 19. Jahrhunderts käuflich zu erwerbende Modelle wie etwa eine drehbare Sternkarte oder eine Art Tellurium, mit dessen Hilfe die Ursache für die unterschiedlichen Höchststände der Sonne im Jahresverlauf veranschaulicht werden konnte (KRETZER, 2019).

Der Astronomieunterricht nutzt heute vor allem auch solche Modelle, die eine gegenständliche Repräsentation darstellen, etwa zur Beschaffenheit von Objekten (der Saturn mit seinem Ringsystem), Größen- und Abstandsverhältnissen (Erde-Mond-System) oder auch von solchen Bewegungsabläufen und Konstellationen, die etwa die veränderliche Lichtgestalt des Mondes hervorrufen. Diese Modelle sollen vorrangig helfen, die kaum vorstellbaren Größenverhältnisse begrifflich zu machen oder die Tücken bei der Vermittlung der Bewegungen im dreidimensionalen Raum zu umschiffen.

Basierend auf den vorstehenden Ausführungen soll in diesem Beitrag ein Ausschnitt aus den Möglichkeiten für den Einsatz des 3D-Drucks im Astronomieunterricht aufgegriffen und vorgestellt werden. Im ersten Beispiel wird dabei aufgezeigt, wie der Prozess der Erstellung eines 3D-Modells das Vorstellungsvermögen der Größenverhältnisse im Sonnensystem fördern kann. Das zweite Beispiel demonstriert, in welchem Maße bereits heute wissenschaftliche Originaldaten aus Raumfahrtmissionen für die Erstellung eigener 3D-Modelle genutzt werden können. Der Fokus liegt hier auf dem Umgang und der Verarbeitung des Datenmaterials. Im dritten Beispiel wird dazu eine Möglichkeit vorgestellt, das Modell eines Marsvulkans auf einfachste Weise zu generieren – hier steht das Produkt selbst im Vordergrund.

#### 4 Beispiel 1: Planetenmodelle

Planetenmodelle gehören zu den klassischen haptischen Modellen des Astronomieunterrichts. Häufig zeigen sie die Umlaufbahnen der Planeten und deren Abstände von der Sonne. So können die Schüler/innen lernen, dass sich die acht Planeten des Sonnensystems näherungsweise auf Kreisbahnen um die Sonne bewegen und sich die Größe dieser Kreisbahnen bei den einzelnen Planeten unterscheidet. Die tatsächlichen Größen der Objekte bzw. das Verhältnis der Größen zueinander wird allerdings aus praktischen Gründen in den meisten Fällen nicht richtig dargestellt, denn der Durchmesser des größten Planeten unseres Sonnensystems Jupiter ist mit 139.822 km bereits mehr als 28-mal so groß wie der des kleinsten Planeten Merkur (4.879 km). Diese enormen Größenunterschiede lassen sich auch an dem in Abbildung 1 zu sehenden Outdoor-Planetenmodell erahnen.



Abb. 1. Veranschaulichung der Planeten- und Kleinkörperdurchmesser in der Stadt Siegen.

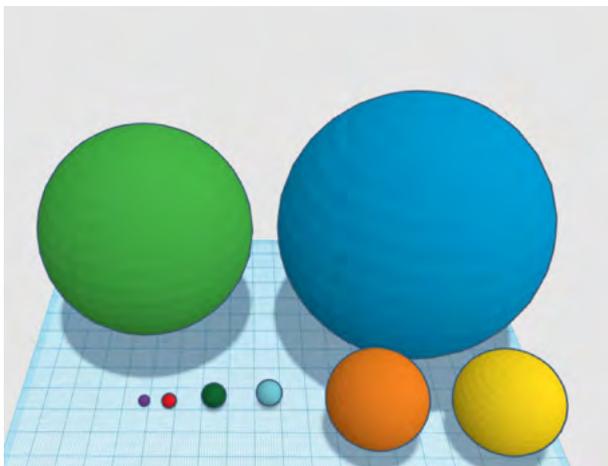


Abb. 2. Modelle der Planeten unseres Sonnensystems im CAD-Programm Tinkercad™ (links) sowie mit einem 3D-Drucker ausgedruckt (rechts).

**Aufgabenstellung:**

Erstelle maßstäbliche Modelle der acht Planeten unseres Sonnensystems mithilfe von Tinkercad™. Mache dir dabei auch Gedanken über die folgenden Fragen:

- a) Wie groß müssen die einzelnen Modelle sein, damit du sie in einem Durchgang drucken kannst? (Tipp: Verwende ein Tabellenkalkulationsprogramm für deine Berechnungen)
- b) In welchem Maßstab stehen dann jeweils die Modelle und die Planeten?
- c) Welchen Durchmesser hätte ein Modell der Sonne im gleichen Maßstab? (Durchmesser der Sonne: 1.392.700 km)
- d) Verwende einen Sitzball als Modell für die Sonne. Wie groß müssen die Durchmesser der einzelnen Planetenmodelle nun gewählt werden?



Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun
4.879 km	12.104 km	12.742 km	6.779 km	139.822 km	116.464 km	50.724 km	49.244 km

**Lösung:**

Die Werte sind abhängig von der Größe des zur Verfügung stehenden 3D-Druckers. Für die meisten Drucker eignet es sich, wenn das Modell des Jupiters einen Durchmesser von 10 cm hat und der Merkur einen Durchmesser von 3,5 mm.

Mit den obigen Werten ergibt sich ein Verhältnis von 1:1.398.220.000

Das Modell der Sonne hätte bei den obigen Werten einen Durchmesser von 99,6 cm.

Sitzbälle haben einen Durchmesser zwischen 45 und 85 cm. Gehen wir von 65 cm aus, erhalten wir ein Verhältnis von 1:2.142.615.385. Das Jupitermodell hätte dann einen Durchmesser von 6,53 cm während der Durchmesser des Merkurmodells 2,2 mm betragen würde.

**Kasten 1. Aufgabenstellung**

Die Entwicklung angemessener Vorstellungen von den Dimensionen und Verhältnissen der Größen im Universum gehört zu den zentralen Zielen des Astronomieunterrichts. So ist das Thema „Struktur des Sonnensystems“ ein typischer Inhalt der Astronomielehrpläne (KRAUS, 2015). Gefordert sind i. d. R. Kenntnisse zum räumlichen Aufbau (was auch rein qualitativ verstanden werden kann) und dazu, als Übergang zur quantitativen Beschreibung, die Erarbeitung der Astronomischen Einheit. Mithilfe des 3D-Drucks können Schüler/innen eigene maßstäbliche Modelle der Planeten unseres Sonnensystems entwickeln und sich auf diese Weise tiefgehend mit den Größenverhältnissen auseinandersetzen. Dabei können zum Beispiel die in Abbildung 2 zu sehenden Objekte entstehen. Das größte Objekt hat einen Durchmesser von etwa 10 cm, sodass alle Objekte in einem Durchgang gedruckt werden können.

Durch verschiedene weiterführende Fragen (siehe Aufgabenteil c und d in Kasten 1) können die Schüler/innen aufbauend auf ihren 3D-gedruckten Objekten die Vorstellungen von den Größenverhältnissen reflektieren oder auch die Größen der Planeten mit der Größe der Sonne in Beziehung setzen. Eine mögliche Aufgabenstellung ist im Kasten 1 zu sehen.

**5 Beispiel 2: Das Modell eines Mondkraters aus Originaldaten**

Die nachfolgenden zwei Beispiele zur Oberflächenstruktur von Planeten lassen sich gut an den aktuellen Kernlehrplan Sek I für Gymnasien in NRW an das „Inhaltsfeld 6: Sterne und Weltall“ anbinden. Hier werden explizit die „Möglichkeiten zur Informationsgewinnung über Objekte, die einer unmittelbaren Untersuchung nicht zugänglich sind“ (KLP, 2019, 17) angesprochen.

Die NASA stellt aufbereitete Daten diverser Missionen in ihrer Datenbank kostenfrei zur Verfügung, darunter auch die topografischen Informationen des Mondes, welche mit Hilfe des „Lunar Orbiter Laser Altimeter“ (LOLA) der Mondsonde „Lunar Reconnaissance Orbiter“ (LRO) aufgenommen wurden. Diese Daten können im Lunar Orbital Data Explorer (LODE) abgerufen

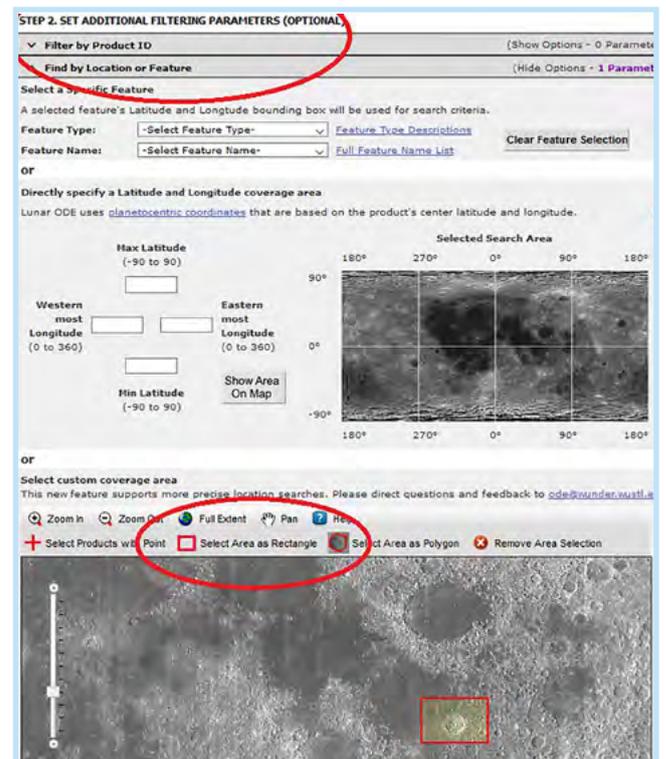


Abb. 3. LODE Suchmaske, Rechteckauswahl eines Mondkraters.

und so aufbereitet werden, dass sie als dreidimensionales Objekt dargestellt und für den 3D-Druck verwendet werden können (NASA, o. D.). Eine detaillierte bebilderte Anleitung stellen wir in der Online-Beilage bereit.

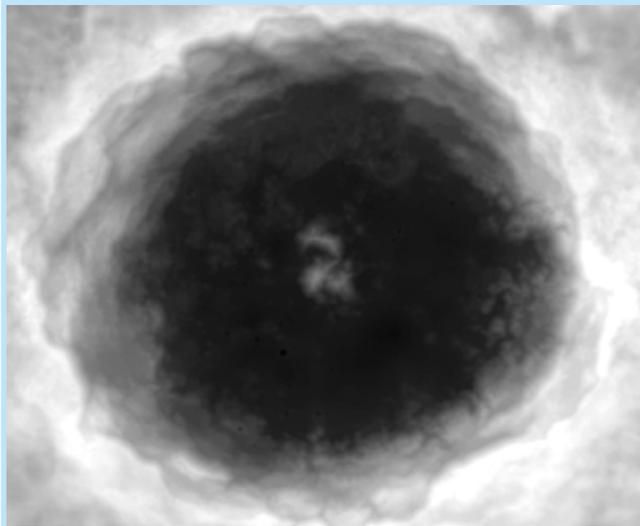


Abb. 4. Bildliche Darstellung der Höhendaten.

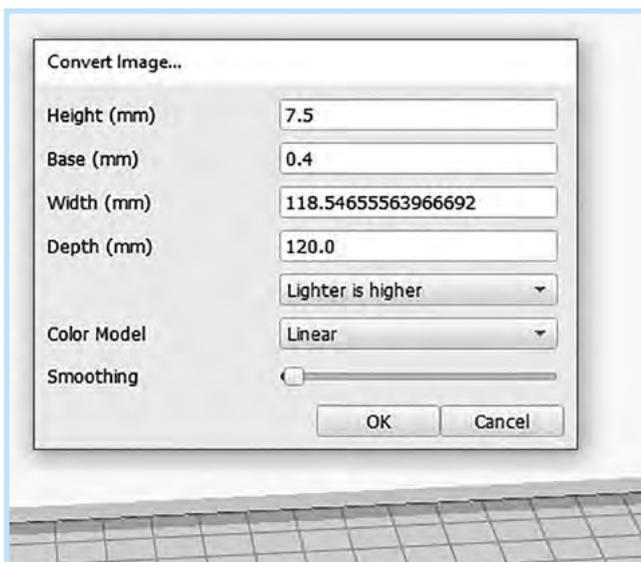


Abb. 5. Automatische Konvertierung des Bildes in ein 3D-Modell. Die Höhe wurde um den Faktor 3 vergrößert.

Die Schüler/innen werden einige Zeit benötigen, um sich auf der Homepage zurechtzufinden und an die benötigten Daten zu gelangen, da der LODE (Abb. 3) sehr umfangreich ist. Hier ist es möglich, eine Auswahl auf der Mondkarte zu treffen, oder nach konkreten Objekten wie einen Krater oder Gebirgszug zu suchen. Die gefilterten Ergebnisse erscheinen dann in einer Tabelle und können in einer Vorschau betrachtet werden. Im nächsten Schritt entscheiden die Schüler/innen, welcher Bildausschnitt das Objekt am besten wiedergibt und können diesen herunterladen (der genaue Ausschnitt ist unter „Map Context“ ersichtlich). Die Auswahl muss nun dem „Warenkorb“ hinzugefügt werden und kann anschließend kostenfrei heruntergeladen werden (das Browser-Plugin „Aspera“ ist erforderlich).

Für die weitere Verarbeitung muss die \*.img-Datei in das \*.jpg-Bildformat umgewandelt werden. Dafür eignet sich insbesondere die Software „NASAView“. Anschließend kann der Bildausschnitt mit einem beliebigen Bildbearbeitungsprogramm auf das gewünschte Objekt reduziert werden. Bei der bildlichen Darstellung (Abb. 4) handelt es sich um keine einfache Schwarzweißfotografie, sondern zu jedem Punkt des Bildes wird die Höheninformation durch deren Helligkeit dargestellt. Damit sind die Vorbereitungen für die Erstellung des 3D-Objektes abgeschlossen.

Als nächster Schritt folgt nun die Erstellung eines 3D-Modells auf Grundlage der Bilddatei. Das kostenlose Programm „Ultimaker Cura“ (Ultimaker, o. J.) erstellt ein 3D-Modell aus einem Bild, indem jedem Punkt des Bildes eine Höhe zugewiesen wird, welche der Helligkeit des Punktes entspricht. Hier haben die Schüler/innen die Möglichkeit das Höhenmodell stärker hervorzuheben, indem sie über eine Schaltfläche die Höhe des Modells hochskalieren. Es muss darauf geachtet werden, dass die Option „Lighter is higher“ und ein lineares Farbmodell ausgewählt ist (Abb. 5). Im nächsten Schritt kann mit dem Programm eine Anweisung für den 3D-Drucker erstellt werden, indem auf die Schaltfläche „Slicen“ gedrückt wird. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen das überhöhte 3D-Modell sowie das Ergebnis des 3D-Drucks.

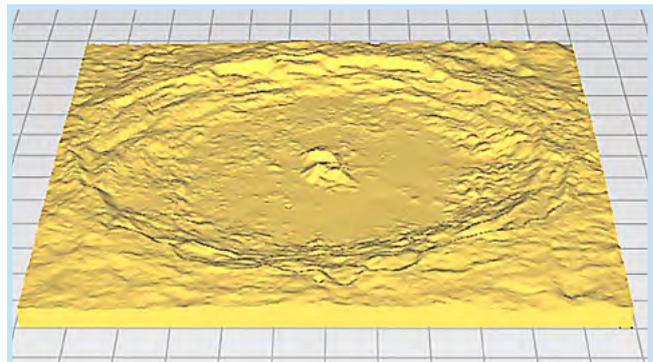


Abb. 6. Automatische Konvertierung des Bildes in ein 3D-Modell. In diesem Beispiel wurde die Höhe mit dem Faktor 3 multipliziert, um das Profil besser sichtbar machen zu können.



Abb. 7. Physischer Ausdruck des Mondkratermodells.

### 6 Beispiel 3: Druckbare Modelle der Oberflächen von Mond und Mars

Sofern der Prozess der Datenaufbereitung und -verarbeitung kein wesentlicher Bestandteil des Unterrichts sein und stattdessen ein haptisches Modell im Zentrum stehen soll, existieren Möglichkeiten, ein solches auf einfachste Weise zu generieren. Die Website [trek.nasa.gov](http://trek.nasa.gov) (NASA Solar System Treks) (nur in Chrome zuverlässig lauffähig) bietet einen stark vereinfachten Zugriff auf das oben behandelte Datenarchiv. Auf Basis optisch ansprechender Aufnahmen moderner Raumsonden lassen sich verschiedene Geoinformationen abrufen, die u. a. in Form von Höheninformationen hinterlegt sind. So lassen sich Entfernungsmessungen anstellen oder Höhenprofile abfragen. Zusätzlich existiert die Möglichkeit, eine 3D-Ansicht der Oberfläche entlang eines selbst festgelegten „Flugweges“ generieren zu lassen und die Oberfläche von Mond oder Mars so mit einer VR-Brille zu erkunden. Weiterhin existiert die Option, ein 3D-Modell beliebiger Regionen mit einer Rechteckauswahl generieren zu lassen. Die Seite umfasst gegenwärtig Information für Merkur, Mars und den Erdmond. Dazu kommen (teils unvollständige) Daten zu weiteren Objekten, wie verschiedenen Monden des Saturn. Auch lässt sich ein vollständiges Modell des Zwergplaneten Ceres herunterladen, welches auf den Daten der Raumsonde Dawn basiert.

Die Auswahloptionen für ein Modell beschränken sich auf die Eckpunkte des Rechtecks (in Form einer Koordinatenangabe), die gewünschte Auflösung und die optionale Einstellung einer Überhöhung (bis zu 10-fach). Die Herkunft und Form der Höheninformation sowie die Notwendigkeit der Projektion auf die Kugeloberfläche bleiben dabei vollständig verborgen. Die Ausgabe kann wahlweise in Form einer \*.STL- oder \*.OBJ-Datei erfolgen – den im 3D-Druck gängigen Formaten, die mit einer beliebigen Standard-Slicer-Software weiterverarbeitet werden können.

Damit lassen sich auf einfachem Wege imposante Strukturen, wie z. B. das 4.000 km lange, 700 km breite und bis zu 7 km tiefe Grabenbruchsystem Valles Marineris auf dem Mars erkunden. Auch die Polregionen, deren Darstellung zum Teil selbst in 3D-Ansichten nicht fehlerfrei gelingt, lassen sich verzerrungsfrei in ein Modell umsetzen. Insbesondere der Wert und die Tücken einer überhöhten Darstellung lassen sich am Beispiel der Marsvulkane demonstrieren und diskutieren. So zeigt sich

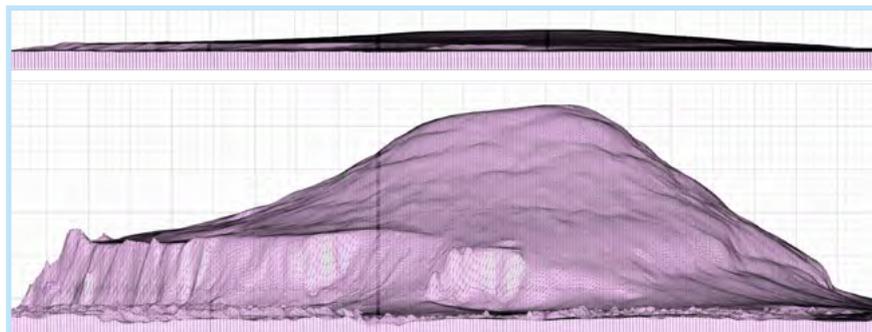


Abb. 8. Silhouette des Olympus Mons aus dem exportierten 3D-Modell ohne Überhöhung (oben) und mit 10-facher Überhöhung (unten) im Vergleich.

der Olympus Mons, der mit 22 km Höhe höchste Berg des Sonnensystems, als 3D-Modell keineswegs so spektakulär, wie man es vielleicht erwarten würde. Durch seinen gewaltigen Basisdurchmesser von bis zu 600 km erscheint er vielmehr sehr flach und würde dementsprechend auch einem Besucher auf der Mars – mit Ausnahme einiger Steilhänge – kaum als Berg, sondern vielmehr als eher sanft ansteigender Geländeverlauf erscheinen (Abb. 8). Ein Vergleich mit irdischen Bergen ist zum Erscheinungszeitpunkt des Beitrags leider noch nicht möglich, die NASA hat die Ausweitung des Angebots auch auf den Planeten Erde jedoch bereits angekündigt.

Im Unterricht könnten die Beispiele 2 und 3 dazu eingesetzt werden, dass Gruppen verschiedene Ausschnitte der Mondoberfläche auswählen und ausdrucken. Es entsteht ein haptisches Modell, welches von allen Seiten angeschaut werden kann, was sonst bei einer Planetenoberfläche nicht möglich ist. Das gedruckte Modell kann bei der Vorstellung der Oberflächenstruktur helfen und hat somit Vorteile gegenüber einem einfachen Bild. Nach dem Druck können die ausgewählten Oberflächenstücke verglichen werden und Kriterien für einen gut gewählten Mondausschnitt zusammengestellt werden. Danach kann die Frage im Unterricht diskutiert werden, warum es interessant ist, Messdaten von Oberflächen von Himmelskörpern zu sammeln. Diese Diskussion kann dann weitergeführt werden, um den Bereich Bewertung aus dem Kernlehrplan zu erfassen, in dem gefordert wird, dass Schüler/innen „auf der Grundlage von Informationen zu aktuellen Projekten der Raumfahrt die wissenschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung dieser Projekte nach ausgewählten Kriterien beurteilen (B1, B3, K2)“ (KLP, 2019, 35).

Welchen Weg man wählt, ist dabei anhängig von der vorhandenen Zeit und dem Lernziel. In Anbetracht der Zielgruppe (Sek I) ist die Arbeit mit realen wissenschaftlichen Daten anspruchsvoll und daher sind Black Boxen vertretbar und unvermeidlich. Da die Arbeit als physisches Produkt mit nach Hause genommen werden kann, ohne dass größere Kosten entstehen, ist eine hohe Motivation zu erwarten, sich dennoch mit der komplexen Arbeit auseinander zu setzen.

### 7 Schlussbemerkung

Wie in Abschnitt 2 aufgezeigt wurde, existieren verschiedene Herangehensweisen und Nutzungsmöglichkeiten für den 3D-Druck im Unterricht. Unterschiede bestehen insbesondere zwischen der mathematischen und der naturwissenschaftlichen Herangehensweise, wobei der Mathematikunterricht sich überwiegend auf den Erwerb prozessbezogener Kompetenzen fokussiert (Szenario 4), während im Physikunterricht überwiegend das Produkt im Vordergrund steht (Szenarien 1 und 2). Mit den hier vorgestellten Beispielen lässt sich diese Kluft zwischen prozess- und produktorientierter Herangehensweise überwinden und beide Ansätze in schüleraktivierender Form zusammen-

führen. Dies ermöglicht den Erwerb von Kompetenzen bei der Herstellung der Modelle und erlaubt dabei deren weitere Nutzung im Unterricht, um spezifische astronomische Kenntnisse zu erwerben und zu vertiefen.

Damit kann einigen der speziellen didaktischen Herausforderungen astronomischer Themen begegnet werden und die astronomischen Objekte lassen sich in modellhafter Form in den Klassenraum holen. Die Technologie des 3D-Drucks kann damit eine Ergänzung zu Beobachtungen und etablierten Modellen darstellen, die durch die stärkere Betonung des Herstellungsprozesses auch neue didaktische Herangehensweisen eröffnet.

In der Online-Ergänzung findet sich eine bebilderte Anleitung zum Beispiel 2 (Modell eines Mondkraters aus Originaldaten).



## Literatur

- BERNSTEIN, F.; WILHELM, T.; SCHMELING, S.; MCGINNESS, L.; DÜHR-KOOP, S.; KELLER, O.; JANSKY, A.; WOITHE, J. (2018). Low Cost-Experimente zur modernen Physik mit dem 3D-Drucker. In MAURER, CHR. (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (S. 715-718). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik.
- DILLING, F. & WITZKE, I. (2019). Was ist 3D-Druck? Zur Funktionsweise der 3D-Druck-Technologie. *Mathematik Lehren*, 217, 10–12.
- HAVERKAMP, N., HAVEMANN, J., HOLZ, C., UBBEN, M., SCHLUMMER, P., & PUSCH, A. (2021). A new implementation of Kundt's tube: 3D-printed low-cost set-up using ultrasonic speakers. *Physics Education* 56(2), 25023.
- HEUSLER, S. (2014). Neue Ausdrucksformen für die Physikdidaktik: Das Potential von 3D-Druckern für den Physikunterricht. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- KRAUS, SIMON F. (2015). *Astronomie für Blinde und Sehbehinderte. Legitimation – Konzepte – Modelle – Materialien*. Dissertation. Siegen.
- KRAUS, SIMON F. (2016). *Astronomy for Blind and Visually Impaired*. *CAPjournal* 21, 36–38.
- KRETZER, O. (2019). Johann Simon Schlimbach – der erste Astronomiemethodiker? *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 56(3-4), 70–74.
- Kultusministerkonferenz (2020). *Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz*. Bonn, Berlin: KMK.
- Kultusministerkonferenz (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife*. Bonn, Berlin: KMK.
- LMU München (o. J.). *Magnetfeld eines Permanentmagneten*. <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/3ddruck/index.html> (11.05.2021)
- NASA (o.D.). Lunar Orbital Data Explorer. <https://ode.rsl.wustl.edu/moon/index.aspx> (11.05.2021)
- NASA (o.D.). Solar System Treks. <https://trek.nasa.gov/> (14.06.2021)
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Physik, Düsseldorf*.
- SCHLUMMER, P., & PUSCH, A. (2019). Low-Cost Kinematik-Experimente mit Luftkissenscheiben aus dem 3D-Drucker. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- SCHÜRMMANN, P. (2020). *Experimente zur optischen Interferenz aus dem 3D-Drucker*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- TRAN, N. C., CHU, C. T., HOLTEN, K., & BERNSHAUSEN, H. (2020). Models and Modeling. In S. F. KRAUS & E. KRAUSE (Eds.), *Comparison of Mathematics and Physics Education I* (S. 257–298). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Ultimaker (o. J.). Ultimaker Cura. <https://ultimaker.com/de/software/ultimaker-cura> (14.06.2021)
- WITZKE, I. & HEITZER, J. (2019). 3D-Druck: Chance für den Mathematikunterricht? *Mathematik Lehren* 217, 2–9.
- FREDERIK DILLING ([frederik.dilling@uni-siegen.de](mailto:frederik.dilling@uni-siegen.de)) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Didaktik der Mathematik an der Universität Siegen.
- SIMON KRAUS ist Akademischer Rat auf Zeit in der AG Physikdidaktik der Universität Siegen.
- Silvia Becher ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TH Köln und Gesellschafterin und Geschäftsführerin der Silvia Becher, Adrian Weber GbR.
- ADRIAN WEBER ist Mathematik- und Physiklehrer am Albertus-Magnus-Gymnasium Bensberg und Gesellschafter und Geschäftsführer der Silvia Becher, Adrian Weber GbR. ■