

CONRAD



- Hintergrundwissen
- praxisbezogene Schritt-für-Schritt-Anleitungen
- fachdidaktisch aufbereitetes Unterrichtsmaterial
- Experimente mit 3D Druck

Academy

HANDBUCH

3D-Druck

Ein einsteigerfreundlicher Leitfaden
für Bildungseinrichtungen und Maker

Florian Ebner
Wolfgang Lex
Andreas Meiler
Michael Rösch
Dr. Sergej Stoetzer
Christian Trösch

Handbuch 3D-Druck

**Ein einsteigerfreundlicher Leitfaden
für Bildungseinrichtungen und Maker.**

- **Hintergrundwissen**
- **praxisbezogene Schritt-für-Schritt-Anleitungen,**
- **fachdidaktisch aufbereitetes Unterrichtsmaterial**
- **Experimente mit 3D-Druck**

© Conrad Electronic

Hirschau 2019

Preview-Version Didacta 2019

Version 0.9 - 02/2019



Sicherheitshinweis

In diesem Buch wird die Inbetriebnahme eines 3D-Druckers und der Druckvorgang eines Objekts Schritt für Schritt erklärt, so dass Sie die einzelnen Schritte mit Ihrem eigenen 3D-Drucker nachvollziehen und den Umgang mit dieser Technologie erlernen können. Dies ersetzt jedoch nicht die Anleitung des jeweils verwendeten Gerätes. Bitte lesen Sie vor der ersten Inbetriebnahme die Anleitung Ihres 3D-Druckers sorgfältig durch und machen Sie sich mit z.B. abweichenden Bedienkonzepten sowie Vorsichts- und Sicherheitsmaßnahmen vertraut.

Einige Teile eines 3D-Druckers können sehr heiß werden und zu Verbrennungen führen. Besondere Vorsicht ist geboten, wenn Kinder anwesend sind. Fassen Sie während des Betriebs auch niemals in den 3D Drucker hinein. Durch die mechanisch bewegten Teile innerhalb des Druckers besteht Verletzungsgefahr! Optionale Einhausungen schützen hier vor unbeabsichtigten und versehentlichen Eingriffen ins Gerät.

Die Benutzung dieses Buches und die Umsetzung der darin enthaltenen Informationen erfolgt ausdrücklich auf eigenes Risiko. Haftungsansprüche gegen Conrad Electronic SE und die Autoren für Schäden materieller oder ideeller Art, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der Informationen bzw. durch die Nutzung fehlerhafter und/oder unvollständiger Informationen verursacht wurden, sind grundsätzlich ausgeschlossen. Rechts- und Schadenersatzansprüche sind daher ausgeschlossen. Das Werk inklusive aller Inhalte wurde unter größter Sorgfalt erarbeitet. Conrad Electronic SE und die Autoren übernehmen jedoch keine Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit und Qualität der bereitgestellten Informationen. Druckfehler und Falschinformationen können nicht vollständig ausgeschlossen werden. Conrad Electronic SE und die Autoren übernehmen keine Haftung für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte des Buches, ebenso nicht für Druckfehler. Es kann keine juristische Verantwortung sowie Haftung in irgendeiner Form für fehlerhafte Angaben und daraus entstandenen Folgen von Conrad Electronic SE und den Autoren übernommen werden. Für die Inhalte von den in diesem Buch abgedruckten Internetseiten sind ausschließlich die Betreiber der jeweiligen Internetseiten verantwortlich. Conrad Electronic SE und die Autoren haben keinen Einfluss auf Gestaltung und Inhalte fremder Internetseiten. Conrad Electronic SE und die Autoren distanzieren sich daher von allen fremden Inhalten. Zum Zeitpunkt der Verwendung waren keinerlei illegalen Inhalte auf den Webseiten vorhanden.

Rechtlicher Hinweis

Dies ist eine Publikation der Conrad Electronic SE, Klaus-Conrad-Str. 1, D-92240 Hirschau (www.conrad.com).

Alle Rechte einschließlich Übersetzung vorbehalten. Reproduktionen jeder Art, z. B. Fotokopie, Mikroverfilmung, oder die Erfassung in elektronischen Datenverarbeitungsanlagen, bedürfen der schriftlichen Genehmigung des Herausgebers. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Die Publikation entspricht dem technischen Stand bei Drucklegung.

Copyright 2019 by Conrad Electronic SE

Inhalt

Sicherheitshinweis	1
Editorial	3
1. Einleitung	5
1.1 Geschichte des 3D-Drucks	5
1.2 Wozu 3D-Drucken?	6
1.3 Einsatzbereiche für 3D-Drucker	8
1.4 Vor- und Nachteile des 3D-Druckens.....	9
1.4.1 Allgemeine Vor- und Nachteile additiver Fertigungsverfahren	9
1.4.2 Argumentation für 3D-Drucker.....	11
1.4.3 Nachteile des 3D-Druckens	13
1.5 3D-Druck: Ein wichtiger Schritt zur Digitalisierung von Bildungseinrichtungen.....	13
2. Verfahren und Materialien.....	17
2.1 Freiraumverfahren	17
2.2 Flüssigmaterialverfahren	18
2.3 Pulverbettverfahren.....	20
2.4 Wie funktioniert ein 3D-Drucker nach dem FFF/FDM-Verfahren?.....	22
2.5 Materialien für das FDM/FFF-Verfahren.....	23
3. Von der Idee zum fertig gedruckten Objekt	33
3.1. Erstellung von 3-D Modellen	33
3.1.1. Konstruktion	33
3.1.2. Programmierung eines Modells	43
3.1.3. Erstellen eines Modells durch Scannen	52
3.1.4. Modell-Datenbanken	53
3.2 Slicing - Aufbereitung des Objekts für den Drucker	53
3.3 Wichtige Parameter beim Slicing: Stützstrukturen.....	60
3.4 Druckvorgang.....	65
4. 3D-Druck im Fachunterricht: Experimente mit digitaler Messwert- erfassung.....	77
Experiment 1: Wie beeinflusst der Füllgrad des gedruckten Objekts die Dämpfungseigenschaften?.....	79
Lehrermaterial 1: Kraftstoß und 3D-gedruckte Elastomere. Variation der Dichte.....	80
Schülerarbeitsblatt Experiment 1: Einfluss der Dichte auf die Dämpfungseigenschaften	89
Experiment 2: Kraftstoß und Dämpfungseigenschaften elastischer Körper in Abhängigkeit von derRaumlage.....	92

Lehrermaterial 2: Kraftstoß und 3D-gedruckte Elastomere. Einfluss der Raumlage	93
Schülerarbeitsblatt Experiment 2: Einfluss der Raumlage auf die Dämpfungseigenschaften	104
Experiment 3: Stabilität von 3D-Drucken – Einfluss der Raumlage beim Druck	107
Lehrermaterial 3: Bruchtest mit einem 3D-gedruckten Quader. Einfluss der Ausrichtung des 3D-Modells für den Druck.....	108
Schülerarbeitsblatt: Experiment 3: Bruchtest mit einem 3D-gedruckten Quader. Einfluss der Ausrichtung des 3D-Modells im Druckvorgang	112
5. Exkurs: 3D-Druck in Schulen – eine Gefahr durch Feinstaub und organische Belastungen?	115
5.1 Studien zur Untersuchung von Feinstaub (UFP) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)	116
5.1.1 Zeitlicher Verlauf der Emissionen.....	116
5.1.2 Einfluss auf Partikelemissionen.....	117
5.1.3 Maximale Partikelemission im Vergleich mit Laserdruckern – Testverfahren „Blauer Engel“	118
5.2 Emission organischer Verbindungen bei 3D-Druck und Laserdruckern.....	119
6. Danksagungen und Ausblick.	121

Editorial

Liebe Lehrerinnen und Lehrer, Dozenten, Anwender, Einsteiger in den 3D-Druck, liebe Maker

nicht alle Revolutionen sind als solche von Anfang an erkennbar. Die Erfindung des Buchdrucks und moderne Kommunikations- und Kollaborationsmöglichkeiten mit Hilfe des Internets haben den Informationsaustausch ihrer Zeit mit Sicherheit drastisch verändert. Vielleicht geschieht im Hinblick auf die stetig wachsenden Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren ein ähnlicher Umbruch bei der Entwicklung und Herstellung von Objekten und Gegenständen? In der Fiktion gibt es ja Maschinen, die auf Zuruf beliebige Konfigurationen von Materie erzeugen können - von einem heißen Earl Grey hin zu Ersatzteilen oder leckerem Essen (sogenannte Replikatoren in Star Trek).

Auf jeden Fall kann man jetzt schon beobachten, dass 3D-Druck eine große Faszination auf Schülerinnen und Schüler ausübt - sei es auf Events wie Maker Faires oder bei MINT-Tagen in Schulen und Ausbildungszentren. Auch eine Professionalisierung ist erkennbar, indem immer mehr Forschungsarbeiten von Schülern in Wettbewerben wie Jugend forscht auf diese Technologie zurückgreifen, um Prototypen zu entwerfen oder Hilfsmittel für die eigenen Experimente zu entwerfen.

Mit dem „Handbuch 3D-Druck“ möchten wir diese Entwicklung unterstützen: Es ist als schrittweise Anleitung konzipiert, wie Sie, liebe Leser, dieses spannende Thema in Ihren Fachunterricht, Ausbildung, oder allgemein in Ihre Bildungsinstitution integrieren können. 3D-Druck taucht in keinem Lehrplan auf - und doch sind mit dieser Technologie und ihrem Einsatz enorm viele lehrplanrelevante Themen verknüpft. Einige davon stellen wir Ihnen in diesem Handbuch vor...

Es beginnt mit einem geschichtlichen Rückblick und bettet die Entwicklungen in zeitgeschichtliche Kontexte ein, stellt mögliche Einsatzbereiche sowie Vor- und Nachteile der aktuellen additiven Fertigungsverfahren vor und diskutiert konkret Einsatzvorschläge von 3D-Druck in Bildungseinrichtungen. Ein weiteres Kapitel widmet sich den unterschiedlichen technischen Lösungen für additive Fertigungsverfahren und stellt vor, mit welchen Materialien gedruckt werden kann. „Von der Idee zum gedruckten Objekt“ beschreibt anhand von drei ausführlichen Schritt-für-Schritt-Anleitungen unterschiedliche Wege, wie die zu druckenden Objekte am Computer erstellt werden - als Konstruktion mit unterschiedlich komplexen CAD-Programmen bis zur grafischen oder textbasierten Programmierung. Natürlich sind die vorgestellten Verfahren für Bildungseinrichtungen optimiert (kostenfreie Lizenzen, open source). Wenn die Computerdarstellung stimmt, folgt als nächster Schritt die konkrete Umsetzung mit Hilfe des eigenen Druckers - auch hier finden Sie viele Tipps für Einsteiger und Expertenwissen für knifflige Situationen. Einige der Themen sind auch in anschaulichen Videos umgesetzt - in den Kapiteln 1.2, 3.2 und 3.4 finden Sie dazu QR-Codes und Links.

Wofür 3D-Drucker konkret im Fachunterricht verwendet werden können, stellt das Kapitel über Experimente vor: Hier finden Sie vier Vorschläge aus dem Bereich Physik, bei dem durch konkretes, erprobtes fachdidaktisches Material der Einstieg erleichtert wird: Arbeitsblätter für Schüler, Zusatzinformationen für Lehrkräfte - entwickelt in Kooperation mit dem Lehrernetzwerk T³ Europa (*Teachers Teaching with Technology*). Die Autoren der Experimente sind daher in diesem Kapitel zusätzlich ausgewiesen.

Unsere Motivation für dieses Handbuch ist, das Thema 3D-Druck weiter und nachhaltig im Bildungssystem zu verankern - damit Auszubildende, Schüler und Studierende von dieser faszinierenden Technologie möglichst umfangreich profitieren können.

Dazu ist dieses Handbuch mit einer einsteigerfreundlichen Heranführung nur ein erster Schritt. Wir möchten gemeinsam mit Ihnen daran weiterarbeiten und Ideen, Anwender und Experten vernetzen. Wie nutzen Sie 3D-Druck in Ihrer Bildungseinrichtung? Haben Sie konkrete Projekte, Unterrichtsmaterialien oder Tipps für Ihre Kollegen, die sie teilen möchten?

In künftigen Versionen dieses Handbuchs veröffentlichen wir gerne auch Ihre Ansätze, 3D-Druck im Bildungsbereich voranzubringen. Schreiben Sie einfach eine Mail an education@conrad.de. Wir möchten mit dem Handbuch die Plattform für eine gemeinsame Vernetzung und Fundgrube für tolle Ideen sowie fachdidaktische Konzepte rund um das Thema 3D-Druck bieten.

Viel Spaß beim Lesen, Konstruieren, 3D-Drucken, Experimentieren und bei der Ausbildung Ihrer Schülerinnen, Schüler, Azubis und Studierenden wünscht

Ihr Team vom Conrad Technology Center (CTC)



Florian Ebner



Michael Rösch



Wolfgang Lex



Dr. Sergej Stoetzer



Andreas Meiler



Christian Trösch

1. Einleitung

1.1 Geschichte des 3D-Drucks

Bereits in der 1966 gestarteten Science-Fiction Fernsehserie Raumschiff Enterprise (engl. Star Trek) waren sogenannte Replikatoren an Bord im Einsatz. Auf sprachliche Anweisung konnten computergesteuert Speisen und Getränke hergestellt werden. Echte Repliken bzw. Objekte herzustellen ist somit keine neue Idee, aber eine ziemlich geniale.

3D-Drucken gehört zu den Fertigungsverfahren, die unter dem Oberbegriff Urformen¹ zusammengefasst werden. Demnach wird aus einem formlosen Stoff, z.B. aus flüssigem Material, ein fester Körper hergestellt. Schon lange verwenden Konstrukteure Computer Aided Design (CAD), um anstatt mit Bleistift oder Tusche auf einem Reißbrett, auf dem Bildschirm Objekte zu entwerfen. Naheliegender Wunsch ist damit der Wunsch, diese Entwürfe auch 3-dimensional real werden zu lassen. 3 Raumachsen, elektrisch angesteuerte Linearachsen, ermöglichen es. Das klingt vom Prinzip her simpel, aber ohne Computer wäre 3D-Drucken nicht möglich, bzw. unglaublich komplex. Im Endeffekt muss ein räumliches Objekt zuerst virtuell geometrisch beschrieben bzw. definiert werden. Bei einem Würfel ist das noch recht einfach, aber komplexe Gebilde brauchen Computer mit schnellen Prozessoren und ausreichend großem Arbeitsspeicher, eine Grafikkarte und einen Monitor. Auch das ist ein wesentlicher Grund, warum die Entwicklung brauchbarer 3D-Drucker erst mit leistungsfähigen PCs möglich wurde.

Zu Beginn der 80er Jahre erfand Chuck Hull² das Fertigungsverfahren Stereolithographie und legte somit den Grundstein für das heute als 3D-Drucken bekannte additive Fertigungsverfahren. In den letzten 30 Jahren entwickelten sich zahlreiche verschiedene Varianten dieses Verfahrens und es dauerte ebenfalls über 30 Jahre bis diese Technologien wirklich praxistauglich und mit erschwinglichen Geräten marktreif wurden.

Vielleicht war es wie beim Fliegen, indem man die Natur beobachtete und versuchte diese nachzuahmen: Spinnennetze sind wahre Kunstwerke der räumlichen Gestaltung. Dabei faszinieren sowohl die Fähigkeiten der kleinen Tiere, als auch die Eigenschaften des gesponnen Fadens selbst: dünn, elastisch, klebend und doch mechanisch belastbar. So wurde und wird einerseits Kleb- und Farbstoff in feines Gipspulver eingespritzt, um farbige Objekte zu erzeugen, andererseits das Extrusionsverfahren variiert, oder feinstes Metallpulver mit einem Laser Schicht für Schicht aufgeschmolzen. Beim Verfahren der Stereolithographie von Chuck Hull wird ein Harz (engl. Resin) durch den Einsatz von UV-Licht ausgehärtet. Diese Technik war bis zu Beginn der 2000er Jahre nur in der Industrie und Forschung im Einsatz, da die Geräte noch sehr teuer und die Betriebskosten hoch waren. Anfang der 2000er veröffentlichte Adrian Bowyer³ seinen Bauplan eines sich selbst replizierenden 3D-Druckers, genannt RepRap (Replicating Rapid Prototyper), der Open Source Philosophie folgend. Unter der GNU (General Public License) war es so jedem möglich sich seinen eigenen 3D-Drucker zu bauen. Grundlage ist das heute häufigste Verfahren des 3D-Druckens, die sogenannte Schmelzschichtung (engl. Fused Deposition Modeling, abgekürzt FDM, oder auch Fused Filament Fabrication, abgekürzt FFF).

3D-Drucker wurden über die Jahre qualitativ und hinsichtlich ihrer Druckergebnisse ständig verbessert. So ist es seit 2014 möglich, mehrere verschiedene Filamente in einem Druck zu kombinieren. Dual-

-
- 1 Otto Kienzle ein deutscher Ingenieur, Fertigungsplaner und Hochschullehrer verwendete den Begriff Urformen 1948 zum ersten Mal.
 - 2 Charles W. (Chuck) Hull, geb. 1939 in Clifton, Colorado, USA, Gründer von 3D-Systems
 - 3 Adrian Bowyer, geb. 1952, englischer Ingenieur und Mathematiker

Extruder können das, wie z.B. der Ultimaker 3 oder der Renkforce RF2000. Einerseits können damit 2-farbige Objekte gedruckt werden, andererseits können unterschiedliche Filamenteigenschaften kombiniert werden: z.B. festes und flexibles Material, oder transparentes und lichtundurchlässiges, oder waserfestes und wasserlösliches, um etwa Stützstrukturen herauslösen zu können. Wieviele Extruder sind denn eigentlich parallel einsetzbar und wo sind die Grenzen eines Multi-Extruders?

Dual Extruder Drucker gibt es von verschiedenen Herstellern. Die Kalibrierung zweier nebeneinander verbauter Extruder ist entsprechend aufwändiger und muss sorgfältig durchgeführt werden. Denn der Versatz der Düsen ist durch die exakte Positionierung, also durch Bewegung zu kompensieren. Das ist bei 2 Düsen noch gut zu machen, wobei schon eine Einschränkung auftritt, indem z.B. die linke Düse den rechten Rand des Druckbettes nicht erreichen kann, bzw. die Linearachse entsprechend über den Rand verlängert sein muss. Anders ausgedrückt, wird daher der Drucker größer und die Mechanik aufwändiger und damit teurer. Techniken für mehrfarbiges 3D-Drucken sind, neben der manuellen Bemalung oder Lackierung, Farbmischtechniken, oder die Einfärbung, wie beim XYZprinting Da Vinci Color. Letzterer kombiniert den Single-Extruder mit einem Tintenstrahldrucker, wobei spezielle Druckertinte verwendet werden muss. Es sind auch einzelne Triple und Multi-Extruder zu finden, die jedoch die Farben mischen, also etwa 3 verschiedene Filamente durch ein Hot-end pressen. In Anbetracht eines vertretbaren Preis-Leistungsverhältnisses wird das bei 3 Extrudern oder mehr immer schwieriger, aufwändiger und teurer. Verbaut man die Hot-ends nicht starr, sondern sieht eine Mechanik vor, die die Düsen einzeln bewegen kann, gilt ein ähnlicher Effekt: je mehr Extruder desto komplexer, teuer und fehleranfälliger wird das Konstrukt. Fazit: Zwei Extruder sind ein guter Kompromiss.

1.2 Wozu 3D-Drucken?

Eigentlich ist, wie im vorigen Kapitel beschrieben, der Gedanke naheliegend und vielleicht es ein langgehegter Traum kreativer Menschen, ein Gerät zur Herstellung beliebiger Formen nutzen zu können, insbesondere, wenn die Daten des Objektes ohnehin bereits im PC vorliegen. Kunststoffe und darunter die sogenannten Thermoplaste sind nahezu ideal, Dinge herzustellen. Der Begriff Thermoplast beinhaltet auch das „Formen“ bzw. „Bilden“, von altgriechisch plássein und thermos für warm bzw. heiß. Klassische Verfahren zur Herstellung waren und sind das Spritzguss- und das Extrusionsverfahren. Ersteres hat den Nachteil, teure Formen zu benötigen, aber mit dem Extrusionsverfahren kommen wir dem Ziel schon näher. Strangpressen ist die deutsche Bezeichnung für Extrusion - und das drückt bereit aus, worauf es ankommt: das mehr oder weniger dünnflüssige, geschmolzene Thermoplast muss mittels Vorschubmotor durch das Modul zur Erhitzung, das sogenannte Hot-End gepresst werden.

Und so verwundert es kaum, dass moderne 3D-Drucker meist Thermoplaste aufschmelzen, um sie flüssig durch eine Düse als Faden an der gewünschten Position wieder zu verfestigen. Damit wird die typische Eigenschaft der Thermoplaste genutzt, dass diese zuerst fest, dann flüssig und schließlich wieder fest werden. Gleichzeitig wird aber auch ein Problem erkennbar, denn wenn diese Materialien thermisch verformbar sind, bleiben Sie auch später nicht bei jeder Temperatur in der gewünschten Form. Denken Sie beispielsweise an die Temperaturen in einem sommerlich aufgeheizten Auto. Der 3D-Drucker braucht daher auch mehr oder weniger ordentlich Power, um auch thermisch stabile Thermoplaste einsetzen zu können, deren Beständigkeit unter Wärmeeinfluss akzeptabel bleibt.

So können heute Maschinenteile, Gebrauchsgegenstände, Gehäuse, Modelle oder **Prototypen** schnell und ohne viel Aufwand hergestellt werden. Vor allem im frühen Stadium einer Entwicklung ist das „Prototyping“ wichtig. Ein Prototyp, oder Modell, kann hinsichtlich seiner Erscheinung, Gefälligkeit oder

Funktion auf diese Weise leichter beurteilt und getestet werden, als nur im 3D-Modell auf dem Computerbildschirm. CAD und reale 3D-Drucke gehören damit heute zu den Standardwerkzeugen eines Konstrukteurs, Designers, oder Entwicklers. Selbst mit hochwertiger VR-Technik⁴ kann man die haptische Wahrnehmung⁵ nicht voll ersetzen.

Ein verlorenes und nicht leicht beschaffbares Ersatzteil ist jederzeit schnell repliziert. Einmal als CAD-Datei vorhanden, ist es relativ einfach, Verbesserungen durchzuführen und zu testen. Oft werden erst bei einem mechanischen Test die Schwächen der Konstruktion erkannt. Recht einfach kann dann eine verstärkte Variante hergestellt werden. Nach unserer Erfahrung, beginnt man nach Anschaffung eines 3D-Druckers nach kurzer Zeit sogar tatsächlich anders zu denken, denn Dinge sind realisierbar, deren Herstellung oder Beschaffung bisher viel Kopfzerbrechen bereitet hatte.

Im künstlerischen bzw. kreativen Bereich ist 3D-Druck schon heute weit verbreitet und sehr beliebt. Bastler und Maker brauchen keine teuren Maschinen mehr, wie Fräsen, Drehbänke oder müssen auf teure Herstellungsverfahren zurückgreifen. Aufwändiges Sägen, Hobeln, Feilen, Glätten, Spachteln oder Löt- bzw. Schweißarbeiten entfallen. Nicht jeder hat gleichermaßen handwerkliches oder gestalterisches Geschick - mit einem 3D-Drucker nebst PC ist dies kein wirkliches Problem mehr! Lassen Sie Ihren Ideen freien Lauf! Vorausgesetzt, man befasst sich mit der 3D-Drucktechnik etwas, denn es gibt auch physikalische Grenzen des Machbaren und zugegeben, es ist ein verlockender Trugschluss, zu glauben, 3D-Drucken wäre so einfach, wie einen Text oder ein Bild auf Papier auszudrucken. Dieses Buch soll ihnen u.a. die nötige Entscheidungssicherheit verleihen, abschätzen zu können, worauf es ankommt.

Auch im privaten Gebrauch sind die Drucker ein nützliches Werkzeug. Drucken Sie sich Ihre selbst gestaltete Lieblingstasse, Kinderspielzeug, Ersatzteile und individualisierte Stücke - nahezu alles ist möglich. Erfahren Sie in Kapitel 2, wie 3D-Drucker und die gängigsten Drucktechniken funktionieren.

Seit der ersten Anwendung des 3D-Drucks hat sich einiges getan. So ist auch die Auswahl der druckbaren Materialien vielfältiger geworden. Mittlerweile lassen sich neben Kunststoffmaterialien auch Beton, Papier, Metall oder organisches Gewebe, ja sogar Schokolade drucken. Möglich machen das verschiedene Herstellungsverfahren wie **selektives Lasersintern** oder **Fused Deposition Modeling**. Ein weiterer wesentlicher Vorteil von 3D-gedruckten Modellen ist die **Leichtigkeit** im Vergleich mit Objekten aus klassischen Herstellungsmethoden.

Die rasante Entwicklung der 3D-Druckverfahren weckte natürlich auch das Interesse der Fertigungsindustrie. Zunächst startete die Automobilindustrie mit der **Herstellung von Prototypen** bzw. **Modellen**. Dieses Verfahren weitete sich rasch auf andere Industrien aus. Mittlerweile ist das 3D-Drucken einer der Standards in der Prototypenherstellung, da er die Zeit für Planung, Entwicklung und Fabrikation eines neuen Produktes erheblich verkürzt. Der Begriff **Rapid Prototyping** beschreibt diese Technologie optimal.

Für die Fabrikation von **Kleinserien**, **Einzelteilen** oder **Ersatzteilen** ist der 3D-Druck ebenfalls geeignet. Gerade dann, wenn die industrielle Fertigung zu aufwändig und teuer wäre, stellt der 3D-Druck eine gute Alternative dar. Darüber hinaus können unterschiedliche Serien oder Teile direkt hintereinander produziert werden. Ein Austausch von beispielsweise Gussformen ist nicht nötig.

4 Virtual Reality basierend auf optischen Tricks, indem 2 räumlich versetzte Bilder den Augen über eine entsprechende Brille „zugespielt“ werden.

5 von griech. haptos =fühlend, d.h. über den Tastsinn

Ein weiterer Bereich, in dem sich das Verfahren bewährt hat, ist der **Werkzeug- und Formenbau**. Statt auf externe Lieferanten zurückzugreifen, lässt sich ein Werkzeug oder eine Form in kurzer Zeit und im eigenen Unternehmen herstellen.

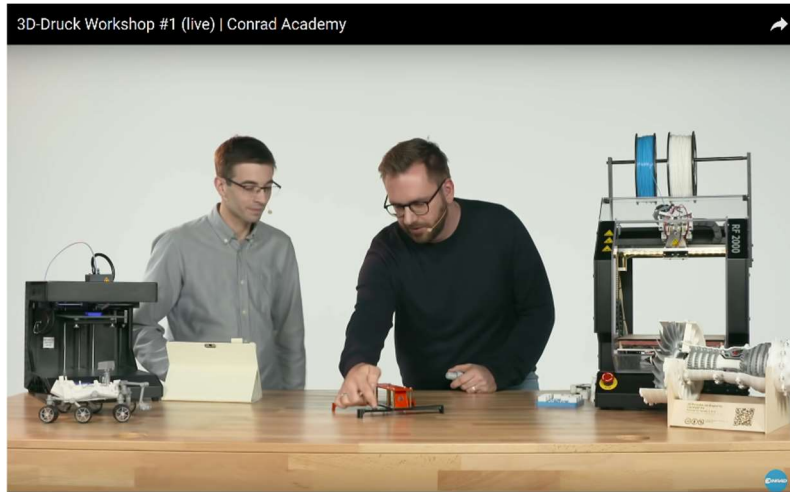


Abbildung 1: Video - 3D-Druck Workshop#1, Conrad Academy.

Das Video finden Sie unter <https://www.youtube.com/watch?v=5wK47Aoho4I>

1.3 Einsatzbereiche für 3D-Drucker

3D-Drucker ermöglichen es Anwendern im privaten und im gewerblichen Bereich, einzigartige Gegenstände mit wenigen Mausklicks herzustellen.

Hier erhalten Sie einen beispielhaften Überblick über die Einsatzmöglichkeiten:

Produktion

- Rapid Prototyping, d.h. die schnelle Herstellung von Muster-Bauteilen
- Kleinserienfertigung
- Individuelle Einzelstückfertigung
- Musterfertigung

Modellbau/-bahn

- Fertigung von An- & Umbauteilen
- Individualisierung von Standardkomponenten
- Herstellung von Ersatzteilen
- Fertigung maßstabsgetreuer Miniaturen

Handwerk

- Kostengünstiger Einstieg in CNC-Verfahren
- Individuelle Einzelstückfertigung
- Maßstabsgetreue Modelle

Bildung / Ausbildung - eine ausführlichere Diskussion der Einsatzmöglichkeiten im Bildungsbereich finden Sie im Kapitel 1.5

- Erlernen von 3D-Konstruktionen: Ergebnis ist sofort greifbar
- Verbesserung des räumlichen Denkens
- Verknüpfung von Theorie & Praxis

Kunst und Design

- Fertigung maßstabsgetreuer Modelle und Skulpturen
- Schmuckdesign, insbesondere Prototypen und Designmuster

Architektur

- Kostengünstige, schnelle Entwürfe für Kunden und Wettbewerbe
- Umsetzung von Grundrissen als Miniaturmodell

1.4 Vor- und Nachteile des 3D-Druckens

Da es viel mehr Vorteile als Nachteile gibt, wollen wir vom Allgemeinen zum Speziellen etwas Struktur in die Komplexität dieser Diskussion bringen:

1.4.1 Allgemeine Vor- und Nachteile additiver Fertigungsverfahren

Der Oberbegriff **additive Fertigung** steht für 3D-Druckverfahren, bei denen eine Schicht nach der anderen auf eine Grundplatte aufgebracht bzw. hinzugefügt (addiert) wird, bis das Druckobjekt fertig ist. Am fertigen Druckobjekt sind die Schichten auch oft mehr oder weniger an den seitlichen Rillen der 3D-Objekte erkennbar. Innerhalb der additiven Druckverfahren gibt es verschiedene Technologien mit individuellen Vor- und Nachteilen. Allen gemeinsam sind diese **Vorteile**:

- **Schnellere und kostengünstigere Produktion**, beispielsweise durch geringeren Materialaufwand und Fehlerreduzierung in der Prototypenentwicklung
- **Funktionale und komplexe sowie filigrane** Druckerzeugnisse
- **Hohe Flexibilität** im Produktionsprozess durch Adhoc-Änderungen und schnelle Umsetzung von Änderungswünschen
- **Leichtbaukonstruktion**: Mit 3D-Druck lassen sich Formen realisieren, die mit klassischen Fertigungsmethoden gar nicht oder nur schwer realisierbar sind. Damit setzen die 3D-Konstruktionen hinsichtlich Gewicht, Design und Stabilität neue Maßstäbe.
- **Just-in-time Produktion** von 3D Objekten

Nachteile: durch den schichtweisen Aufbau der Objekte, nimmt der Druckprozess je nach Komplexität, Füllgrad und Objektgröße bis zu mehrere Stunden in Anspruch. Additive 3D-Druckverfahren sind also keine schnellen Verfahren und somit bei großem Zeitdruck oder ungeduldigen Chefs weniger geeignet.



Tipp: Warnen Sie frühzeitig vor überzogenen Erwartungen, die oben aufgezeigten Vorteile sind zudem eine gute Argumentationshilfe.

Die Schichten der additiven Verfahren sind auf den Seiten des Objektes sichtbar, d.h. die Oberfläche ist nicht glatt, sondern zeigt grundsätzlich mehr oder weniger sichtbare Rillen. Manchmal wird für hohe Ansprüche in einem weiteren Bearbeitungsschritt eine Glättung durch Schleifen, Spachteln, oder Farbauftrag, am besten durch Aufsprühen optimiert.

Durch Erhöhung der Schichtdicke kann für einen schnellen Probedruck die Druckzeit verringert werden, denn zu einer groben Beurteilung reicht dieser in den meisten Fällen völlig. In einem weiteren Schritt kann dann mit geringerer Schichtdicke und damit schönerer Oberfläche gedruckt werden.



Tipp: Nutzen Sie die Tatsache, dass die Grundfläche immer die glatteste Seite ist. Beim Auftragen des flüssigen Filamentes auf die glatte Druckplatte ergibt sich die schönste Fläche. Vor dem Slicing, haben Sie die Möglichkeit das Objekt auf die optimale Seite zu legen, also eine Drehung um 90° , 180° oder 270° vorzunehmen. Prüfen Sie am Bildschirm, ob das Objekt optimal liegt, indem Sie es von den Seiten und von unten betrachten. Am Computerbildschirm ist die Druckplatte lediglich ein transparentes Gitternetz.

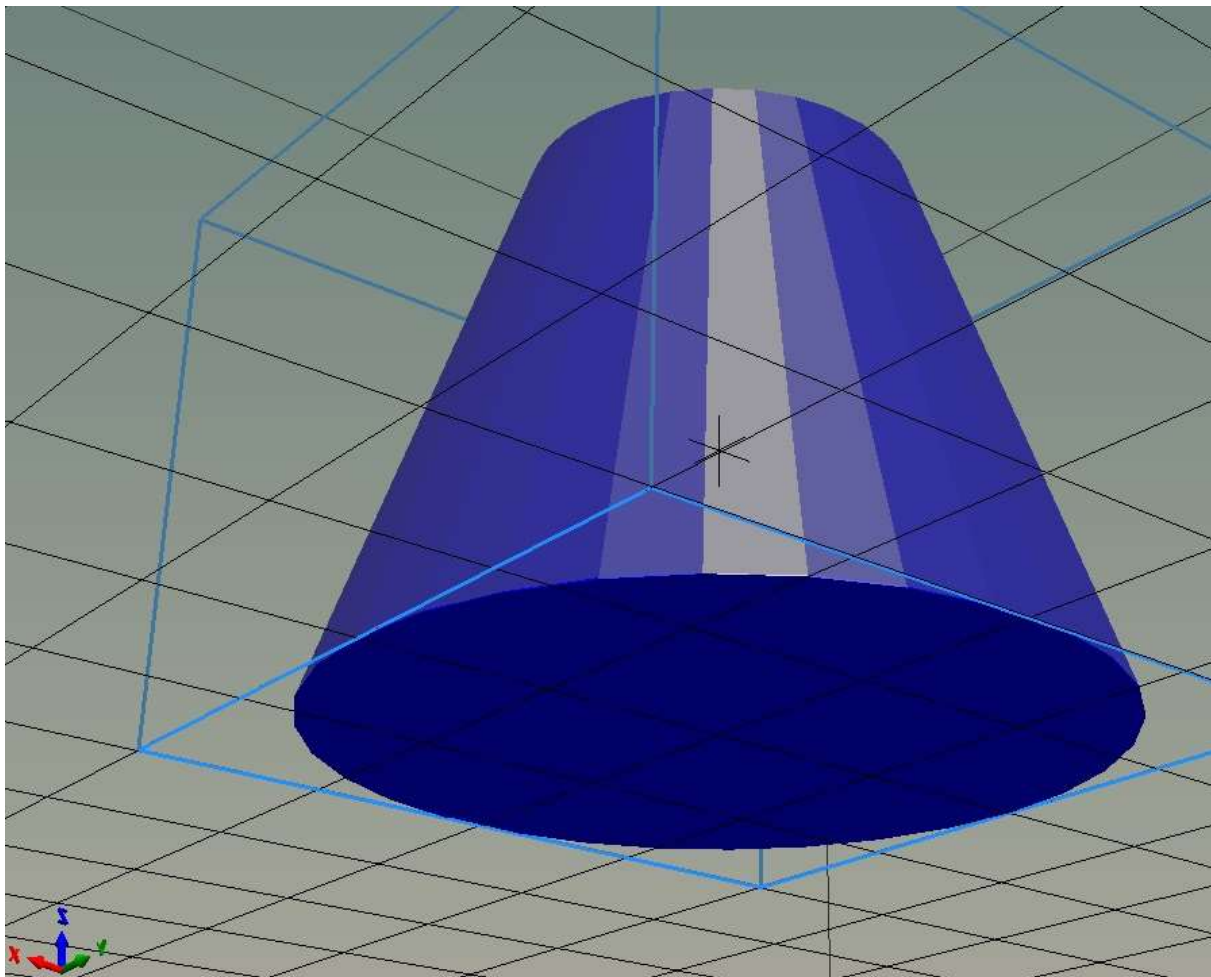


Abbildung 2: Das Objekt - hier ein Kegelstumpf - von unten betrachtet.

Manchmal ist es auch besser, Objekte in 2 Fertigungsteile zu zerlegen, bzw. am Computer zu zerschneiden und erst später zusammenzufügen.

1.4.2 Argumentation für 3D-Drucker

Falls Sie nach Lektüre der obigen Kapitel dieses Buches noch Zweifel am Nutzen eines 3D-Druckers haben sollten, oder noch zögern, einen zu beschaffen: hier kommen weitere Vorteile, womit Sie ggf. Sachaufwandsträger, Genehmiger, oder Ihre Ehefrau / Freundin überzeugen können.

Vermeidung von Fehlern

Unternehmen müssen heute flexibel und schnell reagieren, um mit der Entwicklung ihrer Branche mitzuhalten zu können. Minimieren sie bei komplexen Produktionsprozessen das **Fehlerrisiko**, indem sie frühzeitig produktionsbedingte Mängel anhand 3D-gedruckter Prototypen erkennen.

Gerade in der Entwicklungsphase neuer Produkte sind Fehler in Design und Funktion normal. Die 3D-Modelle können kurzfristig und schon im Frühstadium der Entwicklung genutzt werden. Auf diesem Weg lassen sich Fehler früher erkennen und beseitigen als bei der Herstellung von Objekten per Hand oder mit Gussformen. Da diese klassischen Herangehensweisen zeitaufwändig sind, kommen Prototypen oftmals zu einem späteren Zeitpunkt zum Einsatz, sodass Fehler erst auffallen, nachdem Arbeit und Zeit aufgewendet wurden. Gleiches gilt für die anderen Möglichkeiten, den 3D Druck einzusetzen. So kann die Produktion einer kleinen Auflage von Teilen zwischendurch gestoppt und nachgebessert werden und nicht erst am Ende der Herstellung.

Je hochwertiger ein 3D-Drucker ist, desto präziser oder originalgetreuer ist das produzierte Teil. Beispielsweise ist es möglich, Objekte aus verschiedenen Materialien herzustellen und die Eigenschaften des Produktes nachzubilden. Egal ob mehrfarbig oder transparent, gummiartig oder fest, mit beweglichen Teilen oder ohne. **Thermoplaste, Photopolymere und Verbundwerkstoffe** sind in der Lage, **nahezu jede Materialeigenschaft** bereitzustellen und auch Nachbearbeitungsprozessen wie Lackieren oder Polieren standzuhalten. Auf diese Weise entsprechen Modelle im Gegensatz zu digitalen Entwürfen am Computer in ihrer Optik und Haptik dem Endprodukt. Durch Tests mit den Objekten werden Fehler sichtbar, die beim Endprodukt einen hohen **Kosten- und Zeitaufwand** für die Verbesserung mit sich bringen würde. Das bedeutet, dass sich bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung Prototypen drucken und Fehler beseitigen lassen.

Darüber hinaus sind die einmal erstellten Modelle am Computer beliebig veränderbar und reproduzierbar. Weist der erste Entwurf des Prototyps Fehler auf, oder soll beispielsweise etwas am Design verbessert werden, ist nur das Nötigste zu ändern. Im Anschluss können die Drucker sofort die nächste Generation des Prototyps produzieren.

Durch die exakte maßhaltige Herstellung des gewünschten Objektes reduziert sich der Materialverbrauch. Der 3D-Drucker baut die Modelle in der benötigten Größe und Form auf. Das ist ein wesentlicher Unterschied zu Teilen, deren Urformen durch spanabhebende Verfahren wie Schneiden, Schleifen, Bohren, Fräsen oder Drehen erst ihre endgültige Form erhalten. Durch den geringen Materialverbrauch, vergleichsweise sehr geringe Materialverluste und den geringeren Energie- und Arbeitseinsatz ist die Fertigung eindeutig kostengünstiger.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil in diesem Zusammenhang ist, die Tatsache, dass Objekte nicht aus Vollmaterial hergestellt werden müssen, um stabil und verwindungsfrei zu sein, sondern hohl gedruckt werden können. Festigkeit und weitgehende Verwindungsfreiheit sind bei intern je nach Struktur oder Füllgrad vernetzten Objekten ungleich besser. Dazu können bei der Druckkonfiguration verschiedene Füllmuster bzw. -strukturen (engl. pattern) ausgewählt werden [Abb.2]. Die von den Bienen bekannte

Wabenstruktur gilt allgemein als eine sehr gute Wahl, aber ebenso können auch exotisch anmutende Hilbert-Kurve⁶, oktagonale Strukturen, oder einfache rechteckige Muster ausgewählt werden.

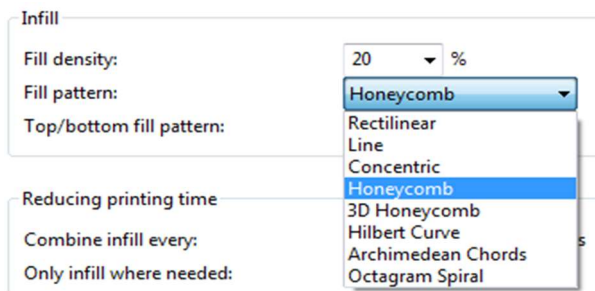


Abbildung 3: Auswahlmöglichkeit verschiedener Füllstrukturen.

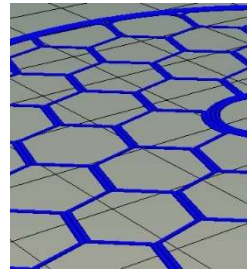


Abbildung 4: Wabenmuster

Aus der Bionik⁷ ist bekannt, dass die schlauen Bienen mit dieser Struktur den geringsten Materialaufwand bei gleichzeitig höchster Stabilität perfektioniert haben. Dies wurde mathematisch nachgewiesen.



Tipp: Auch wenn diese ästhetisch schönen Strukturen im Inneren des Druckobjektes verborgen bleiben, so sind diese in mehrfacher Hinsicht äußerst sinnvoll.

Der **Arbeitsaufwand**, etwas herzustellen, lässt sich an verschiedenen Stellen reduzieren. Zum einen verringern sich der Kosten- und Zeitaufwand während der Entwicklung, da Prototypen frühzeitig getestet werden. Bei der Produktion entfallen der Bau von **teuren Gussformen** und deren Wechsel, sobald eine neue Produktserie beginnt. Die gedruckten Teile sind fertig, eine **Nachbearbeitung** entfällt weitgehend. Zudem sind die Kosten unabhängig von der gedruckten Stückzahl und **frei von Skaleneffekten**. Das bedeutet, dass die Erzeugung von Kleinstmengen beim 3D-Druck nicht teurer ist, als die von großen Mengen. Bei der klassischen Fertigung sinken die Produktionskosten in der Regel bei steigender Produktionsmenge.

Beschleunigung der Produktion

Der kurzfristige und flexible Einsatz des 3D-Drucks führt am Ende zu einer Beschleunigung der Produktion. Dazu gehören die Reduzierung des Entwicklungsaufwands und des Arbeitsaufwands. Dies gilt besonders für die Herstellung von Ersatzteilen. Ohne 3D-Druck muss die Erzeugung im schlimmsten Fall ruhen bis ein Ersatzteil geliefert wird. Ein 3D Drucker produziert die benötigten Teile hingegen vor Ort nach dem Just-In-Time-Prinzip.

Kleinserien

Sie wollen statt einem Teil gleich mehrere identische gleichzeitig drucken um Zeit zu sparen? Das ist zwar keine Massenproduktion und erhöht die Dauer des Druckvorganges, weil der Drucker innerhalb einer Schicht ja komplexere Wege abfahren muss, aber dank des vom PC bekannten und beliebten Copy and Paste (Kopieren und Einfügen) geht das bei der Druckvorbereitung innerhalb weniger Sekunden auch für komplexere Objekte. Die Software verteilt die Objekte automatisch auf der Druckplatte und meldet auch, wenn das Gedränge zu groß wird.



Tipp: Beginnen Sie erst nach erfolgreichem Probedruck mit der Kleinserie. Denn es ist ärgerlich, wenn ein umfangreicher Druckvorgang wegen eines Fehlers fehlschlägt.

6 nach dem dt. Mathematiker David Hilbert (1862-1943)

7 Bionik: Übertragen von Phänomenen aus der Natur in die Technik

1.4.3 Nachteile des 3D-Druckens

Natürlich gibt es neben den vielen Vorteilen auch ein paar Nachteile, die man kennen sollte. Doch wir haben auch Empfehlungen für Sie, die Abhilfe schaffen können:

- Der Aufwand bei der Gestaltung einer druckbaren Vorlage darf nicht unterschätzt werden und braucht spezifische Kenntnisse und Erfahrung. Anders ausgedrückt erfordert es anfangs etwas Zeit und Geduld bis Sie den 3D-Drucker erfolgreich nutzen können. Kapitel 3 „Von der Idee zum fertig gedruckten Objekt“ begleitet Sie Schritt für Schritt auf dem Weg zum Erfolg.
- Der Druckvorgang kann je nach Komplexität und Größe des Objekts mehrere Stunden oder gar Tage dauern. Massenproduktion ist noch nicht möglich, da die klassische Fertigung ab einer bestimmten Stückzahl günstiger ist. Beachten Sie die erforderliche Zeit für einen 3D-Druck, die ebenfalls nach dem Slicen durch die Druckvorbereitungssoftware kalkuliert wird. Drucken Sie ggf. über Nacht. Nutzen Sie die Möglichkeit der Fernüberwachung, z.B. durch eine Art Printserver für 3D-Drucker: Ein Raspberry Pi mit der freien Software Octoprint erledigt dies spielend für Sie (<https://octoprint.org/>).
- Vorsicht mit Überhängen: Typischerweise kann es bei additiven Freiraumverfahren zu unschönen Ergebnissen mit Materialverlust kommen, wenn Sie z.B. eine Brücke oder einen Rahmen „in die Luft“ drucken. Abhilfe schafft oft die günstige Positionierung des Druckobjektes auf der Druckplatte: platzieren Sie bei der Druckvorbereitung in der Slicing-Software die größte Fläche des Objektes auf die Druckplatte. Konische Objekte nach oben verjüngen lassen. Verwenden Sie ggf. Stützstrukturen (Support), welche Sie später mechanisch wieder entfernen. Die Druckvorbereitungssoftware hilft Ihnen dabei.
- Thermoplaste werden bei zu hohen Temperaturen wieder verformbar. Je nach Filament kann sich das gedruckte Objekt verformen, falls es zu heiß wird. Dies tritt schon unterhalb des Schmelzpunktes ein! Vergleichen Sie die Filamente hinsichtlich ihrer Eigenschaften: siehe Kapitel 2.6. Eine Lösung für temperaturbeständige Objekte kann auch die Nutzung eines 3D-Druckservices sein, denn hier können Sie die Objekt-Datei auf teuren Maschinen und mit speziellen Materialien wie z.B. in Metall- oder Keramikausführung drucken lassen.

1.5 3D-Druck: Ein wichtiger Schritt zur Digitalisierung von Bildungseinrichtungen

Motivation von Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen

Nach unserer Erfahrung auf Messen und Maker Fairs sind sowohl Kinder, Jugendliche und auch Erwachsene (Techniker wie auch technisch Unbegabte) bis zum Rentner fasziniert, beim Entstehen eines Objektes live dabei zu sein. Eltern haben dann tatsächlich oft Schwierigkeiten, ihre Kinder wieder vom 3D-Drucker weg zu lösen: Hier bewegt sich etwas und die Phantasie wird angeregt!

Um Kinder und Jugendliche nachhaltig für den 3D-Druck zu begeistern – und nebenbei wichtige Schlüsselkompetenzen und Lerninhalte zu vermitteln – beginnen Sie mit einer einfachen Aufgabenstellung und Entwurfsphase. Bis der komplette 3D-Druckprozess abgeschlossen ist und das gewünschte Ergebnis erzielt wurde, sammeln die Schüler entsprechende Erfahrungen, korrigieren oder erarbeiten einen Entwurf eventuell sogar neu. Die Schüler werden so zu kritischem Denken, Kreativität, Zusammenarbeit und Kommunikation angeregt. Das Lernkonzept basiert auf der Verbindung zwischen abstrakten Konzepten, praxisbezogenem Lernen und greifbaren 3D-Druckmodellen.

Einsatz des 3D-Druckers im Unterricht – fächerübergreifende Aspekte

Vermitteln Sie viele Aspekte der Digitalisierung anschaulich mit einem 3D-Drucker – gerade in den MINT-Fächern steht Ihnen hierzu eine breite Themenpalette zur Verfügung. Angefangen von verschiedenen Möglichkeiten, Objekte digital zu repräsentieren, sie zu erstellen und zu bearbeiten über Produktionsverfahren und deren Kontrolle bis hin zum Abgleich der gedruckten Prototypen mit den Entwürfen im Bereich der Qualitätskontrolle: In allen diesen Bereichen können Sie digitale Messtechnik, computergestützte Verarbeitung von Informationen, IoT-Anbindung und entsprechende Bezüge zu Ihren Unterrichtsfächern herstellen. Auch hier zählt die Zeitersparnis: Sie können in einer einzigen Unterrichtsstunde den kompletten Prozess vom Design bis zum fertigen Objekt demonstrieren! Das ist alles andere als langweilig 😊 Und wir haben in Kapitel 3 für Sie Vorschläge für einen praxisnahen Einstieg ausgearbeitet. In Kapitel 4 finden Sie ebenfalls praxisnahe Experimente für Ausbildung und Schulen, bei denen das Thema 3D-Druck mit digitaler Messwerterfassung kombiniert wird.

Mit 3D-gedruckten Modellen können Sie den Unterricht anschaulicher gestalten, egal ob im Fach Biologie, Physik, Informatik oder Chemie (Molekülmodelle), ja sogar in der Kunst oder in gesellschaftswissenschaftlichen Fächern (Auswirkungen der Digitalisierung, Industrie 4.0).

Die Schüler werden es Ihnen danken, denn 3D-Drucker begeistern Erwachsene wie Kinder. Es ist wohl die Faszination, hautnah und direkt beim Entstehen eines Objektes zusehen zu können...

Einsatz für MINT-Fächer

Für Schulen eignet sich 3D-Druck als übergreifendes Thema – von der Erstellung bis zum fertig gedruckten Objekt – insbesondere in den MINT-Fächern (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik), um den Schülern Fähigkeiten und Kenntnisse in Wissenschaft, Technik und Design näherzubringen. Während an Hochschulen 3D-Printing in vielen Bereichen im Einsatz und „etabliert“ erscheint, tauchen 3D-Drucker derzeit weder in den Lehrplänen der weiterführenden Schulen auf noch ist das Themenfeld Bestandteil einer Ausbildung. Aktuell sehen wir großes Interesse an dem Thema bei Ausbildungswerkstätten auch größerer Technologiefirmen. Eine (externe) Beratung ist sehr gefragt und der Kenntnisstand noch nicht überall ausreichend. Wir hoffen mit diesem Buch dazu beitragen zu können, die Lücken zu schließen.



Hinweis: Weil das vorliegende Buch ein interaktives Projekt ist, hoffen wir, diesen Absatz bald löschen zu können 😊. Gleichzeitig möchten wir alle Lehrkräfte, Dozenten und Ausbilder, die sich bereits aktiv mit dem Themenfeld 3D-Druck in Bildungseinrichtungen beschäftigen, von dieser Kritik ausnehmen. Sehr gern nehmen wir Ihre Vorschläge und Projekte mit in die nächsten Versionen des Projekts auf – schreiben Sie einfach an 3d-druck-buch@conrad.de.

3D-Druck ermöglicht Schülern ein didaktisch modernes und anspruchsvolles Lernumfeld – Problemstellungen und Aufgaben können gemeinsam kritisch durchdacht und interaktiv gelöst werden. Phantasie, Kreativität und gegenseitige Motivation sind wichtige Bestandteile bei diesem innovativen Lernkonzept. Auch die Werkzeuge, die diesen Prozess unterstützen wie digitale Zeichenbretter, Computer und Tablets, ermöglichen eine hohe Interaktivität und haben sich in der Unterrichtspraxis bereits bewährt. Die Schüler können jetzt gestalten, entwerfen und erarbeiten sich ihr Know-how praxisbezogen – im Unterschied zu eher abstrakten Lehr-Lernformen.

Es gibt viele Bereiche in den verschiedenen MINT-Fächern, in denen ein Bezug zum 3D-Druck hergestellt werden kann: Dies kann über die zugrundeliegenden Technologien erfolgen, die gedruckten Objekte selbst können zum Untersuchungsgegenstand erklärt werden, oder es können mit dieser Technologie

Hilfsmittel für den Fachunterricht hergestellt werden. Für Lehrkräfte und Dozenten bedeutet dies, bereits erprobte Konzepte mit digitalen Medien auf ein neues, spannendes und hochmotivierendes Feld zu übertragen. Als Ideenskizze stellen wir für die folgenden Fächer beispielhaft verschiedene Einsatzmöglichkeiten vor und gehen in Kapitel 3 und 4 auf konkrete Projekte ein.

Technik

- Spindel- oder Zahnriemenantriebe
- XYZ Positionierung
- parallele, serielle Kinematik (Antriebssysteme)

Naturwissenschaften

Für die **Biologie** können Sie Anschauungsobjekte zu Evolution und Funktion von Gelenken verwenden:

Evolution des Menschen:

- 3D-Druck der Schädel von Homo rudolfensis, Homo erectus, Homo neanderthalensis und Homo sapiens
- Zuordnung von Schädel zur Stammesgeschichte

Vergleich Wirbeltiere: Funktion der Wirbelgelenke

- Bandscheibe als dämpfendes Element bei Säugetieren
- Anschauungsobjekt mit Dual-Extruder (feste und flexible Strukturen gleichzeitig drucken)
- Hygiene - Bakterienwachstum und Oberflächenstruktur

Im Fachgebiet **Physik** können Sie viele Themen aus dem Bereich Kinematik, Optik und Wärmelehre mit 3D-Druck verbinden. Dazu können Sie z.B. den Kraftstoß oder Hebelgesetze unter dem Aspekt der „Materialprüfung“ diskutieren:

Zerstörungsfreie Materialprüfung / Kraftstoß:

- „Kann ich mir eine Schutzhülle für mein Handy drucken?“
- Test der Dämpfungseigenschaften bei flexiblem Filament

Zerstörende Materialprüfung / Hebelgesetze:

- „Wie stabil sind 3D-Drucke?“
- Bruchtest unterschiedlicher Querschnitts-Geometrien (Rechteck- vs. T- oder Doppel-T-Profil)
- Einfluss von Raumlage, Temperatur oder Dichte auf die Bruchfestigkeit

In der **Chemie** kann 3D-Druck ebenfalls in unterschiedlichen Klassenstufen eingesetzt werden. Sie können unterschiedliche Druckverfahren ebenso besprechen wie anschauliche Unterrichtsmaterialien (Molekülstrukturen, Orbitalmodelle) selbst herstellen:

Kunststoffe – Thermoplaste, Polymere, Elastomere

- Thermoplaste: 3D-Druck im FDM/FFF-Verfahren nutzt ein physikalisches Verfahren es findet keine chemische Reaktion statt
- Polymere: 3D-Druck per SLA nutzt ein chemisches Verfahren chemische Reaktion (Polymerisation, Aushärtung) wird durch Lichtenergie aktiviert

Die **Mathematik** liefert die Grundlagen, damit diese Technologie funktionieren kann:

- Koordinatensysteme: kartesisch, polar
- Berechnung von paralleler und serieller Kinematik (z.B. Anwendbarkeit des Pythagoras bei Delta-3D-Druckern)
- Räumliche Geometrie (Ebene durch 3 Punkte beim Kalibrieren des Druckbettes)
- Korrelationen (Oberflächenstruktur aus Punktwolken berechnen).

Auch außerhalb der Naturwissenschaften kann 3D-Druck in Bildungseinrichtungen sinnvoll eingesetzt werden:

Kunst

- Modellierung von Körpern, Metamorphose
- Repliken von Statuen

Geschichte

- wichtige Artefakte reproduzieren: Anfassen erlaubt!
- Haptik und Handhabung antiker Werkzeuge etc.

Erdkunde/Geographie

- Topographische Modelle der Umgebung;
- 3D-Radarscans drucken

2. Verfahren und Materialien

Falls Sie bereits einen 3D-Drucker gekauft haben oder Ihre Kaufentscheidung schon getroffen haben, bieten sich Ihnen viele Gestaltungsmöglichkeiten, auf die Sie jederzeit zurückgreifen können. Trotzdem gibt es Fälle, in denen es sehr nützlich ist, für spezielle Anforderungen auf einen 3D-Druckservice zurückzugreifen – z.B. wenn Sie Objekte in Metall benötigen. Die Vorarbeit bis zur Erstellung einer STL-Datei war dabei nicht umsonst.

Dazu finden Sie weitere Infos hier:

<https://www.conrad.biz/de/info-und-service/produkt-services/3d-druck-service.html>

Die unterschiedlichen Technologien bieten individuelle Vor- und Nachteilen, auf die in diesem Abschnitt eingegangen werden soll. In den Abschnitten 2.2 und 2.5 wird auch das FDM/ bzw. FFF Verfahren eingehender beschrieben.

2.1 Freiraumverfahren

Wie vorher beschrieben, gehören Freiraumverfahren ebenfalls zu den additiven, d.h. schichtweise aufbauenden Verfahren. Der Drucker positioniert das Filament exakt dort, wo die Vorlage dies vorsieht. Das Filament ist in der Regel fest und wird durch Hitze weich, sodass es sich leicht durch die Düse pressen lässt. Sind im Modell Überhänge oder Hohlräume enthalten, druckt das Gerät zusätzlich Stützkonstruktionen mit, um Verformungen des noch zähflüssigen Filaments zu unterbinden.

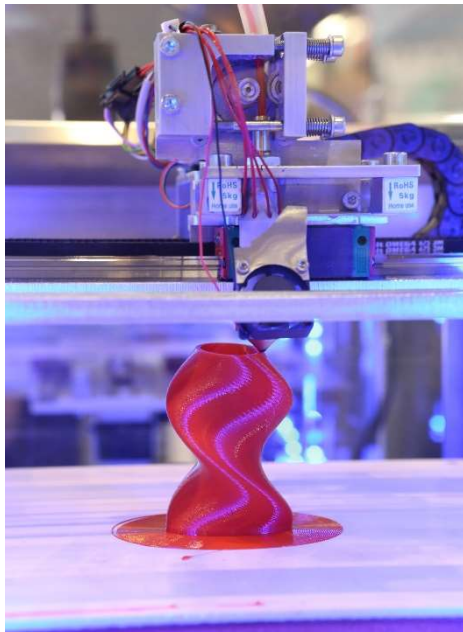


Abbildung 5: FFF/FDM-Verfahren

Das am meisten verbreitete Verfahren ist **Fused Deposition Modeling (FDM)**, deutsch Schmelzschichtung), auch alternativ als **Fused Filament Fabrication (FFF)** bezeichnet. FDM ist eine geschützte Marke bzw. Bezeichnung der Firma Stratasys⁸, weshalb später Mitglieder des RepRap-Projektes die Bezeichnung FFF einführten.

FFF/FDM zeichnet sich besonders durch ein einfaches Handling und hohe Kosteneffizienz aus. Außerdem eignet es sich für ein breites Anwendungsspektrum sowie für Einsteiger und Profis gleichermaßen. Hier gibt es auch die größte Vielfalt unterschiedlicher Geräte verschiedener Hersteller in den unterschiedlichsten Preisklassen.

Häufig werden solche 3D-Drucker auch selbst von ambitionierten Bastlern und Tüftlern, bzw. Makern gebaut. Hintergrund sind einerseits die Zugänglichkeit zu dieser Technologie durch das RepRap Projekt (siehe Kapitel 1.1) und entsprechende Literatur wie z.B. das Buch „3D-Drucker selber bauen - Mach's einfach“ von Daniel Walter, welches sich offensicht-

8 Stratasys Ltd., von Steven Scott Crump 1989 in Minnesota USA gegründeter Hersteller von 3D-Druckern mit zahlreichen Patenten in diesem Bereich. Crump war motiviert von der Idee einen Spielzeugfrosch für seine Tochter herzustellen. Einer der ersten FDM-Drucker kam 1992 mit der Bezeichnung „3D Modeler“ auf den Markt.

lich großer Beliebtheit erfreut. Auch im Internet findet man diverse Anleitungen, die sich sehr motivierend lesen. Damit kann man sicher Geld sparen. Ob man mit dem selbst gebauten Drucker aber auch wirklich dauerhaft Freude hat, wäre zu bezweifeln - denn wie die auch Volksweisheit besagt, kommt der Appetit mit dem Essen. Die Anforderungen an den 3D-Druck steigen sukzessive mit dem technisch machbaren, auch im semiprofessionellen und handwerklich-künstlerischen Bereich.

FFF/FDM eignet sich dort, wo Genauigkeit gefordert ist. Also beispielsweise für präzise Bauteile, die komplexen Tests und rauen Umgebungen standhalten müssen. Auch Befestigungsteile, Werkzeuge und Prototypen in der der Automobilbranche und der Medizintechnik werden oft auf diese Weise produziert. Im privaten Umfeld lassen sich alle vorstellbaren Teile drucken, beispielsweise Ersatzteile im Modellbau, Figuren, Becher oder Spielzeug.

Beim FDM-Verfahren wird das Modell Schicht für Schicht aus Kunststoff gefertigt. Die Beschreibung des FDM/FFF-Verfahrens finden Sie weiter unten in Abschnitt 2.4. Da der Kunststoff durch eine heiße Düse gepresst wird, muss er schmelzfähig sein sowie schnell abkühlen und aushärten. Je nach Form sind auch hier **Stützkonstruktionen** nötig.

Es eignen sich **thermoplastische Kunststoffe** wie ABS- und PLA-Filamente. Filamente mit Anteilen aus Messing-, Kupfer- oder Bronzepartikeln erhalten nach dem Polieren oder Schleifen ihren realitätsgetreuen, metallischen Glanz.

2.2 Flüssigmaterialverfahren

Flüssigkeiten zu verfestigen erscheint zunächst sehr einfach, wenn man an den klassischen Übergang vom Aggregatzustand flüssig zu fest denkt. Doch es bedarf spezieller Verfahren, damit die fest gewordenen Objekte auch in diesem Zustand bleiben - und zwar in einem sinnvollen, praxistauglichen Temperaturbereich, damit Katastrophen, wie die des Ikarus vermieden werden: Dessen Vater verklebte der griechischen Mythologie zufolge Vogelfedern zu großen Flügeln, um aus dem Labyrinth des Minotaurus auf Kreta fliehen zu können - er verwendete Wachs, das die Sonne in größerer Höhe weich werden ließ...

Im Bereich der Flüssigmaterialverfahren verfestigt man spezielle Harze. Generell geschieht dies durch eine chemische Reaktion, die Polymerisation von Monomeren, z.B. bei Epoxidharzen. Soll diese Polymerisation auch noch gezielt an bestimmten Stellen und zum definierten Zeitpunkt geschehen, ist **Photopolymerisation** eine hervorragend geeignete Technologie, wie eindrucksvoll beim Zahnarzt erlebt werden kann. Im Bereich des 3D-Drucks wird zunächst das lichtempfindliche Harz in eine Wanne gefüllt, die damit quasi als Grundplatte dient. Danach wird es computergesteuert fokussiert und dem 3D-Modell folgend durch einen UV-Laser bestrahlt und damit gehärtet. Dieses **Stereolithografie (SLA)** genannte Verfahren war das erste 3D-Druckverfahren und ist somit der Klassiker (siehe Kapitel 1.1).

Am Markt haben sich zwei Vorgehensweisen etabliert: Einmal bestrahlt der UV-Laser das Harz von oben und senkt die Grundplatte Schicht für Schicht ab. Alternativ wird von unten bestrahlt und das Objekt^① wird an der Grundplatte^④ hängend aus dem Harzbad^⑨ herausgezogen (z.B. beim Form 2 des Herstellers Formlabs und beim Nobel 1.0A von XYZprinting).

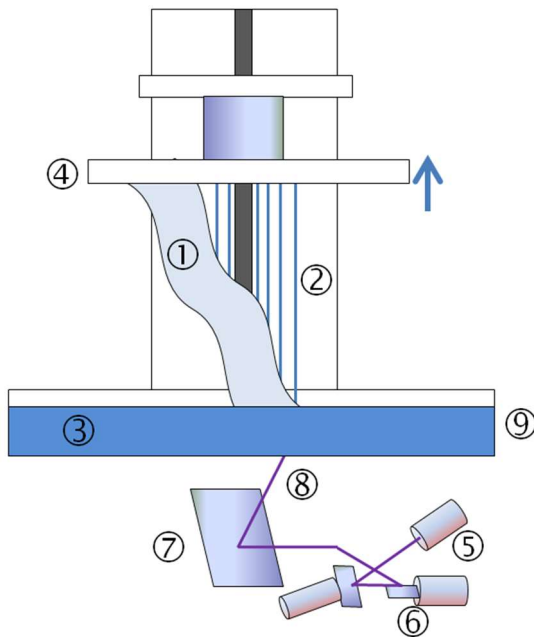


Abbildung 6: Prinzip des SLA-Verfahrens. © Conrad Electronic SE

Per SLA können vor allem filigrane, sehr detailreiche Modelle und Bauteile hergestellt werden: so u.a. Gussmodelle, Funktionsbauteile und Prototypen im Maschinenbau, in der Automobilbranche und der Medizintechnik. Auch für Endprodukte wie beispielsweise passgenaue Hörgeräte ist dieses Verfahren gut geeignet.

Dabei entsteht das Modell ① Schicht für Schicht in einem Flüssigbad ③ aus Photopolymer-Harz⁹. Ein Laserstrahl ⑧ härtet jede Schicht aus, bevor das entstehende Modell für eine weitere Schicht in die Flüssigkeit eintaucht oder nach oben gezogen wird. Damit das Objekt während des Druckvorganges seine Position hält, müssen **Stützstrukturen** ② (Säulen oder Streben) mit vorgesehen werden, die später mechanisch entfernt werden. Keine Sorge, die Software zur Druckvorbereitung baut diese Hilfsstrukturen automatisch ein. Wichtig ist es, das fertige Modell am Ende zunächst zum Abtropfen beiseite zu stellen und dann in einen mit Isopropanol gefüllten Behälter zum Herausspülen überschüssigen Harzes zu tauchen. Dazu müssen spezielle Schutzhandschuhe und eine Schutzbrille getragen werden, um Haut- oder Augenkontakt zu vermeiden. In einer separaten **UV-Kammer** findet im Anschluss das endgültige Aushärten statt.

Der Nobel 1.0A (Advanced) von XYZprinting bietet einige Vereinfachungen in der Bedienung, indem dieser das erforderliche Harz automatisch aus der Flasche entnimmt und das Flüssigkeitsniveau überwacht. Es ist auch kein Umfüllen erforderlich.

Vorteile des SLA-Verfahrens:

- sehr genau, ab 25 µm Schichtdicke,
- Epoxidharz ist ausgehärtet sehr robust gegenüber mechanischer, thermischer oder chemischer Beanspruchung.

9 Ein spezielles Gemisch aus Methacrylsäureester, oder - je nach Hersteller - Urethanacrylat und einem Acrylmonomer, sowie einem Photoinitiator. Photoinitiatoren sind gegen UV-Licht empfindliche Stoffe, die die Polymerisation (Verkettung) starten, indem ein Radikal, also eine hochreaktives Spaltprodukt mit einem einzelnen Elektron, gebildet wird.

Nachteile:

- aufwändig
- erhöhte Material- (1 Liter Harz z.B. ab ca. 122€¹⁰) und Gerätekosten
- separate Aushärtekammer erforderlich
- Schutzhandschuhe und Schutzbrille erforderlich (Sicherheitsdatenblatt beachten!)



TIPP: Alternativ kann auch der 3D-Druckservice empfohlen werden, um vor einer Kaufentscheidung für einen SLA Drucker die Qualität der Druckergebnisse zu testen:

<https://www.conrad.de/de/info-und-service/individuelle-produkt-services/3d-druck-service.html>

Bei den sogenannten **Flächenverfahren** wird nicht mittels eines Laserstrahles punktuell gehärtet, sondern einer Belichtungsmatrix folgend.

Dazu kann das von Beamern bekannte DLP (Digital Light Processing) verwendet werden: Das von Texas Instruments entwickelte Verfahren nutzt eine Fläche von Mikrospiegeln auf einem Chip, die einzeln gekippt werden können. Damit lassen sich einzelne Pixel in einer Bildmatrix hell oder dunkel schalten, je nachdem, wie das einfallende Licht reflektiert wird. Alternativ gibt es auch ein Kombinationsverfahren, welches Photopolymere von unten belichtet, aber eine Suspension aus der Photomonomerlösung mit beispielsweise Keramikpartikeln einsetzt, die dann gesintert werden. Der Binder (Polymer) wird dabei später thermisch entfernt bzw. ausgebrannt. Dieses Verfahren wird als Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM) bezeichnet. Im Gegensatz zu SLA ergibt der Wortbestandteil „Litho“ (für griechisch lithos= Stein) hier eine gewisse Sinnhaftigkeit, denn Lithographie ist ja eine selten gewordene Drucktechnik auf sehr glatten Kalksteinen¹¹. Der großen Popularität der Lithografie in früheren Zeiten ist es vermutlich geschuldet, dass irgendwann vergessen wurde, den Stein als Begriff wieder zu entfernen, als er nicht mehr benötigt wurde.

2.3 Pulverbettverfahren

Pulverbettverfahren (auch kurz Pulververfahren) gehören zu den additiven 3D-Druckverfahren, die auch „generative Fertigung“ genannt werden.

Beim Pulverbettverfahren wird in einem wannenförmigen Bauraum Schicht für Schicht zuerst das pulverisierte Material aufgetragen, aus dem das Objekt gedruckt werden soll. Anschließend werden die Bereiche, die das 3D-Objekt beinhalten, entweder durch ein gezielt aufgesprühtes Bindemittel oder durch Hitze miteinander verbunden bzw. verschmolzen. Nach jeder Schicht senkt sich die Druckplatte um eine Schichthöhe und der Vorgang wiederholt sich.

10 Stand Jan. 2019

11 erfunden von Alois Senefelder 1798 mit Solnhofener Plattenkalk

In einer schematischen Darstellung läuft diese Klasse der 3D-Druckverfahren demnach folgendermaßen ab:

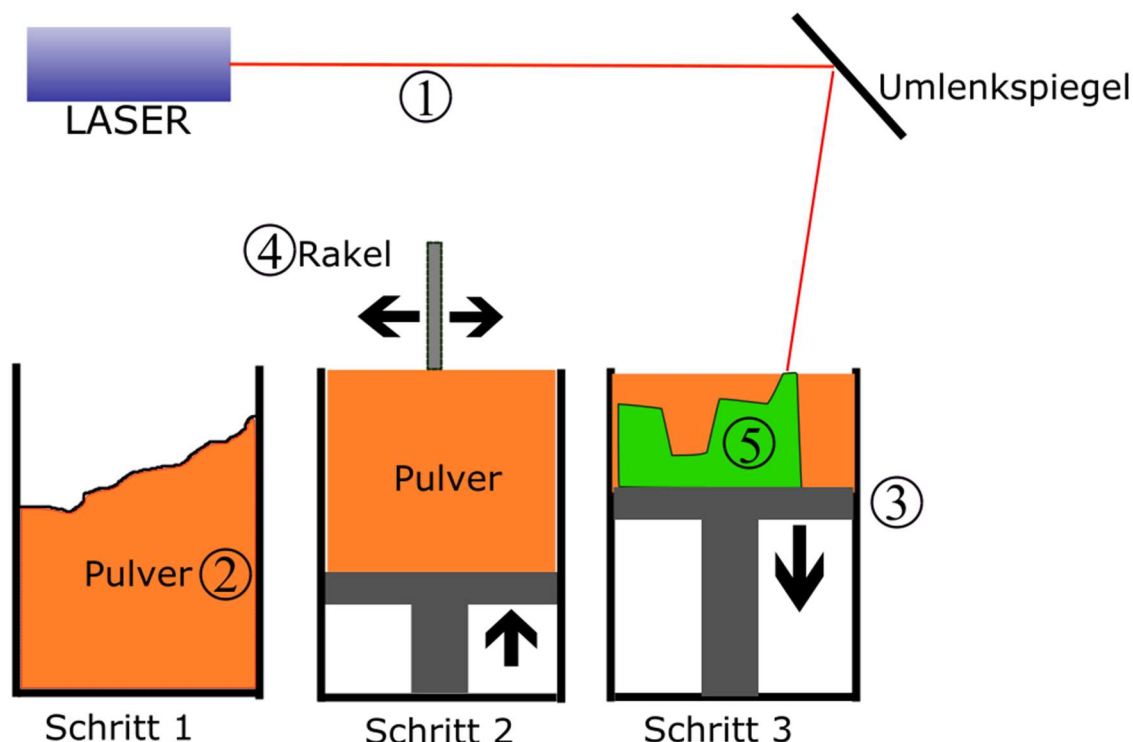


Abbildung 7: Pulverbettverfahren - Selektives Laserschmelzen (SLM). © Conrad Electronic SE

In Schritt 1 wird der Druckraum mit schmelzfähigem Pulver (2) befüllt und in Schritt 2 mit einer Rake (4) die Oberfläche glattgezogen. Dann wird mit einem oder mehreren Laserstrahlen (1) das Pulver an der obersten Pulverschicht verschmolzen. Wie bei anderen additiven Verfahren geht es mit einer Grundschicht los. Danach wird die Druckplatte (3) um die gewünschte Schichtdicke nach unten gefahren, erneut mit Pulver aufgefüllt und erneut mittels Rake (4) geglättet. Erneut schmilzt der Laserstrahl selektiv Pulver der nächsten Schicht und so weiter. Schritt 3 stellt in der Zeichnung zum leichtern Verständnis das grüne Druckobjekt (5) nach Verschmelzung mehrerer Schichten dar.

Die Bauteile sind mit einer Stützstruktur verbunden, die fest mit der Grundplatte verschweißt ist. Dadurch sind eine Wärmeableitung und eine Fixierung während der Produktion gewährleistet. Die Stützstrukturen werden im Anschluss an den Druckvorgang manuell entfernt.

Vorteil: Auch verschiedene Metalle können so eingesetzt werden; weiterhin entstehen die Objekte im Pulverbett liegend, so dass keine zusätzlichen Stützstrukturen notwendig sind.

Nachteil: Hoher Energieeinsatz (bis zu 2.800W) und komplizierter mechanischer Prozess zum Pulverauftrag und glätten.

Die folgenden Verfahren arbeiten ebenfalls mit pulverförmigen Materialien, tragen aber eigene Bezeichnungen aufgrund der spezifischen Weise, wie das Pulver zu einem Werkstück zusammengefügt wird:

Elektronenstrahlschmelzen (EBM): Auch hier wird schichtweise Metallpulver verschmolzen. Die Energie dazu wird jedoch mit einer Elektronenstrahlkanone im Hochvakuum erzeugt und das Material muss

erhitzt werden. Die Ablenkung des Elektronenstrahles geschieht ähnlich wie in der Bildröhre eines klassischen Röhrenfernsehgerätes per magnetischer Ablenkung.

Großer Vorteil: Verschiedene Metalle können eingesetzt werden.

Nachteil: Hoher Energieaufwand mit einigen hundert Kilowatt. Außerdem erzeugen die Elektronen beim Aufprall Röntgenstrahlung, die wiederum abgeschirmt werden muss.

Selektives Lasersintern (SLS): Wie beim SLM-Verfahren werden mittels eines energiereichen Laserstrahles dünne Schichten eines Pulvers in einem Pulverbett verdichtet. Die Kunststoff-, Metall-, oder Keramikpartikel werden dabei jedoch nicht unbedingt geschmolzen, d.h. verflüssigt, sondern verbacken durch hitzebedingte Ausdehnung miteinander. Die Pulver müssen rieselfähig sein. Über eine Rakel, eine Kombination mehrerer Rakeln oder eine Rolle wird eine feine Schicht Pulver auf die Bauplattform aufgetragen und bis knapp unter den Schmelzpunkt erhitzt.

Vorteil: Verschiedene Materialien sind möglich: Kunststoffe, Keramik und Metalle

Nachteil: Energieaufwändig und komplexe Vorrichtung erforderlich, damit ein teures Verfahren.

Beim **Polyjet-Modeling (PJM)** oder **Multijet-Modeling (MJM)** werden flüssiges Acrylharz-Polymere über einen Druckkopf mit einer oder mehreren Düsen schichtweise auf eine Grundplatte aufgetragen. Die Aushärtung geschieht mittels UV-Licht. Wie bei den anderen Verfahren steuert ein Computer den Verfahrensweg auf der Druckplatte. Da die UV-Lampen direkt am Druckkopf angebracht sind, wird der noch flüssige Kunststoff zielgerichtet und genau zum Zeitpunkt nach dem Aufbringen ausgehärtet. Über die Intensität der UV-Lampe wird auch die feste Verbindung zwischen den Schichten optimal fokussiert gesteuert. Der Clou dabei ist, dass zunächst keine komplette Aushärtung angestrebt wird, damit die Schichten sich vor dem kompletten Aushärten miteinander verbinden.

Zuletzt wird das gedruckte Objekt noch mehrere Male komplett bestrahlt um die finale gewünschte Härte zu erzielen.

2.4 Wie funktioniert ein 3D-Drucker nach dem FFF/FDM-Verfahren?

Mit einem 3D-Drucker werden in Schichtbauweise verschiedene, auch selber entworfene, dreidimensionale Objekte hergestellt. Das Objekt, das Sie drucken möchten, muss also digital als dreidimensionales Modell vorliegen. Dafür können Sie vollständige 3D Entwürfe aus dem Internet herunterladen oder diese selbst in einem geeigneten Programm erstellen. Damit aus der entstandenen Datei im 3D-Drucker ein realer Gegenstand entsteht, beinhalten alle Geräte eine entsprechende Software. Diese berechnet die nötigen Verfahrensweg und die daraus resultierenden Befehle für die Motoren der Linearachsen. Dabei müssen die 3 Raumachsen X, Y und Z sowie der Vorschub für die Zuführung des Filamentes durch das Hot-End gleichzeitig gesteuert und synchronisiert werden.

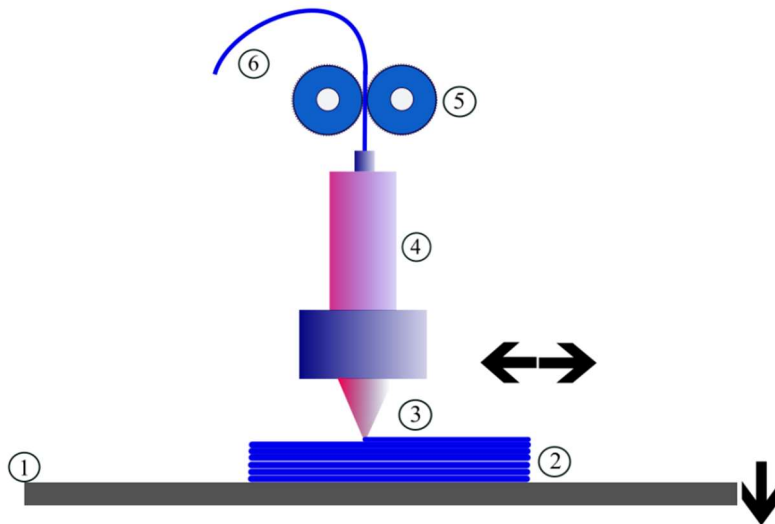


Abbildung 8: Druckprinzip des FFF/FDM-Verfahrens © Conrad Electronic SE

Gedruckt wird mit einer Düse (3), aus der das mehr oder weniger viskose **Filament** als dünner Faden austritt. Das Filament (6) wird mittels zweier gerändelter Andruckrollen (5) in das Hot-End (4) zugeführt und dort geschmolzen. Das Hot-End (4) mit Düse (3) bewegt sich in den vorberechneten Bahnen über das Druckbett (1) und trägt den Faden in mehreren Schichten (2) übereinander auf. Das 3D-Objekt wächst so von unten Schicht für Schicht in die Höhe, wobei sich das aufgetragene Material schnell wieder erhärtet. Dabei wird ein geschlossenes 3D-Druckobjekt nicht vollständig mit Filament gefüllt. Im Inneren der Druckobjekte erstellt der 3D-Drucker eine vordefinierte Füllstruktur, bei der die Materialstärke individuell in % Füllgrad einstellbar ist. Das spart Material und stabilisiert das Objekt zusätzlich.



Hinweis: Sie können die Dichte des gedruckten Objekts und die Füllstruktur selbst individuell anpassen und so von einem Hohlkörper (0% Füllung) bis zu einem Vollkörper (100%) drucken. Diese Einstellung hat natürlich auf Stabilität und Druckzeit einen wichtigen Einfluss. Die Standardeinstellung ist 20% und das reicht auch für die meisten Zwecke.



Tipp: 3D-Drucker gibt es mittlerweile in jeder Preisklasse. Allerdings sollte man sich bewusst sein, dass auffallend günstige Geräte hinsichtlich Präzision und Qualität nicht mit höherpreisigen, gut verarbeiteten Geräten mithalten können. Dies ist gerade beim Druck von Ersatz- oder Bauteilen ärgerlich, wo Genauigkeit gefragt ist. Conrad Electronic bietet Ihnen deshalb 3D-Drucker von hochwertiger Qualität an, die Ihnen brauchbare Ergebnisse liefern und damit Ärger vermeiden. Sollten Sie unsicher sein, welcher Drucker für Sie der richtige ist, empfehlen wir den Besuch einer unserer Filialen. Denn dort wird einerseits Beratung noch „großgeschrieben“, andererseits bieten unsere Printhubs vor Ort auch die Möglichkeit, einen Probedruck zu machen und sich durch das Gespräch mit unseren Experten die Kaufentscheidung zu erleichtern.

Hier finden Sie unsere Filialen: <https://www.conrad.de/de/filialen.html>

2.5 Materialien für das FDM/FFF-Verfahren

Verwendet werden Materialien in Fadenform (engl. filament), die unter Hitze flüssig werden und damit für das FDM/FFF-Verfahren geeignet sind. Das können thermoplastische Kunststoffe wie PLA, ABS, PET, Nylon, aber auch bestimmte Metalle, Wachs oder sogar Schokolade sein. Im sogenannten Hot-End, einer zylindrischen, elektrisch beheizten Röhre, wird das Material bis über den Schmelzpunkt erhitzt. Die

Fließfähigkeit bzw. Viskosität ist entscheidend für die Eignung zum 3D-Druck. Angetrieben durch den Vorschubmotor, verlässt das flüssige Filament die Düse und wird auf die Druckplatte, oder auf die bereits erhärtete Schicht darunter aufgebracht. Der schichtweise Aufbau ist charakteristisch für das FDM-Verfahren. Fließgeschwindigkeit, Position, Verfahrensweg und Temperatur werden durch den im 3D-Drucker eingesetzten Computerprozessor genau gesteuert: Die Temperatur wird idealerweise sogar auf ca. 0,1°C genau geregelt. Das ist ein wichtiges Qualitätskriterium für hochwertige 3D-Drucker. Regeln bedeutet in der Automatisierungstechnik, dass die Temperatur ständig genau elektrisch gemessen wird und dabei mit dem Sollwert (also der idealen Temperatur je nach Filament) verglichen wird. Je nach Abweichung wird die Heizleistung des Hot-Ends nachgeregelt, um eine gleichbleibende Druckqualität zu gewährleisten. Der dazu erforderliche Temperatursensor befindet sich im Hot-End.

Nach Verlassen der Druckdüse sollte das Filament möglichst rasch durch Abkühlen aushärten und mit der darunter befindlichen Schicht verschmelzen, bzw. verkleben. Meist wird die Abkühlung dazu noch durch einen oder mehrere kleine Ventilatoren gesteuert (d.h. hier wird der Einfachheit halber nicht gemessen). Das Aushärten kann je nach aufgebracht Menge, Temperatur und Geschwindigkeit und dessen Wärmekapazität mehr oder weniger schnell geschehen. Bei falscher Parametrierung, oder ungünstigem Aufstellungsort kann es zu Verformungen des gedruckten Objektes kommen.

Deswegen ist eine möglichst geringe Schrumpfung beim Abkühlen ein wichtiges Kriterium für die Eignung eines Kunststoffes als 3D-Drucker-Filament. Diese thermische Eigenschaft wird durch die Wärmeformbeständigkeitstemperatur (engl. Heat Deflection/Distortion Temperature, abgekürzt HDT) charakterisiert und sollte aus dem Produktdatenblatt ersichtlich sein.

3D-Drucker nach dem FDM- bzw. FFF-Verfahren und das zugehörige Filament sind verhältnismäßig günstig in der Anschaffung und eignen sich daher auch für den Privatanwender, ambitionierten Hobbybastler oder „Maker“. Es gibt eine Vielzahl an Filamenten für den 3D-Druck und Filament ist nicht gleich Filament. Die verschiedenen Filamente unterscheiden sich nicht nur durch ihren chemischen Herstellungsprozess, sondern auch in Härte, thermischer Beständigkeit, Schlagfestigkeit, Flexibilität. Außerdem verfügen manche Filamente über besondere Eigenschaften: so gibt es lebensmittelechte, wasserlösliche, transparente, UV-beständige, chemisch-beständige, flammhemmende, nachleuchtende und witterungsbeständige Filamente, um nur einige Eigenschaften zu nennen.

Die Auswahl ist mittlerweile sehr groß. Conrad Electronic bietet aktuell über 600 verschiedene Filamente¹², die unter www.conrad.de leicht nach den Kriterien Farbe, Gewicht, Material, Marke, Durchmesser, Materialeigenschaft per Filter ausgewählt werden können.

Um es gleich voraus zu schicken: falls Sie gerade mit dem 3D-Druck beginnen, oder sich nur vorinformieren:



Tip: Beginnen Sie möglichst mit PLA, denn dieses Filament ist einfach zu drucken und bringt die besten Ergebnisse, die normalen Ansprüchen meist genügen. Es gibt auch preisgünstige Filament-Pakete, die verschiedene Filamente in kleineren Mengen zum Test enthalten. Auch hier verwenden Sie am besten zunächst PLA. Beachten Sie auch den Filamentdurchmesser und den zulässigen Temperaturbereich des Druckers. Beim Durchmesser haben sich 1,75mm und 2,85 bzw. 3mm etabliert.

Fachkundige Beratung finden Sie in allen Conrad Electronic Filialen!

Falls Sie unsicher sind, wieviel Filament Sie für Ihren geplanten Druck brauchen, oder ob die vorhandene Rolle noch reicht, sagt Ihnen die Druckvorbereitungssoftware wie z.B. CURA oder Repetier Host vor dem Start, wieviel benötigt wird: (hier wurde 3mm Filament ausgewählt) [Abb. 8]



Abbildung 9: Automatische Berechnung von Druckzeit und benötigter Menge Filament

Beim Umgang mit 3D-Druck-Technologien gilt es einiges zu beachten, darunter die allgemeine Sicherheit bei der Verwendung von (3D-Druck-) Maschinen, Luftemissionen und Raumluftqualität. Filamente können während der Verarbeitung chemische Stoffe und Partikel an die Raumluft abgeben - daher den Arbeitsraum lüften! Diesbezüglich ist PLA eines der umwelt- und gesundheitsfreundlichsten Filamente.

Eine genaue Diskussion dieses Themas finden Sie in Kapitel 5, wo auch aktuelle Studien zu diesem Thema vorgestellt werden.

Halten Sie sich exakt an die Bedienungsanleitung des verwendeten Druckers und die darin beschriebenen Sicherheitsvorkehrungen, um das richtige Filament zu verwenden, es bestimmungsgerecht zuzuführen und zu verarbeiten. Die Lagerung der Filamente sollte in einem vom Hersteller vorgegebenen Temperaturbereich erfolgen, damit die gewünschten Produkteigenschaften erhalten bleiben. Filament erhalten Sie in der Regel in luftdicht versiegelten Packungen. Öffnen Sie diese erst vor der Verwendung und lagern Sie die Rollen möglichst ebenfalls in luftdicht verschließbaren Tüten (z.B. „Zippertüte“ oder Frischhalteboxen mit Silika-Gel), da viele Filamente hygroskopisch, d.h. wasseranziehend sind. Die Aufnahme von Wasserdampf aus der Raumluft verschlechtert die Druckeigenschaften. Auch Licht, insbesondere Sonnenlicht oder Halogenlampen (diese enthalten auch mehr oder weniger UV-Anteile) haben über die Zeit einen negativen Einfluss auf die Qualität. Verwenden Sie die Filamente zudem innerhalb der angegebenen Fristen. Im Zweifelsfall die Produkt- oder Sicherheitsdatenblätter mit den Herstellerangaben lesen und beachten.



Tipp: Machen Sie ggf. einen Probedruck, um sicherzustellen, dass das Filament noch gut geeignet ist, bevor sie einen größeren Druck starten.

Überblick über die wichtigsten Materialien

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Filamenten, die je nach ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedliche Verarbeitungstemperaturen und ggf. weitere spezielle Erfordernisse nötig machen. Für den Einstieg sollten Sie mit PLA arbeiten – dieses Filament sowie die wichtigsten werden im Folgenden ausführlicher dargestellt, von anderen werden nur die Eigenschaften und Bezeichnungen aufgeführt.

PLA Polylactide Acid

ist ein Biokunststoff, weil aus natürlichen Rohstoffen hergestellt. Das Polymer basiert chemisch auf Milchsäuregruppen:

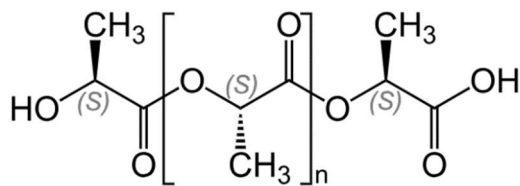


Abbildung 10: Strukturformel PLA, Quelle: Wikimedia

PLA in reiner Form gilt sogar als biologisch abbaubar, jedoch sind die Filamente häufig Copolymere, d.h. enthalten Zusätze, wie z.B. Farbstoffe oder andere Polymere, die diese positive Eigenschaft meist leider wieder zunichtemachen. Daher müssen wir auf die Produktdatenblätter der einzelnen Hersteller verweisen.

- ideales Filament für unkompliziertes Drucken
- umweltfreundlich
- weitgehend geruchsfrei, gelegentlich als süßlich beschrieben
- optimale Druckeigenschaften, da beim Abkühlen nahezu keinen Verzug
- optimal für Anfänger geeignet
- sehr große Auswahl an Herstellern, Farben und Ausführungen
- preisgünstig
- Drucktemperatur: 180 bis 230°C
- Druckbett: Temperierung nicht unbedingt erforderlich, ggf. 60°C

Vorteile

- kann nahezu von allen 3D Druckern verarbeitet werden
- nachhaltig herstellbar und umweltfreundlich
- nahezu keinen Verzug beim Abkühlen - optimal für Anfänger
- Emissionen (organische Verbindungen, Feinstaub) teilweise unterhalb der Nachweisgrenze

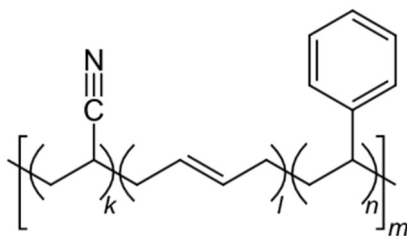
Nachteile

- hartes Material - schwer nachzubearbeiten
- geringe Bruchfestigkeit
- niedrige Erweichungstemperatur - die gedruckten Objekte sind nicht hitzebeständig

PLA Compound, Polylactid mit Zusatz

PLA mit Zusätzen, die für spezielle Materialeffekte sorgen

- je nach Zusatz spezielle Eigenschaften wie z.B. Farbeffekte, Stein-, Terracotta-, Betonlook, etc.
- PLA Compound Aluminium und Kupfer: polierfähig für speziellen Metall-Look
- PLA Compound Holz: mit verschiedenen Temperatureinstellungen sind echte Holzeffekte, selbst Jahresringe simulierbar.
- gute Nachbearbeitung
- ideal für künstlerische Zwecke
- Drucktemperatur: 210 bis 250°C
- Druckbett: Temperierung nicht unbedingt erforderlich, ggf. 60°C

ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat [Abb.10]

ist ein leichtes, robustes und schlagfestes Filament. Als Voraussetzung für das Drucken mit ABS Filamenten benötigen Sie ein beheiztes Druckbett, da die ABS Filamente dazu neigen, beim Abkühlen zu schrumpfen und somit an den Kanten unschönes „Warping“ entsteht.

Abbildung 11: Strukturformel ABS. Quelle: Wikimedia

Druckhinweise:

- Drucktemperatur: zwischen 220 und 270°C (je nach Hersteller)
- Druckbett: 50 bis 100°C

Vorteile

- Hohe Schlagfestigkeit
- Optimal zur Nachbearbeitung
- Geringes Warping (Verzugsarm)
- Hohe Belastbarkeit
- Hohe Bruchfestigkeit
- Hitzebeständig bis ca. 85° C
- Kratz- und schlagfeste harte Oberfläche

Nachteile

- Neigt beim Abkühlen zum Verziehen
- Einhausung empfehlenswert
- Beheiztes Druckbett notwendig
- deutliche Emission (Feinstaub, organische Verbindungen), vergleichbar einem Laserdrucker

ABS Pro ist im Vergleich zu herkömmlichem ABS deutlich verzugsärmer. Dadurch lässt es sich einfach drucken und ist auch für größere Modelle geeignet.

ASA Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer

- Alternative zum ABS für Outdoor-Anwendungen, da resistent gegen UV-Licht
- höhere Formbeständigkeit bei Hitze
- resistent gegen Chemikalien
- hohe Schlagzähigkeit
- besonders gut für technische Funktionsbauteile.
- unlöslich in Wasser
- Drucktemperatur: zwischen 235 und 270°C (je nach Hersteller)

BVOH Hochleistungs-Vinylalkohol-Copolymerisat

- wasserlösliches Trägermaterial für Geräte mit Dual-Extruder
- Abfälle können über das häusliche Abwasser entsorgt werden
- exzellente Schichtenbildung, emulgierend, haftend
- empfindlich gegen Licht und UV-Strahlung
- gute Löslichkeit in Wasser
- Hauptanwendungsbereiche: Trägermaterial für Filamente, Druckprojekte mit Überhängen oder komplexe Objekte
- Drucktemperatur: zwischen 200 und 220°

BendLay Polystyrol Mischung aus Styrol-Butadien-Copolymer und Polystyrol

- elastischer als ABS
- Druckparameter von ABS
- Dichte: 1,05 g/cm³
- Drucktemperatur: zwischen 215 und 240°C

CPE Copolyester

- chemikalienbeständig
- robust und formstabil
- gute Zwischenschichthaftung
- geringe Konzentrationen an ultrafeinen Partikeln (UFP) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)
- Härte 72 (Shore D)
- Drucktemperatur: zwischen 245 und 260°C

CPE + Copolyester

- chemisch beständig
- höhere Temperaturbeständigkeit und Schlagfestigkeit als CPE
- Drucktemperatur: zwischen 250 und 260°C

Elastic ein thermoplastisches Polyuretan (TPU)

- semiflexibel
- gummiartige Haptik
- sauberer Fluss und beste Druckergebnisse
- Drucktemperatur: zwischen 180 und 230°C

Flexibles Filament Thermoplastischer Copolyester TPC

- biologische Basis
- gummiartig dehnbar
- Drucktemperatur: zwischen 210 und 250°C

HIPS High Impact Polystyrol (durch Zusatz von Kautschuk modifiziert)

- hoch schlagfest (engl. high impact)
- in D-Limonen-Extrakt löslich
- Drucktemperatur: 220 bis 235°C
- Druckbett: 50 bis 100°C

Laybrick Compound

- Filament mit Echtholz-Fasern
- Drucktemperatur: 165 bis 200°C

Nylon siehe PA (Polyamid)

PA Polyamid (Nylon)

- hohe Hitzebeständigkeit
- widerstandsfähig
- hohe Zugfestigkeit
- Drucktemperatur: 250 bis 260°C
- Druckbett: 50 bis 100°C

PC Polycarbonat

- zäher als normales PC
- temperaturbeständig bis 110 °C
- großartige mechanische Eigenschaften
- Drucktemperatur: 250 bis 270°C

PC ABS

- optimiertes Fließverhalten
- Wärmeformbeständigkeit zwischen 110 und 135°
- Verfahren wie Lackieren und Verkleben können angewendet werden
- sehr gute elektrisch isolierende Eigenschaften (spezifische Oberflächenwiderstand 10^{15} Ohm)
- hohe Kerbschlagzähigkeit über weiten Temperaturbereich
- hohe Maßgenauigkeit
- geringe Verzugsneigung
- Drucktemperatur: bis 280°C
- Druckbett: 90 bis 110°C

PEEK Polyetheretherketon ist ein hochtemperaturbeständiger thermoplastischer Kunststoff, der aufgrund der hohen Drucktemperatur nur für sehr spezielle 3D-Drucker geeignet ist.

- beständig gegen viele Medien
- Schmelztemperatur 343 °C
- obere Dauergebrauchstemperatur 260 °C
- geringe Rauchentwicklung im Fall eines Brandes
- geeignet für Luftfahrt Transportwesen, Öl- und Gas (Stützringe und Medienleitungen)
- das Material findet Einsatz in der Medizintechnik und ist unter speziellen Bedingungen sogar implantierbar
- Drucktemperatur: ab 375 °C bis 410°C

PET Polyethylenterephthalat

- hochfest und beständig
- temperaturresistent
- verschiedene Transparenzstufen verfügbar
- Drucktemperatur: 220 bis 250°C
- Druckbett: Temperierung nicht erforderlich

PET G Polyethylenterephthalat mit Glykol modifiziertes PET

- hohe Transparenz
- niedrige Viskosität (fließt also besser)
- lebensmittelecht
- schlagzäh
- Drucktemperatur: 230 und 260°C
- Druckbett: Temperierung nicht erforderlich

PET G Compound siehe auch PET G

- PET G mit Zusatz von 20% Kohle- bzw. Carbonfasern
- für extrem leichte und widerstandsfähige Bauteile: gerade im Rennsport vielfältig eingesetzt
- abrasive Wirkung durch Carbonfasern belasten die Düse stark: durch die Reibung der Kohlefasern in der Düse weitet sich die Düsenöffnung. Messingdüsen sollten nach jeder Rolle ausgetauscht werden. Ggf. ist eine Stahldüse erforderlich (je nach 3D-Drucker)
- Drucktemperatur: 230 bis 252°C (bitte Herstellerangaben beachten)

Polyamid (Nylon) siehe PA

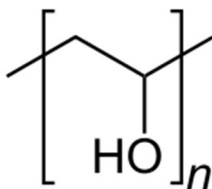
PP Polypropylen

- langlebig
- formbeständig
- chemikalienresistent
- gute mechanische Steifigkeits- und Zugfestigkeitseigenschaften
- hohe Oberflächengüte
- beständig gegenüber Säuren, Basen und organischen Lösungsmitteln
- sehr leichter Werkstoff
- lebensmitteltauglich (je nach Hersteller: Produktdatenblatt beachten!)
- gute Transparenz
- Scharniereigenschaft
- hitzebeständig bis ca. 100°C
- Drucktemperatur: 220 bis 240°C
- Druckbett: 120 bis 150°C

PPA Polyphtalamide

- PPA sind besonders stabile und sowohl mechanisch als auch thermisch beständige Thermoplaste.
- besonders steifer und harter Werkstoff
- hohe Festigkeit und Härte
- hohe Dauergebrauchstemperatur
- Anwendung als Metallsatz z. B. im Motorraum
- eignet sich besonders gut für den 3D-Druck
- im Gegensatz zu **PET G Compound** verschleßen die Druckdüsen nicht
- minimaler Verzug
- Drucktemperatur: 260 bis 275°C
- Druckbett: auf 110°C temperieren

PVA Polyvinylalkohol



PVA eignet sich ideal als Stützmaterial für Materialien wie PLA, Elastic, Flex, usw. Nach dem Drucken wird das 3D Modell einfach in lauwarmes Wasser gelegt, in dem sich das PVA auflöst.

Abbildung 12: Strukturformel von PVA. Quelle: Wikimedia

Druckhinweise:

- ideal als Stützmaterial einsetzbar
- wasserlöslich
- Drucktemperatur: 180 bis 220°C
- Druckbett: Temperierung nicht unbedingt erforderlich, bis max. 60°C

TPE ist eine Abkürzung für chemisch sehr unterschiedliche **Thermoplastische Elastomere**. Daher sind die Drucktemperaturen auch je nach Hersteller unterschiedlich:

- thermoplastisches Hochleistungs-Polyesterelastomer
- sehr flexibel
- beständig gegen Öle, Fette, Abrieb und Lösungsmittel
- gute Formbeständigkeit
- gute Witterungsbeständigkeit
- Hauptanwendungsbereiche: Flexible Elemente wie Klammern, Innensohlen für Schuhe, Schläuche, Spangen, Isolierungen, Bälle, Reifen usw.
- Drucktemperatur: 175 bis 250°C (je nach Hersteller)
- Druckbett: auf 40°C temperieren

TOUGH PLA vereint die besten Eigenschaften von PLA und ABS. Dank verbesserter Dehnbarkeit und Flexibilität gibt es wenig Verzug.

- Extrem zuverlässig
- Äußerst stabil
- Druck mit hoher Geschwindigkeit
- Drucktemperatur: 195 bis 240°C
- Druckbett: 60 bis 65°C

Wenn Sie bis hierher alles gelesen haben - Respekt!

Falls Sie die Materialliste doch für zu umfangreich halten – keine Sorge: Bleiben Sie am Anfang möglichst bei PLA, sofern Sie keine ganz besonderen Materialeigenschaften brauchen, denn damit erhalten Sie die besten Druckergebnisse und zwar ohne spezielle „Klimmzüge“ oder erhöhte Kosten!

3. Von der Idee zum fertig gedruckten Objekt

3.1. Erstellung von 3D-Modellen

Die Erstellung von 3D-Modellen erfolgt entweder „manuell“, indem Sie diese mit Hilfe einer **Konstruktionssoftware** (CAD, Computer Aided Design) zeichnen, Abmessungen festlegen oder mit Hilfe einer **Programmiersprache** programmieren. Eine andere Möglichkeit ist, einen bereits bestehenden Körper mit Hilfe eines **3D-Scanners** abzutasten und das damit entstehende 3D-Modell weiter zu bearbeiten. Zudem gibt es noch die Möglichkeit, bereits fertige 3D Objekte aus **Modell-Datenbanken** im Internet zu beziehen.

Vor/Nachteile der drei Herangehensweisen:

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Konstruktion	präzise bei: ▪ bekannten Abmessungen von Bauteilen ▪ eigenen Entwürfen	▪ professionelle CAD-Software hat eine steile Lernkurve
Programmieren	▪ sehr schnell anpassbar ▪ Automatisierung von technischen Bauteilen wie Zahnräder etc.	▪ gute Vorstellung vom fertigen Modell muss vorhanden sein
Scannen	▪ Ideal für plastisches Modellieren (Kunst, Skulpturen) ▪ Rohfassung für komplexere, bereits existierende Vorlagen	▪ Nachbearbeitung notwendig ▪ Software kann z.T. verdeckte innen liegende Öffnungen und Hohlräume nicht erkennen.
Modelldatenbanken	▪ bereits fertige und verfügbare Modelle	▪ Copyright

3.1.1. Konstruktion

Beim Konstruieren von 3D-Bauteilen können idealtypisch zwei Verfahren unterschieden werden: Die Konstruktion anhand von 3D-Körpern, die kombiniert (addiert, subtrahiert, ...) werden und die parametrische Variante, bei der mit Seiten-, Front- und Aufsicht gearbeitet wird und in den jeweiligen Ebenen die 2D-Darstellungen und die Objekteigenschaften vollständig festgelegt werden.

Die erste Variante bietet einen schnellen Einstieg sowie eine flache Lernkurve und eignet sich für kurze Unterrichtsprojekte und außerschulische Arbeiten im Umfang einiger Wochen. Werden die Konstruktionen komplexer, ist der Umstieg auf ein stärker parametrisch vorgehendes Verfahren sinnvoll. Bei diesem werden die Schritte bis zum fertigen Bauteil aufgezeichnet und lassen sich im Nachhinein auch an

beliebiger Stelle wieder editieren: So kann z.B. die Bohrung in Schritt 16 von 89 Konstruktionsschritten von M3 auf M4 geändert werden und die folgenden z.B. 73 Schritte werden entsprechend geändert. Die vollständige Definition der Eigenschaften der modellierten Körper - in den jeweiligen Teilansichten - ermöglicht diese Abhängigkeit der Konstruktionsschritte voneinander.

3.1.1.1 Konstruktion eines einfachen Objektes mit einem CAD Programm am Beispiel „Einkaufswagen-Chip“

Als Software wird hier die im Browser verwendbare Software Tinkercad (www.tinkercad.com) verwendet. Diese erfordert lediglich eine Anmeldung und ist für den Privatanwender nicht mit weiteren Kosten verbunden.

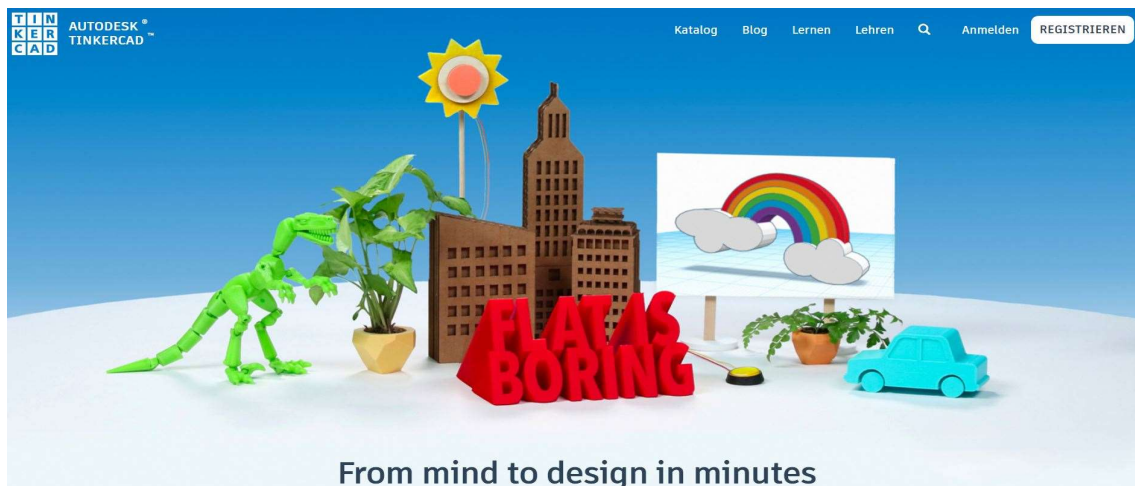


Abbildung 13: Startbildschirm der CAD-Software Tinkercad – im Browser verwendbar

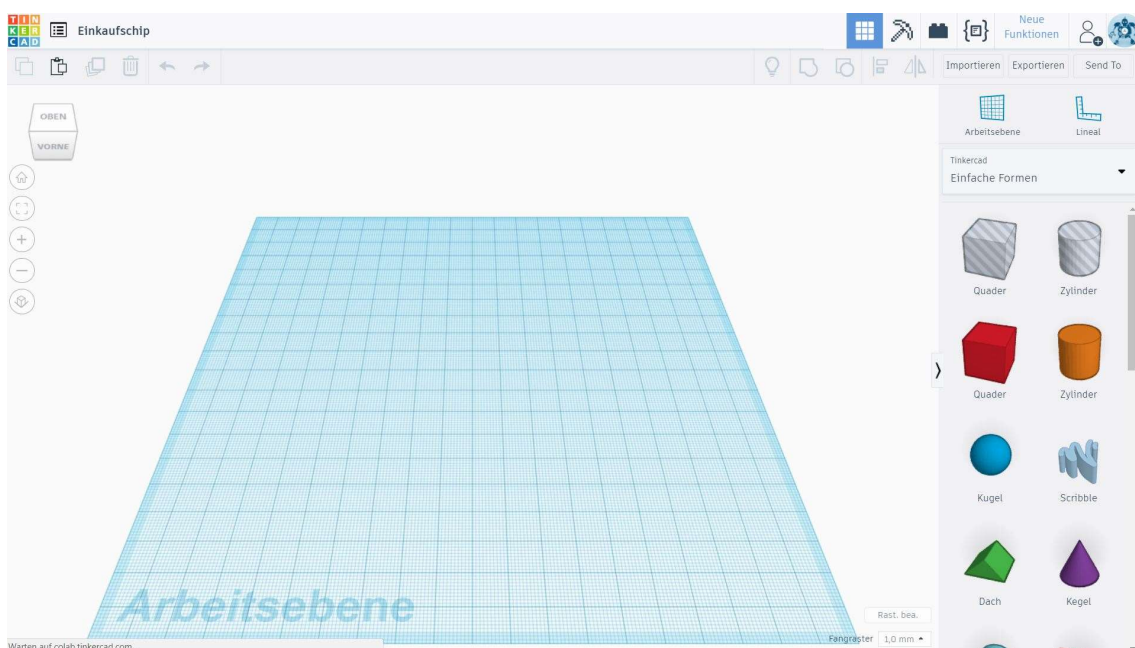


Abbildung 14: Arbeitsumgebung in Tinkercad – Werkzeuge, Arbeitsebene und Schaltflächen

Nach der Anmeldung führt uns Tinkercad durch sein Tutorial. Kurz gehen wir auf die Symbolik ein: am linken Rand finden wir die Symbole für die Ansichten. Rechts finden wir unsere Werkzeuge und in der oberen Leiste die Schaltflächen für Speichern, Gruppieren, Importieren und Exportieren. In der Mitte sehen wir selbsterklärend unser Arbeitsebene.

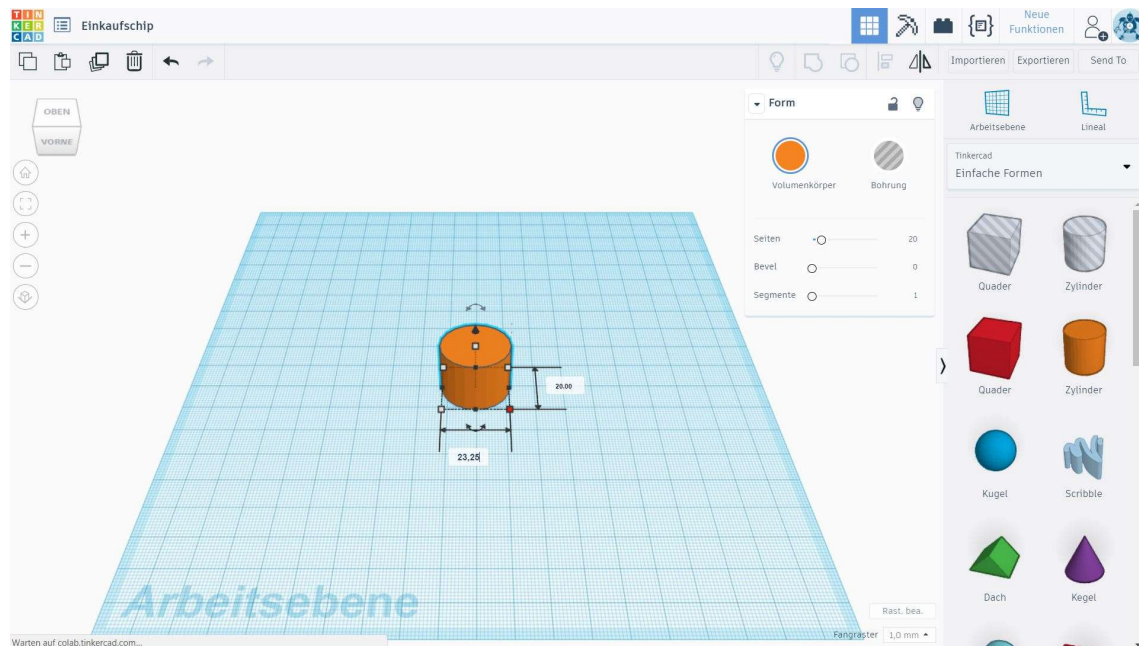


Abbildung 15: Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Platzieren des Zylinders, Bemaßung

In unserem Beispiel des Einkaufschips nehmen wir zunächst einen Zylinder und positionieren diesen nach Belieben auf unserer Arbeitsebene. Im nächsten Schritt übertragen wir die Maße des gewünschten Geldstückes, in diesem Fall der Ein-Euro-Münze. Hier beträgt der Durchmesser 23,25 mm, was wir auf unser Modell in X und Y Richtung übertragen, damit dieses auch rund wird.

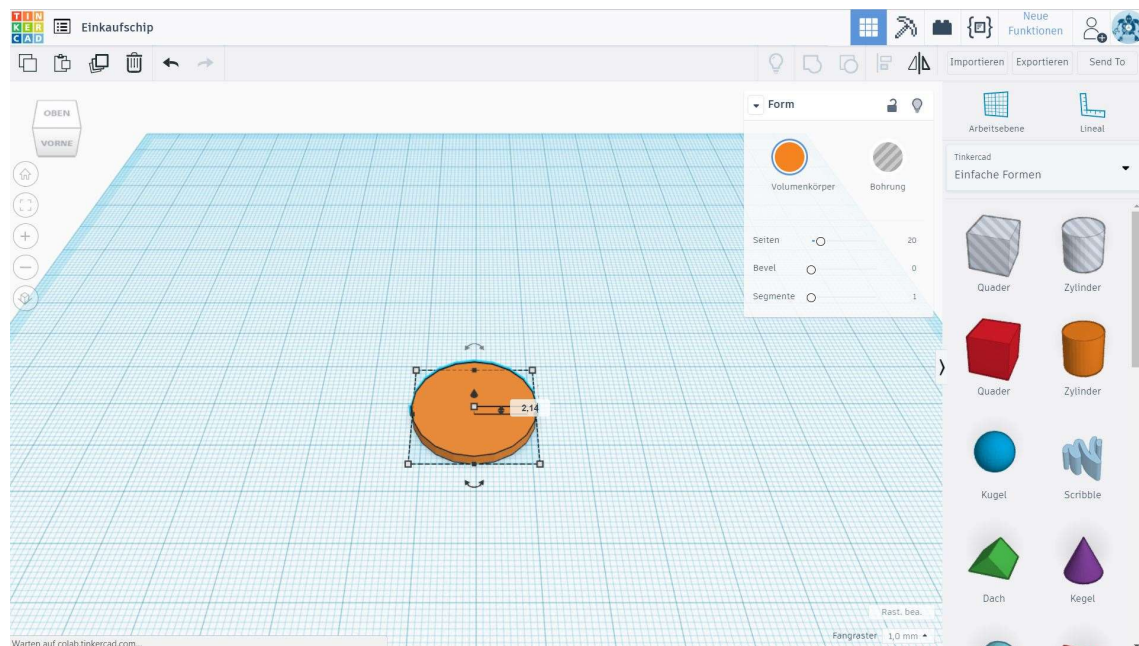


Abbildung 16: Projekt "Einkaufswagen-Chip" – Rohling fertigstellen (Höhe definieren)

Die Höhe der Münze beträgt 2,14 mm. Somit haben wir unseren Rohling des Einkaufschips fertig.

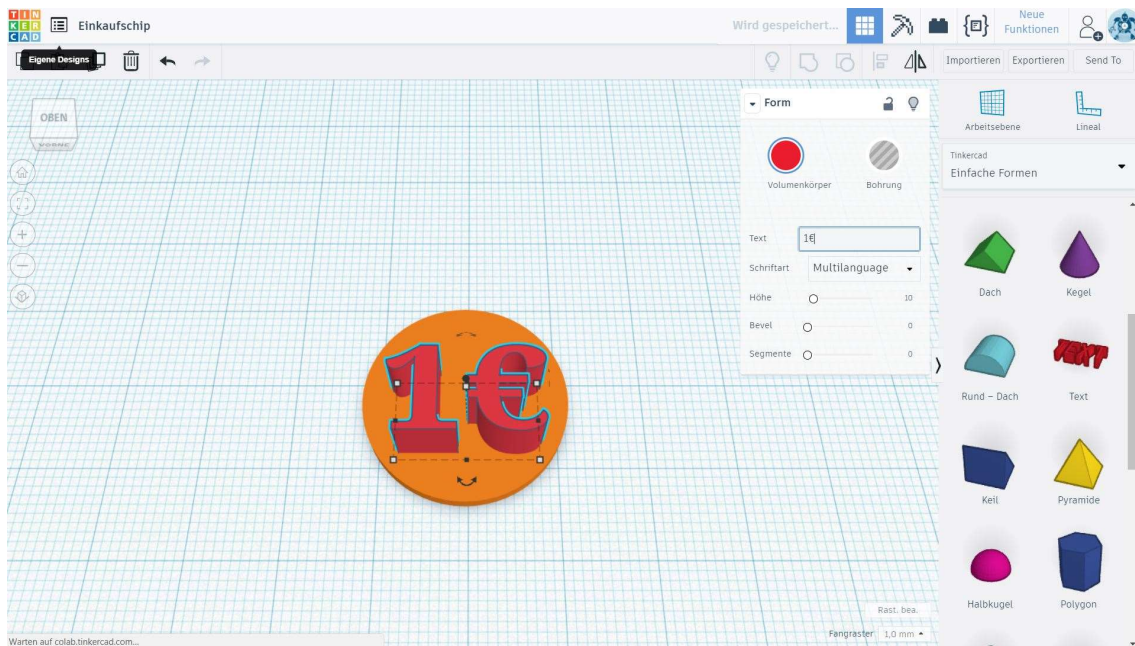


Abbildung 17: Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Individualisierung mit Text

Nun steht es uns frei, den Chip nach Belieben zu beschriften. In unserem Beispiel wählen wir als Beschriftung „1€“ was wir durch die Münze „stanzen“.

Dazu gehen wir wie folgt vor: Zuerst wählen wir rechts das Symbol mit TEXT aus. Hier kann man einen beliebigen Text eingeben, in unserem Fall „1€“. Lange Texte eignen sich nicht, da aufgrund der kleinen Druckfläche keine Feinheiten wie bei einem Druck auf Papier möglich sind.



TIPP: Der Durchmesser der Druckdüse beträgt 0,4mm, kleinere Strukturen sind daher technisch nicht möglich.

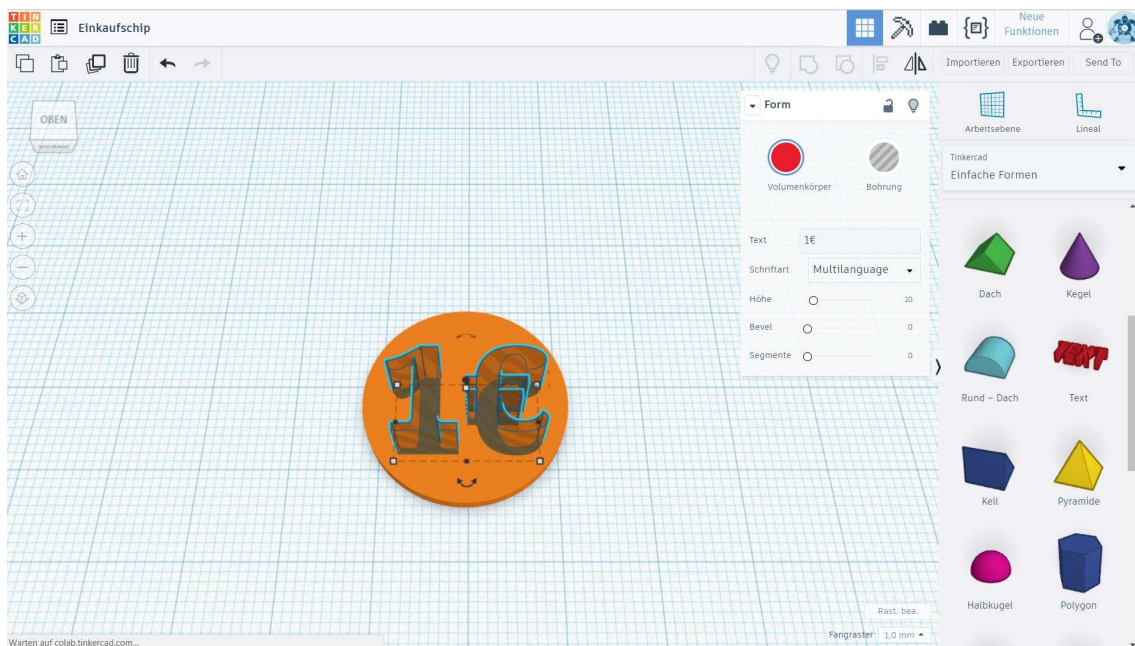


Abbildung 18: Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Freihand-Platzierung von Text zum Ausstanzen

Wir positionieren und skalieren nun ganz einfach frei Hand den Text auf dem bereits vorhandenen Chip. Anschließend ändern wir unseren Schriftzug von „Volumenkörper“ auf „Bohrung“.

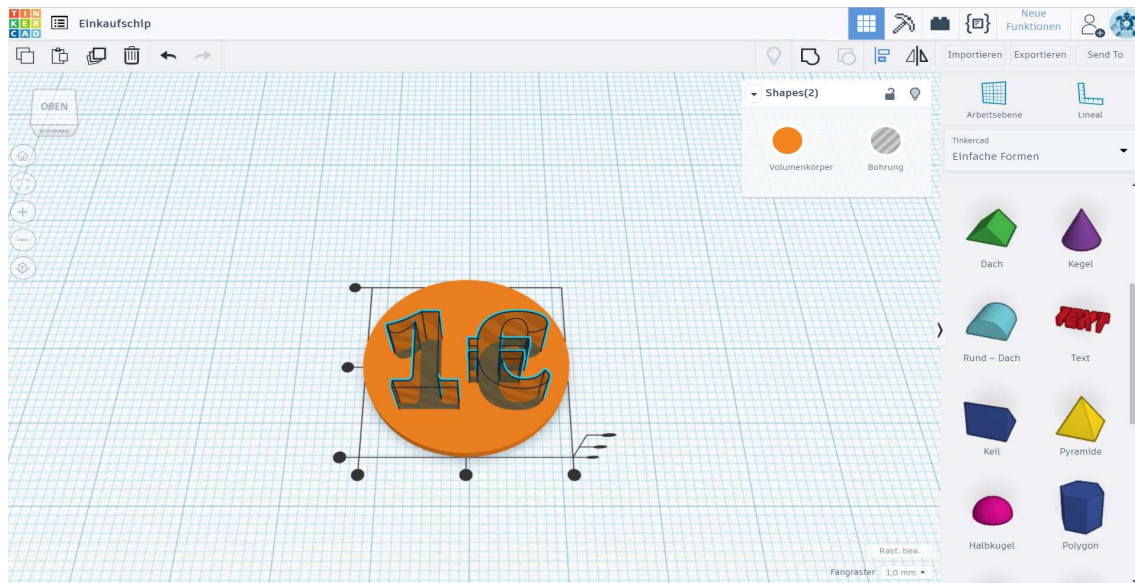


Abbildung 19: Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Ausrichten der Objekte zueinander

Im nächsten Schritt wählen wir beide Objekte an und klicken oben auf das Symbol „Ausrichten“. Nun können wir die beiden Objekte genau mittig zueinander ausrichten. Durch Klicken auf das Symbol „Gruppieren“ können wir nun unseren Text aus dem Chip ausschneiden.

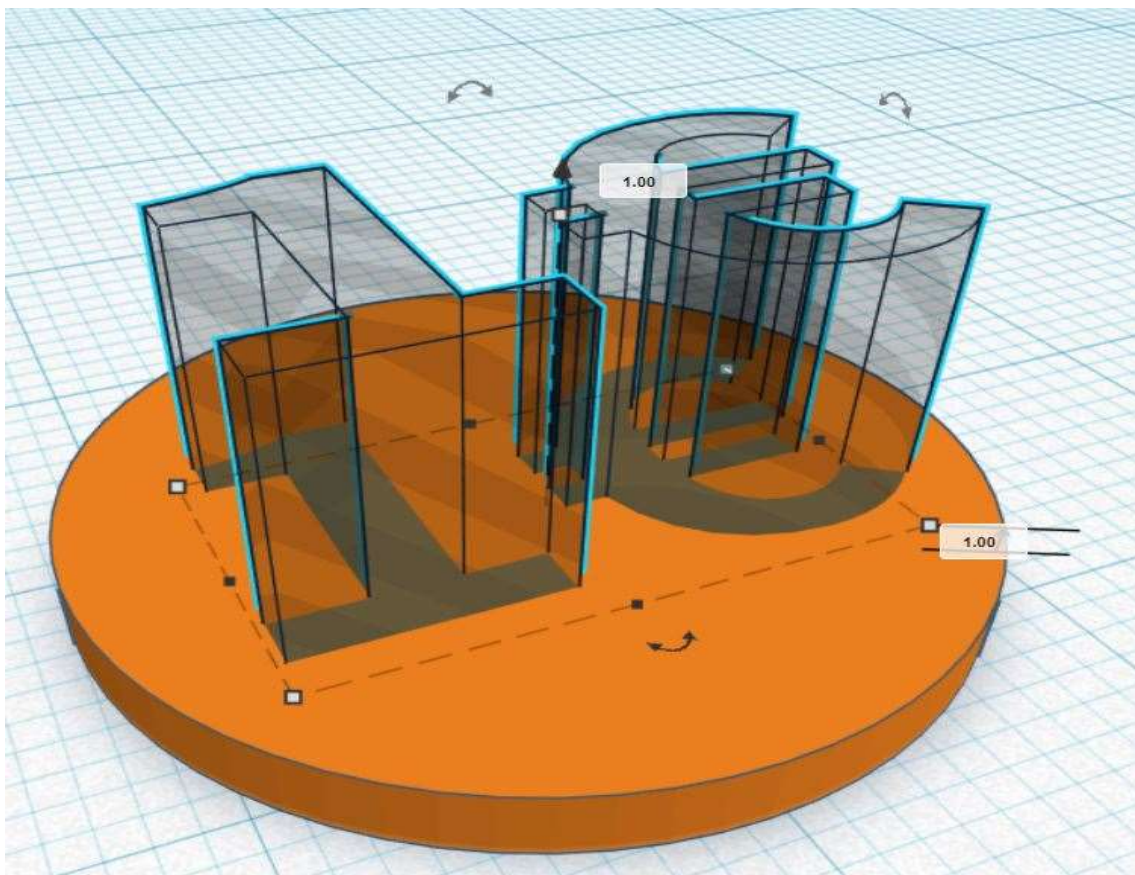


Abbildung 20: Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Detailsicht des Ausstanzens (Subtraktion der Körper durch "Bohrung")



TIPP: Wer lieber eine Prägung auf seinen Chip haben möchte, kann seinen Schriftzug vor dem Gruppieren noch um einen 1 mm anheben.

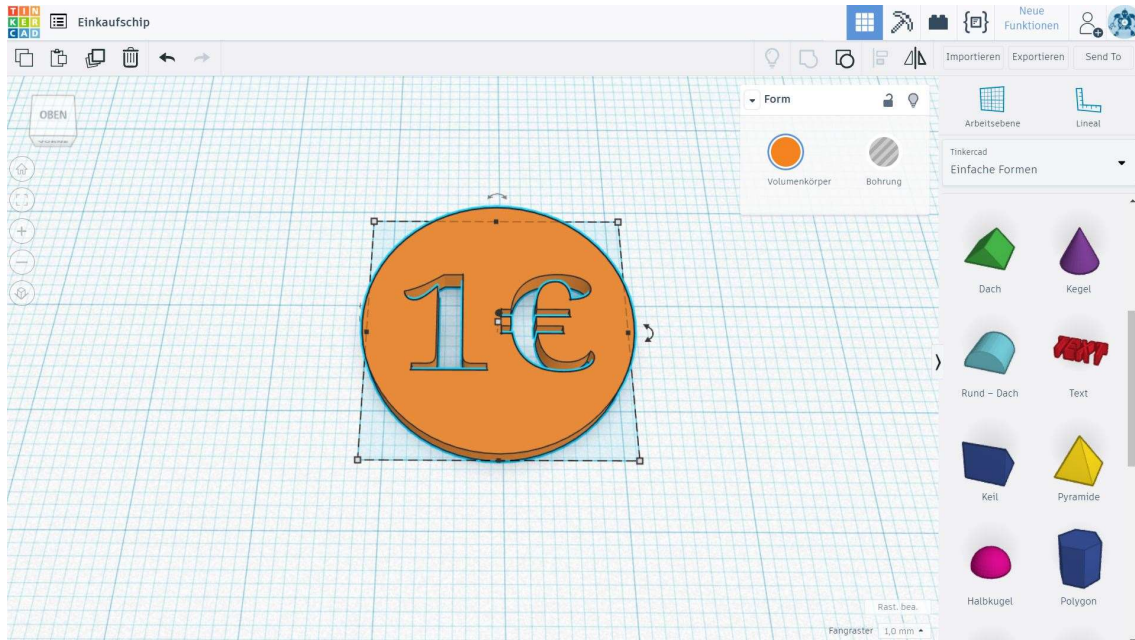


Abbildung 21: Projekt "Einkaufswagen-Chip" – fertige Konstruktion, bereit zum Export

Fertig! Nun können wir durch Klicken auf „Exportieren“ eine STL Datei generieren und anschließend in die Slicing-Software des 3D-Druckers laden (siehe Kapitel 3.2. - Slicing).

3.1.1.2. Professionelles Konstruieren mit einem CAD Programm am Beispiel „LKW mit Scharnier“

In diesem Beispiel wird gezeigt, wie man auf einfachem Weg ein Scharnier erstellt. Das Modell des Trucks dient nur zum Verständnis der grundlegenden Funktion. Für ein besseres Verständnis sind die einzelnen Bauteile in verschiedenen Farben gehalten. Die Farbgebung hat jedoch keinen Einfluss auf die Funktion oder der Handhabung der Software.

Für dieses Beispiel verwenden wir „Fusion 360“ der Firma Autodesk. Dieses Kurzprojekt dient nicht der Einführung und dem Umgang der Software, sondern soll den Unterschied zwischen einem Modellierungsprogramm wie Tinkercad und einem parametrischen CAD-Programm wie Fusion 360 zeigen. Fusion 360 ist für Schüler, Studenten, Lehrkräfte und Bildungseinrichtungen in den ersten drei Jahren kostenlos erhältlich (Stand: 02/2019). Die aktuell gültigen Lizenzbedingungen können Sie der Seite des Herstellers entnehmen.

<https://www.autodesk.de/products/fusion-360/students-teachers-educators>

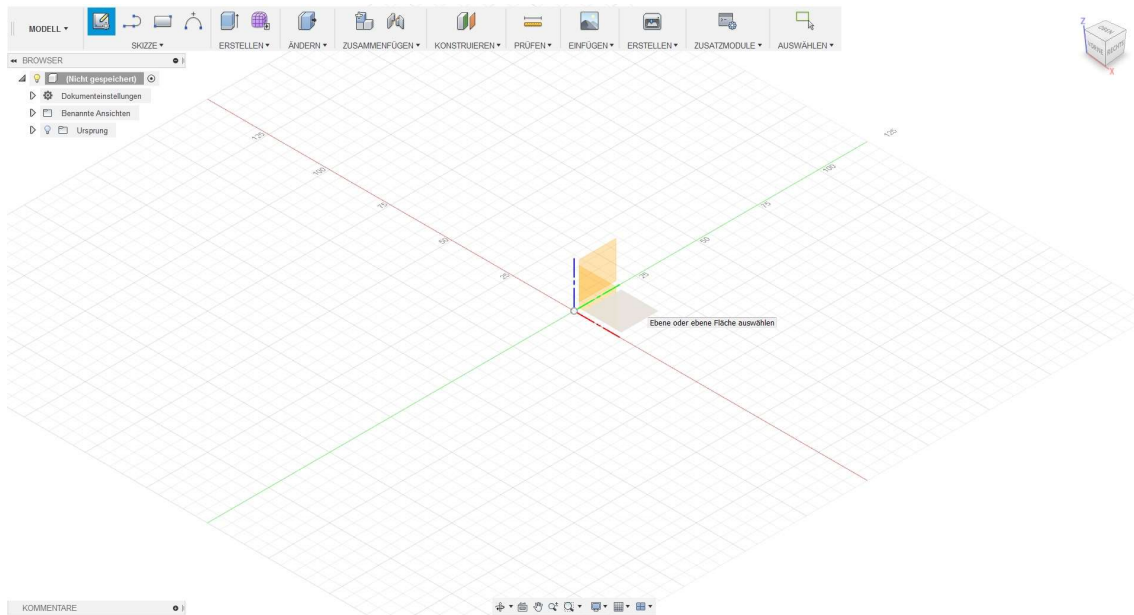


Abbildung 22: Projekt „LKW mit Scharnier“: Arbeitsbereich von Autodesk Fusion 360

Wir starten mit einem neuen Projekt. Autodesk Fusion arbeitet mit sogenannten Skizzen, was es einfach macht, Bemaßungen und Arbeitsschritte nachzubearbeiten.

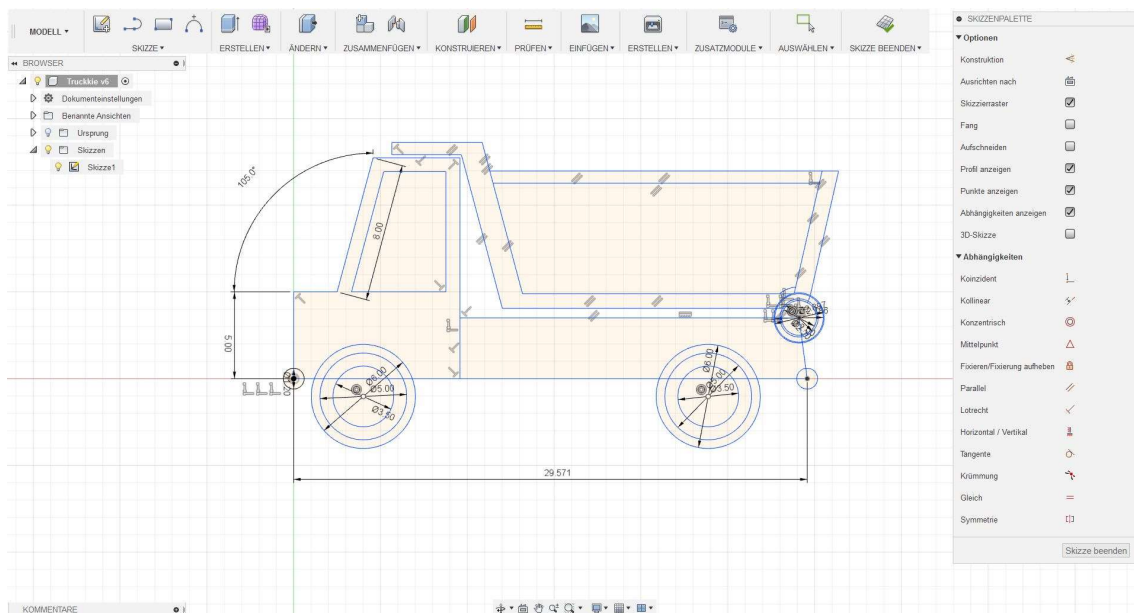


Abbildung 23: Projekt „LKW mit Scharnier“ - erste Skizze mit Bemaßungen

Wir starten also mit der ersten Skizze. Hier kann nun ganz nach Belieben das Projekt gestaltet werden.



TIPP: Wenn man in Fusion 360 seine Skizze bemaßt, so kann diese im Nachgang einfacher abgeändert werden.

Unser Herzstück ist natürlich das Scharnier zwischen LKW und Ladefläche. Normale Scharniere bestehen in der Regel aus drei Bauteilen: linkes und rechtes Band, sowie eine Welle oder Bolzen, der beide Bänder miteinander verbindet und führt. In diesem Beispiel ist der Bolzen Teil der Ladefläche und wird

geführt durch die Aufnahmen am LKW. Somit sind die Ladefläche und der LKW zwei getrennte Bauteile, die nur zusammen funktionieren, da diese ineinander gedruckt werden. Dies ist ein praktisches Beispiel dafür, welche Anwendungen nur mit einem additiven Fertigungsverfahren realisieren werden können.

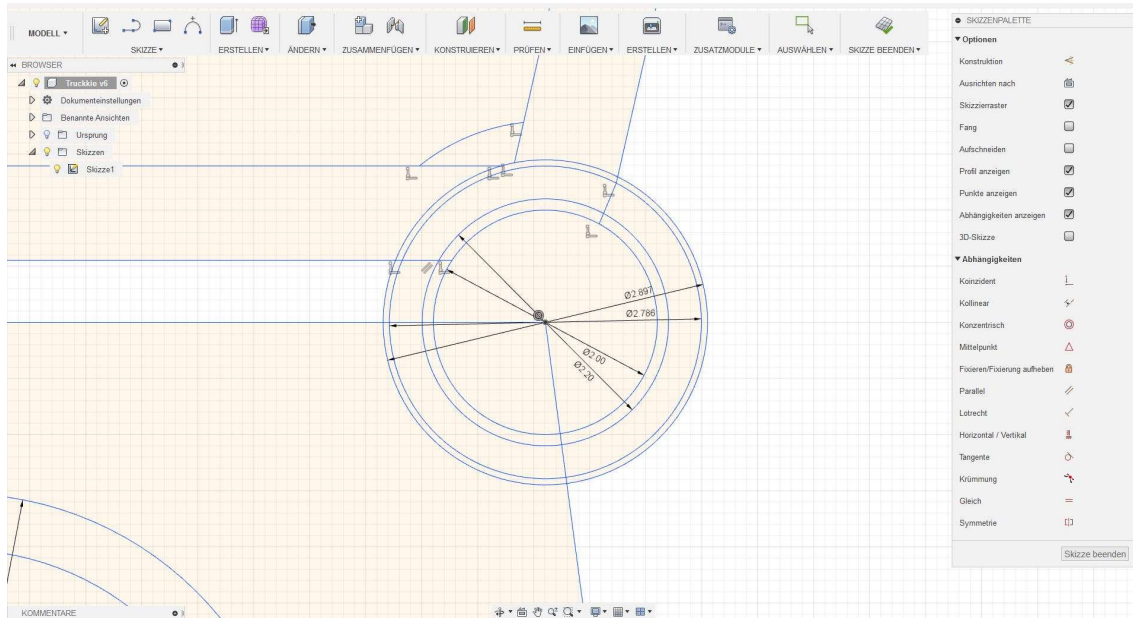


Abbildung 24: Projekt „LKW mit Scharnier“ - Konstruktion des Scharniers

Wir erstellen nun unser Scharnier. Folgende Punkte werden definiert.

- Bolzen (Stehend)
- Freiraum zwischen Bolzen und Scharnier
- Scharnier und dessen Wandstärke
- Freiraum zwischen Scharnier und Ladeflächen (Aussparung)

Der Freiraum oder auch das Spiel zwischen Bolzen oder Scharnier sollte zwischen 0.1 mm - 0.2 mm betragen. Wählt man den Abstand zu groß, hat alles zu viel Spiel. Wählt man diesen Freiraum zu klein, so kann es sein, dass die Objekte zusammen verschmelzen. Dieser Wert ist abhängig vom Gerät und den weiteren Druckeinstellungen. Um diesen zu optimieren, finden sich im Netz einfache Benchmark-Dateien, mit denen man entsprechende Werte ermitteln kann.

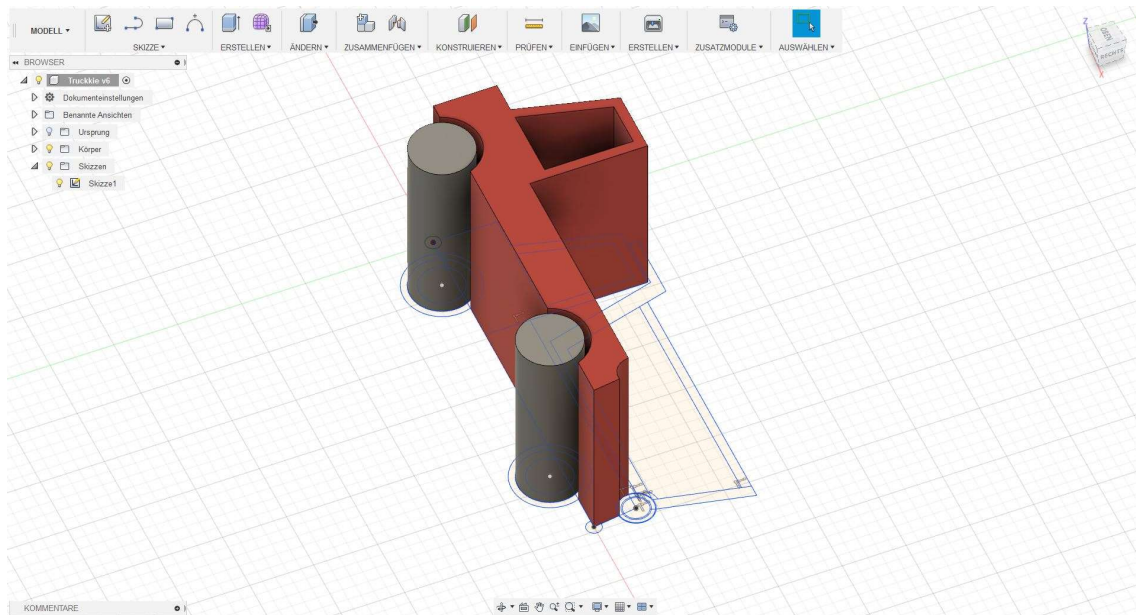


Abbildung 25: Projekt „LKW mit Scharnier“ – erste Flächen extrudieren (in die Höhe ziehen)

Nach Abschließen der ersten Skizze können wir nun beginnen, die ersten Flächen in die gewünschte Höhe zu ziehen.

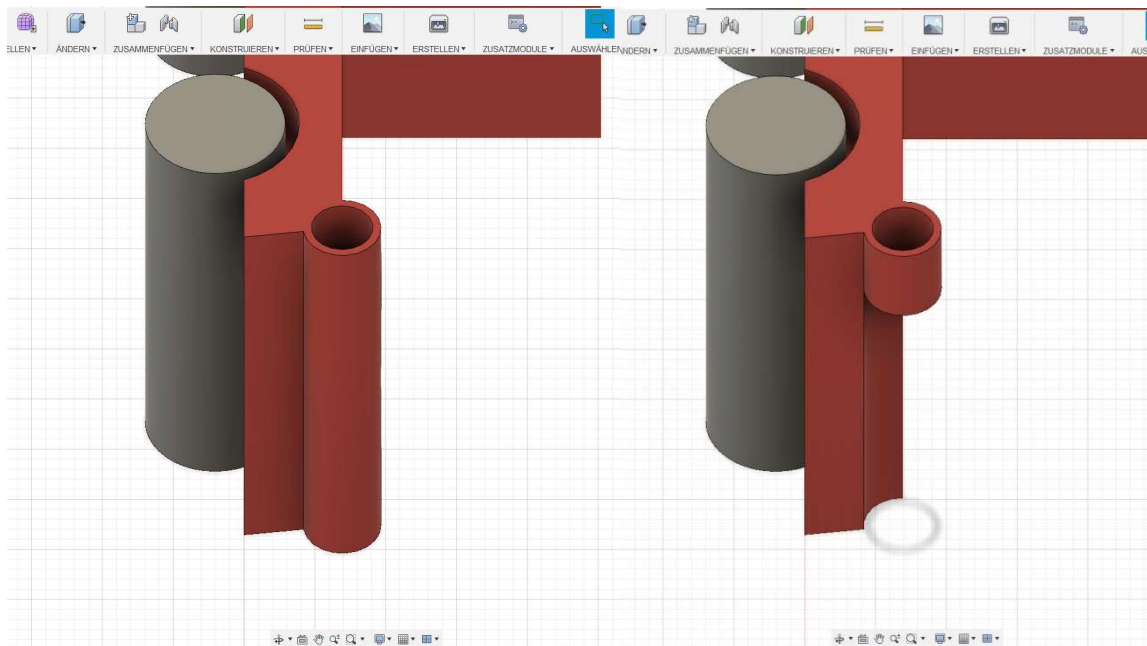


Abbildung 26: Projekt „LKW mit Scharnier“ – Extrusion und Ausschneiden von Volumenkörpern

Wir haben nun die Möglichkeit, einzelne und geschlossene Flächen aus unserer Skizze in die dritte Dimension zu ziehen. Da diese Extrusion maßhaltig ist, können wir auch hier sehr genau arbeiten.

Mit dem gleichen Verfahren, mit dem wir Volumenkörper extrudieren, können wir auch Volumenkörper ausschneiden. Somit ist es möglich, mit etwas Umdenken einfach unser Gelenk von oben nach unten zu definieren. Für den Fall, dass man eine Bemaßung oder einen Wert nachträglich ändern möchte, findet man bei Fusion 360 am unteren Rand die Timeline, in der man alle Schritte noch einmal nacharbeiten kann.

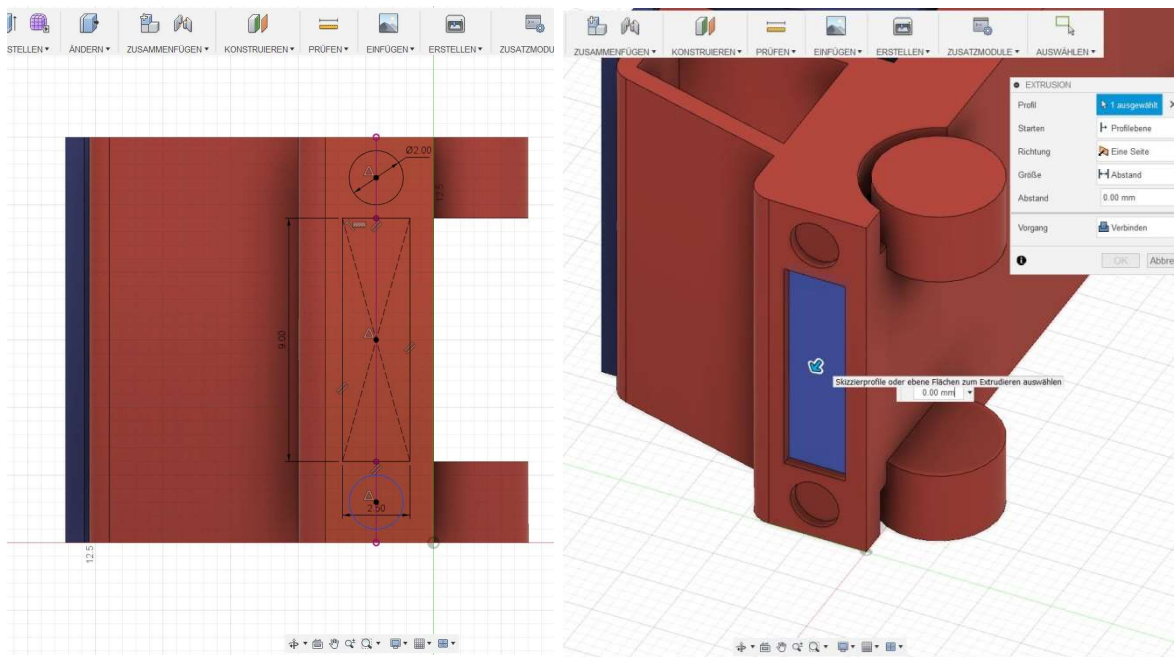


Abbildung 27: Projekt „LKW mit Scharnier“ – Setzen einer neuen Skizze auf einen Volumenkörper

Durch Setzen einer neuen Skizze (zum Beispiel auf dem Kühlergrill unseres Trucks) haben wir die Möglichkeit, diese wie die erste Skizze zu erstellen und zu bearbeiten. Dies bringt den großen Vorteil, dass ein Projekt aus verschiedenen Skizzen bestehen kann und es somit einfacher ist, Anpassungen im Nachgang zu machen. Diese Funktion ist besonders hilfreich bei der Erstellung komplexer Bauteile.

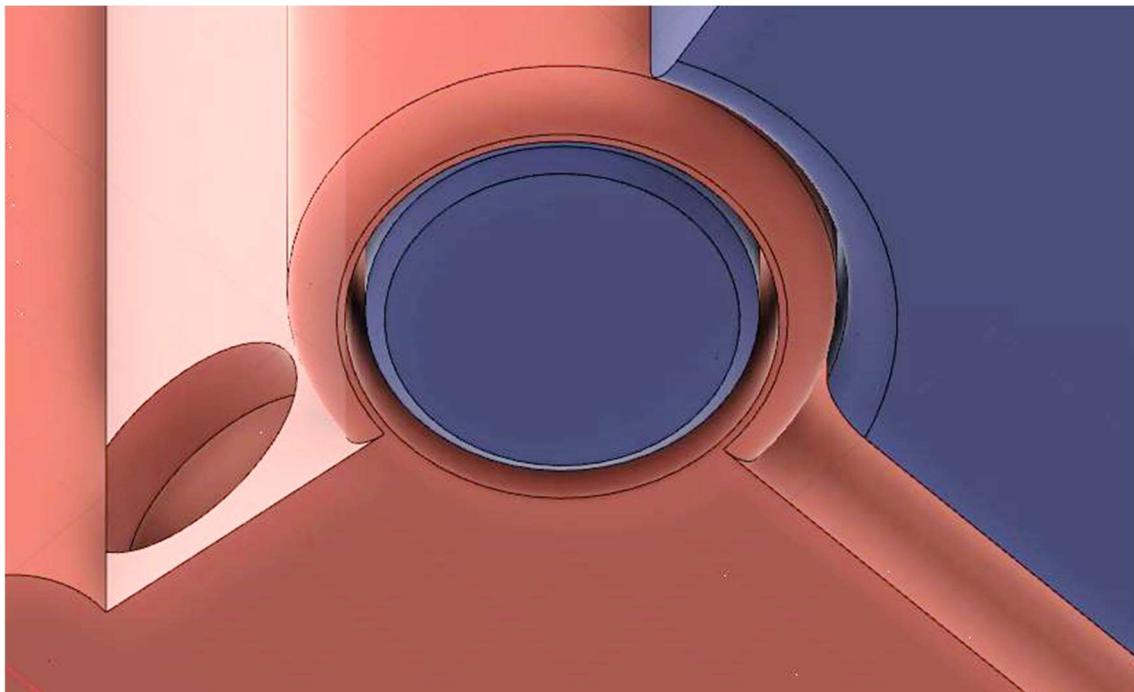


Abbildung 28: Projekt „LKW mit Scharnier“ -



TIPP: Da es sich hier um ein Modell zum 3D-Drucken handelt, empfiehlt es sich, die Kanten des Scharniers, die auf dem Druckbett aufliegen, abzurunden. Somit kann man dem Verschmelzen der unterschiedlichen Bauteile des „First Layers“ entgegenwirken.

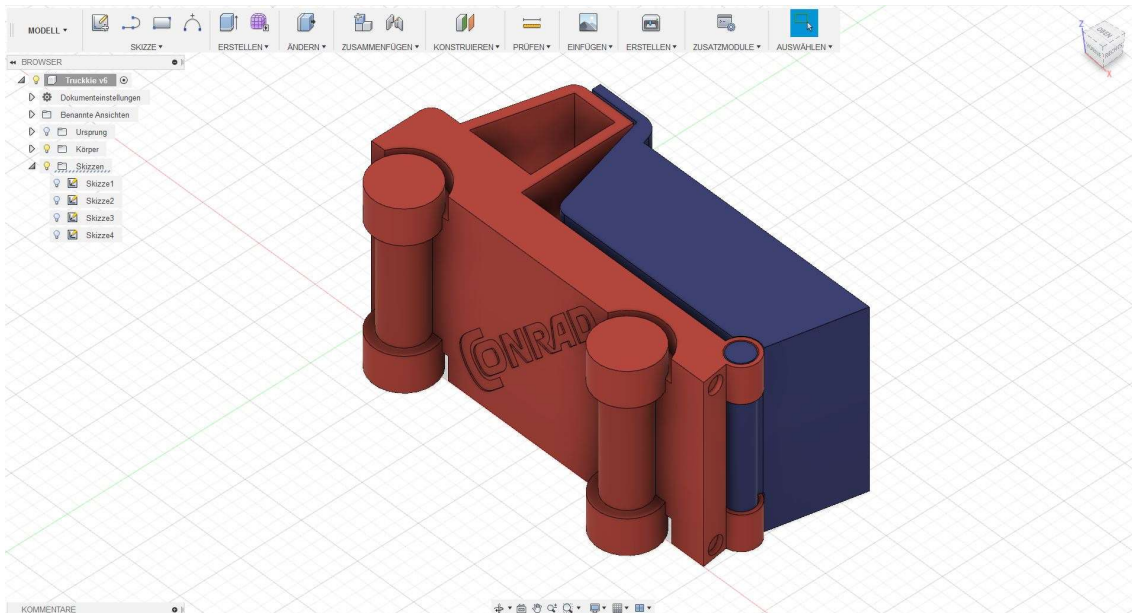


Abbildung 29: Projekt „LKW mit Scharnier“ – fertige Konstruktion, bereit zum Export

Nun sind wir fertig! Da der Truck und die Ladefläche aus zwei einzelnen Bauteilen bestehen, können diese auch bei einem 3D-Drucker mit zwei Extrudern in verschiedenen Farben gedruckt werden - oder auch aus zwei verschiedenen Materialien. So könnte man den Truck in einem robusten Material drucken was im Dunkeln leuchtet und die Ladefläche in einem Material, das bei UV-Licht-Bestrahlung seine Farbe ändert. Das selbst konstruierte Spielzeug hätte dann auch noch einen funktionalen Aspekt für Kinder als Warnung vor zuviel UV-Einstrahlung beim Spielen mit dem Truck draußen im Sandkasten.

3.1.2. Programmierung eines Modells

Für die Erstellung von 3D-Körpern gibt es neben den parametrischen, professionellen Konstruktionsmöglichkeiten auch Programmiersprachen - blockbasiert und in textbasierter Form.

Auch hier folgt diese Programmierung dem Prinzip der „Konstruktiven Festkörpergeometrie“ (Constructive Solid Geometry, CSG), bei der einfache Körper wie Quader, Zylinder, Kugeln an bestimmten Raumkoordinaten platziert und die Beziehungen zwischen ihnen (bool'sche Mengenbeziehung: Addition, Subtraktion, gemeinsames Volumen, jeweiliger Ausschluss) definiert werden. Im Unterschied zu dem Beispiel des Einkaufswagen-Chips werden hier alle Eigenschaften numerisch definiert. Ein großer Vorteil ergibt sich daraus, wenn diese Parameter am Anfang des Programms definiert werden - in Variablen. Diese lassen sich für Anpassungen der Konstruktion verändern und ein Neudurchlauf des Programmcodes führt dann zum geänderten 3D-Körper. Auf diese Weise lassen sich leicht anpassbare Definitionen von durchaus komplexen Konstruktionen erreichen: Zahnräder, Gehäuse und vieles mehr lässt sich auf diese Weise komfortabel anpassbar gestalten.

In der folgenden Übung wird ein Spielwürfel mit Hilfe eines grafischen Online-Programmertools erstellt – die jeweilige Augenzahl soll durch kleine Vertiefungen visualisiert werden.

Als Vorbereitung ist es sinnvoll, die Koordinaten der Augenpunkte vorab zu klären (zunächst in einem zweidimensionalen Koordinatensystem), damit entsprechende Vertiefungen an der Grundform Würfel erzeugt werden und so ein echter Spielwürfel berechnet wird.

Aufgabe an die Schüler:

Bestimme die Koordinaten der Würfelaugen zunächst im 2D-Koordinatensystem

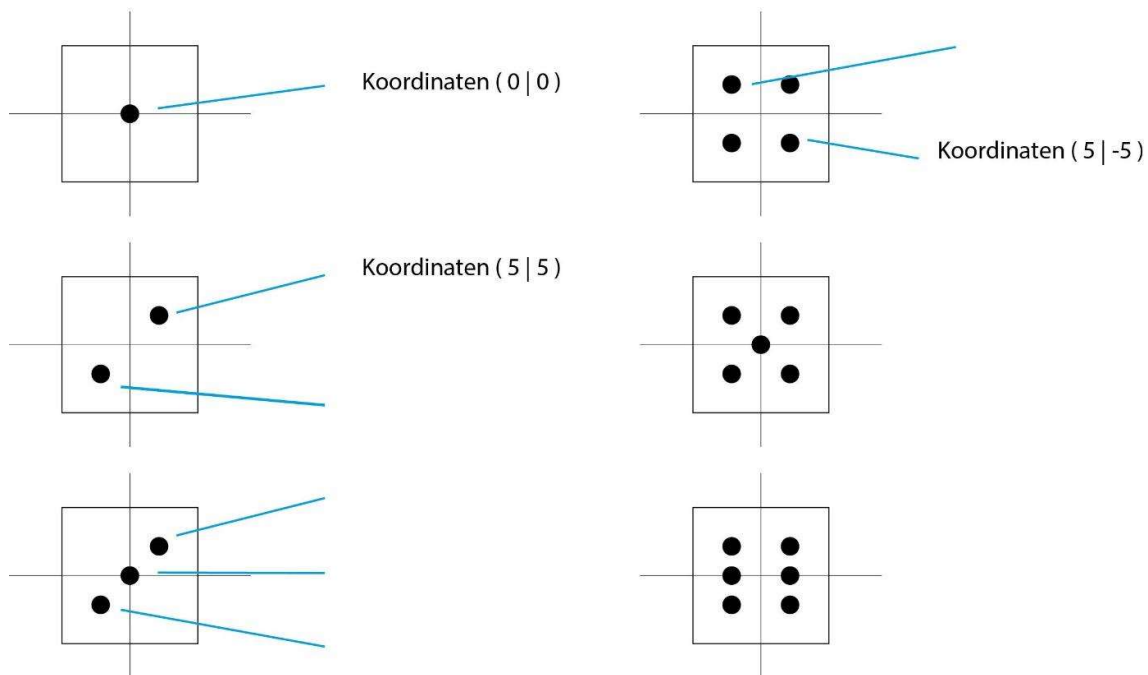


Abbildung 30: Arbeitsblatt – Bestimmung der Koordinaten der Würfelaugen im 2D-Koordinatensystem



Hinweis: Die Augen werden mit Kugeln (Radius 3mm) realisiert, die ein wenig in den Würfelkörper „eingetaucht“ und dann von diesem subtrahiert werden.

- Würfelfkörper:
Gemeinsames Volumen von Würfel ($3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$) und Kugel ($r=2,2 \text{ cm}$), zentriert im Koordinatensystem. Position auf der z-Achse bei 1,7cm
- Augenzahl 3 und 4 müssen um die X-Achse rotiert werden (90° und 270°)
- Augenzahl 2 und 5 müssen ebenfalls um die X-Achse (beide 90°) und anschließend um die Z-Achse gedreht werden (Augenzahl 2 um 90° , Augenzahl 5 um 270°).

Die Programmierung erfolgt über die Webseite <https://www.blockscad.com> – hier kann für Privatpersonen kostenlos gearbeitet werden. Wenn „Klassenraum-Lösungen“ gewünscht werden, bei denen die Arbeiten der Schüler/Auszubildenden gemeinsam in der Cloud gespeichert und vom Dozenten verwaltet werden können, sind entsprechend kommerzielle Angebote für (Aus-)Bildungseinrichtungen möglich. Weitere Infos finden sich auf der Webseite.



Abbildung 31: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Erzeugen des Würfels mit 3cm Kantenlänge

Im ersten Schritt wird ein Würfel mit der Kantenlänge von 3 cm erzeugt, der automatisch mittig im Koordinatensystem liegt. Ein Klick auf den Button „Rendern“ erzeugt die Darstellung anhand des aktuellen Programmcodes (hier 1 Befehl).



Tipp: Die Farbe des Befehls zeigt dessen Herkunft auf der linken Seite. Der Würfel (dunkelgrün) gehört somit zu dem Befehlsbereich „3D-Formen“.

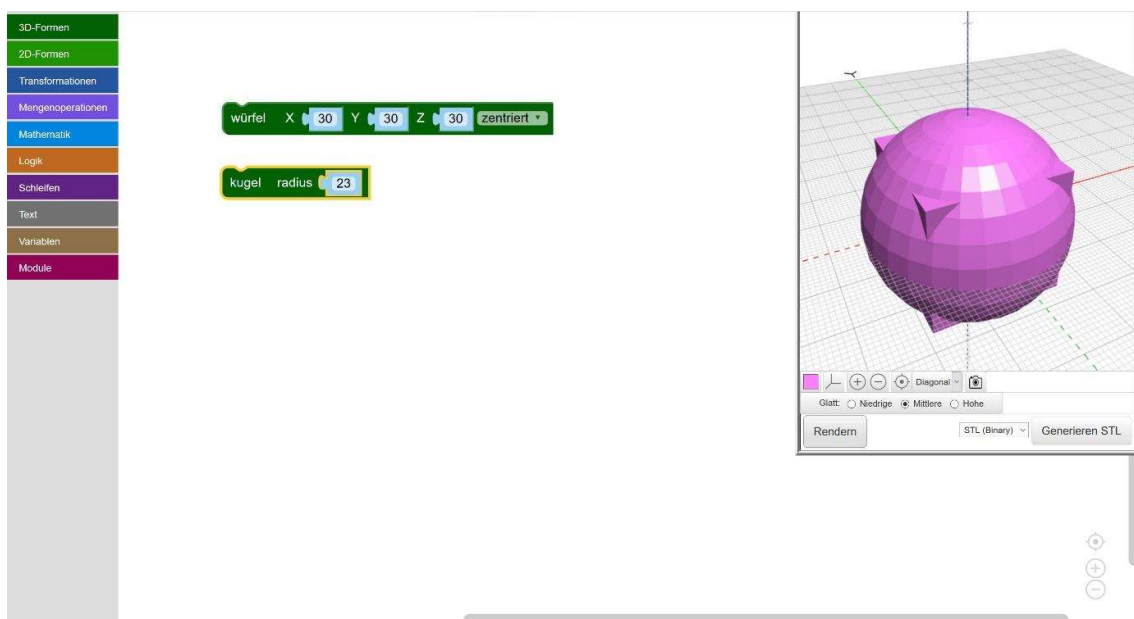


Abbildung 32: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Würfel und Kugel platzieren

Um die Ecken abzurunden wird eine Kugel eingefügt, wahlweise mit dem Radius von 22 oder 23 mm. Dieser bestimmt, wie deutlich die Abrundung der Ecken ausfällt.

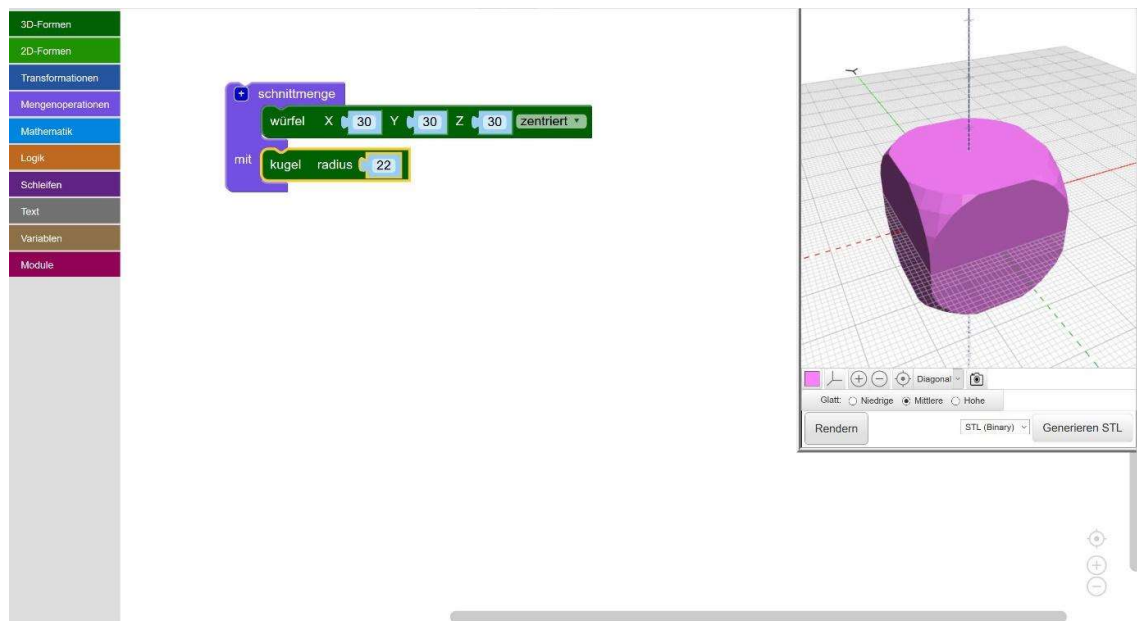


Abbildung 33: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Schnittmenge von Würfel und Kugel erzeugen

Als nächster Schritt werden beide Körper über den Befehlsbereich „Mengenoperationen“ miteinander verknüpft. Der Befehl „Schnittmenge“ wird ausgewählt und die Schnittmenge von Würfel und Kugel erzeugt.

Mit diesen drei Befehlen steht die Grundform des Würfels. Für schnelle Ergebnisse kann hier direkt zum Export der Datei (Generate STL) gesprungen werden – dann müssten die Würfelaugen mit Filzstift aufgemalt werden. Der eigentliche Reiz beim Programmieren besteht jedoch darin, diese Augen als kleine Mulden selbst zu erzeugen:

Hierfür werden jeweils Kugeln mit dem Radius 3mm verwendet, die ein Stück weit in den Grundkörper eintauchen und dann in einem späteren Schritt von diesem subtrahiert werden:

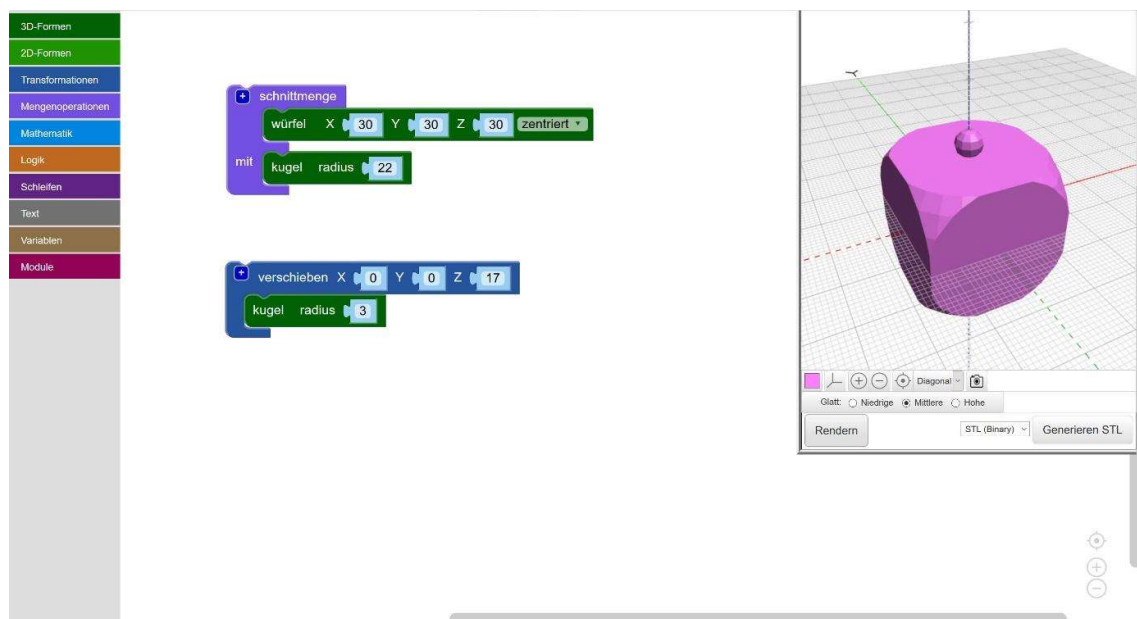


Abbildung 34: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Kugel für Würfelaugen platzieren

Für die Position der kleinen Kugeln als Hilfsmittel, um die Würfelaugen zu erzeugen, wird ein neuer Befehl verwendet aus dem Bereich „Transformation“ – das verschieben, d.h. eine relative Positionsänderung. Bisher hatten wir die Objekte am Ursprung des 3D-Koordinatensystems absolut platziert.

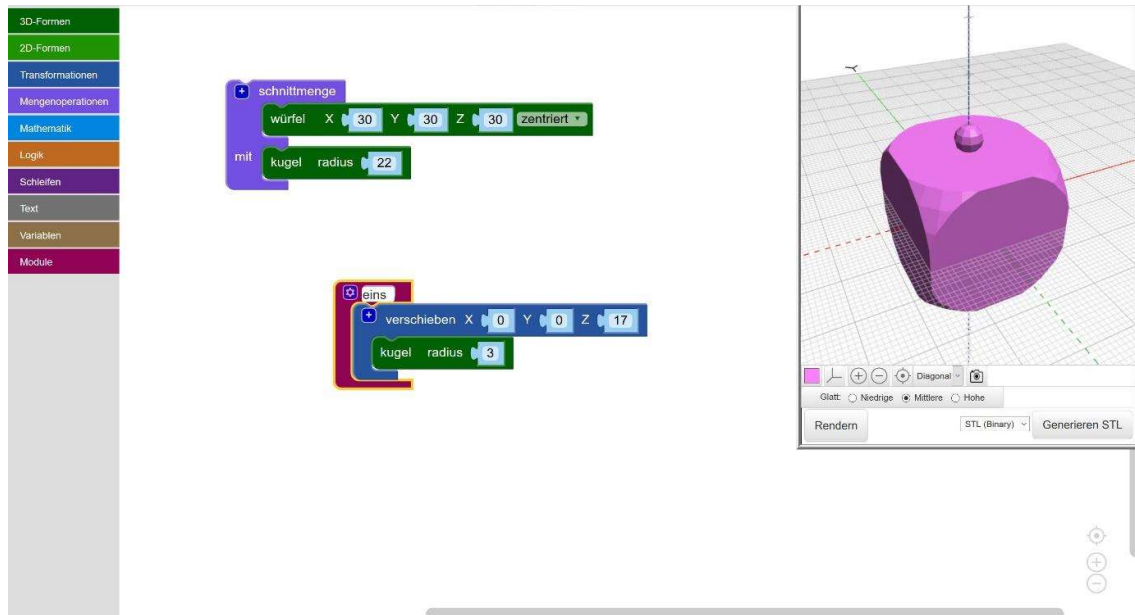


Abbildung 35: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Module für die Augen des Würfels verwenden

Module ermöglichen es, mehrere Befehle zusammenzufassen, damit das Hauptprogramm besser gegliedert und lesbarer wird. In diesem Schritt werden die beiden Befehle zum Erstellen und Positionieren der Hilfs-Kugel in einem Modul mit dem Namen „eins“ zusammengefasst.

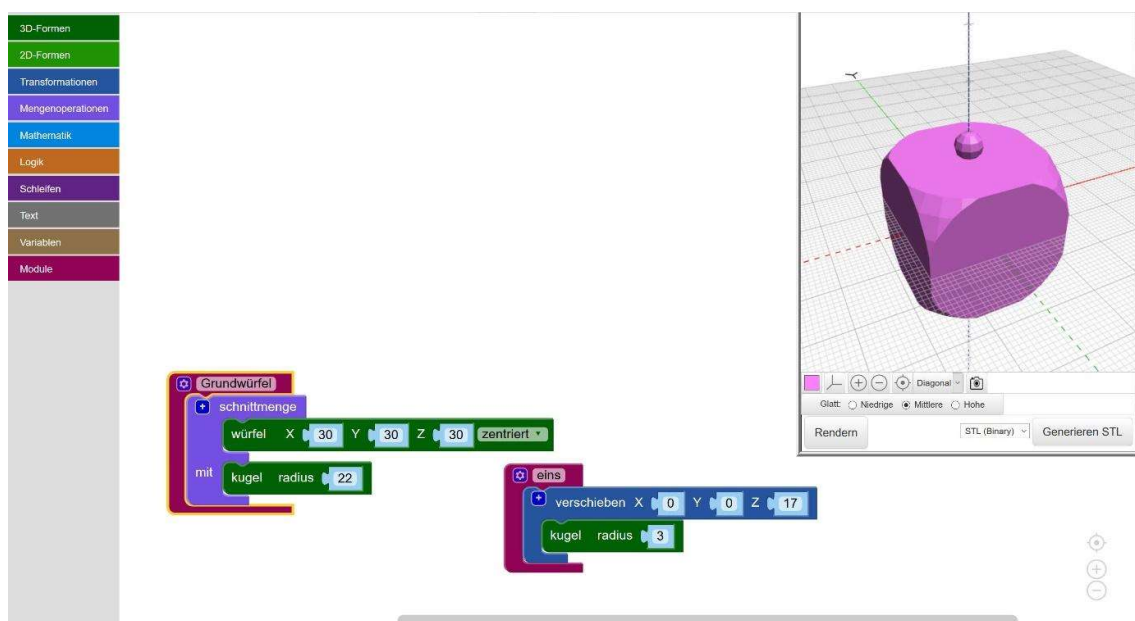


Abbildung 36: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Grundform Würfel ebenfalls als Modul definieren

Die Grundform des Würfels mit abgerundeten Ecken wird ebenfalls als Modul definiert - mit dem Namen „Grundwürfel“.

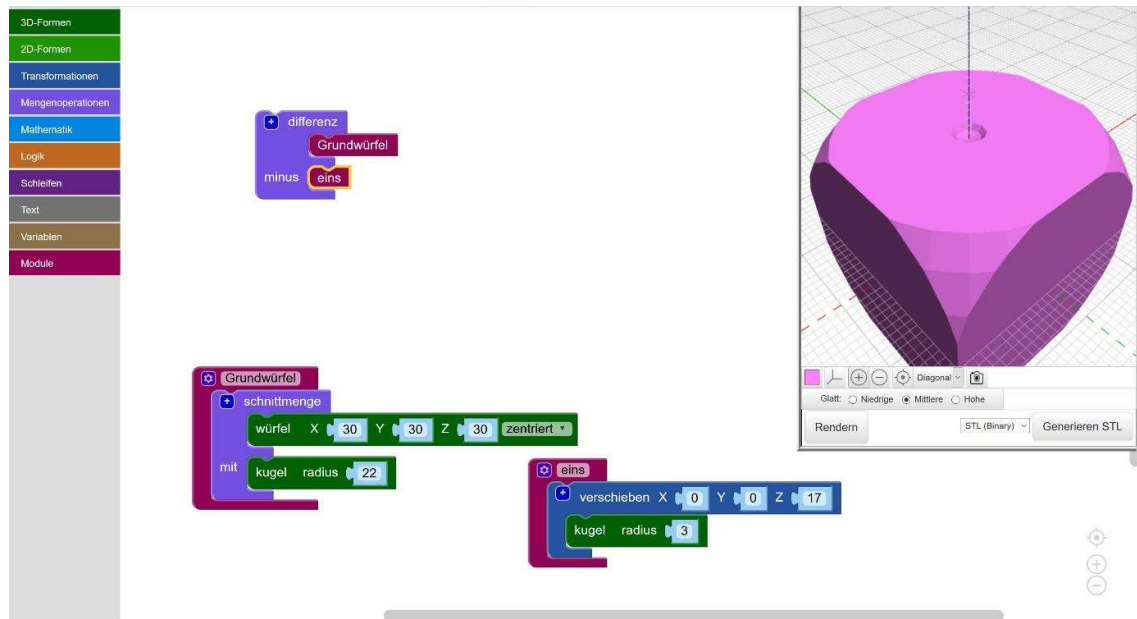


Abbildung 37: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Augenzahl eins als Differenz beider Module

Nun kann gut lesbar und leicht nachzuvollziehen von der Grundform die Augenzahl eins subtrahiert werden. Die Vertiefung für die Augenzahl entsteht.

Entsprechend werden nun alle weiteren Augenzahlen über Module realisiert und von der Grundform subtrahiert. Bitte beachten: Die Summe gegenüberliegender Augen ergibt immer sieben.

Generell sind zwei Vorgangsweisen möglich:

- a. Die Koordinaten können im jeweiligen Modul ausgehend von der Augenzahl sechs realisiert werden und dort jeweils angepasst werden.
- b. Die Augenzahlen werden als Module entsprechend der Augenzahl „eins“ programmiert und anschließend erfolgen die Drehungen um die jeweiligen Raumachsen, um die Augenzahl an die richtige Stelle am Grundkörper zu bringen:

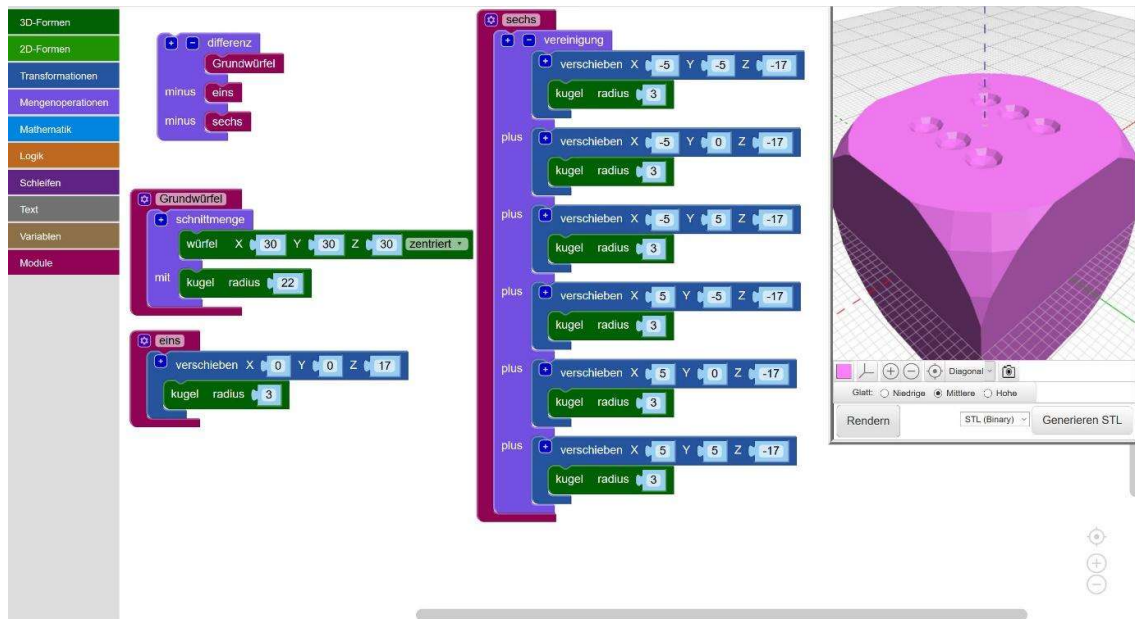


Abbildung 38: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Modul für Augenzahl sechs anlegen

Möglichkeit a) Augenzahl 6 erzeugen über direkte Koordinatenvorgabe ($z = -17$)

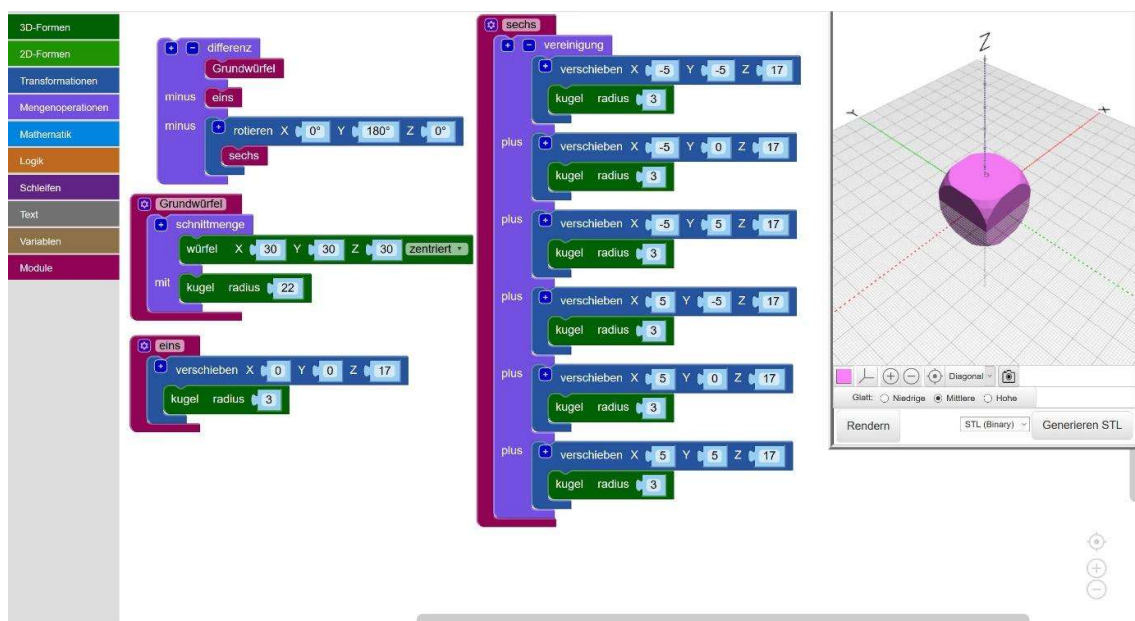


Abbildung 39: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Augenzahl sechs nach Rotation subtrahieren

Möglichkeit b) Augenzahl 6 erzeugen über Rotation und Koordinatenvorgabe wie bei Augenzahl 1 ($z = 17, 180^\circ$ Rotation)

Die folgende Abbildung zeigt die Musterlösung für alle Würfelaugen nach Methode b):

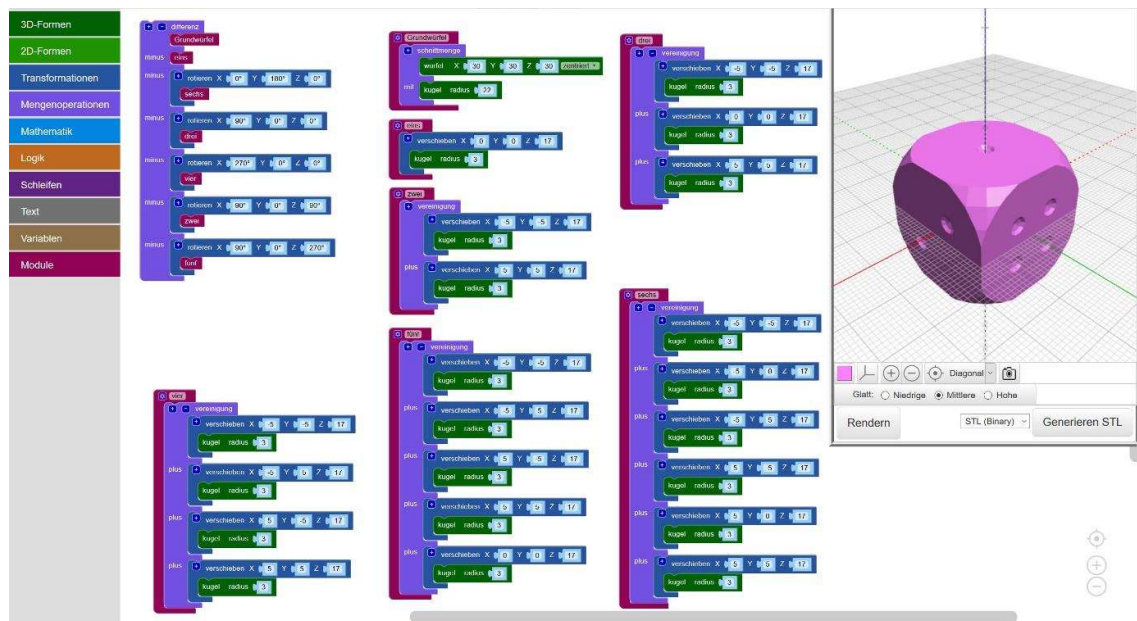


Abbildung 40: Projekt „Programmierung Spielwürfel“ – Musterlösung für die Erzeugung des Würfels

Auch die entsprechenden Rotationen der Module sind angezeigt. Mit dem Klick auf „Generate STL“ kann das 3D-Modell für den Druck exportiert werden.

Beim Drucken wird schichtweise gearbeitet. Die auf der Druckplatte liegende Seite hat demnach Hohlräume an den Stellen, wo die kleinen Mulden der Würfelaugen sind, was ggf zu einem nicht so perfekten Druckbild führen kann. Welche Seite eignet sich als Auflageseite demnach am besten?

In diesem Zusammenhang empfehlen wir ab der Mittelstufe auch durchaus bewusst mit einem Befehlszeileneditor OpenSCAD zu beginnen. Schauen Sie sich doch einmal diese offene und freie Software an <http://www.openscad.org/>, die im Übrigen für Linux/Unix, Windows und Apple Mac OS X verfügbar ist.

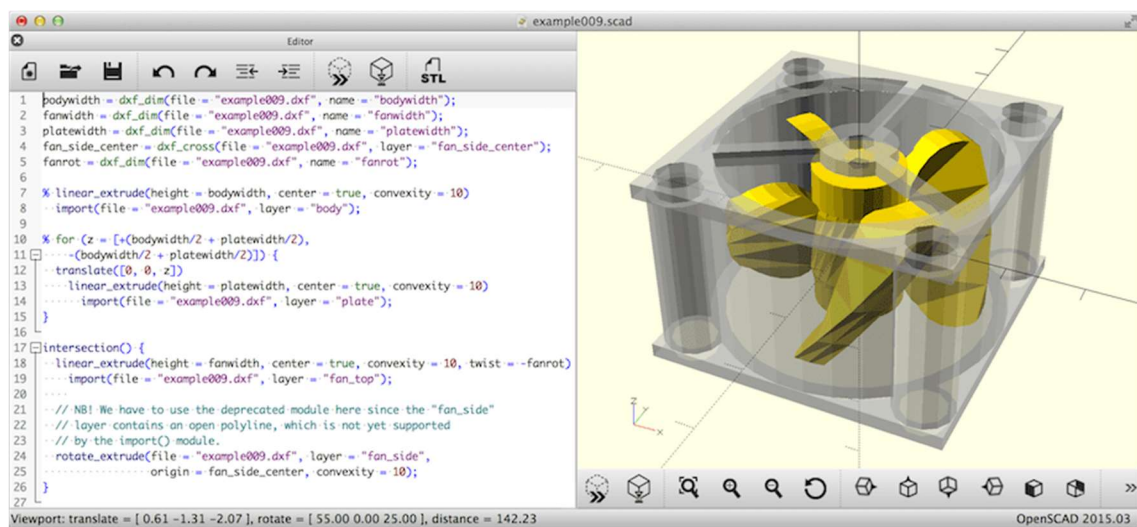


Abbildung 41: Programmierung von 3D-Objekten mit OpenSCAD

Die Idee dahinter ist einfach und genial und der Befehlssatz sehr überschaubar.

Warum sollte man sich eine befehlszeilen-orientierte Software heute noch antun? Hauptgrund ist, dass damit Wissen über die Entstehung eines Objektes leichter begreifbar bleibt und bereits mit einem einzigen Befehl ein Objekt erstellt werden kann.

Beispiel: `cube([2,3,4]);` damit wird ein Quader definiert

Diese Einfachheit motiviert ungemein, gerade Schüler die mit Programmieren sonst eher wenig am Hut haben. Der 3D-Compiler rendert das Objekt und stellt es auf dem Bildschirm dar. Größe etc. wird numerisch in mm eingegeben, was ein großer Vorteil sein kann. Objekte bleiben extrem leicht definierbar und nachvollziehbar. Export als STL-File ist problemlos möglich. Der OpenSource Gedanke motiviert Schüler ggf. tiefer einzusteigen. Forum und Tutorial fördern den Austausch und die Interaktion. Es gibt auch eine Reihe von Software, die ähnlichen Konzepten folgt, oder durch OpenSCAD inspiriert wurde, weil auch der Source-Code offen zugänglich ist: Libre3D, RapCAD, CubeHero, CoffeeSCAD u.a.



Tipp: Nutzen Sie die so erzeugten Würfel für Zufallsexperimente im Bereich der Mathematik: Vielleicht gelingt es Ihren Schülern ja auch, einen Hohlbereich im Würfel zu erzeugen, der nach dem Druck nicht mehr erkennbar ist? Dann wäre der Würfel nicht mehr rotationssymmetrisch und müsste durch die unterschiedliche Masseverteilung bestimmte Zahlen bevorzugen... Wer schafft es, den Würfel so subtil zu „zinken“, dass es nicht sofort auffällt?

Von der ungleichen Masseverteilung durch die kleinen Vertiefungen bei der Augenzahl wird hier abstrahiert.

3.1.3. Erstellen eines Modells durch Scannen



Abbildung 42: 3D-Scan mit strukturiertem Licht – Oberflächenverlauf ergibt Verzerrungen im Linienmuster

Mithilfe eines 3D Scanners und eines 3D Druckers ist es möglich: das Foto 3.0. Sie stellen sich vor einen 3D Scanner, dieser erzeugt ein Computermodell von Ihnen – detailreich bis hin zum Faltenwurf des Shirts. Ein 3D Drucker druckt es in nahezu beliebigem Maßstab aus. Ein **Mini-Ich für die Vitrine**. Für Privatanwender sind 3D Scanner in kleinen Formaten interessant, denn auch hiermit ergeben sich vielfältige Möglichkeiten: Die fehlende Schraube, der Griff für den Schrank, der Zahnputzbecher und vieles mehr kann exakt **kopiert und ausgedruckt** werden. Es gibt verschiedene Verfahren für den 3D-Scan:

- Strukturiertes Licht: Beleuchtung mit Linien- oder Schachbrettmuster, die Verzerrungen im Muster werden auf die Oberflächenverläufe des Modells zurückgerechnet
- Time-of-Flight (ToF): Entfernungsmessungen (Einzelpunktmessungen) ergeben eine Art „Punktwolke“ für Abstände des Sensors zum Objekt
- Fotos aus unterschiedlichen Perspektiven

Neben der Hardware ist eine leistungsstarke **Scan-Software** nötig, die in der Regel im Lieferumfang enthalten ist.

3.1.4. Modell-Datenbanken

In Modell-Datenbanken im Internet finden Sie zusätzlich eine Vielzahl von 3D-Konstruktionen. Einige der bekanntesten Datenbanken sind:

- www.thingiverse.com
- www.youmagine.com
- www.grabcad.de
- www.myminifactory.com

Hinweis: Bitte beachten Sie die Hinweise der jeweiligen Anbieter sowie die Regelungen und gesetzlichen Bestimmungen zum Urheberrecht. Stellen Sie nur selbst entworfene Konstruktionen online, bei denen Sie alle Rechte haben und beachten Sie, ob Sie ggf. Nutzungsrechte an die Plattform übertragen.

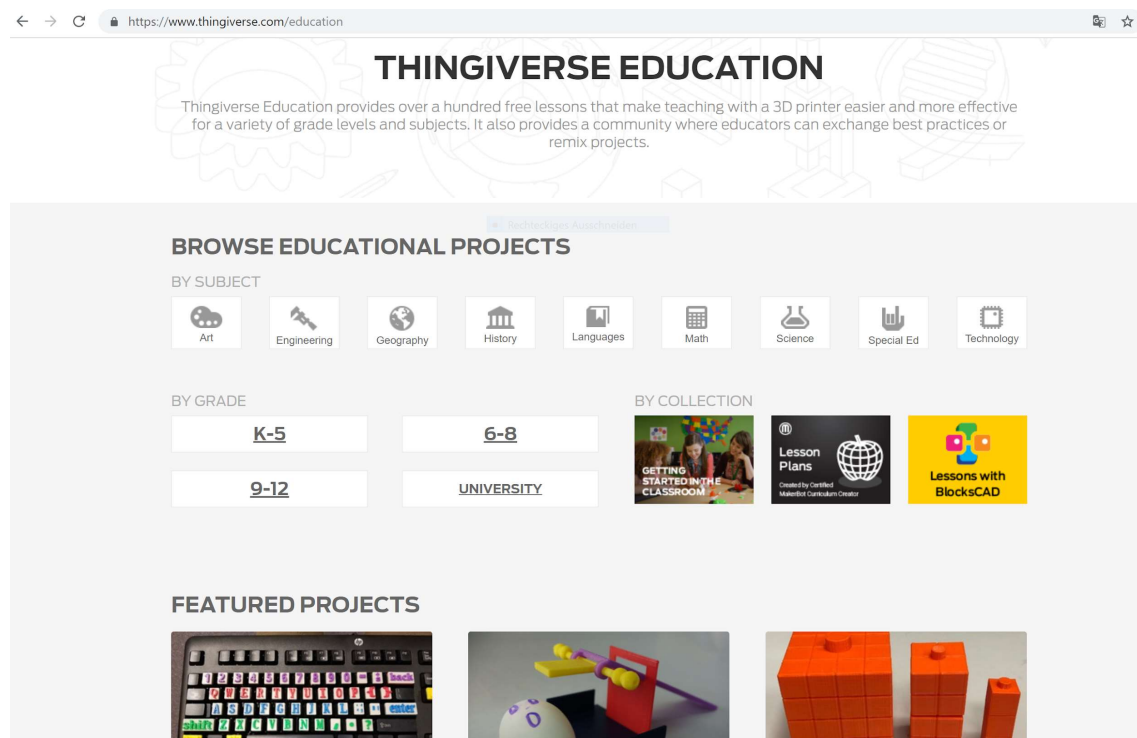


Abbildung 43: Beispiel-Screenshot der Webseite Thingiverse

3.2 Slicing - Aufbereitung des Objekts für den Drucker

Der Druck erfolgt schichtweise und in jeder Druckebene wird das Material an den benötigten Stellen aufgetragen. Für die 3D-Drucker muss daher das Modell schichtweise zerlegt werden und in diesen Schichten die Fahrtwege des Druckkopfes berechnet werden. Die scheibenweise Zerlegung in Ebenen wird auch „slicen“ genannt, die entsprechenden Programme „Slicer“.

Ein ergänzendes Video finden Sie unter folgendem Link:

<https://www.youtube.com/watch?v=svVBOs01ZNg>

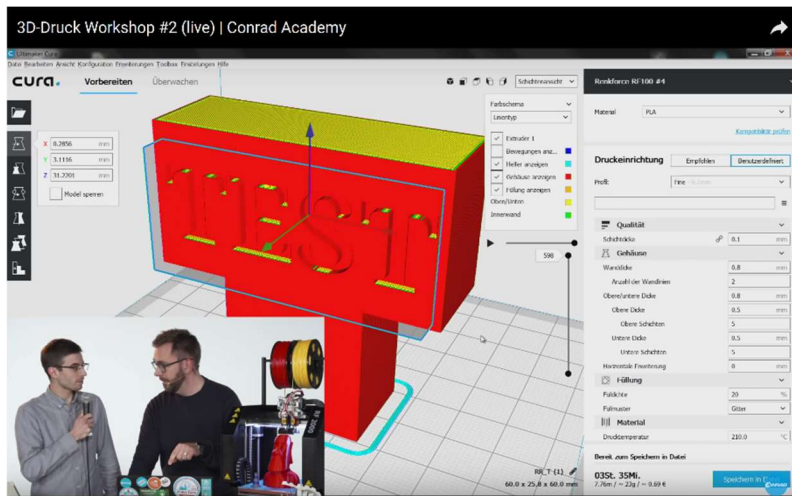


Abbildung 44: Video - 3D-Druck Workshop #2 Conrad Academy

Im Folgenden wird das Open-Source Programm Cura vorgestellt, welches von der Webseite der Firma Ultimaker kostenfrei heruntergeladen werden kann.

Installation und erste Schritte:

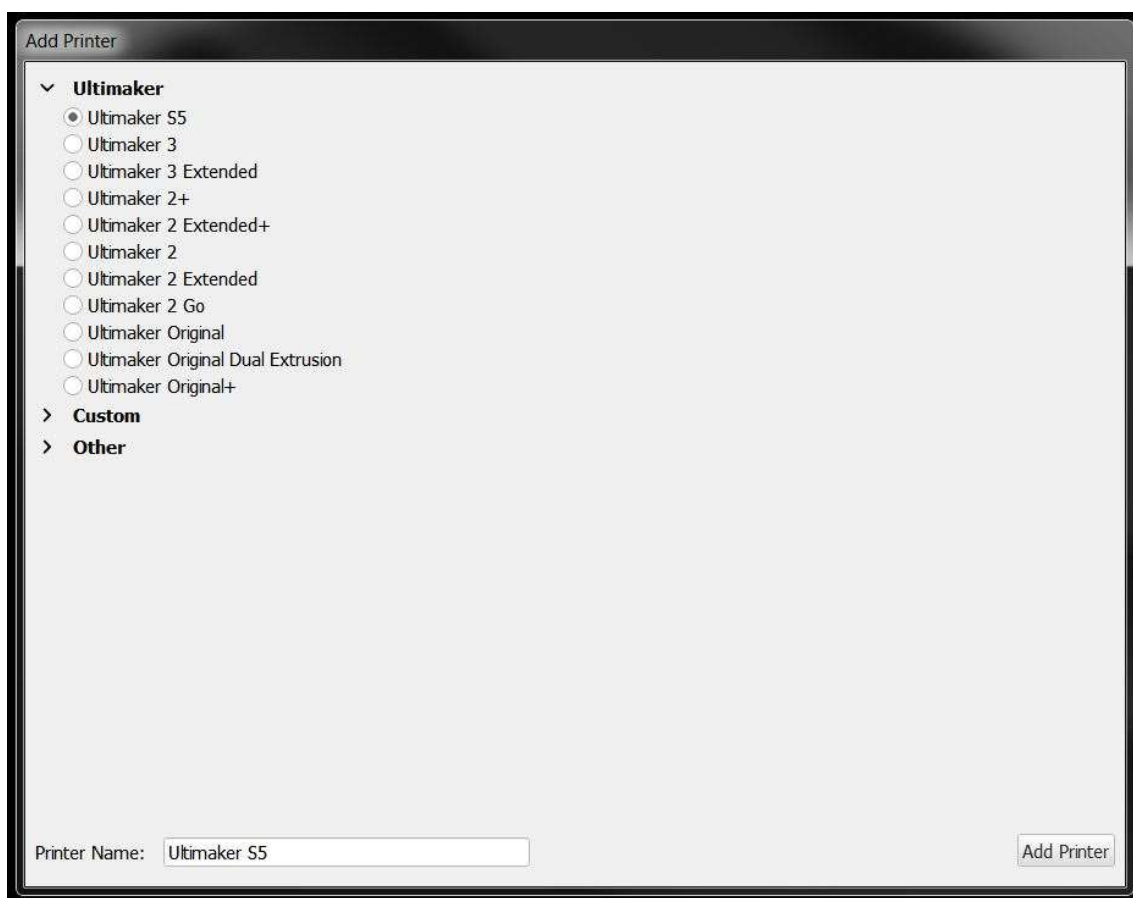


Abbildung 45: Slicing mit Cura - 3D-Drucker hinzufügen

Nach der Installation begrüßt Sie Cura mit der Auswahl des gewünschten Druckers. Hier können Sie ein Gerät der Ultimaker-Familie wählen, z.B. den Ultimaker 3. Für diesen Drucker wäre die Konfiguration dann abgeschlossen.

Die Vorbereitung des Druckobjektes und den Druckvorgang und beschreiben wir in diesem Buch am Beispiel eines „renkforce RF100 v2“ 3D-Druckers. Darum zeigen wir Ihnen am Beispiel des „renkforce RF100 v2“, wie Sie in CURA selbst eigene Drucker einrichten. Damit können Sie den in Kapitel 1.1 konstruierten Einkaufschip für den Druck auf diesem 3D-Drucker vorbereiten.

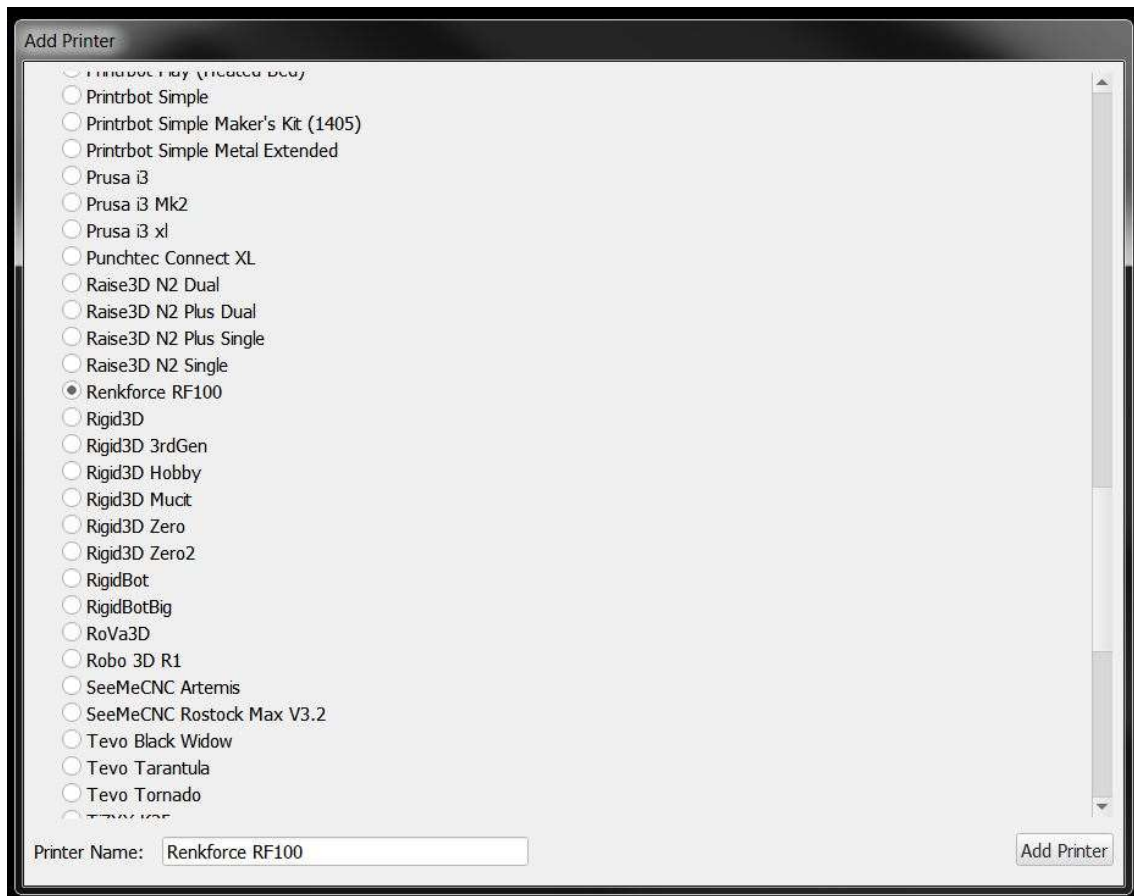


Abbildung 46: Slicing mit Cura – Auswahl des 3D-Druckers

In unserem Beispiel wählen wir unter „Other“ den renkforce RF100 v2 aus.

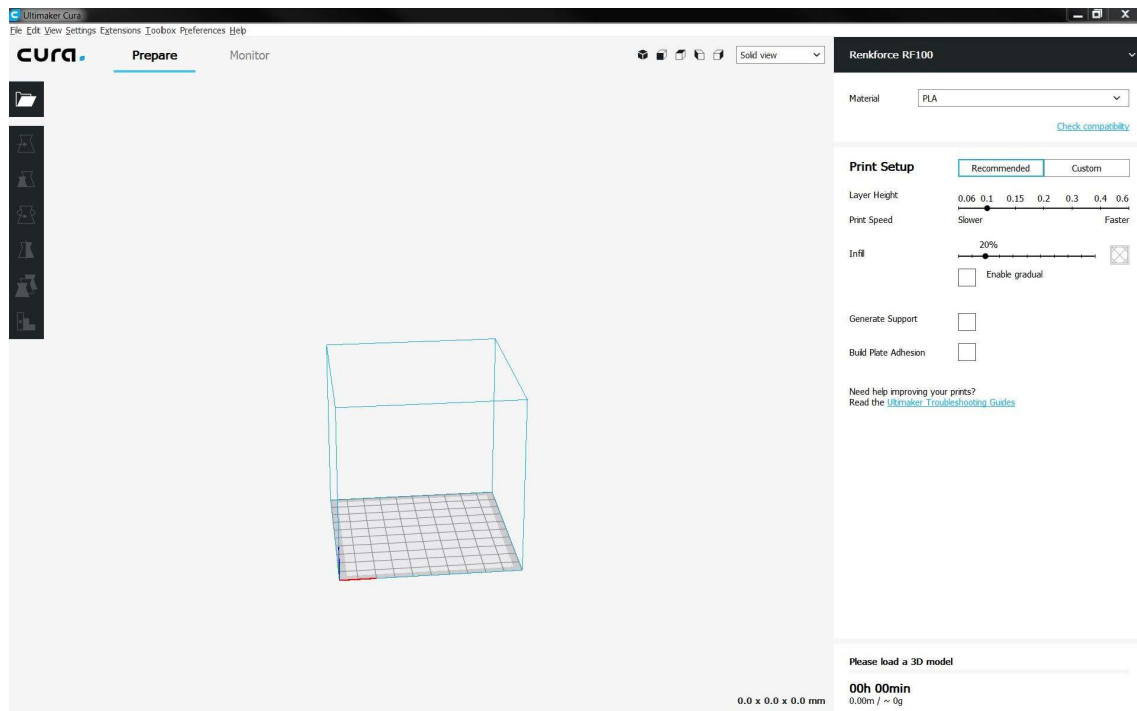


Abbildung 47: Slicing mit Cura - Ansicht der Slicing-Software im Hauptfenster

Nun befinden Sie sich im eigentlichen Slicing Software. Der Bauraum des Druckers wird angezeigt. Zu Beginn öffnen Sie unter [Preferences /Configure Cura](#)

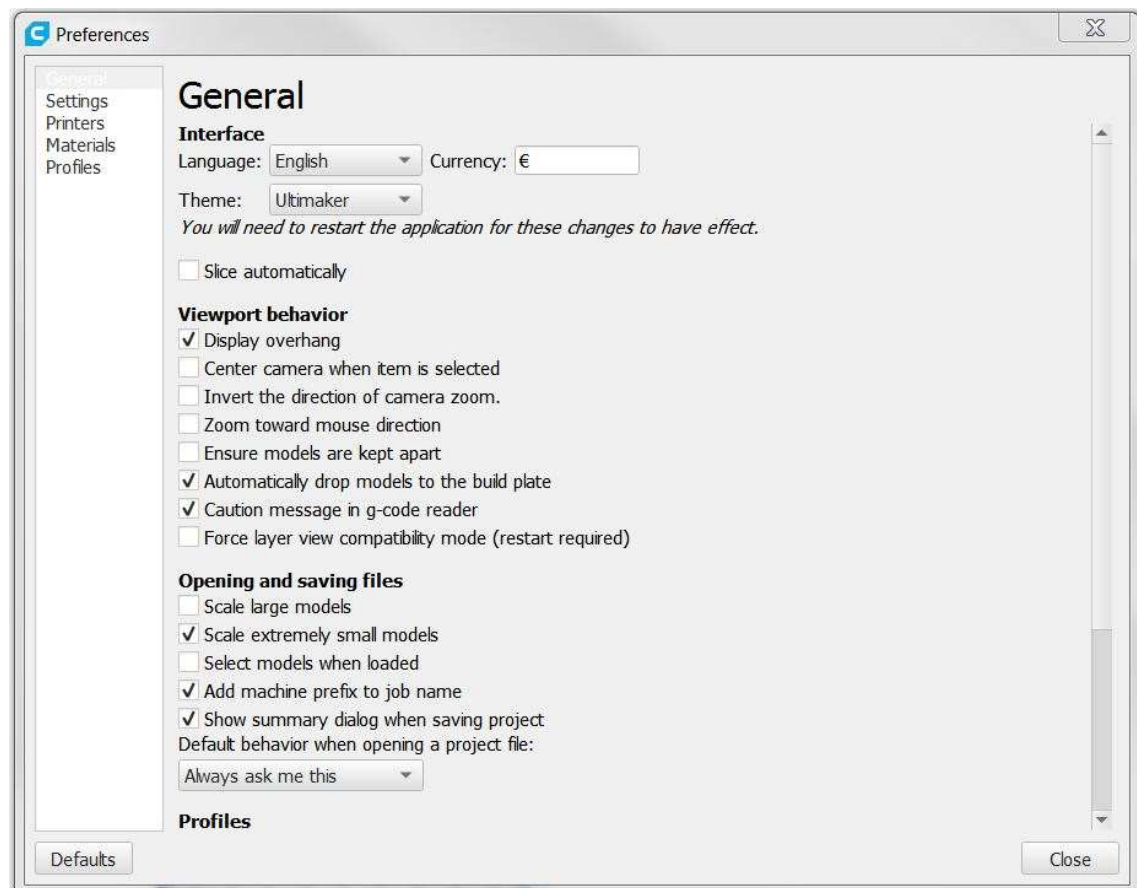


Abbildung 48: Slicing mit Cura - Einstellungen der Software anpassen

Dort können Sie unter anderem die gewünschte Sprache einstellen (in unserem Beispiel Deutsch). Der zweite Punkt [Slice automatically](#) (Automatisch schneiden) sollten Sie bei leistungsschwächeren PC entfernen. Cura würde sonst nach jeder veränderten Einstellung automatisch neu slicen.



Abbildung 49: Slicing mit Cura – Symbol zum Öffnen des 3D-Objekts

Mit dem Symbol des weißen Ordners, links oben können Sie nun ihre erste STL/OBJ Datei ins Programm laden.

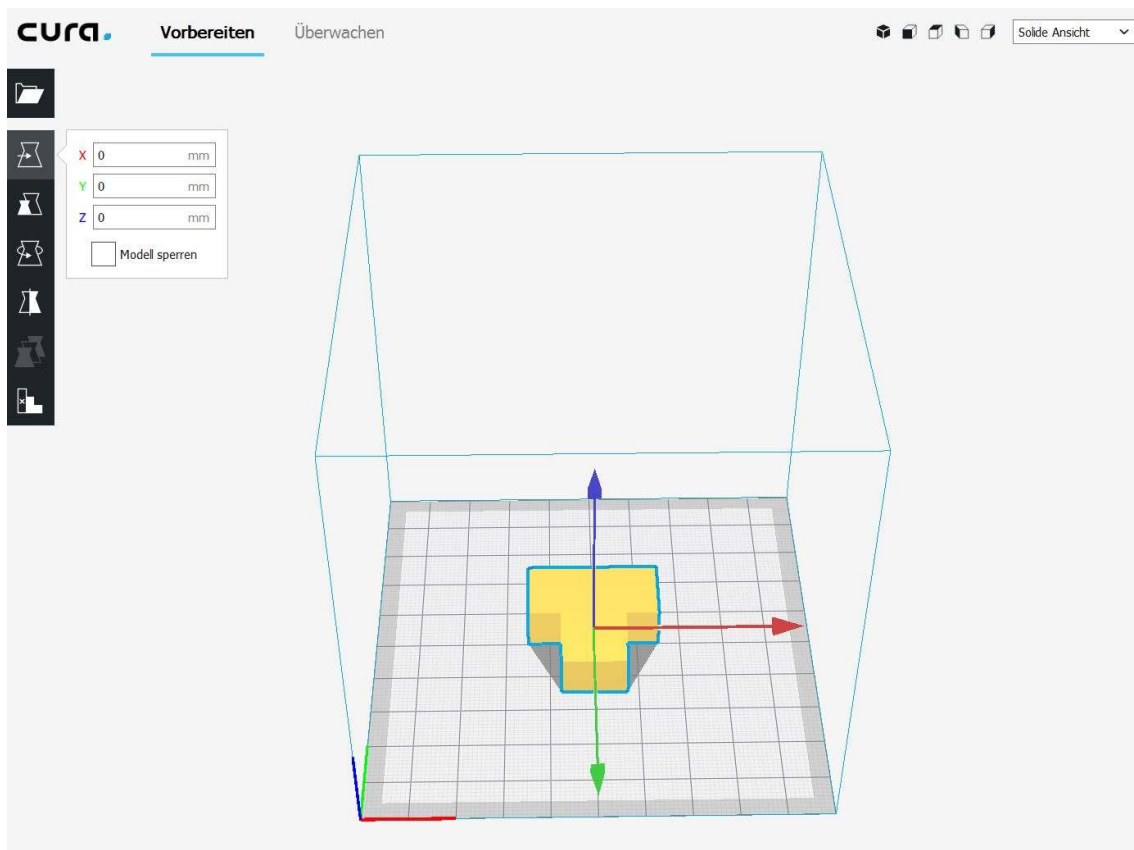


Abbildung 50: Slicing mit Cura – Ansicht des geöffneten 3D-Obejektes (Blick in den virtuellen 3D-Drucker)

Nachdem Sie Ihre Datei ausgewählt haben und diese in der Software durch einmaliges Anklicken ausgewählt haben können Sie sehen, dass die Symbole in der Toolbar auf der linken Seite aktiv sind. Dort haben Sie die Möglichkeit das Objekt zu bewegen, zu skalieren, oder zu drehen.



Tipp: Wenn Sie in Cura mit den Mauszeiger über einem Symbol oder einer Einstellung halten (ohne zu klicken), wird Ihnen immer ein kleiner Info-Text oder eine Betitelung angezeigt.

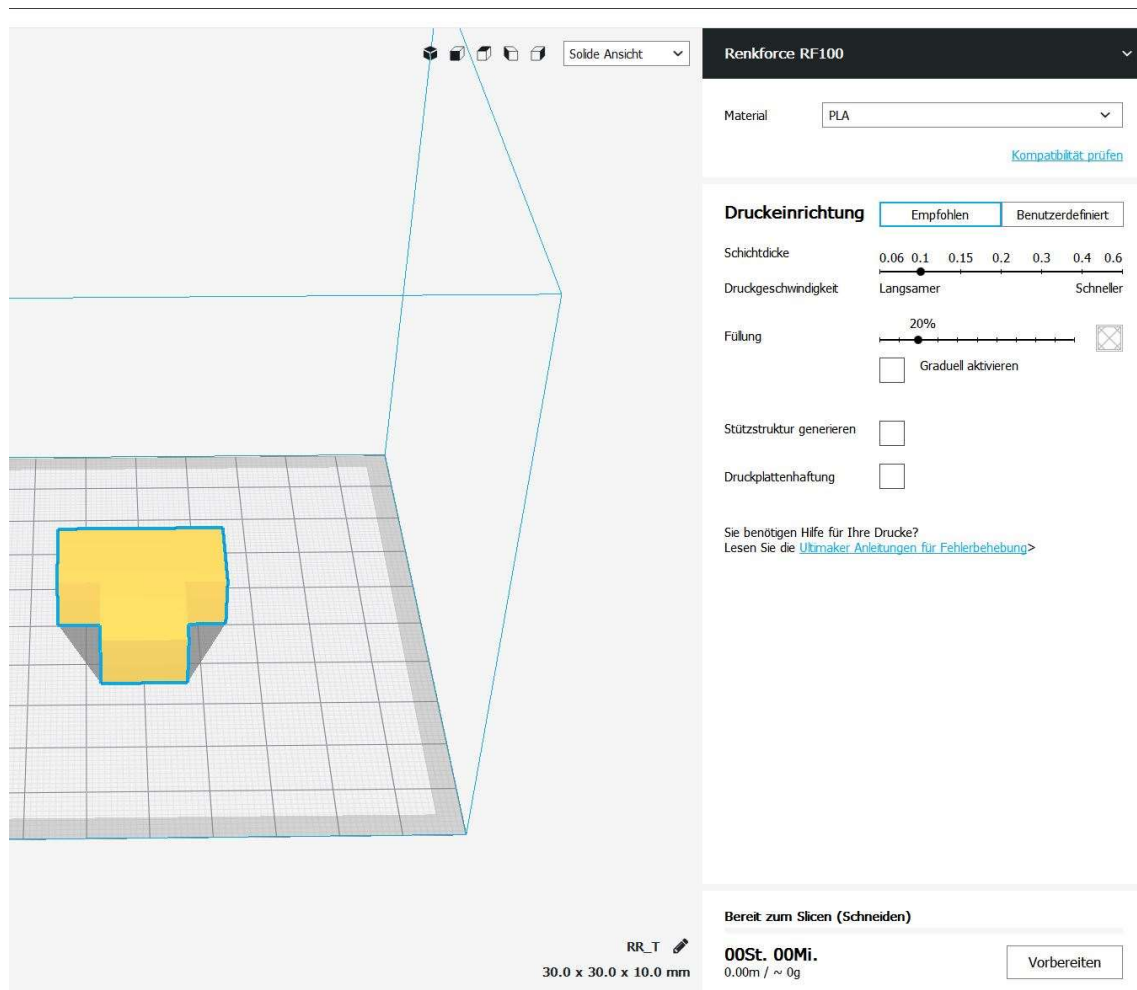


Abbildung 51: Slicing mit Cura - Einstellungen für den 3D-Druck ändern

Auf der rechten Seite sehen Sie bereits die vereinfachten Einstellungen zum Druck.

- **Material.** Achten Sie darauf, dass im Falle des Druckers Renkforce RF100 V2 hier PLA ausgewählt ist.
- **Schichtdicke.** Hier können Sie die Auflösung/Feinheit des zu druckenden Objektes definieren. Diese wirkt sich wesentlich auch auf die Druckzeit aus.
- **Füllung.** Mit dieser Einstellung bestimmen Sie die Dichte des zu druckenden Objekts.
- **Graduell aktivieren.** Die graduelle Füllung steigert die Menge der Füllung nach oben hin schrittweise.
- **Stützstrukturen generieren.** Damit werden Strukturen zur Unterstützung von Modellteilen mit Überhängen generiert. Ohne diese Strukturen würden solche Teile während des Druckvorgangs zusammenfallen.
- **Druckplattenhaftung.** Drucken eines Brim- oder Raft-Elements aktivieren. Es wird ein flacher Bereich rund um oder unter dem Objekt hinzugefügt, das im Anschluss leicht abgeschnitten werden kann.

Anschließend starten wir das Slicen mit einem Klick auf Vorbereiten.

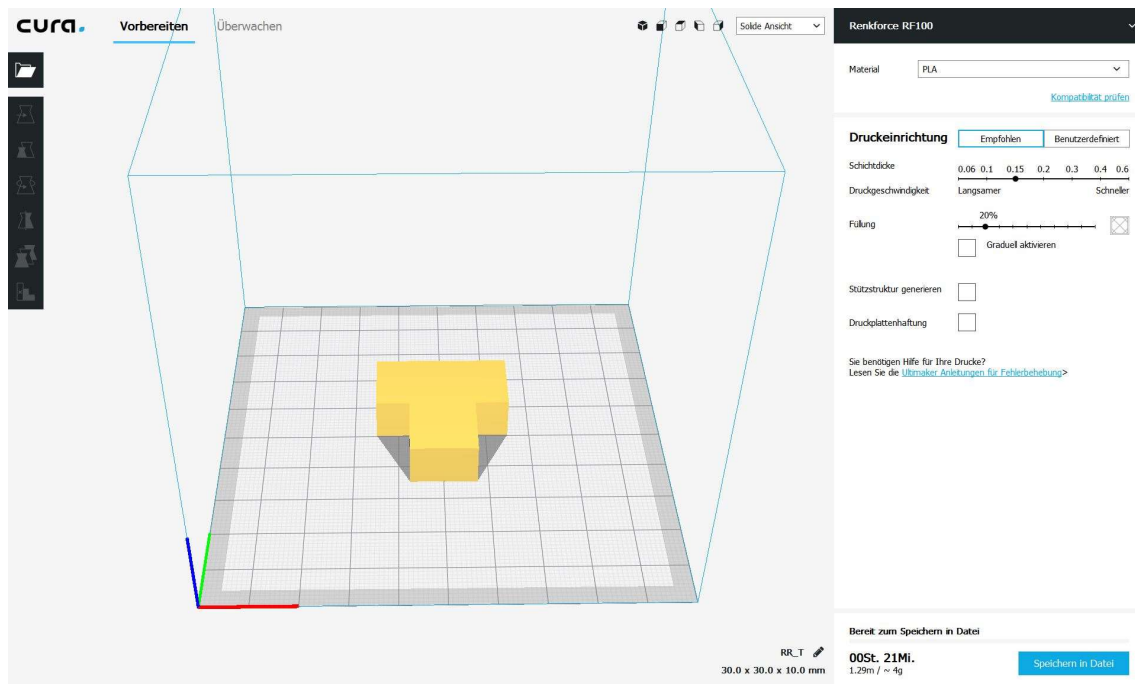


Abbildung 52: Slicing mit Cura – geänderte Auflösung (Schichtdicke), Berechnung von Druckzeit und Materialverbrauch

Nach dem Slicen sehen Sie unten rechts die Druckzeit sowie das benötigte Material. Bevor Sie nun den generierten gcode auf einen Wechseldatenträger/Festplatte abspeichern empfiehlt es sich, immer den gcode doch einmal zu begutachten:

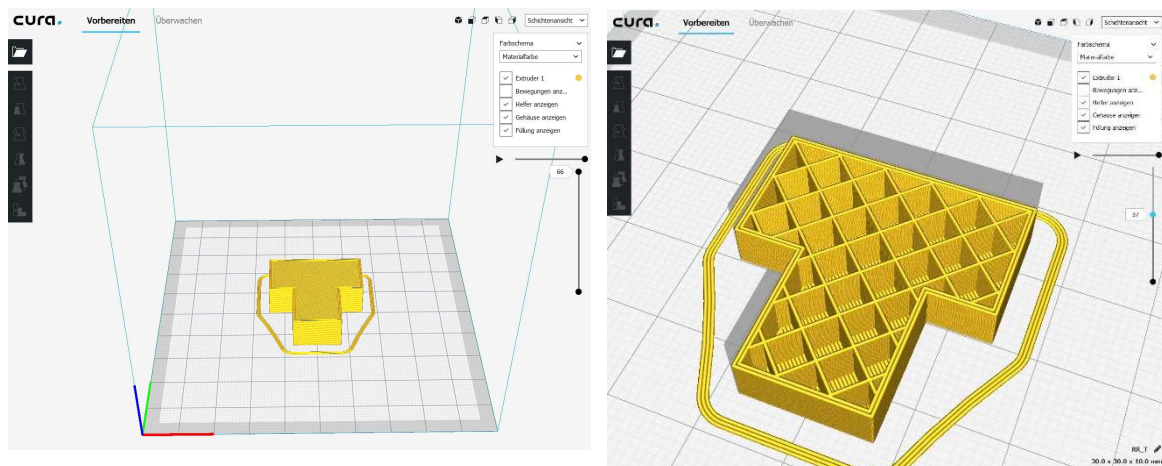


Abbildung 53: Slicing mit Cura – Schichtansicht – Simulation des 3D-Druckvorgangs mit Detailsicht

Schalten Sie im oberen mittleren Bereich von **Solide Ansicht** auf **Schichtansicht** um. Hier haben Sie nun die Möglichkeit den gcode bzw. das was der Drucker tatsächlich umsetzt, zu kontrollieren:

Anschließend können Sie, wenn alles zur ihrer Zufriedenheit ist, die Datei auf einer SD-Karte speichern und damit Ihren Druck am renkforce RF100 V2 starten (siehe Kapitel 3.4.).

3.3 Wichtige Parameter beim Slicing: Stützstrukturen

Stützstrukturen (engl. Support Material) sind, wie der Name bereits sagt, Strukturen, die Überhänge ab einem Winkel von 60 Grad nach unten abstützen – an unserem kleinen Beispiel in Hellblau zu sehen. Diese sind nötig, damit das zu druckende Objekt auch seine Maßhaltigkeit und seine physikalische Aufgabe erfüllen kann.

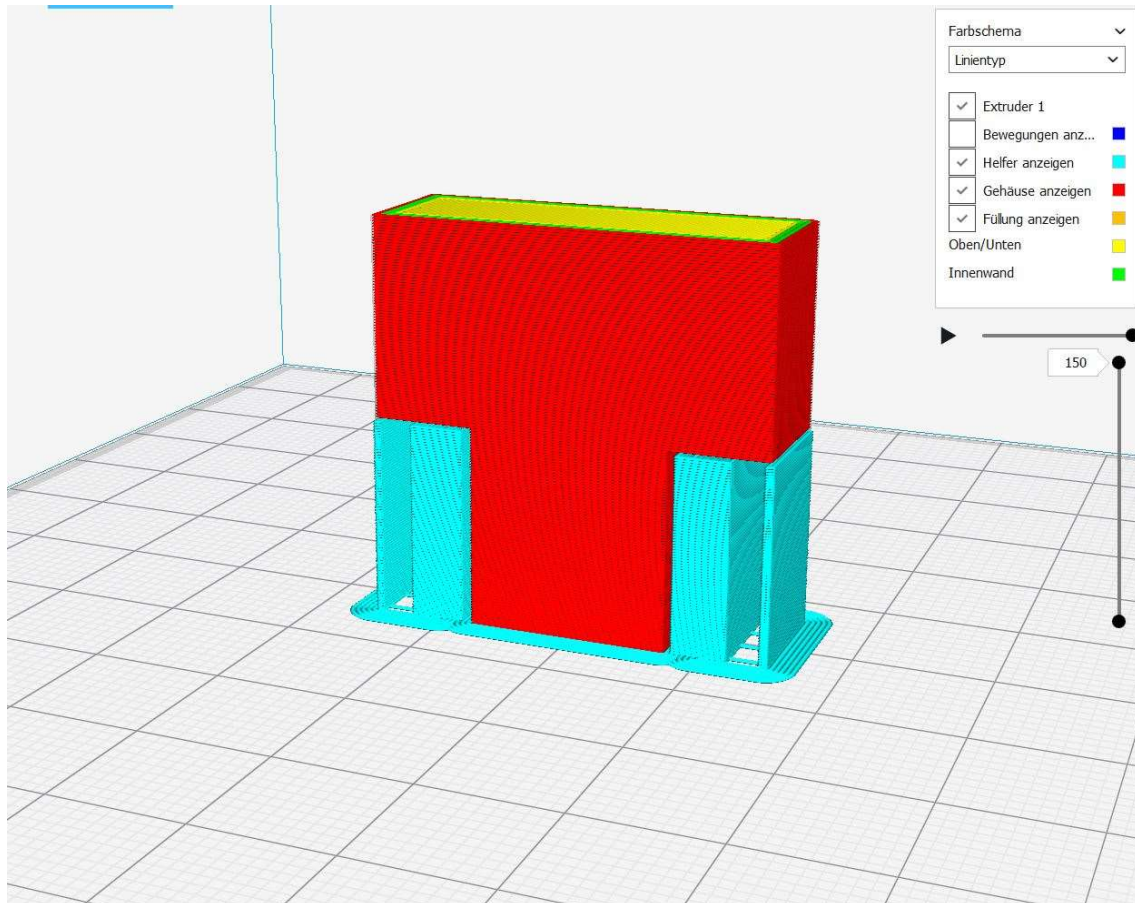


Abbildung 54: : Parameter beim Slicing – Stützstrukturen für Überhänge

In diesem Beispiel wären durch eine geschickte Platzierung Stützstrukturen vermeidbar – wir verwenden dieses Beispiel trotzdem, weil sich hier so besonders gut zeigen lässt, dass die Software allein nicht die gesamte Druckplanung übernehmen kann. Es ist daher notwendig zu überlegen, wie das gewünschte 3D-Objekt am besten gedruckt werden kann.

Wenn das Objekt jedoch in der dargestellten Weise platziert ist (oder z.B. für andere Modelle eine bessere Druckausrichtung nicht möglich ist), sind Stützstrukturen notwendig. Wird der Druck ohne diese gestartet, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass der Druck dadurch komplett scheitern kann:



Hier wurde auf Stützstrukturen verzichtet mit der Folge, dass die Form des Körpers nicht wie gewünscht gedruckt werden konnte.

Abbildung 55: Parameter beim Slicing - Folgen des Drucks von Überhängen ohne Stützstruktur

Ab wann benötigt man Stützen?

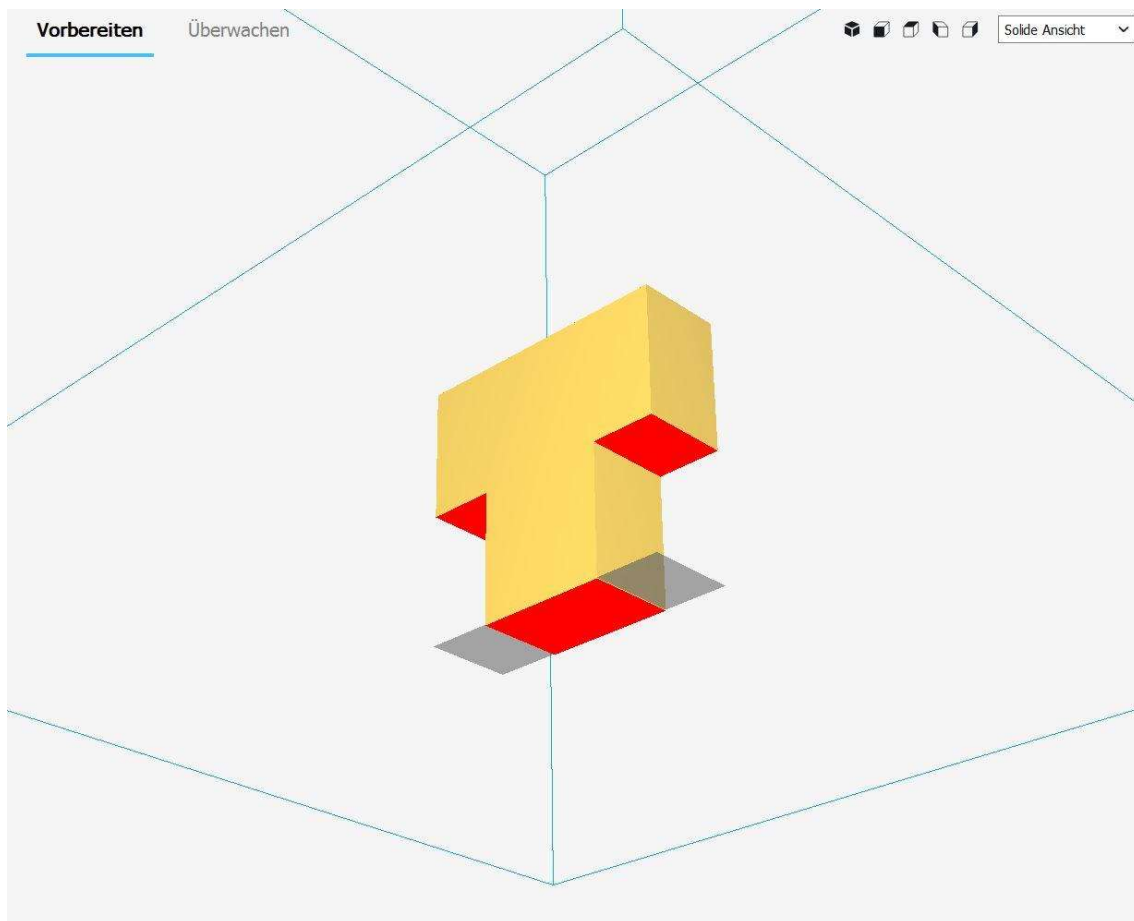


Abbildung 56: Parameter beim Slicing - automatische Vorschläge für die Platzierung von Stützstrukturen

Cura zeigt im Vorschau-Menü an welche Bereiche sich in einem kritischen Winkel befinden und welche die Software abstützen würde - rot markiert.

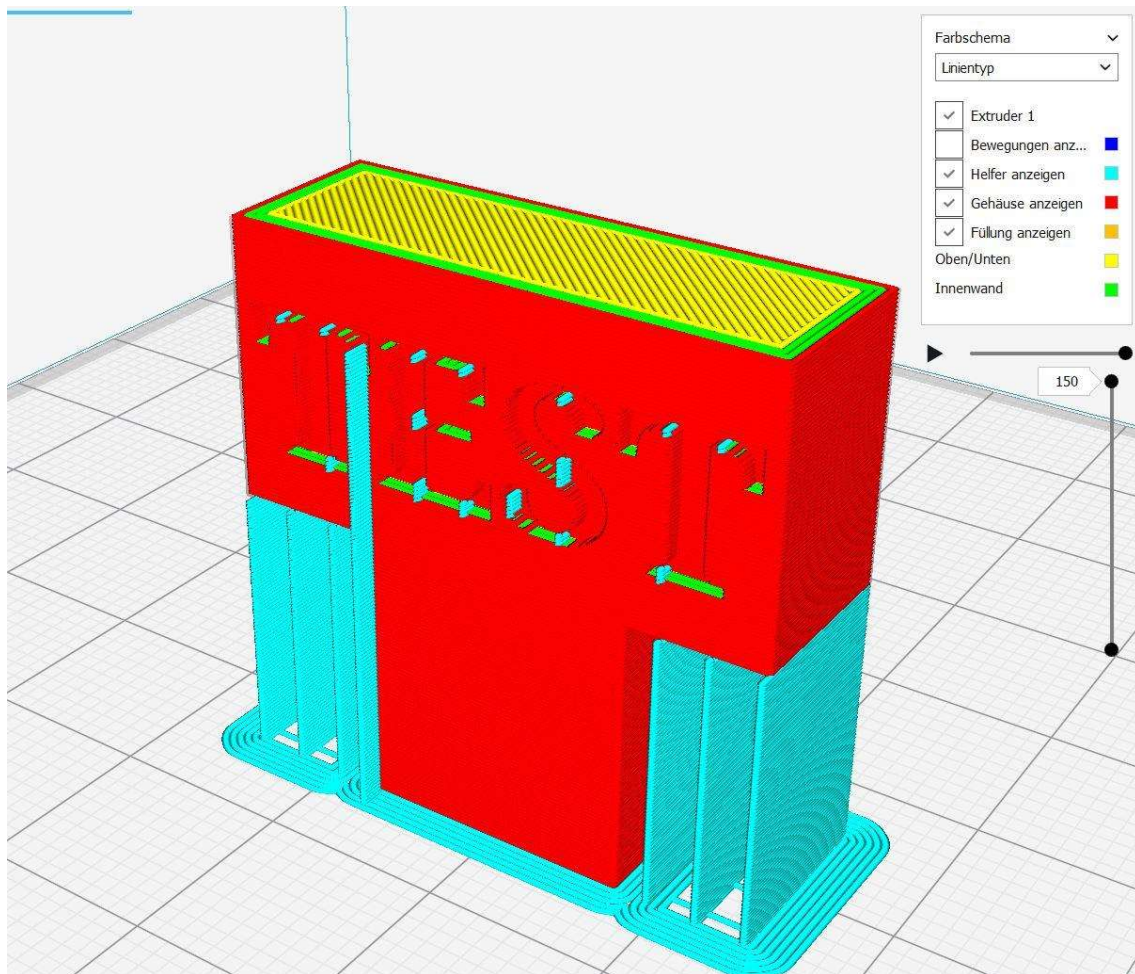


Abbildung 57: Parameter beim Slicing – der Algorithmus meint es zu gut...

Da es sich hier um einen Algorithmus handelt, der bestimmt, wo und wie viel Stützmaterial eingesetzt wird, kann es auch sein, dass dieser es gerne mal etwas zu genau nimmt...



Hier haben Sie die Möglichkeit, ab Version von Cura 3.5 mit dem neuen Tool Stützstruktur-Blocker Bereiche an Ihrem Objekt gezielt von Stützen frei zu halten (letztes Icon unten links in Abbildung 58).

Nach Anwählen dieser Option können Sie durch Anklicken am Druckobjekt einen transparenten Würfel setzen. In diesem Bereich werden nun keine Stützen gesetzt.

Auf den folgenden beiden Abbildungen wird dies schrittweise gezeigt. Im Schriftzug soll auf Stützmaterial verzichtet und nur die T-Struktur selbst abgestützt werden.

Abbildung 58: Tool zum Blockieren von Stützstrukturen in Cura

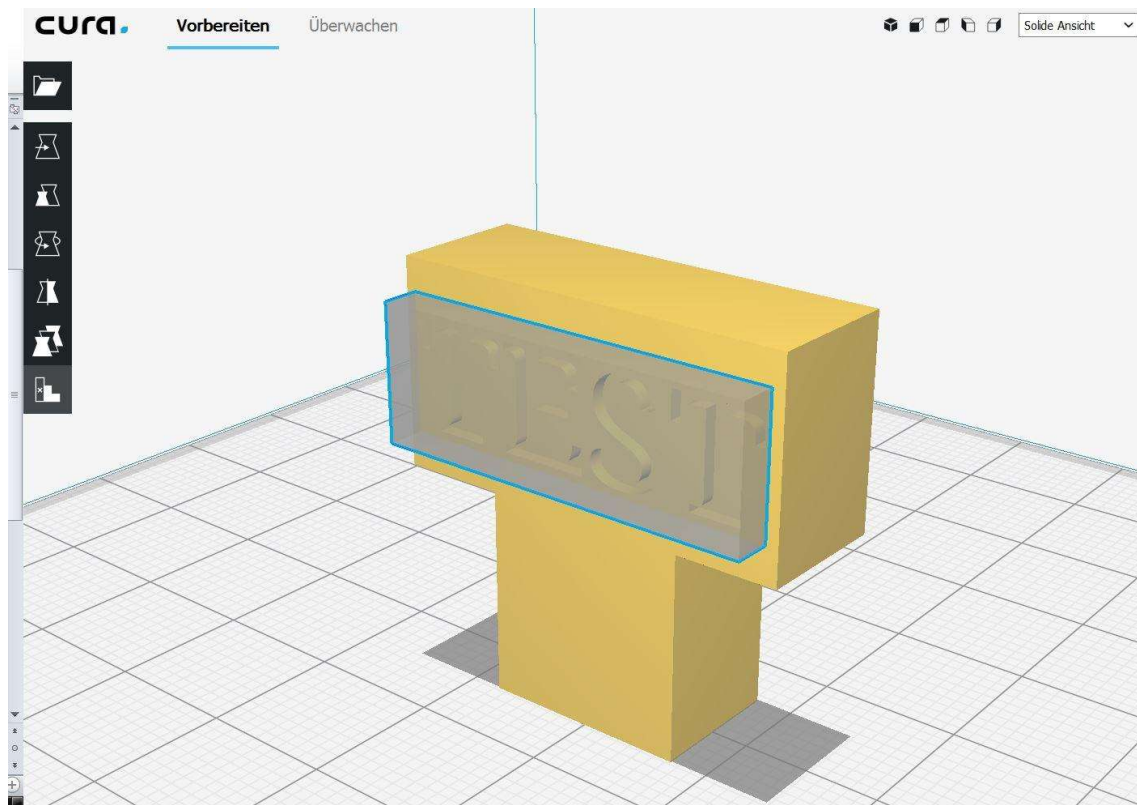


Abbildung 59: Parameter beim Slicing - Blocken von Stützstrukturen im Schriftzug

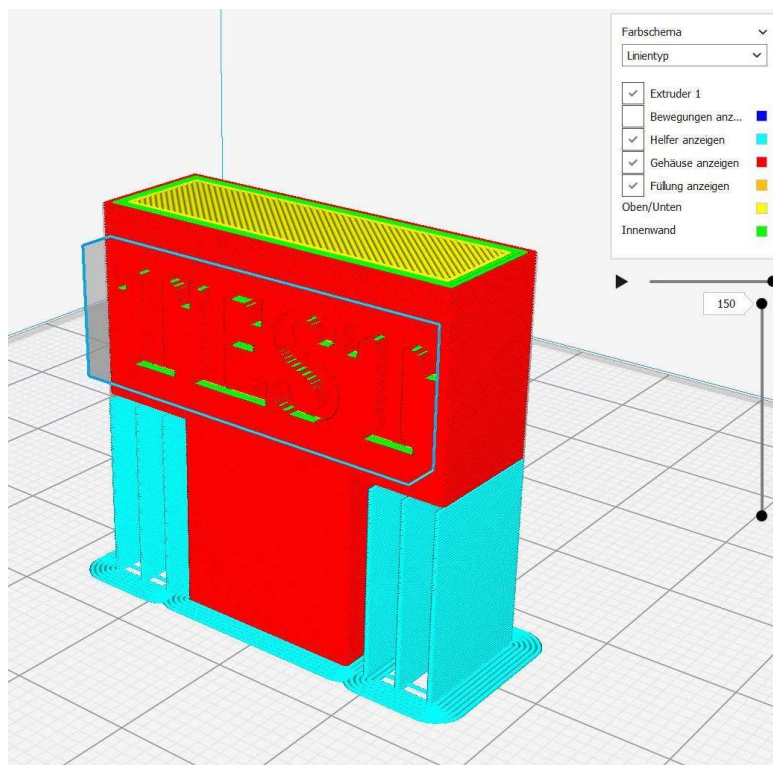


Abbildung 60: Parameter beim Slicing - Vorschau des Gcodes; nur T-Struktur wird abgestützt



Tipps: Den transparenten Würfel des Blockers können Sie wie ein weiteres Objekt verschieben und in der Größe skalieren.

3.3.1.2. Stützstrukturen minimieren oder ganz vermeiden

Wie am Beispiel unseres T-förmigen Objekts bereits erwähnt, könnten wir in diesem Fall ganz auf Stützen verzichten, wenn wir das Objekt mit dem T-Balken nach unten oder flach liegend drucken.

Es empfiehlt sich immer, vor dem Druck genau das Objekt auf der virtuellen Druckplatte anzusehen. Durch richtiges Drehen und Wenden lassen sich so die Stützen minimieren oder ganz vermeiden.

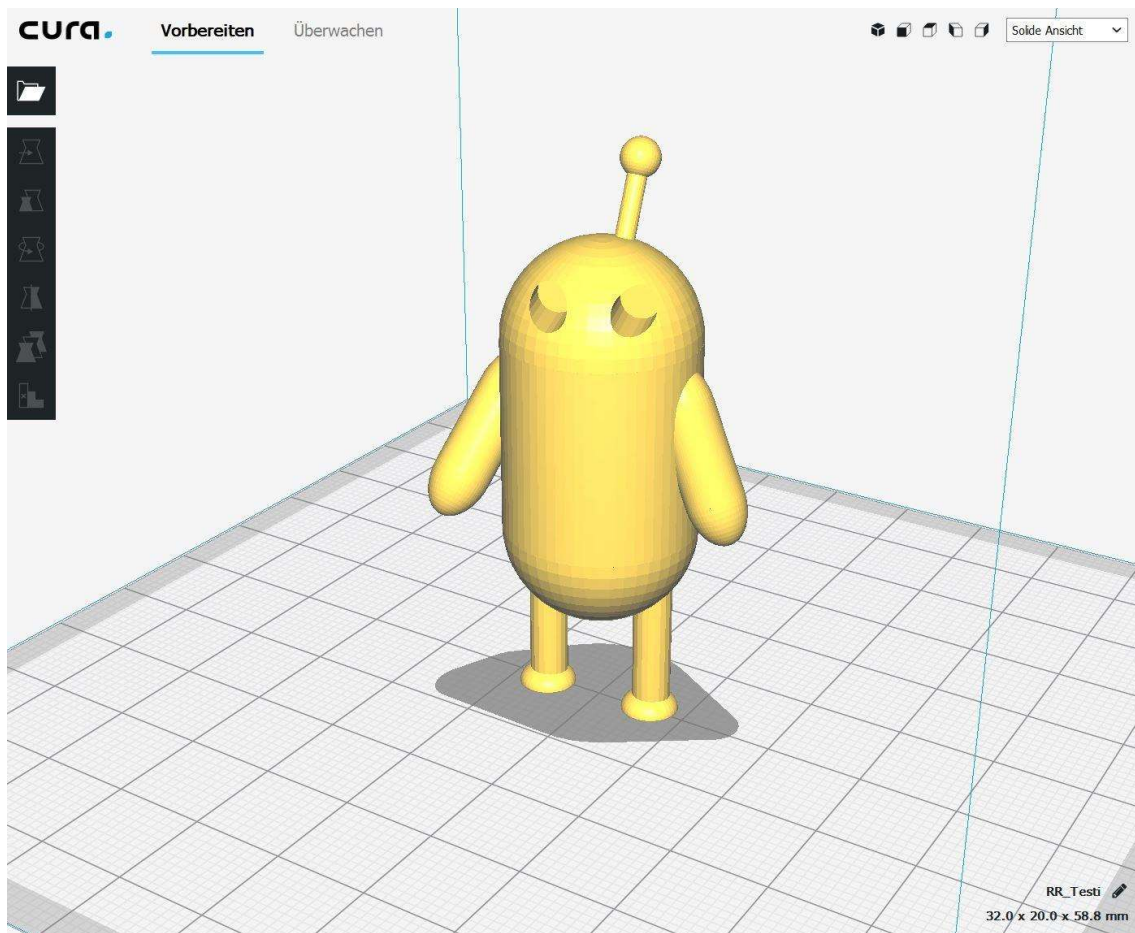


Abbildung 61: Parameter beim Slicing – kompliziertes Druckobjekt: Überhänge, sehr geringe Auflagefläche

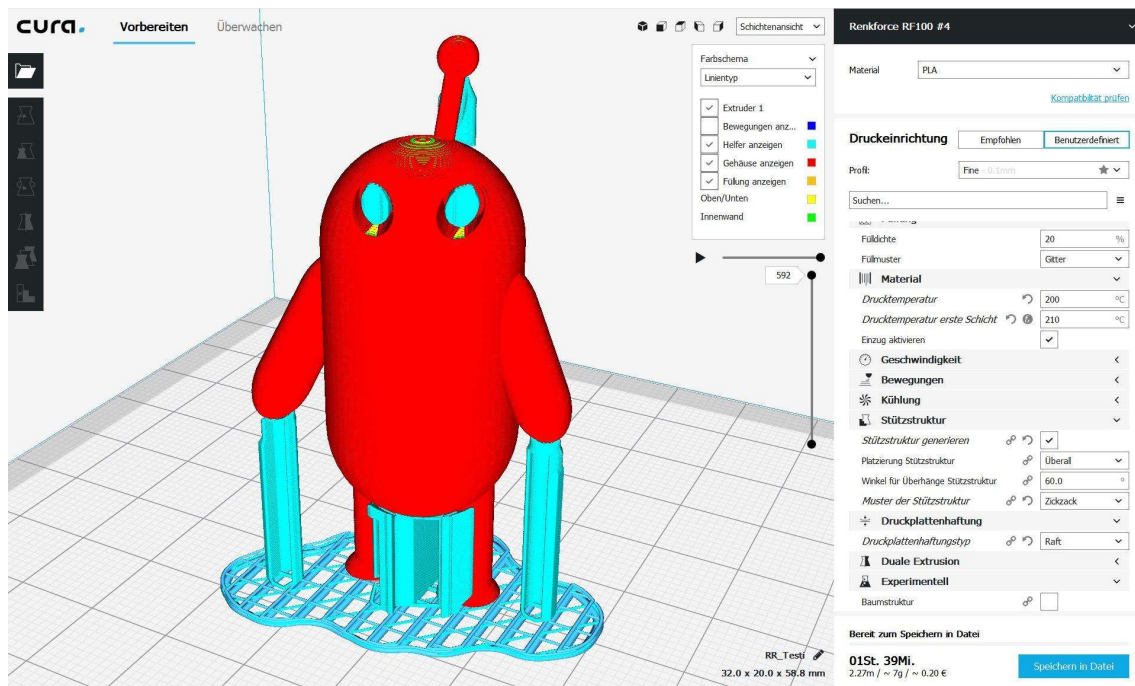


Abbildung 62: Parameter beim Slicing – Raft und Stützstrukturen

Bei Objekten mit einer sehr geringen Auflagefläche – zum Beispiel einer Kugel oder ähnlichem, empfiehlt es sich die Funktion „Raft“ in der Kategorie „Druckplattenhaftung“ auszuwählen. In diesem Fall wird eine Gitterstruktur unter das Objekt gelegt, so dass die gemeinsame Fläche von Druckobjekt und Druckplatte größer wird. Auch leichte Unebenheiten sowie eine nicht perfekt gelevelte Druckplatte können so ausgeglichen werden.

3.4 Druckvorgang

In diesem Kapitel wird der Druckvorgang Schritt für Schritt erklärt, von der allgemeinen Vorbereitung des Geräts bis zum Start des Druckvorgangs.

Als Beispiel werden wir den in Kapitel 3.1. konstruierten Einkaufswagen-Chip ausdrucken. Den Druckvorgang und die Vorbereitung beschreiben wir am Beispiel eines „renkforce RF100 v2“ 3D-Druckers. Jedoch ist die Beschreibung exemplarisch und kann auch auf einem anderen 3D-Drucker nachvollzogen werden. Hierzu müssen Sie gegebenenfalls die Anleitung des jeweiligen Druckers zu Rate ziehen, um die beschriebenen Menüpunkte zu finden.

Damit der Druck gelingt, sollten im Vorfeld einige Schritte beachtet sowie der Drucker vorbereitet werden. Für einen erfolgreichen Druck bauen wir uns daher eine kleine Eselsbrücke, bestehend aus den folgenden drei Eckpfeilern.

	Eckpfeiler	Auf was ist zu achten?	Auswirkung
1	Druckbett	Ist das Druckbett richtig kalibriert?	Wichtig für die Haftung der ersten Druckschicht auf dem Druckbett.
2	Filament	Ist das richtige Filament geladen bzw. ist der Materialfluss gegeben?	Passt das Filament zur vorbereiteten (geslicten) .gcode Datei?
3	Temperatur	Sind die richtigen Temperaturen für das verwendete Filament gesetzt?	Ist die Extruder-Temperatur so eingestellt, dass diese zum verwendeten Material passt? Dies wird durch die Information in der geslicten Datei voreingestellt, kann aber am Gerät nachjustiert werden.

Werden diese drei Punkte beachtet, so lassen sich die meisten Stolperfallen bereits im Vorfeld vermeiden.

3.4.1.1. Bedienelemente und Teile eines 3D Druckers am Beispiel „renkforce RF100 v2“

Das folgende Bild beschreibt die wesentlichen Bedienelement und funktionalen Teile eines druckbereiten 3D-Druckers. Als Beispiel wurde der „renkforce RF100 v2“ gewählt.

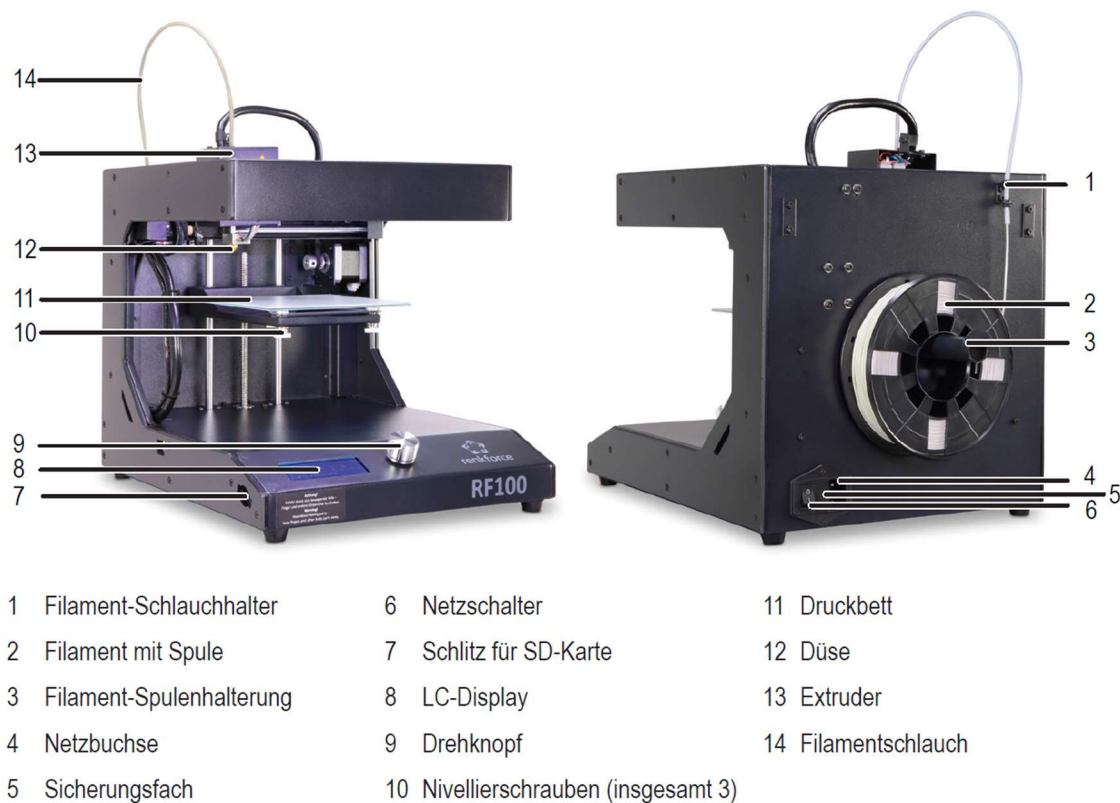


Abbildung 63: Bedienelemente eines 3D-Druckers am Beispiel des Einstiegsdruckers renkforce RF100 V2

3.4.1.2. Druckbett kalibrieren

Das A und O eines erfolgreichen Druckes ist das richtig „Leveln“ des Druckbetts, bei dem der richtige Abstand zwischen Druckbett und Düse eingestellt wird. Diese Art der Kalibrierung ist weit verbreitet und allgemein bekannt. Das Gerät positioniert dabei die Düse automatisch an verschiedenen Positionen des Druckbetts, so dass an diesen Stellen der Abstand zwischen Düse und Druckbett mit Hilfe der Nivellierschrauben exakt eingestellt werden kann. Nach Abschluss des Vorgangs ist das Druckbett eben und hat den richtigen Abstand zur Düse.



TIPP: Bei Geräten anderer Hersteller schlagen Sie bitte im Handbuch nach, welche Methode Sie zur Kalibrierung anwenden müssen.

Ein ebenes Druckbett, sowie der exakte Abstand des Druckbetts zur Düse sind wichtig für die erste Druckschicht. Diese muss gut am Druckbett haften, so dass sich das Druckobjekt während des Druckvorgangs nicht vom Druckbett löst.

Ziehen Sie bei der allerersten Inbetriebnahme die Nivellierschrauben etwas an, um damit das Druckbett abzusinken. Damit vermeiden Sie, dass die Düse beim ersten Kalibriervorgang ins Druckbett fährt.

Nun empfiehlt es sich den Extruder auf eine normale Betriebstemperatur zu bringen, so dass die Bauteile des Extruders die Möglichkeit haben sich zu längen.



Abbildung 64: Infoscreen

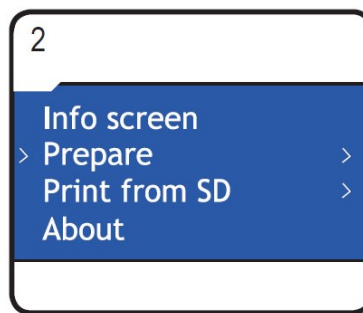


Abbildung 65: Option Prepare

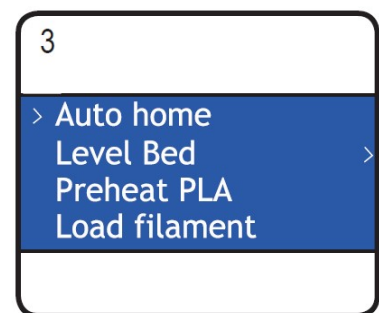


Abbildung 66: Auto home

Im „Info screen“ auf den Drehknopf drücken, um „Main Page“ aufzurufen.

Im Menü „Main“ die Option „Prepare“ wählen.

„Auto home“ wählen.

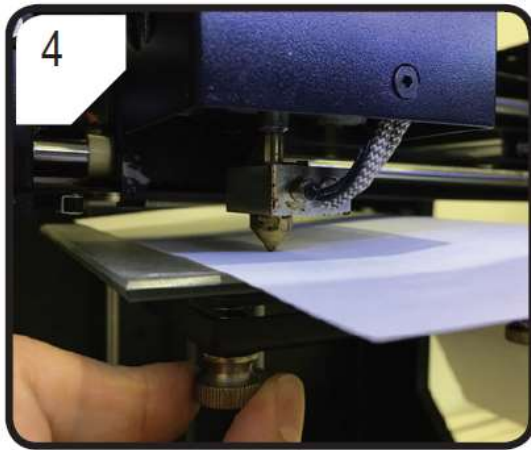


Abbildung 67: Abstand Düse und Druckplatte einstellen – Papier als Hilfsmittel

Nun benötigen wir unser „hochpräzises Kalibrierungswerkzeug“, ein normales 80g Din A4 Papier. Nehmen Sie das Papier in die eine Hand und drehen Sie mit der anderen Hand an der Nivellierschraube. Bewegen Sie das Papier währenddessen hin und her und verringern Sie mit der anderen Hand den Abstand zwischen Düse und Bett. Der richtige Punkt ist erreicht, wenn das Papier an der Düse leicht kratzt. Es darf nicht klemmen und nicht durchrutschen. Diesen Vorgang wiederholen Sie nun auch mit den anderen Nivellierschrauben.

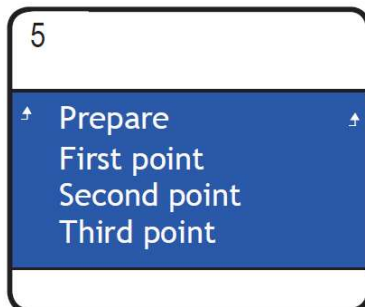


Abbildung 68: Menü Prepare

Zurück zum Menü „Prepare“.

Das Menü „Level bed“ aufrufen und „First point“ wählen.

Beim Regulieren des Druckbetts jedes Mal sicherstellen, dass der Abstand zwischen Düse und Druckbett immer gleich ist. Andernfalls sind die Ebenen der Führung des Extruders und das Druckbett nicht parallel, sodass die Druckobjekte nicht einwandfrei daran haften.

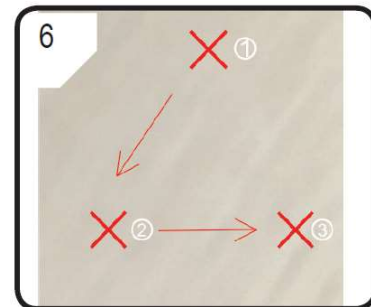


Abbildung 69: Kalibriersequenz

Schritte 1-4 für die zweiten und dritten Punkte wiederholen (Kalibriersequenz und Bewegungsrichtung der Düse werden dargestellt).



Tipp: Bei der ersten Inbetriebnahme empfiehlt es sich, diesen Vorgang zweimal hintereinander durchzuführen.

3.4.1.3. Wie erkennt man eine falsche Kalibrierung des Druckbettes?

Ist das Druckbett falsch eingerichtet, so kann dies zu Fehlern während des Druckens führen, oder das Druckobjekt löst sich sogar während des Druckvorgangs. Die Zeit und das Material, das bis zu diesem Zeitpunkt eingesetzt wurde, sind damit im schlimmsten Fall verschwendet.

Allerdings lässt sich zu Beginn des Druckvorgangs, sobald die ersten Schichten eines Objekts gedruckt wurden, erkennen, ob das Druckbett richtig kalibriert ist. Darum sollte man zu Beginn den Druckvorgang beobachten. So kann im Zweifelsfall der Druckvorgang gleich zu Beginn abgebrochen und nachkorrigiert werden.

Das folgende Bild zeigt ein Druckbild, welches sich bei einem richtig eingerichteten Druckbett ergibt:

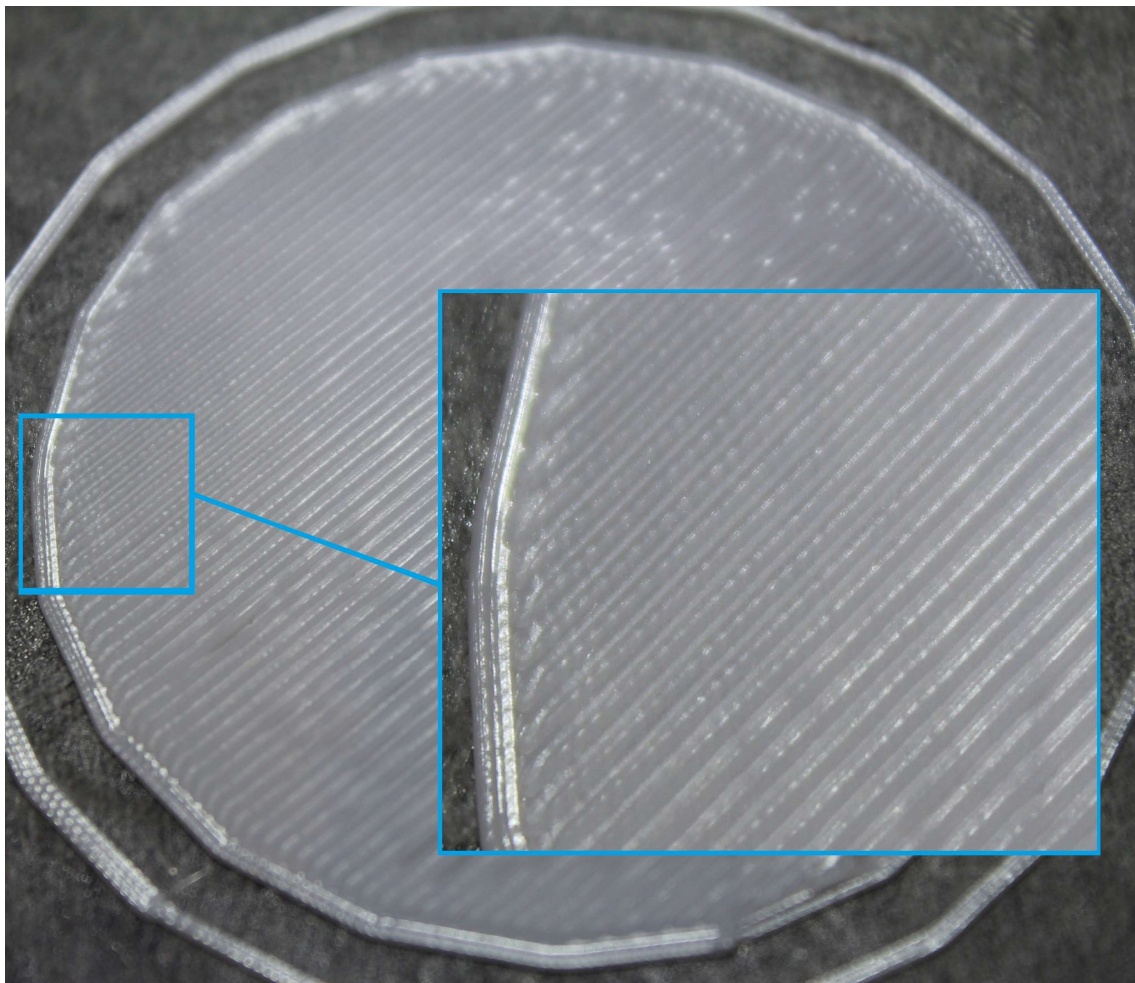


Abbildung 70: optimales Druckbild der ersten Schicht („first layer“)

Hier ist gut zu erkennen, dass jede Linie mit ihrer Nachbarlinie eine Verbindung eingegangen ist. Die Linien sind alle parallel zueinander und leicht angedrückt. Dies ist das optimale Druckbild einer ersten Druckschicht, auch „first layer“ genannt.

Das folgende Beispiel zeigt ein Fehlerbild, das bei zu geringem Abstand zwischen Düse und Druckbett auftritt.

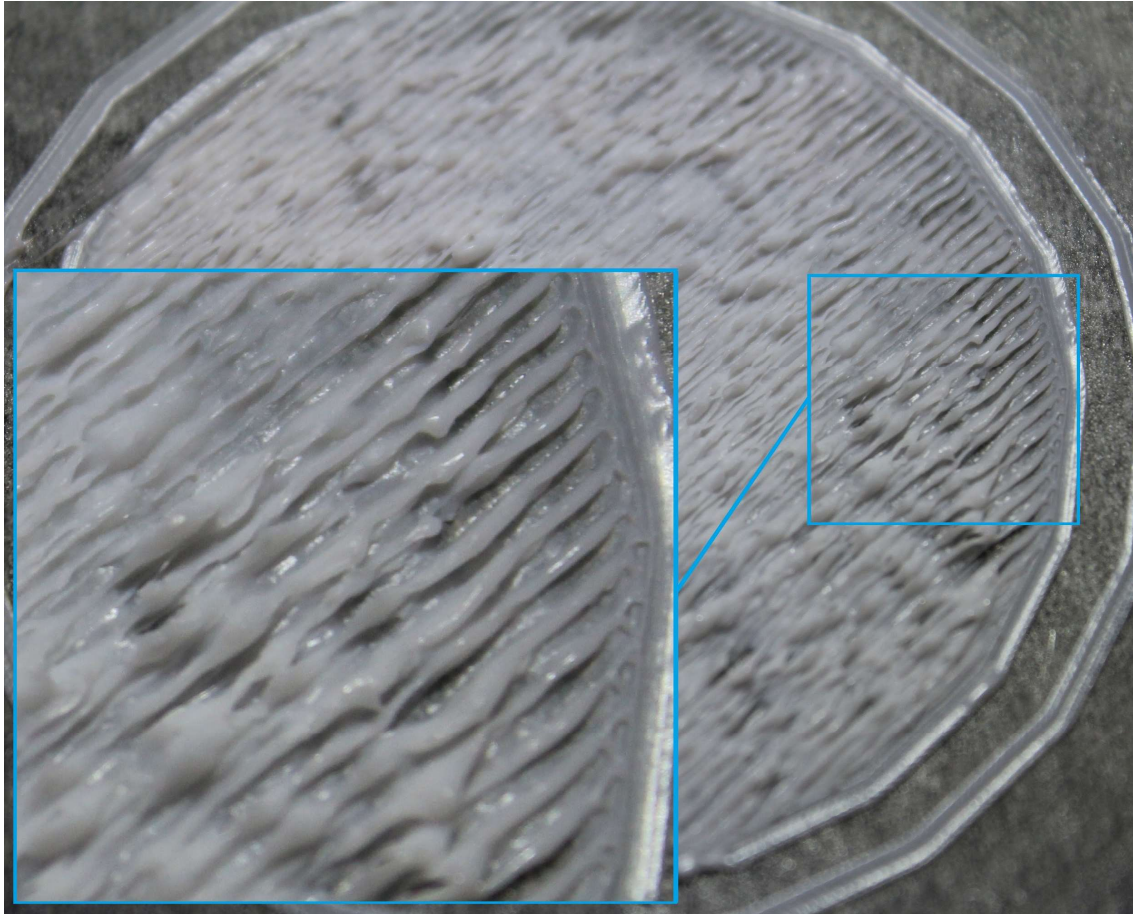


Abbildung 71: schlechtes Druckbild der ersten Schicht, Abstand Düse-Druckbett zu gering

Bestes Indiz für einen zu geringen Abstand sind die in der Vergrößerung gut zu erkennenden Rillen in der Druckschicht (auch „layer“ genannt). Hier wird das Material extrudiert und quillt an den Seiten der Düse wieder hoch. Die zweite und dritte Schicht wird dann augenscheinlich optisch besser aussehen, die Gefahr eines Ausfalls ist aber gegeben. Außerdem begünstigt dies das sogenannte „Warping“.



TIPP: Ein weiteres Indiz für einen zu geringen Abstand ist ein klackendes Geräusch des materialzuführenden Schrittmotors, des sogenannten Feeders.

Das folgende Beispiel zeigt ein Fehlerbild, das bei zu großem Abstand zwischen Düse und Druckbett auftritt. Zwischen den einzelnen Linien ist eine Lücke zu erkennen. Die Linien liegen nahezu lose auf dem Druckbett auf. Die Wahrscheinlichkeit ist hier sehr hoch, dass sich das Druckobjekt vom Druckbett lösen wird.

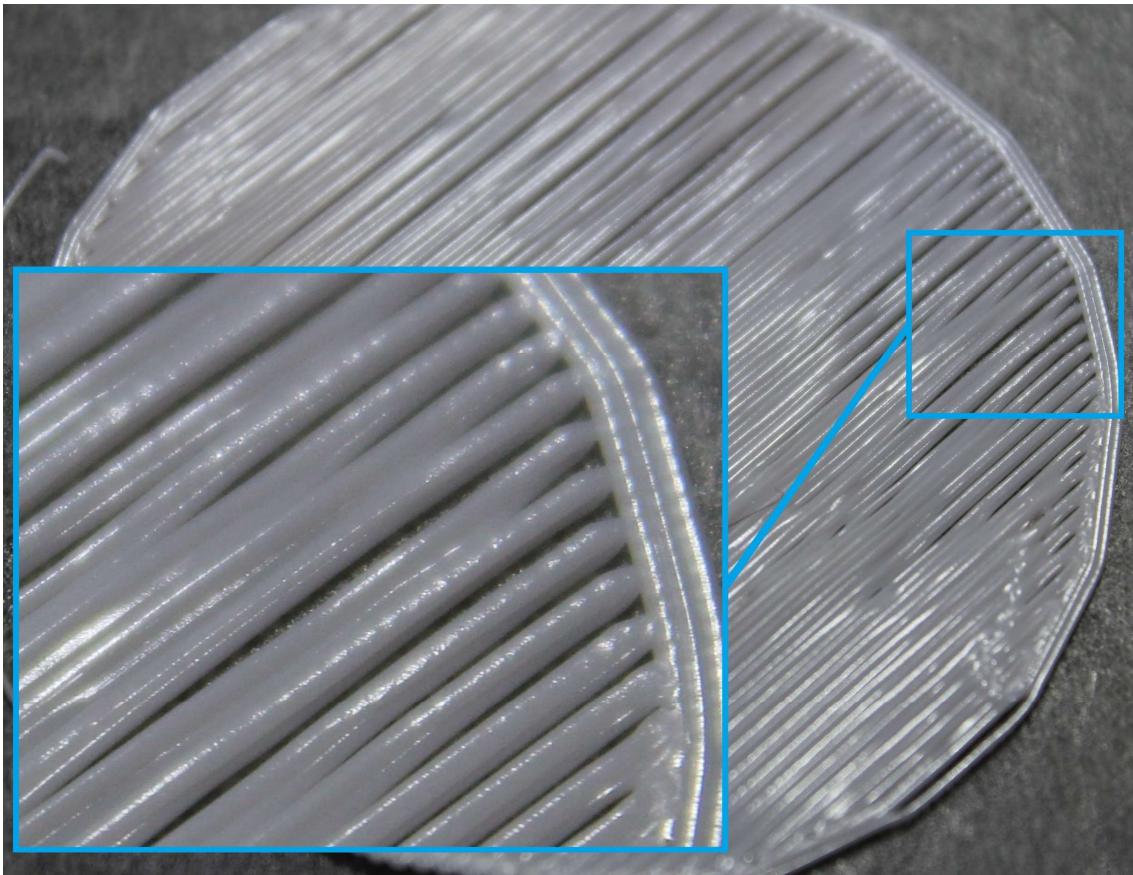


Abbildung 72: schlechtes Druckbild der ersten Schicht, Abstand Düse-Druckbett zu groß



TIPP: Ein gescheiterter Druck ist nicht gleich ein Fall für die Tonne, er kann uns noch wertvolle Hinweise geben zum Problem. Denn die erste Druckschicht lässt sich an der Unterseite gut erkennen und deuten.

Ein ergänzendes Video zu dem Thema finden Sie unter:
<https://www.youtube.com/watch?v=BOcAYVcurC4>

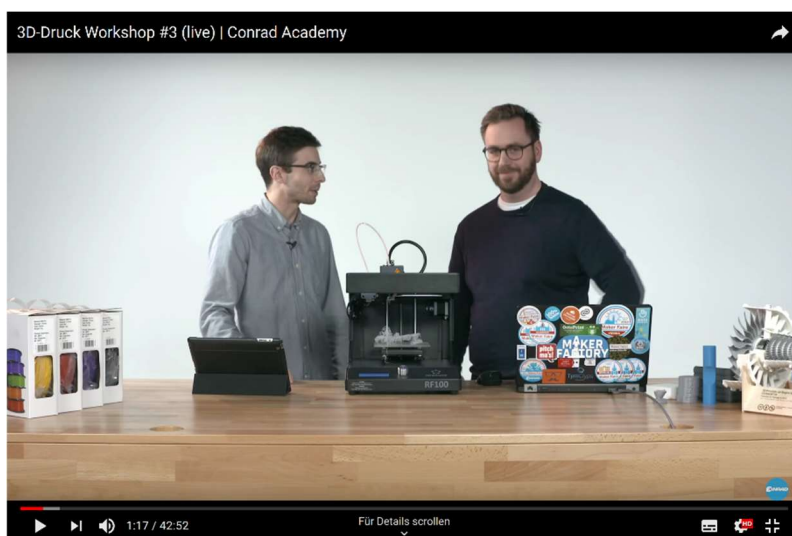


Abbildung 73: Video - 3D-Druck Workshop #3 Conrad Academy

3.4.1.4. Filamenteinrichtung

Richten Sie mit den folgenden Schritten das Filament, welches Sie für den Ausdruck verwenden möchten, am Drucker ein. Wir empfehlen für den Ausdruck des Einkaufs-Chips die Verwendung eines PLA-Filaments. Die Datei „Conrad_Coin.gcode“, die Sie in den mitgelieferten Dateien zu diesem Buch finden, ist für PLA-Filament vorbereitet.



Abbildung 74: Filamenthalterung

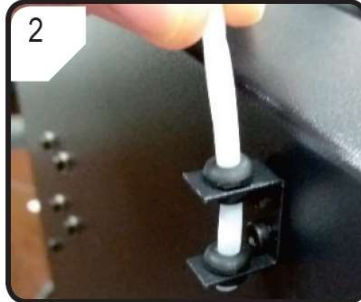


Abbildung 75: Schlauchhalterung

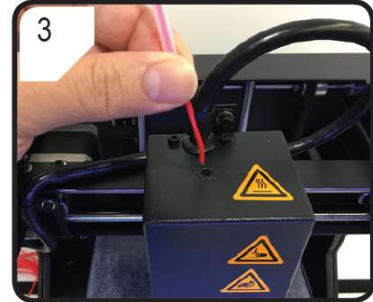


Abbildung 76: Filament im Schlauch

Das Filament an der Spulenhaltung anbringen.

Filament-Schlauch in die Schlauchhalterung einsetzen.

Das Filament soweit in den Schlauch einführen, bis ca. 5 cm am Extruder-Ende zu sehen sind.



TIPP: Der renkforce RF100 v2 benötigt Filament mit dem gängigen Durchmesser 1.75mm.

3.4.1.5. Filament einziehen

Ist das Filament am Drucker eingerichtet, muss dieses nun in den Extruder eingezogen werden, so dass beim Start des Druckvorgangs bereits Material am Düsen-Ende anliegt. Der Extruder wird hierfür zunächst aufgeheizt, dann fördert der Drucker eine kleine Menge Filament in den Extruder.

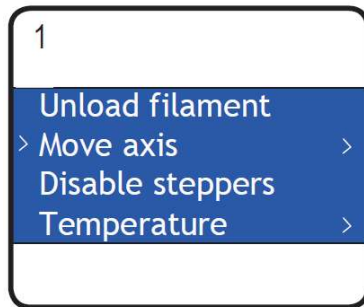


Abbildung 77: Move axis

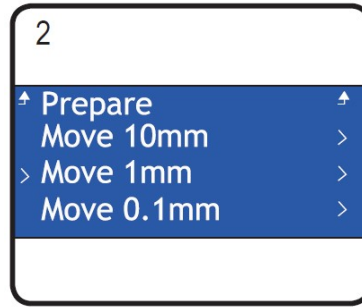


Abbildung 78: Move 1mm

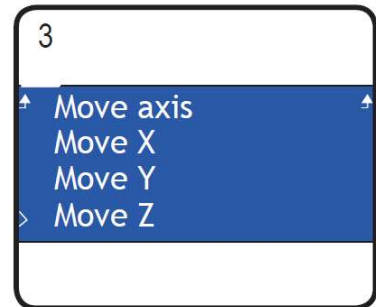


Abbildung 79: Move Z

Im Menü „Prepare“ zuerst „Auto Home“ und dann „Move axis“ auswählen.

Den Punkt „Move 1mm“ auswählen.

Den Punkt „Move Z“ auswählen.

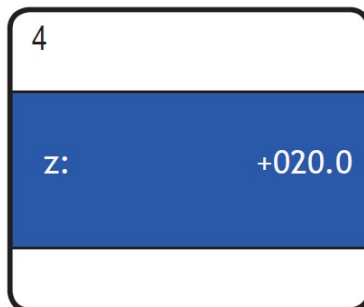


Abbildung 80: Z-Achse 20mm

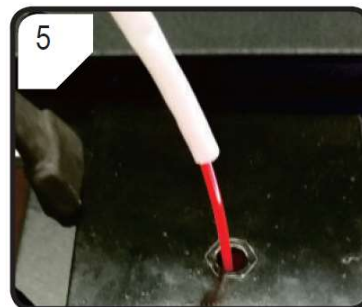


Abbildung 81: Filament einführen

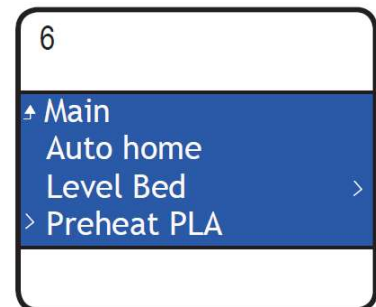


Abbildung 82: Preheat PLA

Die Z-Achse auf mindestens + 20.0 mm einstellen.

Das Filament durch die Öffnung des Extruders hindurchführen.

Die Option „Preheat PLA“ im Menü „Prepare“ auswählen.

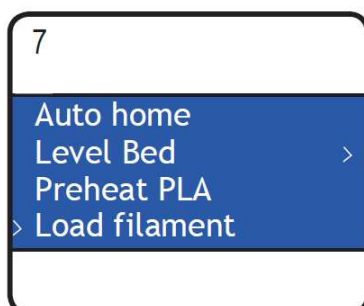


Abbildung 83: Load filament

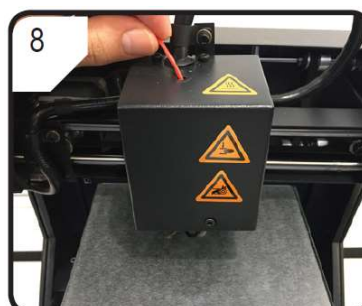


Abbildung 84: Filament vorschieben

Wenn die aktuelle Temperatur auf Solltemperatur gestiegen ist (mindestens 170 °C), wählen Sie „Load filament“.

Das Filament mit leichtem Druck vorwärts schieben, bis es aus der Düse austritt. Man kann beobachten, wie das Filament langsam in den Extruder eingezogen wird.



TIPP: Wenn nach dem Anhalten der Filamentbewegung kein Material aus der Düse austritt, wählen Sie „Load filament“ erneut. Material, das aus der Düse ausgetreten ist, kann nach dem Einziehen des Filaments mit der Pinzette entfernt werden.

3.4.1.6. Druckvorgang starten

Nun ist alles vorbereitet und der Druckvorgang kann starten! Wir drucken nun den Einkaufschip, den wir in Kapitel 3.1. konstruiert und nach der Anleitung in Kapitel 3.2. gesliced und auf SD-Karte gespeichert haben.



TIPP: Sie finden die fertig vorbereitete Datei des Einkaufschips „Conrad_Coin.gcode“ auch in den mitgelieferten Dateien. Die Datei ist für die Verwendung PLA Filament vorbereitet.

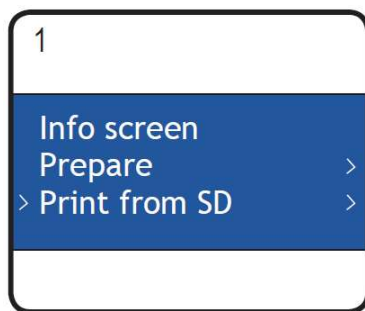


Abbildung 85: Print from SD

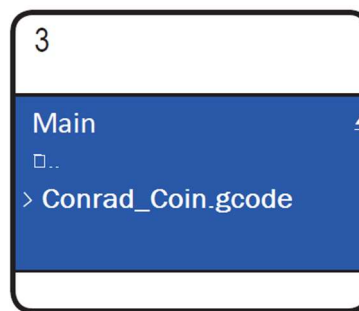


Abbildung 86: Auswahl der Datei

Drehknopf drücken und „Print from SD“ im Menü „Main“ auswählen.

Die zu druckende Datei z. B. „Conrad_Coin.gcode“ auswählen.

Bitte beachten Sie, dass nur Dateien mit dem Format .gcode im Menü angezeigt werden.

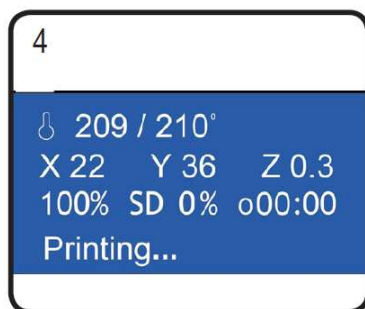


Abbildung 87: Infoscreen

Im LC-Display erscheint „Info Screen“.

Das Druckbett bewegt sich gegen null entlang der Z-Achse. Die Düse bewegt sich in die Ausgangsposition und beginnt sich zu erhitzen.

Wenn die Düse die Solltemperatur erreicht hat, beginnt der Druckvorgang.

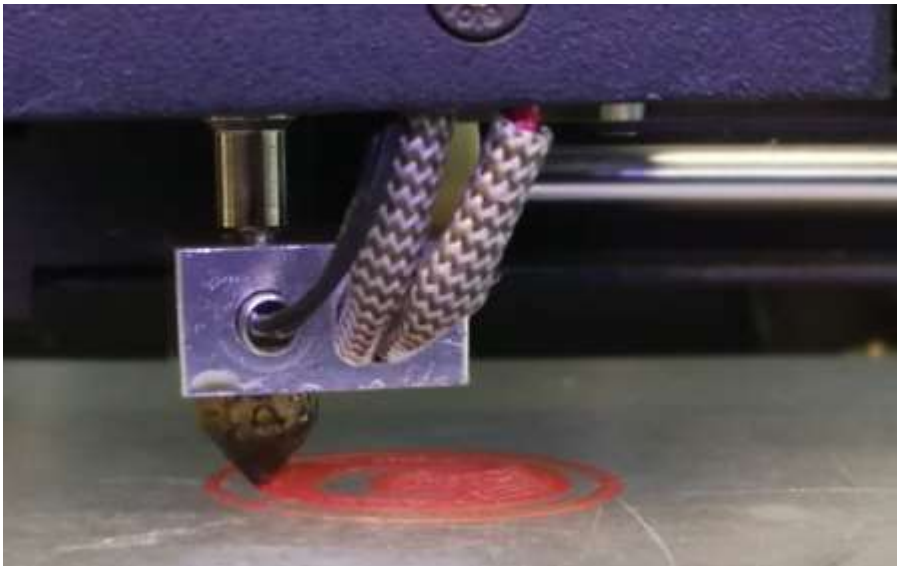


Abbildung 88: Druckbeginn des Einkaufswagen-Chips - erste Druckschicht

Nun baut der 3D Drucker das Objekt Schicht für Schicht auf.

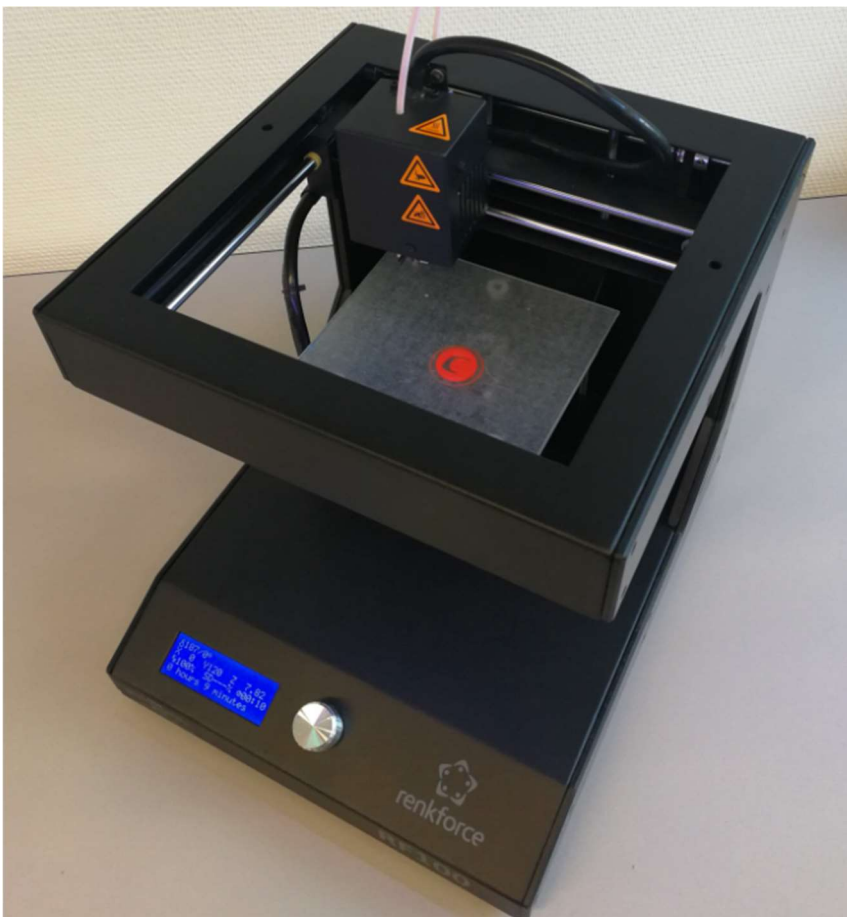


Abbildung 89: Der erste 3D-Druck ist fertig!

Fertig! Nach Abschluss des Druckvorgangs, lassen Sie das gedruckte Objekt ein paar Minuten abkühlen. Danach nehmen Sie das Druckbett heraus und heben Sie das gedruckte Objekt mit einem Spachtel vorsichtig ab.

4. 3D-Druck im Fachunterricht: Experimente mit digitaler Messwert- erfassung

Claude Blanc / Irma Mgeladze / Dr. Sergej Stoetzer / Dr. Hildegard Urban-Woldron



Hinweis: Die folgenden Experimente wurden im [Lehrernetzwerk T³ Europe](#) (Teachers Teaching with Technology) von den Autoren gemeinsam entwickelt mit dem Ziel, in diesem Handbuch zum Einstieg in den 3D-Druck vor allem für weiterführende Schulen einen [fachlichen Bezug](#) zum Einsatz von 3D-Druckern herzustellen.

T³

T³ ist ein Lehrerfortbildungsnetzwerk, das von Texas Instruments gefördert wird. Es richtet sich an interessierte Lehrerinnen und Lehrer, die Interesse am Einsatz digitaler Werkzeuge im MINT-Unterricht haben und Erfahrungen austauschen wollen. Jährlich werden 200 Veranstaltungen in den Bundesländern angeboten – von der schulinternen Lehrerfortbildung über Webinare bis zu Junglehrertagungen – sowie kostenlose Unterrichtsmaterialien entwickelt.



Conrad engagiert sich in diesem Netzwerk und unterstützt die Treffen der Länderkoordinatoren im Berliner Fortbildungszentrum. Weitere Infos zum T³-Netzwerk mit Links zu Weiterbildungsangeboten und kostenfreien Unterrichtsmaterial finden Sie unter www.t3deutschland.de.

3D-Druck ist ein ressourcenschonendes, additives Fertigungsverfahren, für das eine Vielzahl an Technologien bereitsteht und weiterentwickelt werden kann. Für den Einsatz in weiterführenden Schulen eignet sich besonders das Schmelzschicht-Verfahren, bei dem ein thermoplastischer Kunststoff als Draht auf einer Rolle vorliegt, aufgeschmolzen und schichtweise aufgebracht wird.

Die 3D-Technologie bietet Bildungseinrichtungen vielfältige Möglichkeiten des Einsatzes – von der Beschäftigung mit den mathematisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen der Drucktechnologie über den Einsatz im Fachunterricht bis zu eigenständig von Schülerinnen und Schülern initiierten Projekt- und Forschungsarbeiten. So lassen sich vor allem in den Themenbereichen Mechanik, Wärmelehre und

Optik klassische Schülerexperimente mit 3D-gedruckten Untersuchungsgegenständen durchführen, wobei die dabei verwendeten Materialien z. T. auch von den Schülerinnen und Schülern selbst hergestellt werden können. Im Besonderen aber üben die Möglichkeiten der 3D-Drucktechnologie eine sehr starke Faszination auf junge Menschen aus – der Einsatz für Unterrichtszwecke unterstützt daher auch eine hohe Motivierung der Schülerinnen und Schüler. Daher eignet sich das Themenfeld über die Schul-Experimente hinaus auch hervorragend für die eigenständige Weiterarbeit der Schülerinnen und Schüler im Sinne von Differenzierungsarbeiten sowie forschenden Untersuchungsaufgaben im Rahmen von Projektwochen, aber auch etwa dem Entwerfen geeigneter Dämpfungskörper für Smartphones. Für das Experimentieren sollten dabei anstatt hochwertiger Smartphones z.B. Dummies von Smartphones verwendet werden oder Geräte, die über eine entsprechende Schutzertifizierung verfügen (z.B. manche Outdoor-Smartphones wie CAT S31 und höherwertige) – stoßfest nach US-MIL-810-G. Im Fachunterricht sind grundsätzlich zwei Anwendungsgebiete möglich:

- Der 3D-Drucker wird als Hilfsmittel eingesetzt, um bestehende Experimente zu verbessern oder zu erleichtern (Sensoradapter, Halterungen, Gehäuse für selbstgebaute Messgeräte).
- Die mit Hilfe von 3D-Drucktechnologie erstellbaren Objekte werden selbst untersucht (Materialeigenschaften)

Die hier vorliegenden Unterrichtsmaterialien für Schülerexperimente im Physikunterricht konzentrieren sich auf den *zweiten* Aspekt, die Untersuchung der 3D-gedruckten Objekte selbst. Dabei fokussieren die ersten beiden Experimente auf die Dämpfungseigenschaften flexibler 3D-Drucke. Das erste Experiment untersucht den Einfluss unterschiedlicher Dichte (Infill-Grade) auf das Dämpfungsverhalten des Körpers. Das zweite Experiment zielt auf die Beantwortung der Frage, ob und welche Unterschiede für einen Würfel mit 15 % Füllung beim Aufprall auf verschiedene Seitenflächen zu beobachten sind. Hier geht es demnach um die Auswirkungen der „Raumlage“ des Körpers in Bezug auf die Druckrichtung bei der Interaktionen mit dem Stoßobjekt.

Ideen für weiterführende Untersuchungsfragen zu einzelnen physikalischen Teilbereichen wären z.B.:

- Einfluss der Temperatur beim Druck auf Materialeigenschaften
- Würfel in einem Wärmebad auf höhere Temperatur bringen – Einfluss der Temperatur des Würfels auf die Dämpfungseigenschaften beim Kraftstoß
- Absorptionseigenschaften von Licht



Hinweis: Die Vorbereitungen für die beiden ersten Experimente sind sehr ähnlich, ebenso der Versuchsaufbau. Da die Lehrer- und Schülermaterialien als Kopiervorlage entwickelt wurden, werden diese Aspekte in den jeweiligen Lehrermaterialien eigenständig aufgeführt, damit die Verwendung im Unterricht leichter ist durch eine *jeweils* vollständige Anleitung.

Die teilweise damit einhergehende Dopplung der Texte und Informationen ist somit beabsichtigt.

Experiment 1: Wie beeinflusst der Füllgrad des gedruckten Objekts die Dämpfungseigenschaften?

In diesem Experiment werden unterschiedliche Würfel aus flexiblem Filament verwendet. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Infill-Rate, d.h. sie haben eine unterschiedliche Dichte und damit andere Dämpfungseigenschaften. Das Experiment zielt darauf ab, den Einfluss der Dichte des gedruckten Materials auf das Dämpfungsverhalten zu untersuchen und nach Möglichkeit (je nach Klassenstufe) zu modellieren. Das Stoßobjekt prallt dabei immer auf dieselbe Seite des gedruckten Würfels auf. Es wird ein Würfel mit 2 cm Kantenlänge eingesetzt, dessen Infill-Werte im Slicer-Programm auf die vorgeschlagenen Werte (5%, 15%, 30%) eingestellt werden. Die Darstellung der Füllstrukturen erfolgt in Abbildung 93 in den Lehrmaterialien auf S. 82.

Der Infill-Wert, der beim Erzeugen der 3D-Druckdatei („Slicen“) zwischen Null („Hohlkörper“) und Einhundert Prozent („Vollkörper“) gewählt werden kann, sollte zwischen 5% und 50% liegen. Werte kleiner 5% sind aufwändig zu drucken, weil für die obere Fläche kaum Stützmaterial in Form des Infill bereitsteht. Der Drucker muss dann den geschmolzenen Kunststoff-Faden so weit ziehen, bis wieder die Füllung oder eine Wand erreicht ist – diese „Briding“ genannte Funktion („Brückenbau“) ist gerade mit flexiblem Material kompliziert und führt nicht immer zu gut geschlossenen Flächen für die Oberseite des Würfels. Infill-Werte größer als 50% sind ebenfalls nicht unbedingt nötig, da ab diesem Wert nur noch eine marginale Dämpfung auftritt. Man kann z.B. mit 5%, 15% und 30% arbeiten, um eine gleichmäßige, schrittweise Erhöhung der Dichte zu erhalten.

Lehrmaterial 1: Kraftstoß und 3D-gedruckte Elastomere. Variation der Dichte

Einleitung

Thermoplastische Elastomere sind Kunststoffe, die unter Normalbedingungen flexibel sind, d.h. sich durch Krafteinwirkung reversibel verbiegen und verformen lassen - eliminiert man die einwirkende Kraft, gehen die Verformungen zurück und der Körper wieder in den Ausgangszustand. Bei hohen Temperaturen - mit diesem Kunststoff wird zwischen 190°C und 240°C gedruckt - bleiben die neuen Formen nach dem Auskühlen erhalten. So lassen sich z. B. Reifen oder Dämpfungskörper drucken. Für die folgenden Experimente werden Experimente mit Würfeln von 2 cm Kantenlänge durchgeführt.

Lernvoraussetzungen bei den Schülerinnen und Schülern

- Energieumwandlungen und -erhaltung (potentielle Energie, kinetische Energie; ggf bei Verwendung der schiefen Ebene: Rotationsenergie)
- Spannenergie (Dämpfung, elastische Verformung)
- Kraftstoß, Impulsänderung

Benötigtes Material	Digitale Messwerterfassung
▪ 3D-gedruckte Würfel mit 2 cm Kantenlänge aus flexiblem Filament (z.B. Renkforce Flex-Filament, Best. Nr. 1528331): Je ein Würfel mit 5 %, 15 % und 30 % Infill pro Schülergruppe) ▪ Stahlkugel 6 bis 8 mm auf schiefer Ebene mit mindestens 10 cm Höhendifferenz oder im freien Fall (z. B. ausgelöst durch Abschalten eines Elektromagneten), ebenfalls mindestens 10 cm Höhendifferenz. Möglichst Auslösung ohne Berührung (z.B. mit Elektromagnet)	▪ Kraftmesser mit +/- 50N: Vernier DF-BTA für die Messung mit grafikfähigen Taschenrechnern ▪ Datenlogger: TI Nspire mit Lab Cradle

Versuchsaufbau

Der Kraftsensor hat einen abschraubbaren Haken für die Aufnahme der Kräfte - dieser muss entfernt werden und der metallische 4 bzw. 6-Kant so positioniert werden, dass der Dämpfungskörper mittig auf der Aufnahme sitzt und die Kugel ebenfalls mittig auf das Testobjekt prallt - entweder im freien Fall oder rollend von einer schiefen Ebene aus.

Die 3D-gedruckten Messobjekte werden zwischen dem 6-Kant und der aufprallenden Kugel platziert. Sie sollten leicht zwischen schiefer Ebene und Sensor verklemt oder kippstabil auf dem Sensor mittig platziert werden. Wenn Sie die Kugel im freien Fall auf den Würfel aufprallen lassen, können Sie diesen auch mit einem kurzen Plastikrohr als Führung für die Kugel leicht auf dem Sensor festklemmen.



Abbildung 90: Foto des Kraftsensors ohne Haken – 6-Kant der Kraftaufnahme (2 unterschiedliche Bauformen)

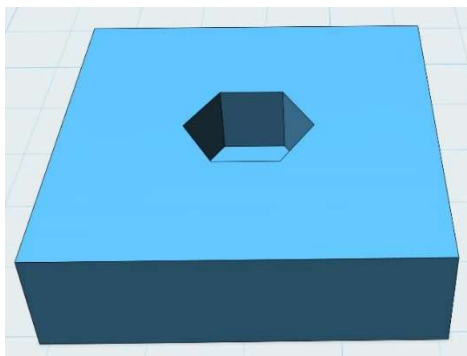


Abbildung 91: Aufnahme der flexiblen Würfel für Fallversuche; Montagevorschlag auf dem Sensor



Abbildung 92: Vorschlag zum Versuchsaufbau:
a) Konstruktion mit fischertechnik, b) Aufbau mit Stativmaterial

Der Sensor zeigt dann z.B. 2 N an und wird vor Start der Messwerterfassung auf Null zurückgesetzt. Als Halterung für die Fallversuche kann auch folgende Konstruktion aus normalem, nicht-flexiblem PLA-Filament verwendet werden.

Bauen Sie den Versuch so auf, dass der Sensor auf dem Tisch aufliegt. Eine freie Befestigung des Sensors am Stativmaterial führt zu deutlichen Schwingungen beim Aufprall der Kugel (Schwingungen des gesamten Versuchsaufbaus bzw. des Mess-Systems). Es ist nicht immer leicht, Kugel, Versuchsobjekt und Sensor zentriert übereinander zu positionieren. Sie können eine Wasserwaage oder ein Plastikrohr zum Verlegen von Elektroleitungen verwenden, um die Positionierung genauer zu realisieren.

Versuchsdurchführung

In diesem Experiment werden drei Würfel pro Schülergruppe benötigt, die aus flexiblem Filament mit unterschiedlichen Infill-Raten (unterschiedlicher Dichte) gedruckt wurden – vorgeschlagen werden 5%, 15% und 30% Infill. Bei diesem Experiment ist wichtig, dass die Kollision immer auf dieselbe Seitenfläche erfolgt. Die Orientierung kann anhand der Unterseite leicht festgelegt werden, da dort das Füllmuster besonders gut zu erkennen ist. Der Würfel wird in dem Experiment so platziert, dass die Unterseite immer zur selben Seite zeigt. Die Unterseite darf in diesem Experiment nicht zum Sensor oder der fallenden Kugel zeigen.

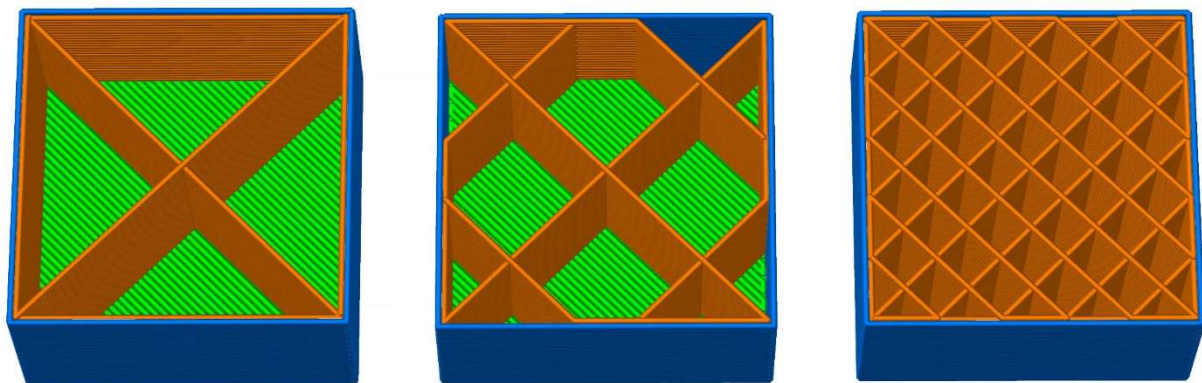


Abbildung 93: Drei Infill-Raten im Vergleich: 5%, 15% und 30%

Der Körper wird durch den 3D-Drucker schichtweise erzeugt und daher liegen die Füllmuster der einzelnen Ebenen übereinander. Bei geringem Füllgrad werden sie auch abwechselnd im Zick-Zack-Muster übereinander angeordnet. Bei höheren Infill-Werten steigt die Vernetzung der Füllstruktur an und die Flexibilität des Gesamtkörpers nimmt ab. Diesen qualitativen Zusammenhang können Schülerinnen und Schüler selbst experimentell herleiten und in höheren Jahrgängen auch quantitativ beschreiben bzw. mathematisch modellieren.

a) Einstellung zur Messwerterfassung

Damit der Würfel stabil auf dem Sensor platziert wird, ist es sinnvoll, ihn leicht seitlich oder durch ein Plastikrohr, das die fallende Kugel auf den Sensor ausrichtet, einzuklemmen. Dies muss zwischen den Läufen mit möglichst gleicher Kraftwirkung erfolgen, z.B. 2 N (vgl. auch Abbildung 2 b). Dazu setzen Sie zunächst den Sensor auf Null, damit zwischen allen Versuchen der Würfel mit gleicher Kraft festgeklammert wird. Vor der eigentlichen Messung muss dann der Sensor noch einmal zurückgesetzt werden, damit nur der Kraftstoß selbst erfasst wird.

Für die Erfassung selbst ist es sinnvoll, eine Triggerung einzusetzen, die die Messwernerfassung startet, wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht wird. Damit auch die Messwerte unmittelbar vor dem Ereignis - hier Auftreffen der Kugel auf den Würfel - ausgewertet werden können, lassen sich in einem Ringspeicher 20% der Messdaten vor dem Ereignis festhalten.

Vor der Messung soll der Sensorwert auf Null gesetzt werden, damit eine bessere Vergleichbarkeit der Messreihen gewährleistet ist. Bitte beachten Sie, dass die Nullstellung des Sensors die in der momentan aktuellen Firmware gesetzten Trigger-Einstellungen verändert. Bitte nutzen Sie daher folgende Reihenfolge für die Einstellung der Messparameter.

1. Sensor auf Null
2. ggf. Testobjekt einklemmen (etwa 2 N)
3. Sensor auf Null
4. Samplerate und Triggerung einstellen

Stellen Sie nun die Messwernerfassung am TI Nspire auf folgende Parameter ein.

- 5000 Samples/s (ignorieren Sie die Warnung)
- Messzeit 0,2 Sekunden
- Trigger wenn fallend unter 0,1 N (Druck auf Sensor = negative Kraftrichtung)
- 20% Daten vorab

b) Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

Je nach Klassenstufe können Sie diese Messreihe qualitativ oder quantitativ auswerten lassen.

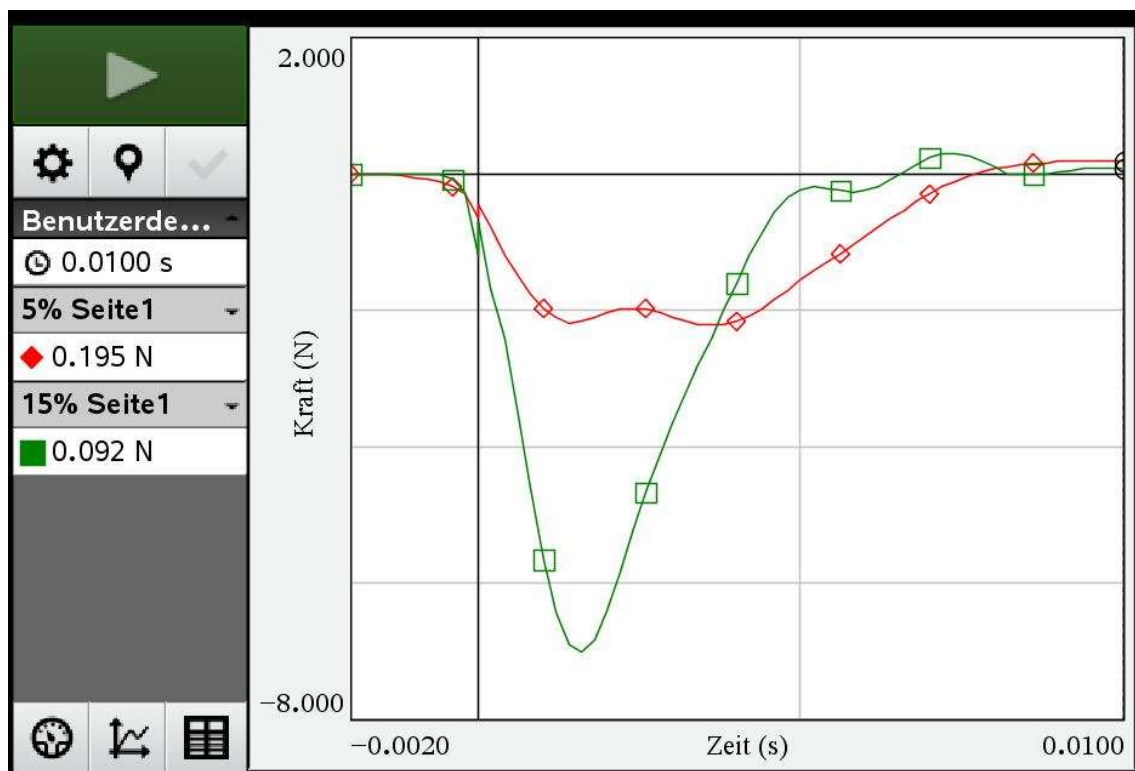


Abbildung 94: Seitenaufprall bei 5% vs 15% Infill - für eine qualitative Auswertung

Die Abbildung zeigt sehr deutlich, dass der Würfel mit 5% Infill den Kraftstoß deutlich verzögert und weniger intensiv weiterleitet.

Musterlösung für eine quantitative Auswertung:

Für eine quantitative Auswertung werden die Messwerte der Experimente, die mit Hilfe der digitalen Messwerterfassung aufgezeichnet wurden, für die Berechnung des Impulses herangezogen.

Dazu werden in der Auswertungssoftware die Ausschnitte so gewählt, dass der erste Ausschlag der Kollision vollständig zu sehen ist. Anschließend wird der Kurvenverlauf zwischen den beiden Nullstellen markiert und als Auswertung für diesen Bereich die Berechnung der Integrale angefordert:

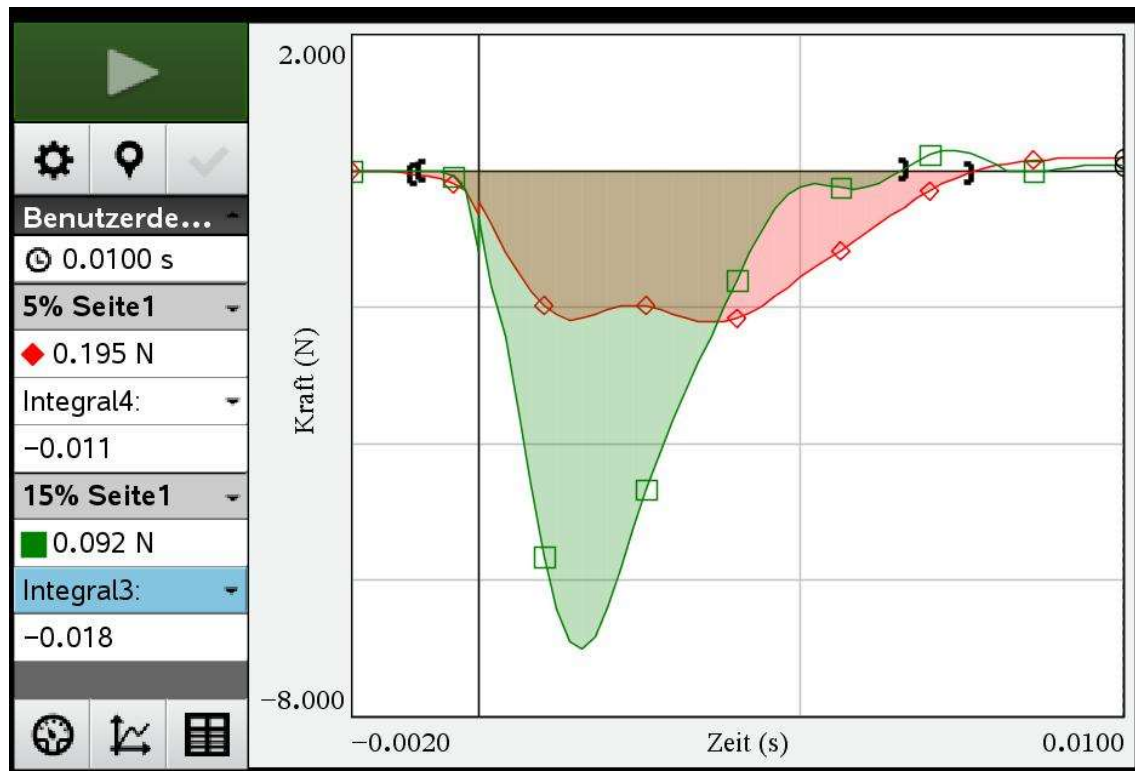


Abbildung 95: Seitenaufprall bei 5% vs 15% Infill - Integralbildung für eine quantitative Auswertung

Dies erfolgt für beide Versuche, so dass sich die Integrale vergleichen lassen. Als Evaluation der Messaufnahme ist es sinnvoll, eine Kollision ohne Testkörper durchzuführen und auch hier das Integral entsprechend berechnen zu lassen. Beim Vergleich der Fallhöhe muss die Höhe des Würfels (2cm) berücksichtigt werden – die Fallstrecke ist entsprechend länger, wenn der direkte Aufprall auf den Sensor untersucht wird (ohne Testkörper). Mit dieser Grundlage können die empirisch und theoretisch ermittelten Impulse verglichen werden – sie müssen zwischen einem voll elastischen und unelastischen Stoß liegen:

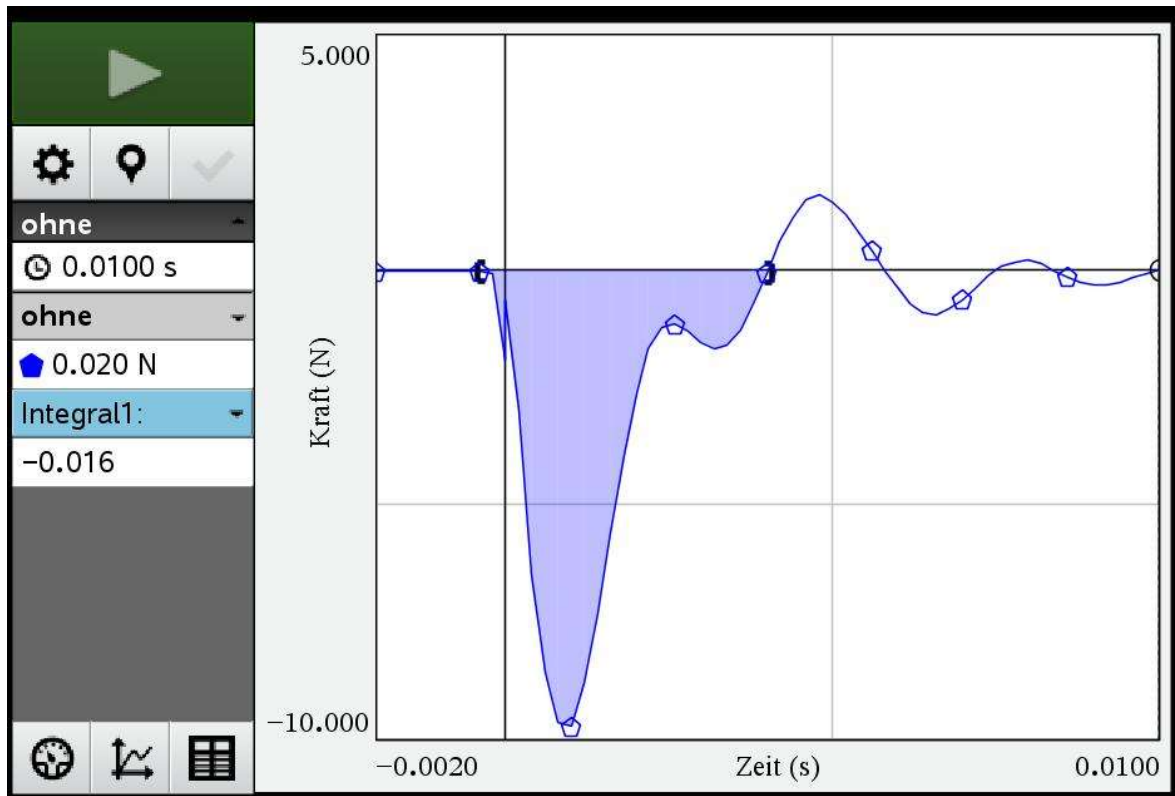


Abbildung 96: direkter Aufprall auf den Sensor – Integralbildung für eine quantitative Auswertung

Aus den bekannten Größen wie Fallhöhe und Erdbeschleunigung kann zunächst die Geschwindigkeit beim Aufprall berechnet werden, die mit dem Gewicht der Kugel schließlich den Impuls beim Aufschlag ergibt. Die Impulsänderung bei einem vollständig elastischen bzw. vollständig unelastischen Stoß lässt sich damit bestimmen und mit den empirisch ermittelten Werten vergleichen:

	ohne Würfel	mit Würfel
gegeben	- Fallhöhe (h) ohne Würfel als Testkörper: $h = 0,101\text{m}$ - Masse der Kugel $m=0.0082\text{kg}$	- Fallhöhe (h) mit Würfel als Testkörper: $h = 0,081\text{m}$ - Masse der Kugel $m=0.0082\text{kg}$
Geschwindigkeit beim Aufprall v_0	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,101\text{m}}$ $\approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,081\text{m}}$ $\approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Impuls beim Aufprall	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082 \text{kg}$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082 \text{kg}$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Impulsänderung bei:		
vollständig <i>elastischen</i> Stoß	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.023082 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.020671 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
vollständig <i>unelastischen</i> Stoß	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
experimentell ermittelt	$\Delta p_{\text{exper}} \approx 0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	5% Seitenaufprall $\Delta p_{\text{exper}_5\%} \approx 0.011 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ 15% Seitenaufprall $\Delta p_{\text{exper}_15\%} \approx 0.018 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Bewertung	Impuls beim Aufprall liegt näher am vollständig unelastischen Stoß. Wenn man unelastischen Stoß mit 0% und elastischen mit 100% ansetzt, liegt der Aufprall direkt auf den Sensor bei 38,6%. Eigentlich wäre ein höherer Wert zu erwarten; möglicherweise spricht der Sensor nicht schnell genug an.	Impuls beim Aufprall liegt bei 5% Infill sehr nah am vollständig unelastischen Stoß, bei 15% Infill hingegen sehr nah am vollständig elastischen Stoß. Wenn man unelastischen Stoß mit 0% und elastischen mit 100% ansetzt, liegt der Aufprall mit 5% Infill bei 6,4% und mit 15% Infill bei 74%. Bei höherer Dichte wird die fallende Kugel eher „reflektiert“ – die Werte entsprechen den Erwartungen.

Ideen und Vorschläge zur Diskussion der Messergebnisse

Bei der Interaktion trifft die Kugel auf die Ober/Seitenfläche des mit flexiblem Filament gedruckten Würfels. Diese Fläche wird durch den Kraftstoß verformt, sie nimmt Fallenergie durch reversible Verformung auf. Der Kraftstoß, der an den Sensor weitergeleitet wird, ist um diesen Betrag geringer. Bei sehr weichem Material reichen bereits geringere Kräfte für die Verformung aus – dies ist hier der Fall bei dem Aufprall auf die Seite bei einem vergleichsweise niedrigen Infill-Wert. Je höher der Füllgrad gewählt wird, desto engmaschiger wird die innere Struktur des Testobjekts – und entsprechend sinken die Dämpfungseigenschaften.

Lassen Sie Ihre Schülerinnen und Schüler diskutieren, welche konkreten physikalischen Prozesse beim Aufprall der Kugel ablaufen und wie die gedämpfte Schwingung nach dem ersten großen Ausschlag zu interpretieren ist.

Sie können Ihre Schülerinnen und Schüler auch anregen, *eigene Forschungsfragen zu entwickeln*, d. h. zu überlegen, was noch verändert werden könnte und welche weiteren Abhängigkeiten und Zusammenhänge noch interessant zu entdecken wären. Beispielsweise lassen sich in den Slicer-Programmen auch andere Füllmuster wählen (Wabenstrukturen; 3D-Strukturen, d.h. sich schichtweise ändernde Füllmuster), deren Einfluss auf die Dämpfung ebenfalls vermessen werden kann (vgl. Abb. 97 mit 15 % Infill, Variation der Füllmuster).

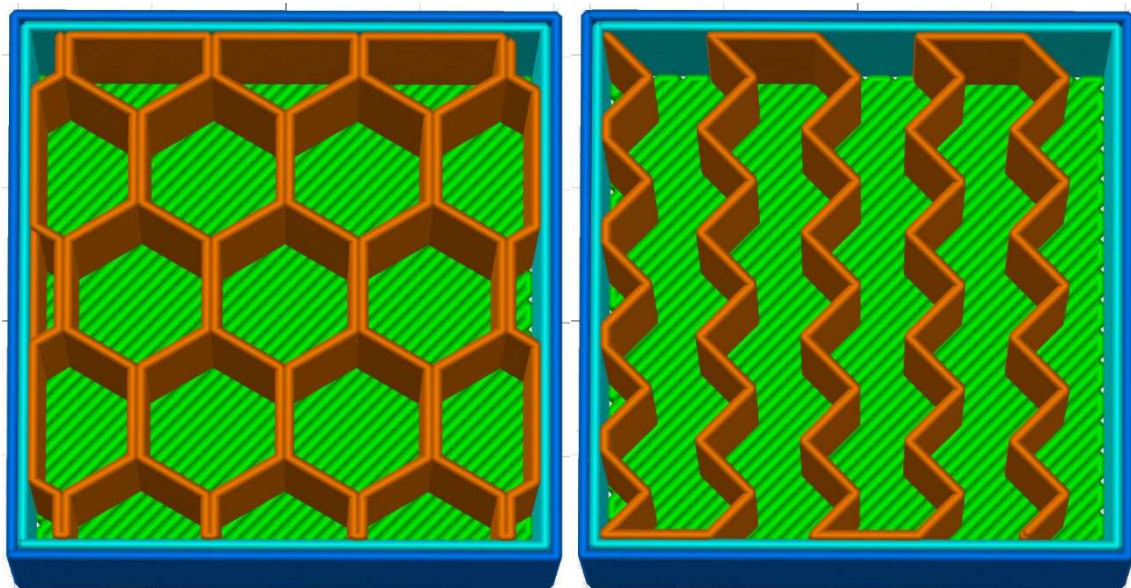


Abbildung 97: Infill-Muster mit 15% im Vergleich (Wabe und Zickzack). Vorschlag für weitere Messreihen

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit **unterschiedlicher Auflösung in z-Achse** (Druckqualität) zu arbeiten – vergleichen Sie dann z.B. 0,1 mm gegen 0,2 mm oder 0,25 mm Druckhöhe pro Schicht. Diese Werte können Sie ebenfalls im Slicer einstellen und Ihren Schülerinnen und Schülern entsprechende Testobjekte zur Verfügung stellen – oder sie von den Schülern selbst drucken lassen.

Anhang: Herstellung der Versuchsobjekte (Würfel mit flexiblem Filament)

Fertige Druckdateien für die 3D-Drucker der Marke Renkforce haben Sie als gezippte Datei mit diesem PDF erhalten. Drucken Sie mit flexiblem Filament besonders langsam und mit nur 10 bis 15 mm/s und verwenden Sie Temperaturen von 205-230°C für die Extrusion(Schmelzdüse).

Wenn Sie eigene Objekte mit flexiblem Filament drucken möchten, können Sie die wichtigsten Einstellungen dem folgenden Screenshot der Slicer-Software Cura entnehmen (vgl. Abb. 9).

- Stellen Sie im **Bereich Gehäuse** die oberen und unteren Schichten auf 4 oder 5.
- Im **Bereich Füllung** können sie die gewünschten Infill-Raten eintragen. Wählen Sie hier zunächst 15 % und als Muster ein einfaches Gitter - in späteren eigenen Versuchsreihen können z. B. auch unterschiedliche Füllgeometrien mit gleichem Füllgrad verglichen werden.
- Die **Drucktemperatur** sollte zwischen 205 und 230°C betragen und die **Geschwindigkeit** maximal 15 mm/s, für die erste Schicht lediglich 10 mm/s und für die restlichen obersten und untersten Schichten 5 mm/s.

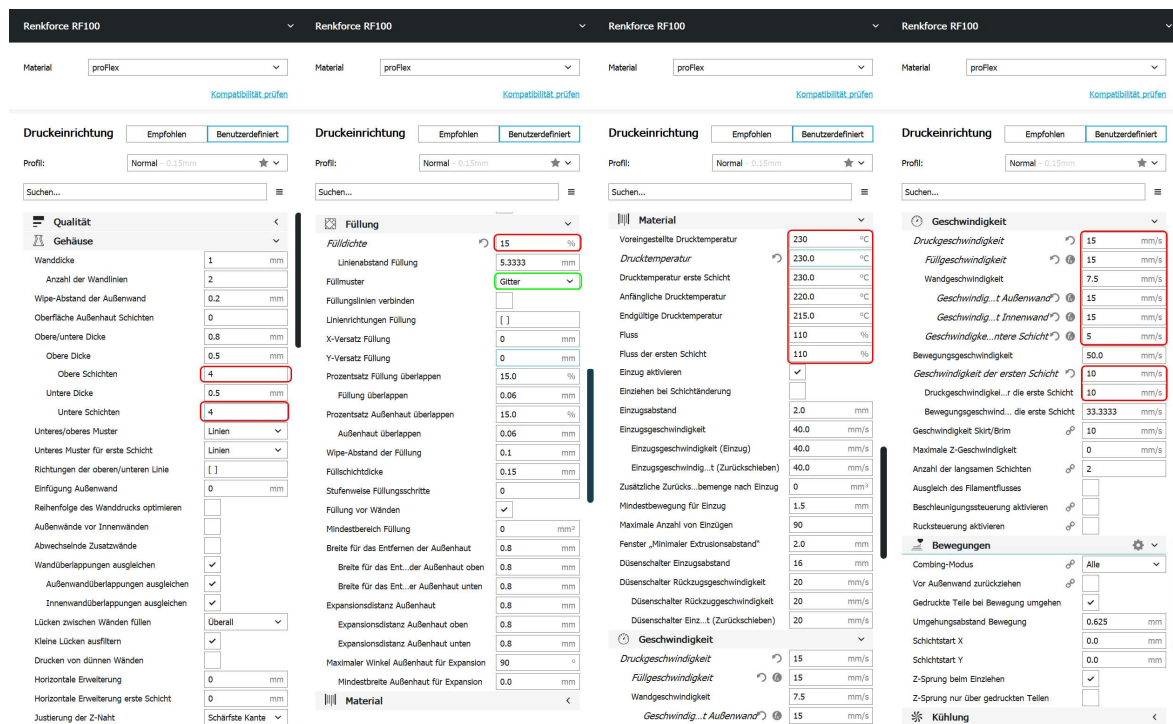


Abbildung 98: Einstellungen für den Druck mit flexiblem Filament (Screenshot Cura)

Schülerarbeitsblatt Experiment 1: Einfluss der Dichte auf die Dämpfungseigenschaften

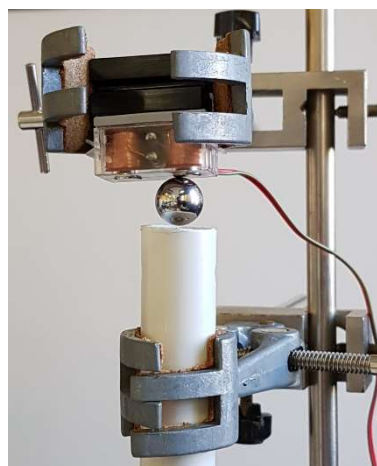
In diesem Experiment untersucht ihr die Dämpfungseigenschaften von 3D-gedruckten Körpern. Sie werden schichtweise aus einem thermoplastischen, d.h. durch Erhitzen dauerhaft verformbaren Kunststoff hergestellt. Ähnlich einer Heißklebepistole besitzt ein 3D-Drucker eine Heizdüse, durch die der Kunststoff in Form eines dünnen Drahtes („Filament“) geschoben wird. Der Vorschub des Materials, die Position und Wege der Düse sowie der Beginn einer neuen Lage erfolgen computergesteuert. Neben den nach dem Erkalten wieder starren Filamenten können auch flexible eingesetzt werden (Elastomere), die durch Erhitzen und 3D-Druck in eine Form gebracht werden, anschließend aber weiterhin flexibel sind.

Versuchsaufbau

Baut den Versuch nach dem Bild rechts auf.

Achtet darauf, den 3D-gedruckten Würfel nur leicht einzuklemmen - seitlich oder durch ein Rohr, durch das die Kugel mittig auf den Sensor fällt.

Der Würfel muss immer mit derselben Kraftwirkung eingeklemmt werden!



Messwerterfassung

- Sensor – Nullstellung
- 5000 Samples/s (Warnung ignorieren)
- Messzeit 0.2 Sekunden
- Trigger wenn fallend unter 0,1 N (Druck auf Sensor = negative Krafrichtung)
- 20% Daten vorab

Durchführung

Der Kraftstoß auf den Würfel wird mit einer Stahlkugel von 6 bis 8 mm Durchmesser ausgeführt – entweder über eine schiefe Ebene oder im freien Fall.

- a) Die Kugel rollt die schiefe Ebene hinunter und prallt gegen den 3D-gedruckten Körper. Achtet darauf, dass die Kugel immer von derselben Position aus gestartet wird (nur loslassen, kein „Anschubsen“).
- b) Die Kugel fällt frei auf den 3D-gedruckten Körper und wird immer aus derselben Höhe ausgeklinkt, z.B. mit Hilfe eines Elektromagneten.

Es werden Würfel mit unterschiedlicher Dichte (Infill-Werte von 5 %, 15 %, 30 %) vermessen. Zunächst beginnt ihr mit dem Würfel mit 5% und wiederholt das Experiment mit schrittweise erhöhten Infill-Werten. Bitte achtet darauf, dass die Würfel so platziert sind, dass Sensor und Kugel auf die Seitenflächen weisen. Der Boden des Würfels (und auch die Infill-Dichte) sind gut zu erkennen, da hier der Druck am gleichmäßigsten ist. Alle Experimente müssen mit derselben Raumlage des Würfels vermessen werden – der Boden muss in diesem Experiment zur Seite zeigen.

Auswertung

Beschreibe die Graphen, die beim Aufprall der Metallkugel auf die drei Würfel mit verschiedenen Infills entstehen. Erkläre, was in den Diagrammen dargestellt wird.

Findest du Unterschiede zwischen den einzelnen Graphen? Welche Erklärung hast du für diese Unterschiede?



Tipp: Du kannst die Graphen „übereinanderlegen“, d. h. die Messwerte verschiedener „Runs“ in einem einzigen Diagramm darstellen.

Berechne (mit Hilfe der Datenlogger-Software) die Integrale der *Kraftwirkung der drei Stöße*, vergleiche die Ergebnisse und beschreibe die Kraftstöße auch in mathematischer Form.

Experiment 2: Kraftstoß und Dämpfungseigenschaften elastischer Körper in Abhängigkeit von der Raumlage

Zu Beginn werden Grundlagen der Physik aus dem Teilbereich Mechanik vermittelt. Das beinhaltet die Analyse und Beschreibung von Bewegungen und von Kräften und ihren Einfluss auf Bewegungsänderungen sowie auf grundlegende Gesetzmäßigkeiten wie Energie- und Impulserhaltung und Gravitation. Mit diesem Themenfeld werden zentrale Konzepte und Sichtweisen für das Verstehen der Physik vermittelt - und daher sind diese Lerninhalte obligatorisch in vielen Curricula der gymnasialen Oberstufe.

Mit dem hier aufgeführten Themenbereich Kraftstoß und Dämpfung werden Anreize für Experimentier- und Mess-Reihen gegeben, die Schülerinnen und Schüler selbständig konzipieren und erweitern können.

Das folgende Experiment ist als Schülerexperiment für eine Unterrichtseinheit von 120 Minuten entworfen. Die verwendeten 3D-Drucke benötigen pro Schülergruppe etwa 2 bis 3 Stunden Zeit für den Druck (mind. 3 Würfel mit unterschiedlichen Füllraten oder Strukturen; je Würfel ca. 1,5 h Druckzeit). Die benötigten Druckdateien haben Sie als gezippte Datei mit diesem PDF erhalten.

Sie können die Würfel auch selbst herstellen, indem Sie mit einem beliebigen 3D-Konstruktionsprogramm einen Würfel mit der Kantenlänge von 2 cm erstellen, als STL-Datei exportieren und anschließend für ihren Drucker aufbereiten (slicen). Im Kapitel 3 finden Sie Hinweise zur Erstellung von 3D-Körpern und der Aufbereitung für den 3D-Druck.

Lehrermaterial 2: Kraftstoß und 3D-gedruckte Elastomere. Einfluss der Raumlage

Einleitung

Thermoplastische Elastomere sind Kunststoffe, die unter Normalbedingungen flexibel sind, d. h. sich durch Krafteinwirkung reversibel verbiegen und verformen lassen. Wenn man also die einwirkende Kraft eliminiert, gehen die Verformungen zurück und der Körper nimmt wieder in den Ausgangszustand an.

Bei hohen Temperaturen - mit diesem Kunststoff wird zwischen 190°C und 240°C gedruckt - bleiben die neuen Formen erhalten beim Auskühlen. So lassen sich z.B. Reifen oder Dämpfungskörper drucken. Für die folgenden Experimente werden der Einfachheit halber Experimente mit Würfeln von 2cm Kantenlänge durchgeführt.

Lernvoraussetzungen bei den Schülerinnen und Schülern

- Energieumwandlungen und -erhaltung (potentielle Energie, kinetische Energie; ggf. bei Verwendung der schiefen Ebene: Rotationsenergie)
- Spannenergie (Dämpfung, elastische Verformung)
- Kraftstoß, Impulsänderung

Benötigtes Material	Digitale Messwerterfassung
▪ 3D-gedruckte Würfel mit 2 cm Kantenlänge aus flexiblem Filament (z.B. Renkforce Flex-Filament, Best. Nr. 1528331): Je ein Würfel mit 5 %, 15 % und 30 % Infill pro Schülergruppe ▪ Stahlkugel 6 bis 8 mm auf schiefer Ebene mit mindestens 10 cm Höhendifferenz oder im freien Fall (z. B. ausgelöst durch Abschalten eines Elektromagneten), ebenfalls mindestens 10 cm Höhendifferenz. Möglichst Auslösung ohne Berührung (z.B. mit Elektromagnet)	▪ Kraftmesser mit +/- 50N: Vernier DF-BTA für die Messung mit grafikfähigen Taschenrechnern ▪ Datenlogger: TI Nspire mit Lab Cradle

Versuchsaufbau

Der Kraftsensor hat einen abschraubbaren Haken für die Aufnahme der Kräfte - dieser muss entfernt werden und der metallische 6-Kant so positioniert werden, dass der Dämpfungskörper mittig auf der Aufnahme sitzt und die Kugel ebenfalls mittig auf das Testobjekt prallt - entweder im freien Fall oder rollend von einer schiefen Ebene aus.



Abbildung 99: Foto des Kraftsensors ohne Haken – 6-Kant der Kraftaufnahme (2 unterschiedliche Bauformen)

Für eine optimale Platzierung von Sensor, Messobjekt und Aufprallkörper kann man ein Leer-Rohr für Elektroinstallationen verwenden, das einen deutlich größeren Innendurchmesser hat. Sensor und Fallrohr werden mit Stativbefestigungen am Tisch montiert:

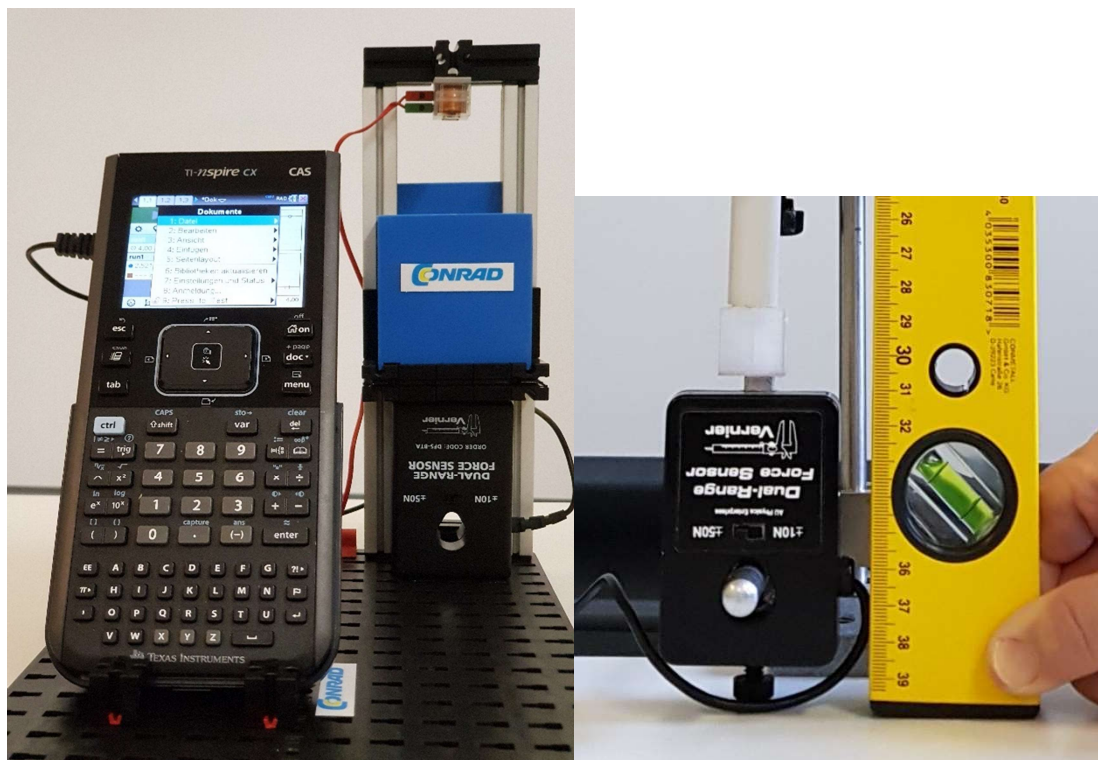


Abbildung 100: Vorschlag zum Versuchsaufbau:
a) Konstruktion mit fischertechnik, b) Aufbau mit Stativmaterial

Falls Sie eine schiefe Ebene verwenden möchten, können Sie ein U-Profil aus Aluminium nutzen, damit die Kugel nicht seitlich abdriften kann.

Bauen Sie den Versuch so auf, dass der Sensor auf dem Tisch aufliegt. Eine freie Befestigung des Sensors am Stativmaterial führt zu deutlichen Schwingungen beim Aufprall der Kugel (Schwingungen des gesamten Versuchsaufbaus bzw. des Mess-Systems). Es ist nicht immer leicht, Kugel, Versuchsobjekt und Sensor zentriert übereinander zu positionieren. Sie können eine Wasserwaage oder ein Plastikrohr zum Verlegen von Elektroleitungen verwenden, um die Positionierung genauer zu realisieren.

Die 3D-gedruckten Messobjekte werden zwischen dem 6-Kant und der aufprallenden Kugel platziert. Sie sollten leicht zwischen schiefer Ebene und Sensor verklemmt oder kippstabil auf dem Sensor mittig platziert werden. Wenn Sie die Kugel im freien Fall auf den Würfel aufprallen lassen, können Sie diesen auch mit einem kurzen Plastikrohr als Führung für die Kugel leicht auf dem Sensor festklemmen. Der Sensor zeigt dann z.B. 2 N an und wird vor Start der Messwerterfassung auf Null zurückgesetzt. Eine Erweiterungsmöglichkeit besteht darin, eine Halterung für die flexiblen Würfel zu entwerfen, die direkt auf den 6-Kant des Sensors aufgesteckt wird und aus (starrem) PLA-Filament mit hoher Füllrate (>50%) gedruckt wird. So wird die Interaktionsfläche zwischen Sensor und Messobjekt vergrößert, was zu einer geringeren Dämpfung führen kann. Weiterhin könnte der Trägheitseffekt dieses Adapters mit modelliert werden.

Versuchsdurchführung: Einfluss der Raumlage des gedruckten Objekts auf die Dämpfungseigenschaften

In diesem Experiment wird pro Schülergruppe ein Würfel mit geringer Infill-Rate (Dichte) – vorgeschlagen werden 15% Infill – verwendet. Hier wird der Einfluss der räumlichen Lage des Dämpfungskörpers untersucht – der Würfel hat insgesamt betrachtet eine Füllrate von 15%, aber das flexible Filament als Füllung ist nicht notwendigerweise gleichmäßig in alle Raumrichtungen verteilt (vgl. Abb. 101).

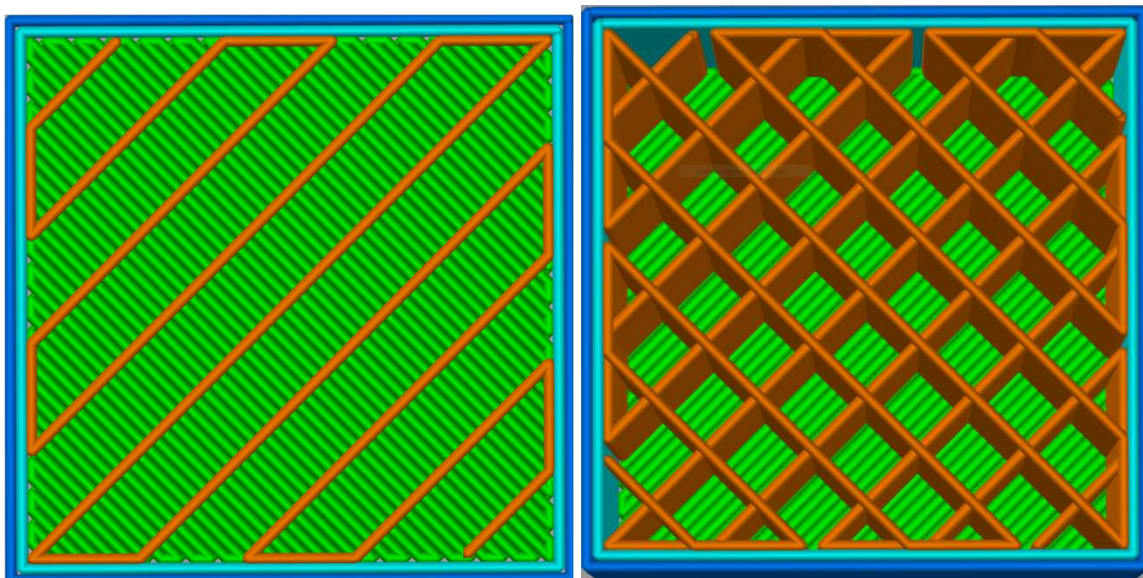


Abbildung 101: a) Beginn des Drucks; 1. Ebene mit Füllung
b) Füllung eines Würfels mit 2cm Kantenlänge; Blick von schräg oben

Der Körper wird durch den 3D-Drucker schichtweise erzeugt und daher liegen die Füllmuster der einzelnen Ebenen übereinander – es gibt auch die Möglichkeit im Slicer, 3D-Füllmuster einzustellen, deren Struktur sich während des Schichtaufbaus entlang der z-Achse ändert. Diese Einstellungen sind für die Experimente hier ungeeignet, können aber als Ergänzung hinzugezogen werden.

Bei geringem Füllgrad werden die (flächigen) Füllmuster in der Regel abwechselnd im Zick-Zack-Muster übereinander angeordnet. Daher ergibt sich für den Schnitt parallel zur xy-Ebene eine andere Anordnung des flexiblen Filaments im Körper als bei einem ebenen Schnitt parallel zur z-Achse. Diese geometrischen Unterschiede werden auf ihre Dämpfungseigenschaften in diesem Experiment untersucht. Daher werden für die Schülerexperimente hier auch nur identische Würfel mit einem einheitlichen Füllgrad verwendet.

a) Einstellung zur Messwerterfassung

Wenn Sie eine schiefe Ebene verwenden, um die rollende Kugel auf das Messobjekt prallen zu lassen, ist es sinnvoll, den zu untersuchenden Würfel leicht zwischen Sensoraufnahme und Ebene einzuklemmen. Dies muss zwischen den Läufen mit möglichst gleicher Kraftwirkung erfolgen, z. B. 2 N. Dazu setzen Sie zunächst den Sensor auf Null, damit zwischen allen Versuchen der Würfel mit gleicher Kraft festgeklemmt wird. Vor der eigentlichen Messung muss dann der Sensor noch einmal zurückgesetzt werden, damit nur der Kraftstoß selbst erfasst wird.

Für die Erfassung selbst ist es sinnvoll, eine Triggerung einzusetzen, die die Messwerterfassung startet, wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht wird. Damit auch die Messwerte unmittelbar vor dem Ereignis – hier Auftreffen der Kugel auf den Würfel – ausgewertet werden können, lassen sich in einem Ringspeicher 20% der Messdaten vor dem Ereignis festhalten.

Vor der Messung soll der Sensorwert auf Null gesetzt werden, damit eine bessere Vergleichbarkeit der Messreihen gewährleistet ist. Bitte beachten Sie, dass die Nullstellung des Sensors die in der Software gesetzten Trigger-Einstellungen verändert. Bitte nutzen Sie daher folgende Reihenfolge für die Einstellung der Messparameter.

1. Sensor auf Null
2. ggf. Testobjekt einklemmen (etwa 2 N)
3. Sensor auf Null
4. Samplerate und Triggerung einstellen

Stellen Sie nun die Messwerterfassung am TI Nspire auf folgende Parameter ein.

- 5000 Samples/s (ignorieren Sie die Warnung)
- Messzeit 0,2 Sekunden
- Trigger wenn fallend unter 0,1 N (Druck auf Sensor = negative Krafrichtung)
- 20% Daten vorab

b) Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

Je nach Klassenstufe können Sie diese Messreihe qualitativ oder quantitativ auswerten lassen. Gemessen wurde der Kraftstoß auf einen 3D-gedruckten Körper, bei dem der ebenenweise Schichtaufbau die z-Achse darstellt. Hier liegen die Füllstrukturen übereinander und ergeben damit eine andere räumliche Verteilung des verwendeten Elastomers als bei einem seitlichen Aufprall. Diese Unterschiede sind in den Abbildungen 102 und 103 dargestellt.

Eine qualitative Auswertung kann die Einschätzung der Auswirkung der räumlichen Ausrichtung beinhalten, während eine quantitative Auswertung für die höheren Klassenstufen in der gymnasialen Oberstufe die jeweiligen Messwerte numerisch mit einbezieht und z. B. durch Integralbildung den Einfluss der räumlichen Lage beschreibt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Einfluss der räumlichen Lage – im ersten Fall erfolgt die Kollision auf die Seite des Würfels (geringere Dichte der Füllstruktur in dieser Richtung), im zweiten Fall auf die Oberseite, d.h. parallel zum Druckverfahren. Legt man die beiden Kurven übereinander, zeigt sich die geringere Dämpfungswirkung beim Aufprall parallel zu den Druck-Ebenen:

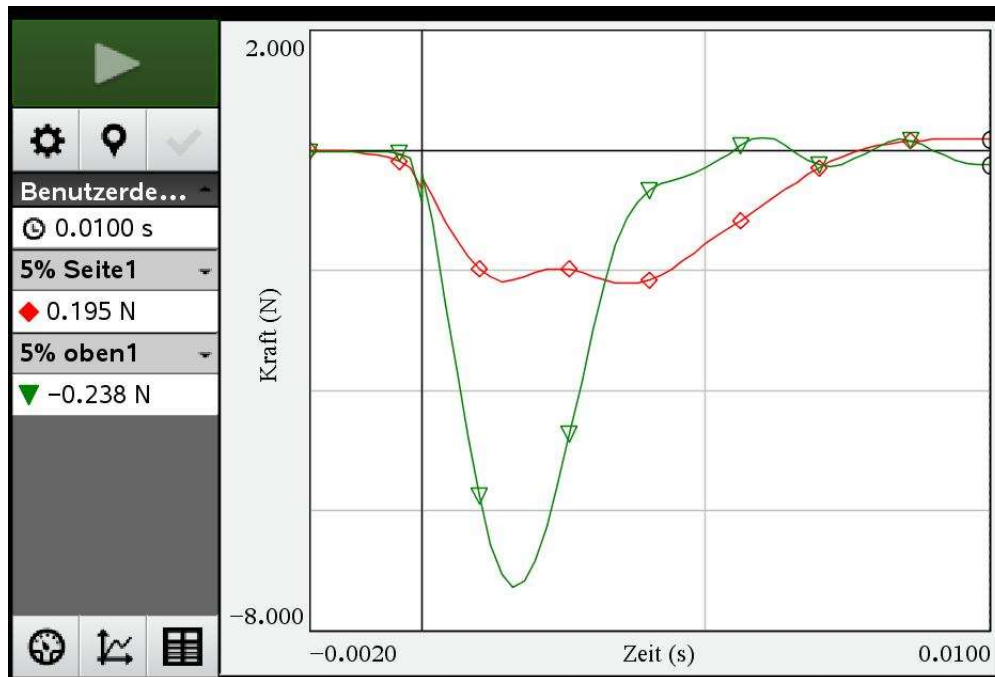


Abbildung 102: Vergleich der Kollisionen: grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 5% Infill

Für die Auswertung sollte nur der erste Ausschlag verwendet werden – hier ist der Ausschnitt bereits entsprechend gewählt. Erhöht man den Infill auf 15%, wird der Einfluss der Raumlage auf die Dämpfung geringer:

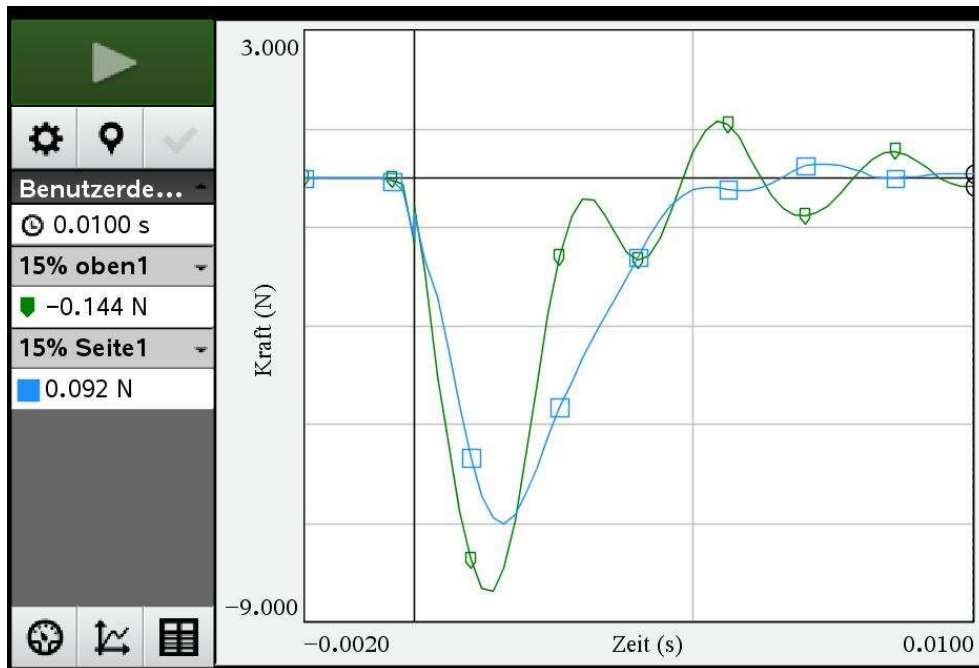


Abbildung 103: Vergleich der Kollisionen: grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 15% Infill

Musterlösung für eine quantitative Auswertung:

Wie schon im ersten Experiment werden für eine quantitative Auswertung die Messwerte der Experimente, die mit Hilfe der digitalen Messwerterfassung aufgezeichnet wurden, für die Berechnung des Impulses herangezogen.

Dazu werden in der Auswertungssoftware die Ausschnitte so gewählt, dass der erste Ausschlag der Kollision vollständig zu sehen ist. Anschließend wird der Kurvenverlauf zwischen den beiden Nullstellen markiert und als Auswertung für diesen Bereich die Berechnung der Integrale angefordert:

Dies erfolgt für beide Versuche, so dass sich die Integrale vergleichen lassen. Als Evaluation der Messaufnahme ist es sinnvoll, eine Kollision ohne Testkörper durchzuführen und auch hier das Integral entsprechend berechnen zu lassen. Beim Vergleich der Fallhöhe muss die Höhe des Würfels (2cm) berücksichtigt werden - die Fallstrecke ist entsprechend länger, wenn der direkte Aufprall auf den Sensor untersucht wird (ohne Testkörper). Mit dieser Grundlage können die empirisch und theoretisch ermittelten Impulse verglichen werden - sie müssen zwischen einem voll elastischen und unelastischen Stoß liegen:

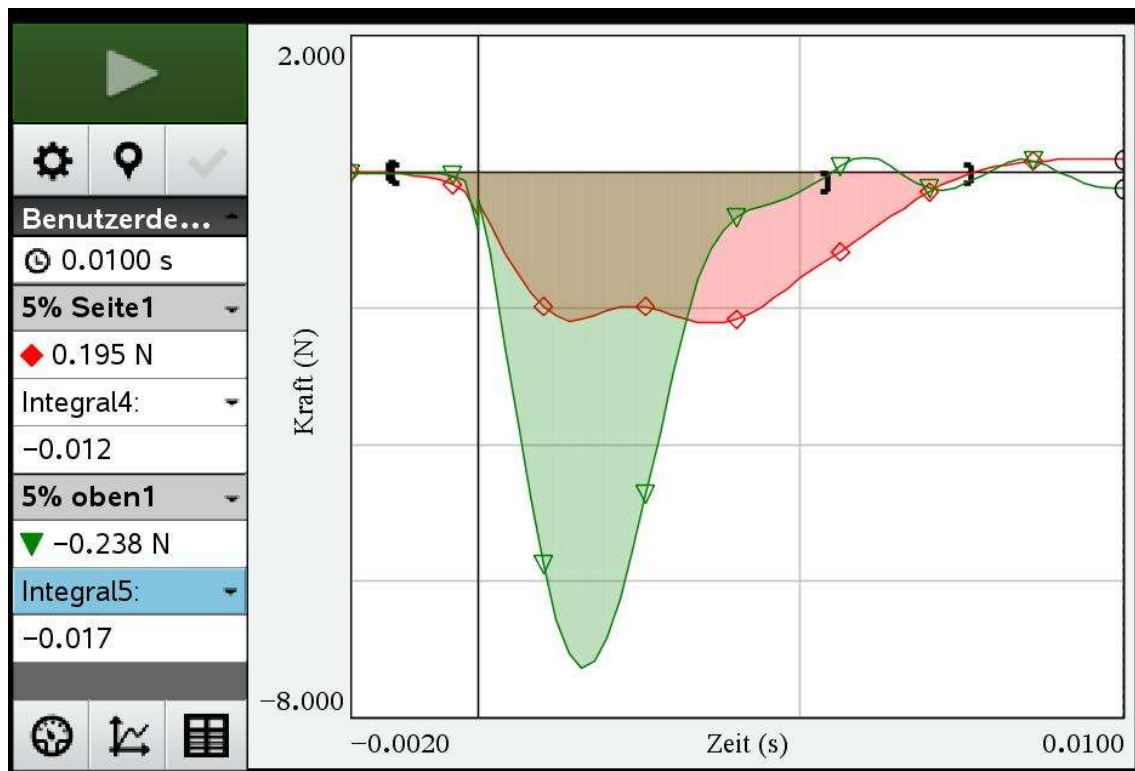


Abbildung 104: Integral - Vergleich der Raumlage grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 5% Infill

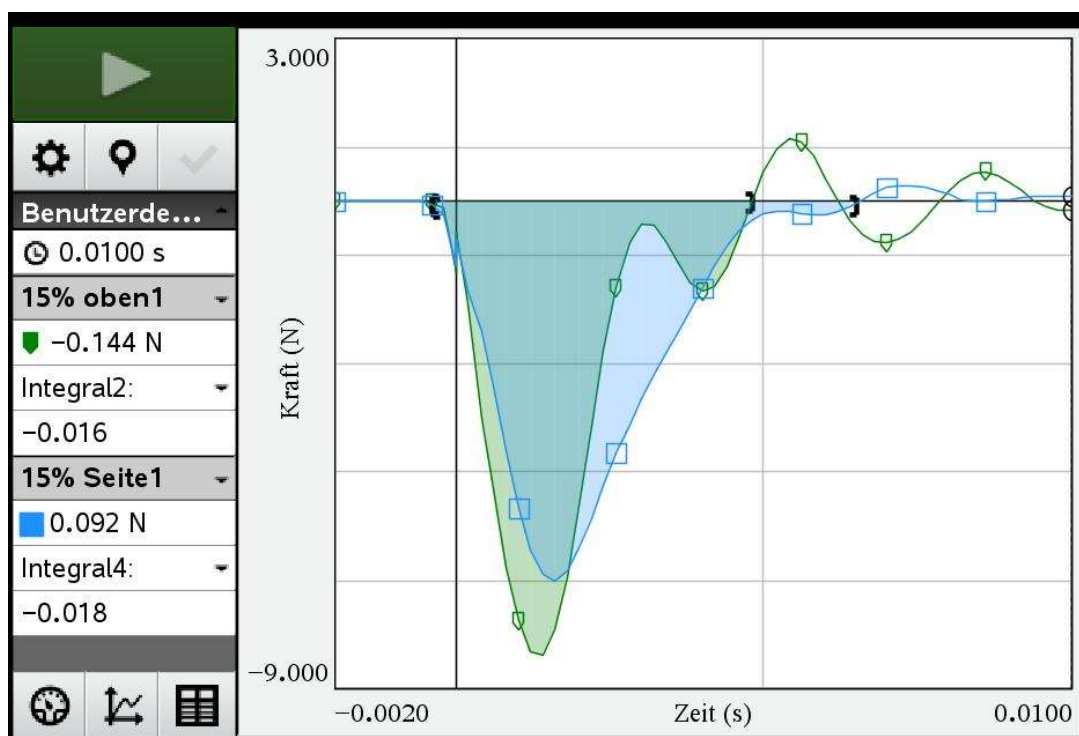


Abbildung 105: Integral - Vergleich der Raumlage grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 15% Infill

Dies erfolgt in der Verschränkung von Infill und Raumlage beim Aufprall, so dass vier Integrale betrachtet werden müssen. Als Evaluation der Messaufnahme ist es sinnvoll, eine Kollision ohne Testkörper

durchzuführen und auch hier das Integral entsprechend berechnen zu lassen. Mit dieser Grundlage können die empirisch und theoretisch ermittelten Impulse verglichen werden – sie müssen zwischen einem voll elastischen und unelastischen Stoß liegen:

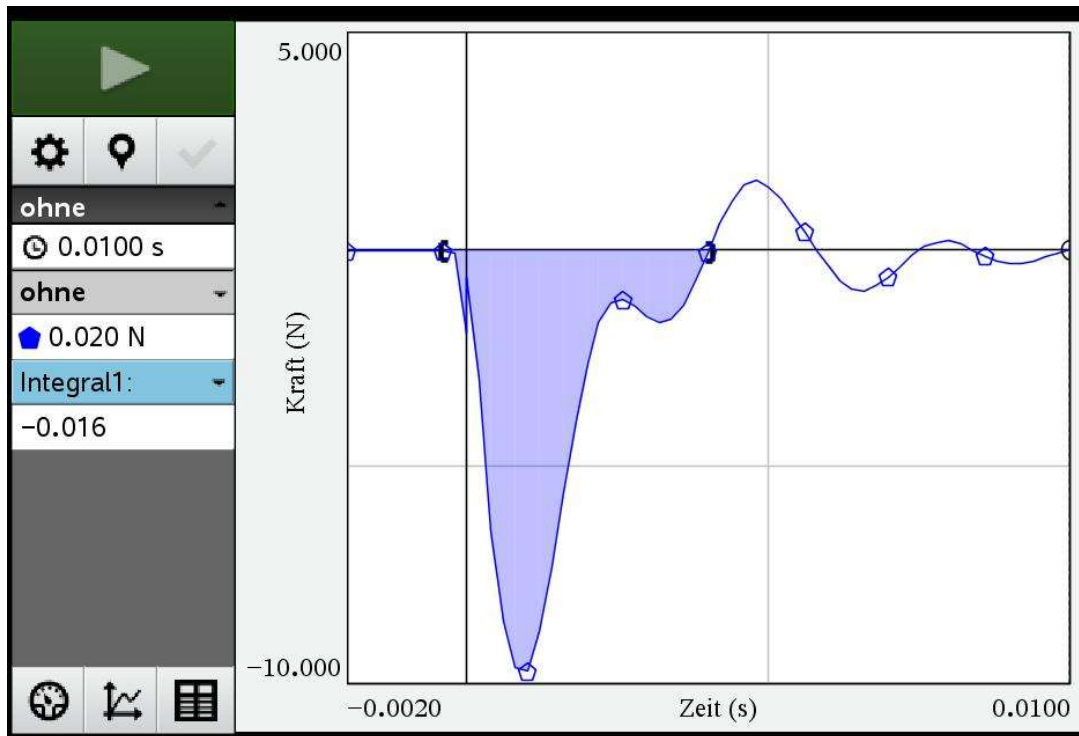


Abbildung 106: Integral - Aufprall der Kugel direkt auf den Sensor - Fallhöhe 10,1cm

Aus den bekannten Größen wie Fallhöhe und Erdbeschleunigung kann zunächst die Geschwindigkeit beim Aufprall berechnet werden, die mit dem Gewicht der Kugel schließlich den Impuls beim Aufschlag ergibt. Die Impulsänderung bei einem vollständig elastischen bzw. vollständig unelastischen Stoß lässt sich damit bestimmen und mit den empirisch ermittelten Werten vergleichen:

	ohne Würfel	mit Würfel
gegeben	- Fallhöhe (h) ohne Würfel als Testkörper: $h = 0,101\text{m}$ - Masse der Kugel $m=0.0082\text{kg}$	- Fallhöhe (h) mit Würfel als Testkörper: $h = 0,081\text{m}$ - Masse der Kugel $m=0.0082\text{kg}$
Geschwindigkeit beim Aufprall v_0	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,101\text{m}}$ $\approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,081\text{m}}$ $\approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Impuls beim Aufprall	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,40746 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082 \text{kg}$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$p_0 = m \cdot v_0$ $p_0 \approx 1,26043 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0082 \text{kg}$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
Impulsänderung bei:		
vollständig <i>elastischen</i> Stoß	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.023082 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{elast}} = 2 \cdot p_0$ $\approx 0.020671 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
vollständig <i>unelastischen</i> Stoß	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.011541 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	$\Delta p_{\text{inelast}} = p_0$ $\approx 0.010336 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
experimentell ermittelt	$\Delta p_{\text{exper}} \approx 0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	5% Seitenaufprall $\Delta p_{\text{exper}_5\%} \approx 0.012 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ 5% Aufprall oben $\Delta p_{\text{exper}_15\%} \approx 0.017 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ 15% Seitenaufprall $\Delta p_{\text{exper}_5\%} \approx 0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ 15% Aufprall oben $\Delta p_{\text{exper}_15\%} \approx 0.018 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

Bewertung	Impuls beim Aufprall liegt näher am vollständig unelastischen Stoß. Wenn man unelastischen Stoß mit 0% und elastischen mit 100% ansetzt, liegt der Aufprall direkt auf den Sensor bei 38,6%. Eigentlich wäre ein höherer Wert zu erwarten; möglicherweise spricht der Sensor nicht schnell genug an.	Impuls beim Aufprall liegt bei 5% Infill sehr nah am vollständig unelastischen Stoß, bei 15% Infill hingegen sehr nah am vollständig elastischen Stoß. Wenn man unelastischen Stoß mit 0% und elastischen mit 100% ansetzt, ergibt sich für die Kollisionen jeweils: <table><tr><td>5% Seitenaufprall</td><td>16.1 %</td></tr><tr><td>5% Aufprall oben</td><td>64,5 %</td></tr><tr><td>15% Seitenaufprall</td><td>54,8 %</td></tr><tr><td>15% Aufprall oben</td><td>74,1 %</td></tr></table> Bei höherer Dichte oder Aufprall von oben wird die fallende Kugel eher „reflektiert“ - die Werte entsprechen den Erwartungen.	5% Seitenaufprall	16.1 %	5% Aufprall oben	64,5 %	15% Seitenaufprall	54,8 %	15% Aufprall oben	74,1 %
5% Seitenaufprall	16.1 %									
5% Aufprall oben	64,5 %									
15% Seitenaufprall	54,8 %									
15% Aufprall oben	74,1 %									

Vorschlag: Lassen Sie Ihre Schülerinnen und Schüler diskutieren, welche konkreten Prozesse beim Aufprall der Kugel ablaufen und wie die gedämpfte Schwingung nach dem ersten großen Ausschlag zu interpretieren ist.



Hinweis: Die Kugel trifft auf die Ober/Seitenfläche des mit flexiblem Filament gedruckten Würfels. Die Seitenfläche des Würfels wird durch den Kraftstoß verformt, sie nimmt Fallenergie durch reversible Verformung auf. Der Kraftstoß, der an den Sensor weitergeleitet wird, ist um diesen Betrag geringer. Bei sehr weichem Material reichen bereits geringere Kräfte für die Verformung aus - dies ist hier der Fall bei dem Aufprall auf die Seite, da in dieser Richtung die Dichte geringer ist als beim Aufprall auf die Oberseite. Grund für diese inhomogene Dichteverteilung im Würfel ist das Druckverfahren, das schichtweise arbeitet. Die zur Verformung verwendete Kraft wird wieder an die Kugel abgegeben, so dass hier ein gedämpftes Schwingen des Gesamtsystems Kugel-Messobjekt-Sensor beobachtet werden kann.

Anhang: Herstellung der Versuchsobjekte (Würfel mit flexiblem Filament)

Fertige Druckdateien für die 3D-Drucker der Marke Renkforce haben Sie als gezippte Datei mit diesem PDF erhalten. Drucken Sie mit flexiblem Filament besonders langsam und mit nur 10 bis 15 mm/s und verwenden Sie Temperaturen von 205-230°C für die Extrusion(Schmelzdüse).

Wenn Sie eigene Objekte mit flexiblem Filament drucken möchten, können Sie die wichtigsten Einstellungen dem folgenden Screenshot der Slicer-Software Cura entnehmen (vgl. Abb. 9).

- Stellen Sie im **Bereich Gehäuse** die oberen und unteren Schichten auf 4 oder 5.
- Im **Bereich Füllung** können sie die gewünschten Infill-Raten eintragen. Wählen Sie hier zunächst 15 % und als Muster ein einfaches Gitter - in späteren eigenen Versuchsreihen können z. B. auch unterschiedliche Füllgeometrien mit gleichem Füllgrad verglichen werden.
- Die **Drucktemperatur** sollte zwischen 205 und 230°C betragen und die **Geschwindigkeit** maximal 15 mm/s, für die erste Schicht lediglich 10 mm/s und für die restlichen obersten und untersten Schichten 5 mm/s.

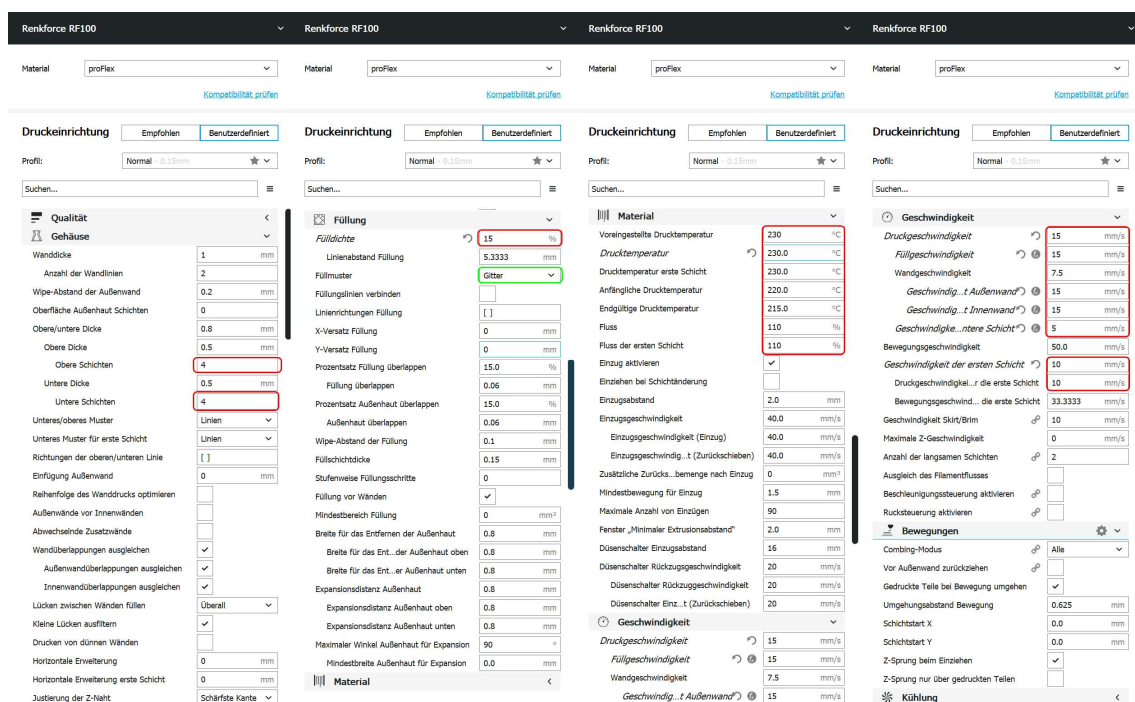


Abbildung 107: Einstellungen für den Druck mit flexiblem Filament (Screenshot Cura, Version

Schülerarbeitsblatt Experiment 2: Einfluss der Raumlage auf die Dämpfungseigenschaften

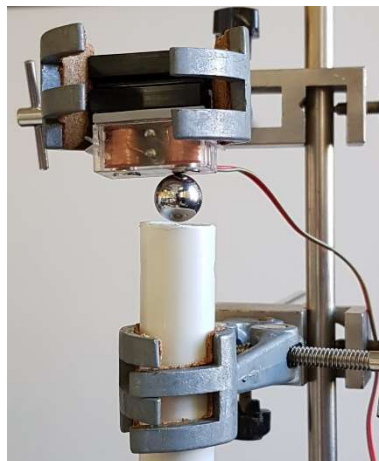
In diesem Experiment untersucht ihr die Dämpfungseigenschaften von 3D-gedruckten Körpern. Sie werden schichtweise aus einem thermoplastischen, d.h. durch Erhitzen eines dauerhaft verformbaren Kunststoffes hergestellt. Ähnlich einer Heißklebepistole besitzt ein 3D-Drucker eine Heizdüse, durch die der Kunststoff in Form eines dünnen Drahtes („Filament“) geschoben wird. Der Vorschub des Materials, die Position und Wege der Düse sowie der Beginn einer neuen Lage erfolgen computergesteuert. Neben den beim Erkalten wieder starren Filamenten können auch flexible eingesetzt werden (Elastomere), die durch Erhitzen und 3D-Druck in eine Form gebracht werden, anschließend aber weiterhin flexibel sind.

Versuchsaufbau

Baut den Versuch nach dem Bild rechts auf.

Achtet darauf, den 3D-gedruckten Würfel nur leicht einzuklemmen - seitlich oder durch ein Rohr, durch das die Kugel mittig auf den Sensor fällt.

Der Würfel muss immer mit derselben Kraftwirkung eingeklemmt werden!



Messwerterfassung

- Sensor - Nullstellung
- 5000 Samples/s (Warnung ignorieren)
- Messzeit 0,2 Sekunden
- Trigger wenn fallend unter 0,1 N (Druck auf Sensor = negative Kraftrichtung)
- 20% Daten vorab

Durchführung

Der Kraftstoß auf den Würfel wird mit einer Stahlkugel von 6 bis 8 mm Durchmesser ausgeführt - entweder über eine schiefe Ebene oder im freien Fall.

- c) Die Kugel rollt die schiefe Ebene hinunter und prallt gegen den 3D-gedruckten Körper. Achtet darauf, dass die Kugel immer von derselben Position aus gestartet wird (nur loslassen, kein „Anschubsen“).
- d) Die Kugel fällt frei auf den 3D-gedruckten Körper und wird immer aus derselben Höhe ausgeklinkt, z.B. mit Hilfe eines Elektromagneten.

Es wird ein Würfel mit einem Infill-Werte von 15 % vermessen. Zuerst wird der Würfel so platziert, dass die einzelnen Druckebenen horizontal ausgerichtet sind. Im zweiten Durchlauf wird der Würfel um 90° gedreht, so dass die Druckschichten vertikal stehen.

Auswertung

Beschreibe die Graphen, die beim Aufprall der Metallkugel auf die Würfel mit verschiedenen Infills entstehen. Erkläre, was in den Diagrammen dargestellt wird.

Findest du Unterschiede zwischen den einzelnen Graphen? Welche Erklärung hast du für diese Unterschiede?



Tipp: Du kannst die Graphen „übereinanderlegen“, d. h. die Messwerte verschiedener „Runs“ in einem einzigen Diagramm darstellen.

Berechne (mit Hilfe der Datenlogger-Software) die Integrale der Kraftwirkung der zwei Stöße. Vergleiche im nächsten Schritt die Ergebnisse und beschreibe die Kraftstöße auch in mathematischer Form.

Experiment 3: Stabilität von 3D-Drucken – Einfluss der Raumlage beim Druck

Das folgende Experiment unterscheidet sich von den vorherigen dadurch, dass das Untersuchungsobjekt dabei zerstört wird: Es handelt sich um eine *zerstörende Materialprüfung*.

Untersucht wird, welche Kraft nötig ist, um einen 3D-gedruckten Körper zu zerbrechen, wobei wieder pro Versuch nur ein Parameter variiert wird, um den Einfluss auf die Stabilität des Körpers festzustellen. Ausgearbeitet ist für dieses Schülerexperiment der Einfluss der „Ausrichtung des Objektes“ während des Druckes, der sehr deutlich die Stabilität beeinflusst.

Je nach 3D-Modell kann es verschiedene Möglichkeiten geben, das Modell auf der Druckplatte für den Ausdruck zu platzieren. Der Druck erfolgt schichtweise, so dass die Platzierung und Ausrichtung die Lage dieser Schichten im Modell bestimmt. Für dieses Experiment wird wieder ein simpler Körper verwendet, ein Quader mit einer Grundfläche von 5x5mm² sowie einer Höhe von 50mm. Dieser könnte stehend oder liegend gedruckt werden:

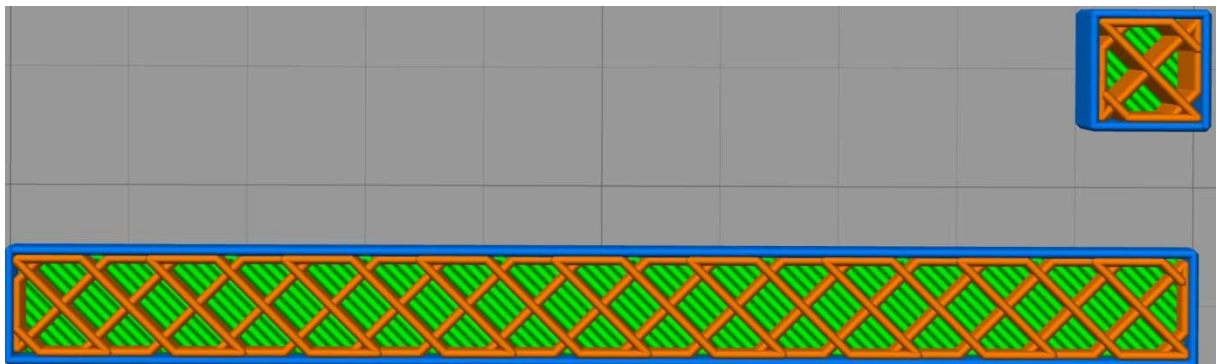


Abbildung 108: Messobjekt für zerstörende Materialprüfung stehend und liegend gedruckt.



Hinweis: Ihre Schülerinnen und Schüler können anschließend eigenständig weitere Messreihen planen und weitere Parameter wie z.B. Druckauflösung (Layerhöhe), Temperatur, Druckgeschwindigkeit, Infill-Muster oder Filament-Hersteller bzw. Farbe (andere Additive und Pigmente) verwenden, ggf. auch unterschiedliche Materialarten vergleichen. Diese Erweiterungen eignen sich für eigene Forschungsarbeiten und die Auswirkungen sind möglicherweise deutlich geringer ausgeprägt, so dass ein anderer Versuchsaufbau notwendig sein kann, der stärker standardisierte Messungen ermöglicht (z.B. Sensor nicht in der Hand gehalten, ggf. Strukturtester).

Lehrmaterial 3: Bruchtest mit einem 3D-gedruckten Quader. Einfluss der Ausrichtung des 3D-Modells für den Druck.

Einleitung

Der Aufbau der Modelle erfolgt beim 3D-Druckverfahren schichtweise – es werden also eine Vielzahl von Ebenen („Layer“) gedruckt, in denen mit einem geschmolzenen Kunststoffaden von 0,4 mm Durchmesser die Umrisse und Füllungen angelegt werden. Ist der Materialauftrag für die jeweilige Ebene beendet, senkt sich die Druckplatte (z-Achse) und eine neue Materialschicht wird aufgetragen.

Die Stabilität eines Objektes hängt also mit der Reißfestigkeit des Materials selbst und der Haftung desselben zwischen den Druckebenen („Layerhaftung“) zusammen. Nicht alle Objekte können in beliebiger Ausrichtung gedruckt werden (Überhänge sind je nach Druckermodell und Einstellungen schwierig zu drucken oder benötigen eine Abstützung), deswegen wird für das folgende Experiment ein simpler Körper verwendet, der sowohl liegend als auch stehend gedruckt werden kann.

In diesem Freihandexperiment wird die Stabilität von liegend und stehend gedruckten Exemplaren eines Quaders mit den Abmessungen 5x5x50mm³ vermessen. Dazu wird die Kraft bestimmt, die aufgewendet werden muss, bis der 3D-gedruckte Körper zerbricht. Mit Hilfe eines Kraftsensors und digitaler Messwerterfassung wird so der Einfluss der Lage beim Druck auf die Stabilität hin untersucht.

Notwendiges Vorwissen der Schülerinnen und Schüler

- Kraft
- Hebelgesetze
- (Drehmoment?)

Benötigtes Material	Digitale Messwerterfassung
▪ 3D-gedruckte Quader (5x5x50 mm³) ca. 2-3 für jede Schülergruppe jeweils stehend und liegend gedruckt ▪ Schraubstock oder Schraubklemme zur Befestigung	▪ Kraftmesser mit +/- 50N: Vernier DF-BTA für die Messung mit grafikfähigen Taschenrechnern ▪ Datenlogger: TI Nspire mit Lab Cradle

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Schülerinnen und Schüler haben mehrere Exemplare des Quaders jeweils liegend und stehend gedruckt vor sich liegen (jeder in der Gruppe sollte beide Druckausrichtungen im Freihandexperiment überprüfen können). Zunächst werden mit einem Bleistift Markierungsstriche jeweils 5 mm vom Ende entfernt angebracht, damit die Objekte jeweils gleich weit eingespannt werden können und der Sensor immer an der gleichen Stelle eingehakt werden kann.

Die Schülerinnen und Schüler sollen zunächst ihre begründeten Vermutungen äußern, welcher Körper stabiler ist und dies im Arbeitsblatt dokumentieren (s. Arbeitsblatt III Schüler).

Anschließend wird zunächst der stehend gedruckte Körper im Schraubstock festgeklemmt, der Haken des Kraftsensors oben über die zweite Markierung geschoben und in der Messwerterfassung der Sensor auf Null zurückgesetzt. Der Sensor wird dabei ruhig in der Hand gehalten:

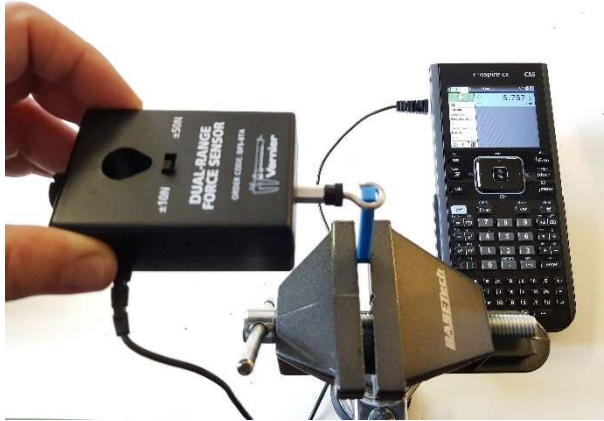


Abbildung 109: Freihandexperiment: Der zu untersuchende 3D-Druck ist im Schraubstock eingespannt – hier wird bereits mit einer Kraft von 6.7 N gezogen

Sobald die Datenerfassung gestartet ist, wird mit zunehmender Kraft der Sensor horizontal weggezogen, bis der 3D-gedruckte Quader abbricht. In den Standard-Einstellungen der Software sind dazu 5 Sekunden Messzeit vorgesehen; dies kann bei Bedarf verlängert werden. Alle Schüler der Gruppe prüfen zunächst die stehend gedruckten Quader, anschließend werden die liegend gedruckten entsprechend getestet.

Einstellung der Messwerterfassung

Die automatischen Voreinstellungen (50 Messungen/s bei 5 Sekunden Messzeit) können direkt verwendet werden, ggf. kann die Zeitdauer erhöht werden. Stellen Sie am Sensor den größeren Bereich (± 50 N) ein.

Auswertung der Daten

Die folgende Darstellung zeigt die Kurvenverläufe für die jeweilige Kraftaufwendung bei stehend und liegend gedrucktem Versuchsobjekt:

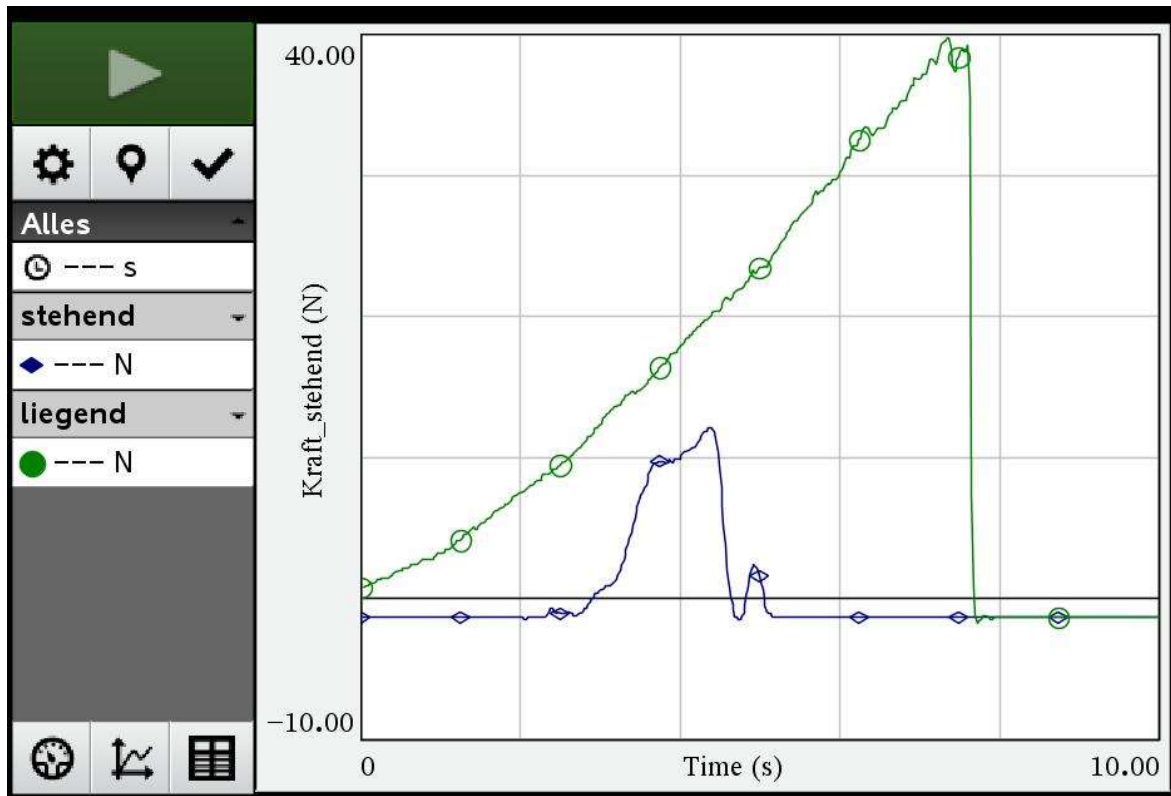


Abbildung 110: Bruchtest mit stehend bzw. liegend gedrucktem Quader

Die stehend gedruckten Quader brechen deutlich früher. Der Grund liegt in der vielfach niedrigen Haftfläche zwischen den Ebenen, die sich bei diesem Körper ergibt, wenn er stehend gedruckt wurde. Abstrahiert man zunächst vom Füllgrad, ergibt sich eine maximale Fläche von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ beim stehend gedruckten Objekt für die Ebenenhaftung gegenüber $5 \times 50 \text{ mm}^2$ bei dem liegend gedruckten Quader. Diese maximale Fläche würde nur beim Druck von Vollkörpern in Anspruch genommen werden.

Das Experiment ist jedoch keine klassische Zerreißprobe, da die Kräfte nicht nur senkrecht zur Druckebene wirken, sondern durch den seitlichen Zug wirkt ein Drehmoment auf den Körper.

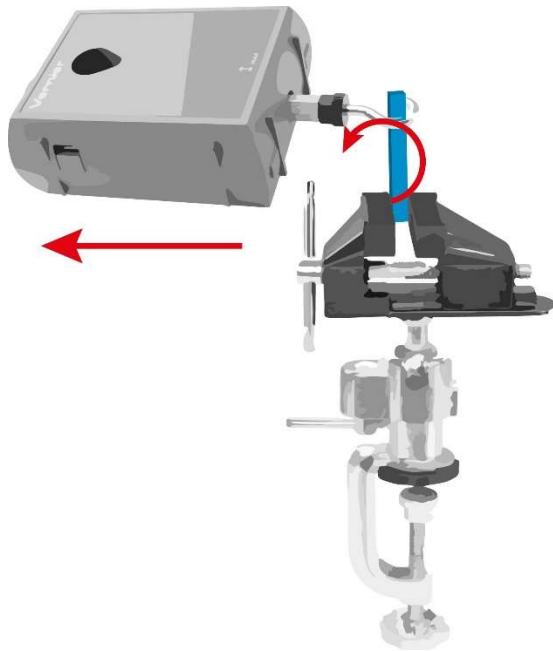


Abbildung 111: Kräfte bei der Zerreißprobe (Zug, Drehmoment)

Schülerarbeitsblatt: Experiment 3: Bruchtest mit einem 3D-gedruckten Quader. Einfluss der Ausrichtung des 3D-Modells im Druckvorgang.

In diesem Experiment untersucht Ihr die Haltbarkeit von 3D-Drucken. Dabei wird ein Quader ($l=5\text{mm}$; $b=5\text{mm}$, $h=50\text{mm}$) einmal stehend und einmal liegend ausgedruckt. Die Druckrichtung könnt Ihr anhand der kleinen Rillen auch später noch erkennen. Ihr untersucht nun, welchen Einfluss die Lage des zu druckenden Objekts beim schrittweisen Druck auf dessen Stabilität hat. Dies kann z.B. bei der Konstruktion von tragenden Strukturen oder mechanisch hochbelasteten Teilen wie Zahnrädern eine Rolle spielen.

Versuchsaufbau

Ihr erhaltet in der Arbeitsgruppe mehrere Quader, für jeden Schüler/Schülerin je einen mit pro Druckrichtung. Markiert bitte mit einem weichen Bleistift einen Strich 5mm von der längsten Seite oben und unten entfernt (Filzstift verläuft). An einer dieser Markierungen spannt Ihr den Quader im Schraubstock fest ein – so fest, dass er nicht wackelt oder verrutscht, aber nicht zu fest, damit der Druck nicht zerquetscht wird. An der anderen Markierung wird der Haken vom Kraftsensor eingehängt, der Sensor wird dabei ruhig mit der Hand gehalten. Das Bild gibt einen Hinweis für den Aufbau:



Abbildung 112: Freihandexperiment: Der zu untersuchende 3D-Druck ist im Schraubstock eingespannt – hier wird bereits mit einer Kraft von 6.7 N gezogen

Einstellung der Messwerterfassung

Die automatischen Voreinstellungen (50 Messungen/s bei 5 Sekunden Messzeit) können direkt verwendet werden, ggf. kann die Zeitdauer erhöht werden. Stellt den Sensor auf den größeren Messbereich ($\pm 50\text{ N}$) ein.

Prognose der Ergebnisse:

Bevor Ihr die Messungen durchführt, tragt Eure Erwartungen und Vermutungen bitte in die Tabelle ein:

Druckrichtung	bricht als (Rangfolge angeben)	Begründung
liegend		
stehend		

Durchführung der Messungen

Spannt den zu testenden 3D-Druck in einen kleinen Schraubstock ein und schiebt den Haken vom Sensor ca 5mm weit über den 3D-Druck. Der Sensor wird dabei ruhig in der Hand gehalten:



Vor der Messung wird der Sensor noch auf Null gesetzt (möglichst ruhig halten, kleine Abweichungen beim Freihandexperiment sind ok). Sobald die Messung gestartet wird, den Sensor in eine Richtung parallel zur Tischplatte ziehen, bis der kleine 3D-gedruckte Quader bricht. Das Experiment kann zur Kontrolle mit mehreren gleichgedruckten Quadern wiederholt werden. Anschließend wird die andere Raumrichtung beim Druck (stehend/liegend) getestet.

Auswertung der Daten

Beschreibt Eure Beobachtungen während des Experiments:

Welcher Körper ist zuerst abgebrochen? Stimmen Eure Beobachtungen mit den Vermutungen überein?

Wie lassen sich die unterschiedlichen Stabilitäten erklären?

Sind die Bruchstellen unterschiedlich?

Für weiterführende Experimente: Welche Einstellungen beim Druck könnten noch einen Einfluss auf die Stabilität der 3D-Drucke haben? Entwerfe ein Experiment, wie Deine Vorschläge systematisch untersucht werden können.

5. Exkurs: 3D-Druck in Schulen - eine Gefahr durch Feinstaub und organische Belastungen?



Hinweis: Das Thema „Emissionen und Gefahren durch 3D-Drucker“ ist eine viel diskutierte Thematik, zu der sehr unterschiedliche und kontroverse Meinungen existieren. Ziel dieses Kapitels ist es, dieses Thema anhand von wissenschaftlichen Studien zu betrachten und dem Leser somit eine neutrale und unaufgeregte Sichtweise auf das Thema zu verschaffen, die

auf den Ergebnissen der veröffentlichten Studien beruht.

Dieses Kapitel bildet den aktuellen Stand der Forschung (Stand: 02/2019) anhand der zitierten Studien ab. Es kann jedoch nicht die jeweils individuelle und aktuelle eigene Beurteilung eines möglichen Gefahrenpotentials von 3D-Druckern ersetzen.

3D-Drucker erhitzen Thermoplaste und kühlen das verflüssigte Material direkt nach dem Auftragen auf die vorangegangenen Schichten oder die Druckplatte wieder ab. Dazu werden Lüfter eingesetzt, die sowohl in den Regelkreis des Extruders einbezogen sind, als auch mit dem Luftstrom direkt das flüssige, extrudierte Material kühlen. Bei diesem Prozess werden auch Moleküle des Thermoplasten und flüchtige organische Verbindungen in die Umluft abgegeben – dies ist seit Jahrzehnten aus dem Spritzgussverfahren bekannt, mit dem Thermoplaste in industriellen Maßstab verarbeitet werden. Je nach verwendeter Materialart können die emittierten Mengen sehr stark variieren – teilweise deutlich mehr als um den Faktor 100. In den letzten Jahren ist eine verstärkte Diskussion um die Gefährdung durch kleine und kleinste Partikel („Feinstaubemissionen“) und organische Verbindungen im Kontext des stetig wachsenden Einsatzes von 3D-Druckern im Bildungsbereich und für Büro bzw. Heimanwendungen aufgekommen.

Eine einheitliche oder gar verbindliche Testnorm besteht für FDM/FFF-3D-Drucker zum jetzigen Zeitpunkt nicht. Die Autoren der wissenschaftlichen Studien zu diesem Thema müssen daher selbst geeignete Untersuchungsverfahren entwickeln. Alle Untersuchungen zeigen, dass die Wahl des Filaments (Thermoplast) einen gravierenden Einfluss auf die Luftbelastung durch Feinstäube und organische Belastungen haben, auch die Art und Weise, wie die Drucker im Detail konstruiert sind, welche Temperaturen verwendet werden, ist nicht unwichtig.

„Spoiler-Alarm“ – die wichtigsten Ergebnisse:

- Die Emissionen sind ‚im schlimmsten Fall‘ vergleichbar mit denen eines Laserdruckers.
- Die Wahl eines geeigneten Filaments (normales PLA, kein Compound) kann die Emissionen um den Faktor 10^2 bis 10^4 verringern
- In einigen Teil-Versuchen war eine Emissionen beim Druck mit PLA nicht einmal messbar (Zhang, Wong et al. 2017:1284). Die Echtzeitmessung der Emission organischer Verbindungen (VOC) war bei PLA ebenfalls extrem gering bzw. nicht nachweisbar (Stefaniak, LeBouf et al. 2017:543)
- Die Belastung von Feinstaub durch Druck mit PLA-Filament lässt sich nur mit gereinigter Luft nachweisen, da die Gesamtemission unterhalb der von typischen Innenräumen liegt.
- Eine normale Einhausung bringt nur beim Druck von ABS-Filamenten Vorteile, die Partikelemission bei PLA ändert sich nicht signifikant (Zhang, Wong et al.:supplemental material, 18)

5.1 Studien zur Untersuchung von Feinstaub (UFP) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)

Die zurzeit aufwändigste Studie von Zhang, Wong et al. (2017) erschien in der Fachzeitschrift „Aerosol Science and Technology“ und untersucht mit einem multidimensionalen Design den Einfluss folgende Parameter:

- Hersteller des 3D-Druckers (unterschiedlichen Bauformen mit/ohne Einhausung)
- Filament-Material (ABS, PLA, Nylon) und -farbe (Einfluss weiterer Additive wie Pigmente)
- Temperatur von Extruder und Bauplatte
- Größe des zu druckenden Objekts

Die Veröffentlichung, ergänzendes Material sowie alle verwendeten Abbildungen sind online über den Verlag abrufbar (OpenAccess).

Die Autoren verwenden eine kontrollierte Messumgebung mit einer 1m³ großen Kammer aus Edelstahl mit Isolierung, geregelter Luftumwälzung, Feuchtigkeit (3% Luftfeuchte), Temperatur (23°C) und Filtersystem für die Luftzufuhr, so dass die gemessenen Emissionen von den Testdrucken stammen müssen. Die Anforderungen orientieren sich an dem Verfahren, mit dem Laserdrucker für das Prüfsiegel „Blauer Engel“ getestet werden, so dass die Emissionswerte vergleichbar sind, auch wenn die Druckertechnologien sich natürlich unterscheiden.

Die Feinstaub-Emissionen wurden mit drei unterschiedlichen Verfahren gemessen, die jeweils die Größen von 7 nm - 3 µm, 7 nm bis 300 nm und 300 nm - 25 µm erfassen. Betrachtet werden die Emissionsrate im zeitlichen Verlauf (Particle emission rate, PER) und die Gesamtemission (total particle emission, TP), zusätzlich wird die Gesamtemission noch mit der Masse des zu druckenden Objekts gemittelt, um die Ergebnisse spezifischer Drucker/Filamentkombinationen besser bewerten zu können („yield“ in TP/g).

5.1.1 Zeitlicher Verlauf der Emissionen

Mit dem Start des 3D-Drucks und dem Beginn der Extrusion steigt für ABS die Emissionsrate sprunghaft an; für PLA ist die Emissionsrate nur im Reinraum nachweisbar, da die Hintergrundbelastung (Partikelanzahl/m³) von Luft in Innenräumen typischerweise höher ist als die Gesamtemission während des Drucks (Zhang, Wong et al. 2017:1279, 1281). So lag in einigen Testdurchläufen mit PLA die Partikelemission bei unter 10 Partikel /cm³ bei einer Hintergrundbelastung der Testkammer bei gefilterter Luft von 1 Partikel pro cm³. Die Partikelanzahl bei Verwendung der ungefilterten Luft in den Testdurchläufen¹⁴ lag bei $(5.4 \pm 2.9) \times 10^4$ Partikeln/cm³.

14 Zhang, Wong et al 2017, ergänzendes Material, S. 10

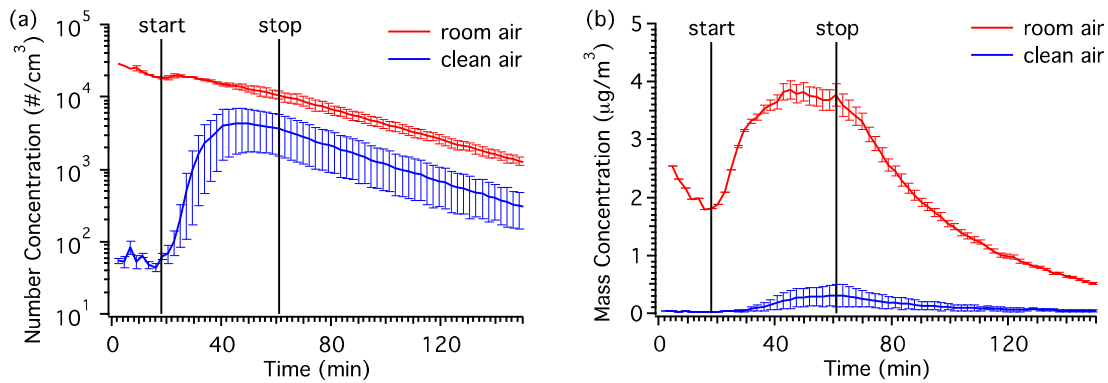


Abbildung 113: Zeitlicher Verlauf der Emissionen bei Druck mit rotem PLA (Hersteller „c“) mit einem Drucker ohne Einhausung. Druckzeit 44min. Fehlerbalken geben Standardfehler des Mittelwertes an. Quelle: Zhang, Wong et al. (2017), ergänzendes Material, S. 10, Abbildung 3

In diesem Fall verbinden sich die emittierten Partikel mit den bereits in der Luft vorhandenen, so dass die Konzentration nahezu gleich bleibt, die Masse der Partikel jedoch zunimmt; auch entsteht die Belastungsspitze anders als bei ABS nicht unmittelbar, sondern erst nach 10 Minuten oder später.

Die Emission von Ozon steigt beim Druck mit Laserdruckern von etwa $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aber weder der Druck mit ABS noch mit PLA hat die Ozonbelastung deutlich erhöht (Stefaniak, LeBouf et al. 2017:544), sie ist bei geöffnetem Gehäuse und ABS während des Drucks sogar leicht gesunken.

5.1.2 Einfluss auf Partikelemissionen

Die Emission von Partikeln kann in erster Linie vom Material, der Bauform der Drucker (keine o. teilweise Umhausung) und dem Zusatz von unterschiedlichen Additiven zum Thermoplast-Rohstoff abhängen. Farbpigmente oder weitere Zusätze können je nach Hersteller variieren, daher untersuchen Zhang, Wong et al. (2017) ergänzend Filamente unterschiedlicher Hersteller.

Den bedeutendsten Einfluss wiesen die Autoren bei ABS-Filamenten verschiedener Hersteller (größter Einfluss) in Kombination mit unterschiedlich geschlossenen Bauformen von 3D-Druckern nach. Keine Bauform hatte eine vollständige Umhüllung oder gar einen Filter. Die Farbe hatte keinen signifikanten Einfluss. Bei PLA hingegen waren Unterschiede der Emissionen bei verschiedenen Bauformen und Filamentherstellern im Reinraum zwar messbar, sie konnten jedoch nicht statistisch abgesichert werden. Zhang, Wong et al. (2017:1282) kommen zu dem Schluss, dass lediglich der Wechsel von ABS zu PLA unter Beibehaltung aller anderen Parameter allein eine Reduktion der Partikelemission um den Faktor 3 bis 1000 ermöglicht – hier ist auch ein PLA mit besonders hoher Emission inbegriffen. Betrachtet man die Werte für einen Drucker ohne Einhausung im Vergleich der Filamenthersteller, so ergeben sich folgende Werte:

Materialart	Filamenthersteller	
	"c" (anonymisiert; a-f)	"f" (anonymisiert; a-f)
ABS	$1.38 \pm 0.51 \times 10^{10}$	$(9.71 \pm 1.94) \times 10^9$
PLA	$(2.02 \pm 0.78) \times 10^8$	$(7.60 \pm 4.15) \times 10^5$

Abbildung 114: Partikelanzahl (TP) pro Gramm des Druckobjekts, Drucker ohne Einhausung im Vergleich unterschiedlicher Filamentarten und -hersteller. Quelle Zhang, Wong et al. (2017), ergänzendes Material, S. 19. Die Filamenthersteller wurden mit Kleinbuchstaben durchnummeriert, Druckerhersteller mit Großbuchstaben; **es werden keine Herstellerangaben im Klartext gegeben.**

Vergleicht man nun ABS und PLA-Filamente des selben Herstellers, indem man das Verhältnis der minimalen ABS-Emission zur maximalen PLA-Emission berechnet, ergibt sich für das stärker Partikel emittierende Filament (Hersteller „c“) ein Faktor von 1:30000 (minimale ABS Emission zu maximaler PLA-Emission), für den Hersteller „f“ immer noch 1:6600. Im Falle eines Druckers ohne Umhausung kann also die Wahl eines guten Filaments und der Verzicht auf ABS die Partikelemission pro Gramm des Druckobjektes um mehr den Faktor 6000 senken.

Eine weitere Möglichkeit, die Partikelemission beim Druck mit ABS zu reduzieren, besteht in einer Absenkung der Extrudertemperatur, denn hier besteht ein exponentieller Zusammenhang. Je höher die Temperatur, desto mehr halbflüchtige organische Verbindungen entstehen und mit ihnen Partikel. Zhang, Wong et al. (2017:1284) zeigen, dass bei einem Drucker ohne Umhausung ein Absenken der Extrudertemperatur von 270°C auf 220°C die Partikelemission (Partikel pro Gramm Druckobjekt) auf ein Sechstel reduzierte – und dennoch eine gute Druckqualität erreicht wurde.

5.1.3 Maximale Partikelemission im Vergleich mit Laserdruckern – Testverfahren „Blauer Engel“

Vergleicht man die maximalen Emissionsraten im Hinblick auf die Partikelanzahl, zeigt sich für die von Zhang, Wong et al. (2017) durchgeführten Tests mit PLA eine sehr große Spannweite von 10 Partikeln (untere Messgrenze) bis zu $5 \cdot 10^5$ Partikeln pro cm^3 , wobei der Median bei knapp über 10^3 Partikeln liegt. Dieser Wert ist eine Größenordnung niedriger als in vorangegangenen Studien und um den Faktor 100 kleiner als der Median bei der Feinstaubuntersuchung von Laserdruckern. Außerdem liegt damit der Median der maximalen Partikelanzahl pro cm^3 beim Druck mit PLA-Filamenten ebenfalls um den Faktor 10 unter der eines typischen Innenraums. Beim Druck mit ABS liegt der Median bei ca $5 \cdot 10^5$ pro cm^3 – dies wird übrigens auch erreicht, wenn man Bacon in einer Pfanne auf dem Gasherd brät (Fromme 2012:122)

PLA ist damit über alle Studien und Materialien hinweg die Materialart, die sich am Besten zum Druck eignet, wenn die Feinstaubbelastung so niedrig wie möglich gehalten werden soll. ABS hingegen liegt von der maximalen Partikelkonzentration in etwa gleichauf mit der durch einen Laserdrucker verursachten.

Die **Partikelkonzentration in Schulen in Deutschland** eignet sich hier als ein guter Referenzwert, um diese Messungen einzuschätzen. Fromme (2012:128) verweist auf eine eigene Untersuchung von 36

Klassenzimmern, bei der zwischen $2,6 \cdot 10^3$ und $1,2 \cdot 10^4$ Partikel pro cm^3 gemessen wurden und führt eine weitere Studie¹⁵ von Link et al (2004) an, bei der diese Werte zwischen ländlicher Gegend ($1,7 \cdot 10^3$ bis $4,7 \cdot 10^4$) und städtischem Umfeld differenziert wurden ($2,4 \cdot 10^3$ bis $7,55 \cdot 10^4$).

Die durchschnittliche Partikelemission beim Druck mit PLA-Filamenten liegt demnach genau in dem Bereich, der bei Klassenzimmern in Deutschland ohnehin gemessen wird.

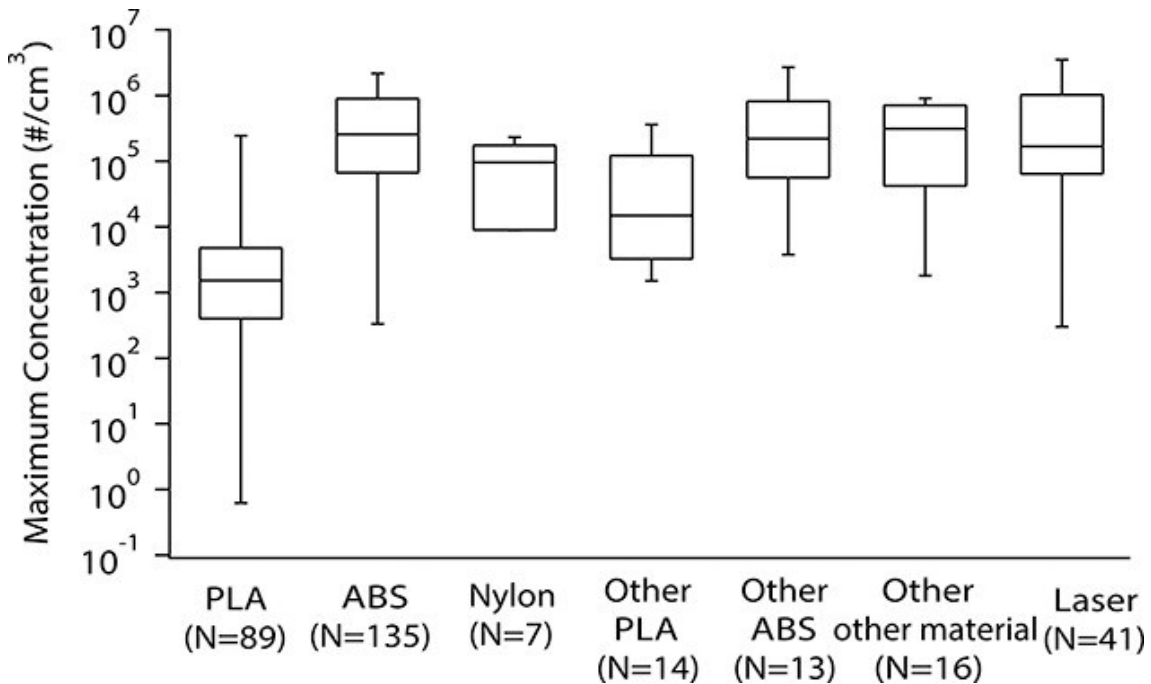


Abbildung 115: Maximale Partikelemission (Anzahl) aller Testläufe (Kombination unterschiedlicher Bauformen, Materialien, Filamenthersteller, Farben) im Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien und der von Tests mit Laserdruckern. Boxplot mit Median und Quartilen; Antennen geben minimale und maximale absolute Partikelzahlen pro cm^3 an. N gibt die Anzahl der Datensätze für den jeweiligen Boxplot an. Quelle Zhang, Wong et al. (2017:1283), Abbildung 10.

5.2 Emission organischer Verbindungen bei 3D-Druck und Laserdruckern

Das Druckprinzip bei FDM-Druckern, das Schmelzschichtverfahren, nutzt einen beheizten Extruder, um ein thermoplastisches Material schichtweise aufzutragen. Durch die Erhitzung des Materials erfolgt eine Verflüssigung als gewünschter Effekt, aber es tritt auch in sehr geringen Mengen eine thermische Zersetzung des Filaments ein. Dieser Prozess ist von der thermischen Verarbeitung dieser Materialien her bekannt (Spritzguss, Recycling) und erzeugt z.B. bei ABS Benzol, Benzaldehyd, Ethylbenzol, Ethylmethylbenzol, Toluol, Styrol, Acetophenon und m,p-Xylol, o-Xylol und Benzaldehyd (Stefaniak, LeBouf et al. 2017:547). Entsprechend konnten diese auch in der Messkammer beim Druck mit ABS-Filament nachgewiesen werden. Der Vergleich zwischen ABS und PLA liefert folgende Stoffkonzentrationen:

15 Alle Angaben Partikelanzahl pro cm^3 ; Fromme et al (2007) und Link et al (2004) zitiert nach Fromme (2012:128)

ABS					PLA			
VOC	Natural	Blue	Red	Black	True red	Army green	Ocean blue	Trans blue
Acetaldehyd	16.3±10.1	13.7±8.5	7.7±0.4	11.1±2.2	3.6±1.4	5.5±3.7	5.0±2.0	5.0±0.6
Ethanol	57.3±32.4	67.2	39.9	63.1	103.3±5.6	85.0±79.1	55.5±22.1	73.0±77.1
Acetonitril	0.6			2.7	5.4±1.9	0.4	0.4±0.2	1.0±1.3
Aceton	15.0±7.9	62.4±12.0	31.5	45.3±2.3	27.0±18.7	31.8±1.0	7.2±2.7	3.5±0.9
Isopropylalkohol.	87.2±83.8	47.7	108.1	213.0	552.3±66.9	1582.8	278.3±3.4	99.4 ±44.6
n-Hexan		1.8±1.2	0.8	3.1	0.2±0.0	1.3	0.3	1.9±2.0
Chloroform		1.4	0.4	1.2	1.0	0.3	0.6	0.7±0.5
Benzol	0.2	1.5						1.8
Toluol		1.4±1.5				1.9	1.1	
Ethylbenzol	4.7	7.3±1.0	6.6±0.6					
m,p-Xylol	0.2	3.1±2.1	3.0	1.8				
Styrol	252.1 ±128.7	212.1±9.9	237.1±62.9	100.5±11.7				
o-Xylol		1.6±0.0		1.9				
D-Limonen								

Tabelle: Durchschnitt und Standardabweichung der flüchtigen organischen Verbindungen beim 3D-Druck (bereinigt um Hintergrundkonzentrationen). Angaben in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Quelle: Stefaniak, LeBouf et al. (2017:545)

Druckt man mit einem FDM-Drucker 8 Stunden in einen 40m^3 großen Raum ohne zu lüften (z.B. 16m^2 bei einer Deckenhöhe von 2,5m), so entsteht Stefaniak, LeBouf et al. (2017:548) zufolge eine Gesamtbelastung mit organischen Verbindungen (TVOC) der Luft von $215\text{--}710 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei ABS und $10\text{--}26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei PLA. Für Bildungseinrichtungen ist daher sowohl im Hinblick auf eine Feinstaubbelastung als auch durch organische Verbindungen die Verwendung von PLA als Filamentmaterial sehr zu empfehlen.

Literatur:

Fromme, H. (2012). Particles in the Indoor Environment. Air Quality - Monitoring and Modeling. S. Kumar, InTech: 117-144.

Stefaniak, A. B., et al. (2017). "Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer." J Occup Environ Hyg **14**(7): 540-550.

Zhang, Q., et al. (2017). "Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers." Aerosol Science and Technology **51**(11): 1275-1286.

6. Danksagungen und Ausblick.

An der Entstehung eines solchen Handbuches sind viele Personen beteiligt. An dieser Stelle möchten wir uns für die Unterstützung und Zusammenarbeit bei folgenden Personen, Firmen und Institutionen bedanken:

Autodesk	Für die Freigabe zur Verwendung der Screenshots zu Fusion 360 und TinkerCAD.
T3 Europe	Für die spannende und konstruktive Zusammenarbeit bei der Ausarbeitung des didaktischen Materials für den Einsatz von 3D-Druck im Fachunterricht.
Texas Instruments:	Für die Unterstützung und Kooperation im T ³ -Netzwerk.
Mirco Tewes	Für wichtige Hinweise zur quantitativen Auswertung der Experimente und für die Leihstellung von Laborbedarf.

Weiterer Dank geht an alle beteiligten Kollegen bei Conrad Electronic SE, die an der Erstellung der Publikation mitgewirkt haben.

Ausblick

Dieses Handbuch ist ein erster Schritt, um mit 3D-Druck anzufangen, doch wie geht es nun weiter? Das Feld der additiven Fertigung ist in ständiger Bewegung und viel Forschung findet in diesem Bereich statt: Höhere Druckauflösungen, schnellere Verfahren, Multi-Materialdruck oder z.B. 3D-Druck auf Stoffe sind nur einige der Themen. Aus diesem Grund – und von der Idee her, ein interaktives Handbuch zu schreiben – können wir mit dem Projekt eigentlich gar nicht fertig werden...

Ein verstärkter Einsatz von 3D-Druck in Bildungseinrichtungen führt direkt zu Fragen der Skalierbarkeit – wie lassen sich bequem und ohne großen Aufwand z.B. 10 oder mehr Drucker warten? Welche Einsatzmöglichkeiten gibt es über die hier vorgestellten hinausgehend? Haben Sie selbst Experimente mit 3D-Druckern oder 3D-Drucken durchgeführt?

Sehr gern möchten wir das Themenspektrum erweitern und vertiefen und Ihre Entdeckungen, Anregungen und Projekte mit aufnehmen in die nächste Version dieses Handbuchs! Wir freuen uns über Anregungen, Vorschläge, Kritik, konkrete Projekte... education@conrad.de

Ihr Autorenteam vom Conrad Technology Center (CTC), Conrad Electronic SE

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1:	Video - 3D-Druck Workshop#1, Conrad Academy	8
Abbildung 2:	Das Objekt - hier ein Kegelstumpf - von unten betrachtet.	10
Abbildung 3:	Auswahlmöglichkeit verschiedener Füllstrukturen.	12
Abbildung 4:	Wabenmuster	12
Abbildung 5:	FFF/FDM-Verfahren	17
Abbildung 9:	Prinzip des SLA-Verfahrens. © Conrad Electronic SE	19
Abbildung 10:	Pulverbettverfahren- Selektives Laserschmelzen (SLM). © Conrad Electronic SE.....	21
Abbildung 11:	Druckprinzip des FFF/FDM-Verfahrens © Conrad Electronic SE	23
Abbildung 12:	Automatische Berechnung von Druckzeit und benötigter Menge Filament	25
Abbildung 13:	Strukturformel PLA, Quelle: Wikimedia	26
Abbildung 14:	Strukturformel ABS. Quelle: Wikimedia	27
Abbildung 15:	Strukturformel von PVA. Quelle: Wikimedia	31
Abbildung 16:	Startbildschirm der CAD-Software Tinkercad - im Browser verwendbar	34
Abbildung 17:	Arbeitsumgebung in Tinkercad - Werkzeuge, Arbeitsebene und Schaltflächen	34
Abbildung 18:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Platzieren des Zylinders, Bemaßung	35
Abbildung 19:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Rohling fertigstellen (Höhe definieren)	35
Abbildung 20:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Individualisierung mit Text	36
Abbildung 21:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Freihand-Platzierung von Text zum Ausstanzen.....	36
Abbildung 22:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Ausrichten der Objekte zueinander	37
Abbildung 23:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - Detailansicht des Ausstanzens (Subtraktion der Körper durch "Bohrung")	37
Abbildung 24:	Projekt "Einkaufswagen-Chip" - fertige Konstruktion, bereit zum Export.....	38
Abbildung 25:	Projekt „LKW mit Scharnier“: Arbeitsbereich von Autodesk Fusion 360.....	39
Abbildung 26:	Projekt „LKW mit Scharnier“ - erste Skizze mit Bemaßungen	39
Abbildung 27:	Projekt „LKW mit Scharnier“ - Konstruktion des Scharniers.....	40
Abbildung 28:	Projekt „LKW mit Scharnier“ - erste Flächen extrudieren (in die Höhe ziehen).....	41
Abbildung 29:	Projekt „LKW mit Scharnier“ - Extrusion und Ausschneiden von Volumenkörpern ...	41
Abbildung 30:	Projekt „LKW mit Scharnier“ - Setzen einer neuen Skizze auf einen Volumenkörper	42
Abbildung 31:	Projekt „LKW mit Scharnier“ -	42
Abbildung 32:	Projekt „LKW mit Scharnier“ - fertige Konstruktion, bereit zum Export.....	43
Abbildung 33:	Arbeitsblatt - Bestimmung der Koordinaten der Würfelaugen im 2D-Koordinatensystem.....	44
Abbildung 34:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Erzeugen des Würfels mit 3cm Kantenlänge.....	45
Abbildung 35:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Würfel und Kugel platzieren	45
Abbildung 36:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Schnittmenge von Würfel und Kugel erzeugen	46
Abbildung 37:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Kugel für Würfelaugen platzieren	46
Abbildung 38:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Module für die Augen des Würfels verwenden.....	47
Abbildung 39:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Grundform Würfel ebenfalls als Modul definieren.....	47
Abbildung 40:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Augenzahl eins als Differenz beider Module.....	48
Abbildung 41:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Modul für Augenzahl sechs anlegen	49

Abbildung 42:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Augenzahl sechs nach Rotation subtrahieren.....	49
Abbildung 43:	Projekt „Programmierung Spielwürfel“ - Musterlösung für die Erzeugung des Würfels.....	50
Abbildung 44:	Programmierung von 3D-Objekten mit OpenSCAD	50
Abbildung 45:	3D-Scan mit strukturiertem Licht - Oberflächenverlauf ergibt Verzerrungen im Linienmuster	52
Abbildung 46:	Beispiel-Screenshot der Webseite Thingiverse	53
Abbildung 47:	Video - 3D-Druck Workshop #2 Conrad Academy.....	54
Abbildung 48:	Slicing mit Cura - 3D-Drucker hinzufügen.....	54
Abbildung 49:	Slicing mit Cura - Auswahl des 3D-Druckers.....	55
Abbildung 50:	Slicing mit Cura - Ansicht der Slicing-Software im Hauptfenster.....	56
Abbildung 51:	Slicing mit Cura - Einstellungen der Software anpassen	56
Abbildung 52:	Slicing mit Cura - Symbol zum Öffnen des 3D-Objekts	57
Abbildung 53:	Slicing mit Cura - Ansicht des geöffneten 3D-Objektes (Blick in den virtuellen 3D- Drucker)	57
Abbildung 54:	Slicing mit Cura - Einstellungen für den 3D-Druck ändern.....	58
Abbildung 55:	Slicing mit Cura - geänderte Auflösung (Schichtdicke), Berechnung von Druckzeit und Materialverbrauch.....	59
Abbildung 56:	Slicing mit Cura - Schichtansicht - Simulation des 3D-Druckvorgangs mit Detailansicht	59
Abbildung 57:	Parameter beim Slicing - Stützstrukturen für Überhänge	60
Abbildung 58:	Parameter beim Slicing - Folgen des Drucks von Überhängen ohne Stützstruktur.....	61
Abbildung 59:	Parameter beim Slicing - automatische Vorschläge für die Platzierung von Stützstrukturen.....	61
Abbildung 60:	Parameter beim Slicing - der Algorithmus meint es zu gut.....	62
Abbildung 61:	Tool zum Blockieren von Stützstrukturen in Cura	62
Abbildung 62:	Parameter beim Slicing - Blocken von Stützstrukturen im Schriftzug	63
Abbildung 63:	Parameter beim Slicing - Vorschau des Gcodes; nur T-Struktur wird abgestützt.....	63
Abbildung 64:	Parameter beim Slicing - kompliziertes Druckobjekt: Überhänge, sehr geringe Auflagefläche.....	64
Abbildung 65:	Parameter beim Slicing - Raft und Stützstrukturen.....	65
Abbildung 66:	Bedienelemente eines 3D-Druckers am Beispiel des Einstiegsdruckers renkforce RF100 V2	66
Abbildung 67:	Infoscreen.....	67
Abbildung 68:	Option Prepare.....	67
Abbildung 69:	Auto home.....	67
Abbildung 70:	Abstand Düse und Druckplatte einstellen - Papier als Hilfsmittel	68
Abbildung 71:	Menü Prepare.....	68
Abbildung 72:	Kalibriersequenz	68
Abbildung 73:	optimales Druckbild der ersten Schicht („first layer“)	69
Abbildung 74:	schlechtes Druckbild der ersten Schicht, Abstand Düse-Druckbett zu gering	70
Abbildung 75:	schlechtes Druckbild der ersten Schicht, Abstand Düse-Druckbett zu groß.....	71
Abbildung 76:	Video - 3D-Druck Workshop #3 Conrad Academy.....	71
Abbildung 77:	Filamenthalterung.....	72
Abbildung 78:	Schlauchhalterung	72
Abbildung 79:	Filament im Schlauch	72
Abbildung 80:	Move axis	73

Abbildung 81:	Move 1mm	73
Abbildung 82:	Move Z	73
Abbildung 83:	Z-Achse 20mm	73
Abbildung 84:	Filament einführen	73
Abbildung 85:	Preheat PLA	73
Abbildung 86:	Load filament	73
Abbildung 87:	Filament verschieben	73
Abbildung 88:	Print from SD	74
Abbildung 89:	Auswahl der Datei	74
Abbildung 90:	Infoscreen	74
Abbildung 91:	Druckbeginn des Einkaufswagen-Chips - erste Druckschicht	75
Abbildung 92:	Der erste 3D-Druck ist fertig!	75
Abbildung 93:	Foto des Kraftsensors ohne Haken - 6-Kant der Kraftaufnahme (2 unterschiedliche Bauformen)	81
Abbildung 94:	Aufnahme der flexiblen Würfel für Fallversuche; Montagevorschlag auf dem Sensor	81
Abbildung 95:	Vorschlag zum Versuchsaufbau: a) Konstruktion mit fischertechnik, b) Aufbau mit Stativmaterial	81
Abbildung 96:	Drei Infill-Raten im Vergleich: 5%, 15% und 30%	82
Abbildung 97:	Seitenaufprall bei 5% vs 15% Infill - für eine qualitative Auswertung	83
Abbildung 98:	Seitenaufprall bei 5% vs 15% Infill - Integralbildung für eine quantitative Auswertung	84
Abbildung 99:	direkter Aufprall auf den Sensor - Integralbildung für eine quantitative Auswertung.	85
Abbildung 100:	Infill-Muster mit 15% im Vergleich (Wabe und Zickzack). Vorschlag für weitere Messreihen	87
Abbildung 101:	Einstellungen für den Druck mit flexiblem Filament (Screenshot Cura)	88
Abbildung 102:	Foto des Kraftsensors ohne Haken - 6-Kant der Kraftaufnahme (2 unterschiedliche Bauformen)	94
Abbildung 103:	Vorschlag zum Versuchsaufbau: a) Konstruktion mit fischertechnik, b) Aufbau mit Stativmaterial	94
Abbildung 104:	a) Beginn des Drucks; 1. Ebene mit Füllung b) Füllung eines Würfels mit 2cm Kantenlänge; Blick von schräg oben	95
Abbildung 105:	Vergleich der Kollisionen: grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 5% Infill	97
Abbildung 106:	Vergleich der Kollisionen: grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 15% Infill	98
Abbildung 107:	Integral - Vergleich der Raumlage grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 5% Infill	99
Abbildung 108:	Integral - Vergleich der Raumlage grün - Oberseite; rot: Seitenfläche, 15% Infill	99
Abbildung 109:	Integral - Aufprall der Kugel direkt auf den Sensor - Fallhöhe 10,1cm	100
Abbildung 110:	Einstellungen für den Druck mit flexiblem Filament (Screenshot Cura, Version	103
Abbildung 111:	Messobjekt für zerstörende Materialprüfung stehend und liegend gedruckt	107
Abbildung 112:	Freihandexperiment: Der zu untersuchende 3D-Druck ist im Schraubstock eingespannt - hier wird bereits mit einer Kraft von 6.7 N gezogen	109
Abbildung 113:	Bruchtest mit stehend bzw. liegend gedrucktem Quader	110
Abbildung 114:	Kräfte bei der Zerreißprobe (Zug, Drehmoment)	111
Abbildung 115:	Freihandexperiment: Der zu untersuchende 3D-Druck ist im Schraubstock eingespannt - hier wird bereits mit einer Kraft von 6.7 N gezogen	112
Abbildung 116:	Zeitlicher Verlauf der Emissionen bei Druck mit rotem PLA (Hersteller „c“) mit einem Drucker ohne Einhausung. Druckzeit 44min. Fehlerbalken geben Standardfehler des Mittelwertes an. Quelle: Zhang, Wong et al. (2017), ergänzendes Material, S. 10, Abbildung 3	117

Abbildung 117:	Partikelanzahl (TP) pro Gramm des Druckobjekts, Drucker ohne Einhausung im Vergleich unterschiedlicher Filamentarten und -hersteller. Quelle Zhang, Wong et al. (2017), ergänzendes Material, S. 19. Die Filamenthersteller wurden mit Kleinbuchstaben durchnummeriert, Druckerhersteller mit Großbuchstaben; es werden keine Herstellerangaben im Klartext gegeben.	118
Abbildung 118:	Maximale Partikelemission (Anzahl) aller Testläufe (Kombination unterschiedlicher Bauformen, Materialien, Filementhersteller, Farben) im Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien und der von Tests mit Laserdruckern. Boxplot mit Median und Quartilen; Antennen geben minimale und maximale absolute Partikelzahlen pro cm ³ an. N gibt die Anzahl der Datensätze für den jeweiligen Boxplot an. Quelle Zhang, Wong et al. (2017:1283), Abbildung 10.....	119