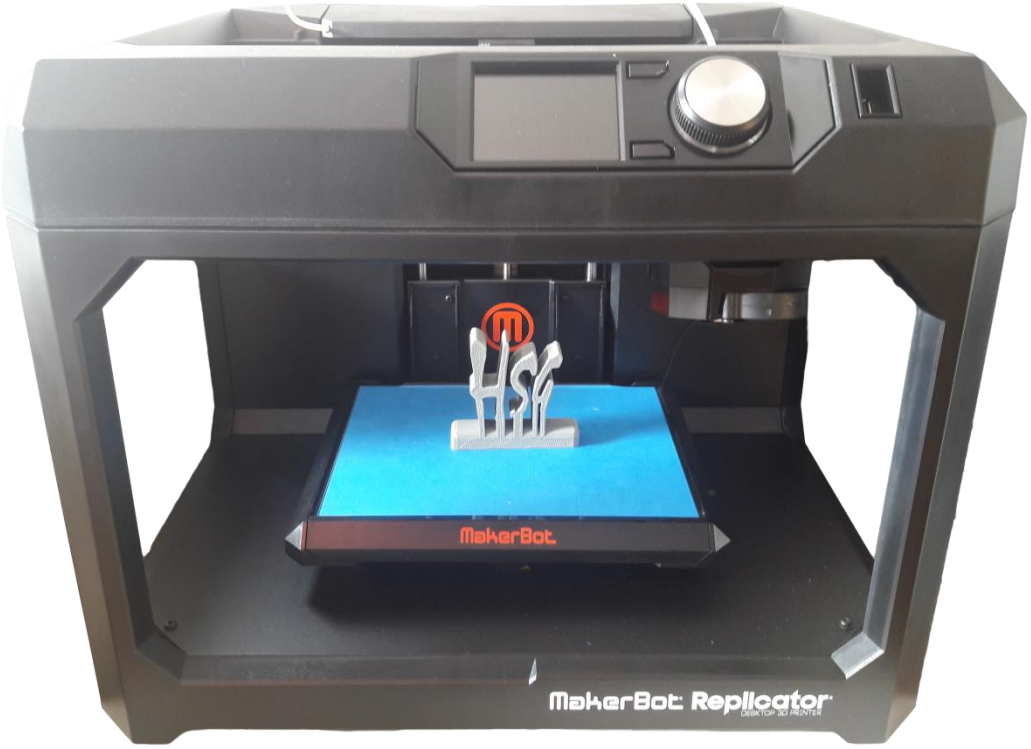
Stand: 11.12.2017

HSG-NÜRNBERG

3D-DRUCK – FERTIGUNGSTECHNIK DER ZUKUNFT



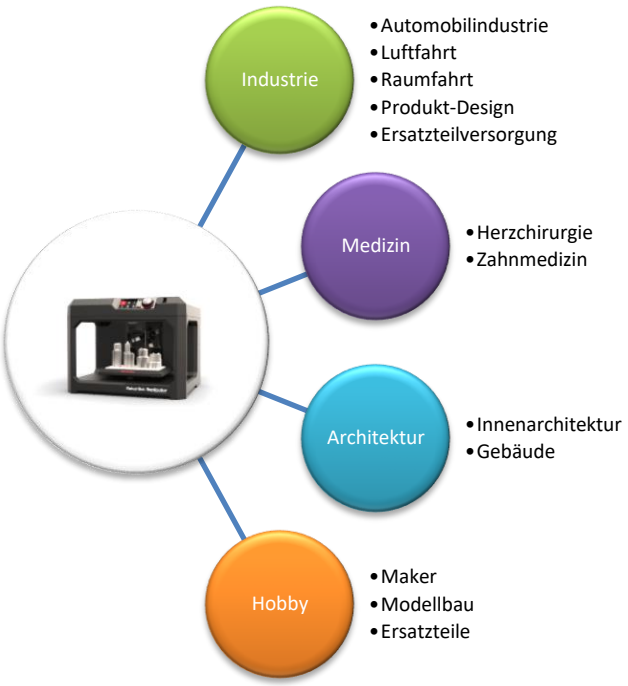
Skript zum Wahlkurs „3D-Druck“ im Schuljahr 2017/18 | Stefan Kraus

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
1. 3D-Druck überall – Anwendungsgebiete 3
2. Druckverfahren 3
2.1. 3D-Druck mit Pulver (3DP) 3
2.2. 3D-Druck mittels geschmolzenen Materialien 4
2.3. 3D-Druck mit flüssigen Materialien 4
3. Workflow 5
3.1. Slicen 6
3.2. Drucken 7
4. Software 7
4.1. CAD-Programm 7
4.2. Slicer 8
4.3. Slicer - Druckerparameter 9
4.4. Interessante Programme 11
5. Hardware 12
5.1. Filament 12
5.2. Extruder 12
5.3. Druckbett 12
5.4. Weitere Hilfsmittel (3D-Maus…) 12
6. Aufgaben 13
Aufgabe 1: Hausbau in TinkerCAD 13
Aufgabe 2: Einkaufs-Chips in TinkerCAD 13
Aufgabe 3: Plätzchenformen 13
7. FAQ 13

1. 3D-Druck überall – Anwendungsgebiete

Es gibt viele Anwendungsgebiete des 3D-Drucks:



- Prototypenbau
- Druck von Gussformen aus einem Stück
- Modelle für Windkanaltests – auch bei komplexen Computerprogrammen noch immer unersetzbar
- Herstellung von Zahnprothesen aus Metall
- Herstellung von Grundgerüsten für Herzklappen – darauf angesiedelte Zellen wachsen zu einer neuen Herzklappe heran, die so gut ist wie eine menschliche.
- Architektur „begreifen“

2. Druckverfahren

2.1. 3D-Druck mit Pulver (3DP)

Grundlage: Pulver, verklebt mit Bindemittel

Schicht für Schicht wird Bindemittel wie bei einem Tintenstrahldrucker hinzugefügt, anschließend eine hauchdünne neue Pulverschicht aufgetragen.

2.1.1. Selective Laser Sintering (SLS) – Selektives Laserschmelzen

Grundlage: Pulver, per Laser verschmolzen

Ähnlich wie 3DP Verfahren, das Pulver wird allerdings miteinander verschmolzen. Materialien können auch Metalle, Keramiken und Sand sein.

Video: https://www.youtube.com/watch?v=wD9-QEo-qDk

Video: 3D-Druck bei Audi: https://youtu.be/vKJdZtxOBg4

2.1.2. Electron Beam Melting, Electron Beam Additive Manufacturing Elektronenstrahlschmelzen (EBM/EBAM)

Beim Elektronenstrahlschmelzen werden nach einem ähnlichen Prinzip, pulverförmige Metalle über einen gut steuerbaren Elektronenstrahl unter Vakuum verschmolzen. Das Vakuum verhindert einen Einschluss von Sauerstoff in das Objekt. Dadurch entstehen sehr feste metallische Objekte, die über einen komplexen Aufbau verfügen können. Das Verfahren ermöglicht auch das Verarbeiten von Metallen mit einem höheren Schmelzpunkt wie beispielsweise Titan. Zwar erreichen EBM Geräte üblicherweise eine schlechtere Auflösung als SLS Geräte, dafür ist der Druckvorgang um einiges schneller.

Video: https://www.youtube.com/watch?v=M_qSnjKN7f8

2.2. 3D-Druck mittels geschmolzenen Materialien

Fused Filament Fabrication (FFF), Schmelzschichtung (z. B. FDM – Fused Deposition Modeling)

Grundlage: Geschmolzener Kunststoff (PLA, ABS, …)

Vom Prinzip her funktionieren diese Drucker wie eine Heißklebepistole, deren Position und Materialtransport vom Computer gesteuert werden. Auch hier wird das Modell Schicht für Schicht aufgebaut. Ist eine Schicht genügend abgekühlt, wird die zweite darauf aufgebaut. Um bei Überhängen nicht in die Luft drucken zu müssen, werden (automatisch oder manuell) Stützstrukturen hinzugefügt.

Video: https://www.youtube.com/watch?v=WHO6G67GJbM

2.3. 3D-Druck mit flüssigen Materialien

Der 3D-Druck mit flüssigen Materialien beruht darauf, dass

2.3.1. Stereolithografie (STL, SLA)

TODO

2.3.2. Digital Light Processing (DLP)

TODO

2.3.3. Multi Jet Modeling (MJM), Polyjet Verfahren

TODO

2.3.4. Film Transfer Imaging Verfahren (FTI)

TODO

Vertiefte Informationen finden sich unter https://3druck.com/grundkurs-3d-drucker/teil-2-uebersicht-der-aktuellen-3d-druckverfahren-462146/ .

3. Workflow

Modellieren

Design	Download	Scan
•per CAD-Programm	•Online-Portale wie Thingiverse mit fertigen Modellen	•3D-Scanner, Apps oder per Drohne

Zunächst muss ein 3D-Modell erstellt werden. Üblicherweise verwendest du dafür ein CAD-Programm (siehe 4.1 CAD-Programm). Darin kannst du quasi alle Formen erstellen, Maße eingeben und den Entwurf genau betrachten, bevor du ihn zum Druck gibst.

Es muss aber nicht immer das Rad neu erfunden werden. Online-Portale wie z. B. www.thingiverse.com bieten eine Vielzahl an Modellen, die von anderen 3D-Druck-Begeisterten erstellt wurden. Diese können heruntergeladen, gedruckt, bewertet, kommentiert und verbessert werden. Auch kannst du ein Foto von deinem Ausdruck und eigene Entwürfe hochladen.

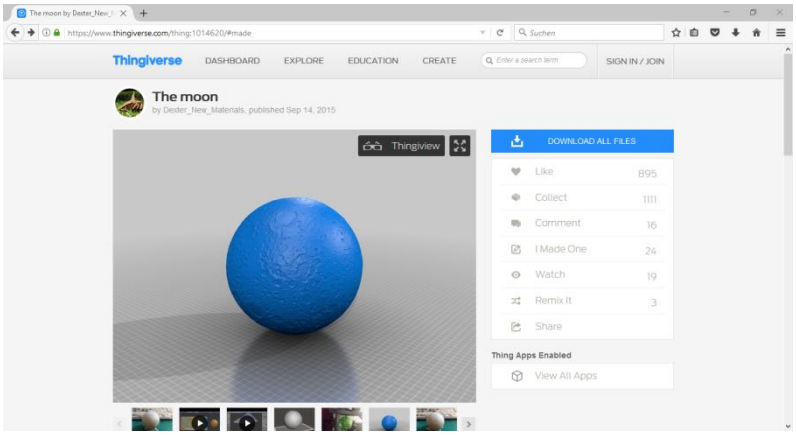


Abbildung 1: Der Mond als Modell bei thingiverse.com[1]

Soll eine bestehende Figur bearbeitet oder einfach erneut ausgedruckt werden, kann man sie mit einem 3D-Scanner einscannen. Üblicherweise steht die Figur dabei auf einer drehbaren Plattform und wird viele Male fotografiert. Dabei werden mit einem Laser Linien über die Figur gelegt. Aus den Bildern kann per Software ein 3D-Modell berechnet werden.

BILD 3D-Scanner

Diese Scanner gibt es nicht nur für kleine Figuren, beliebt sind auch Scanner für ganze Menschen. Dafür benötigt man viele Kameras, die gleichzeitig ein Foto aufnehmen. Aus diesen Bildern wird das

[1] Screenshot der Website https://www.thingiverse.com/thing:1014620, aufgerufen am 23.09.2017

3D-Modell errechnet. Der Hardware-Einsatz ist hierbei recht hoch, so dass ein Scanner wie in Abbildung 2 etwa mit 10 000 € Materialkosten zu Buche schlägt.

Abbildung 2: 3D-Scanner für Personen[2]

Wenn es noch ein bisschen mehr sein darf, können Häuser, Industrieanlagen oder landwirtschaftlich genutzte Felder mit einer Drohne von oben abfotografiert und anschließend als 3D-Modell dargestellt werden. Ein Programm dafür wäre beispielsweise Autodesk RECAP.

3.1. Slicen

Das 3D-Modell kann vom Drucker noch nicht direkt verarbeitet werden. Das Modell wird in einer weiteren Software auf dem Druckbett platziert. Es können auch mehrere Modelle gleichzeitig gedruckt werden. Dann werden Einstellungen wie Schichtdicke, Druckgeschwindigkeit und Infill (siehe TODO) angepasst. Ist alles eingetragen, beginnt der Vorgang des „Slicings“. Dabei wird das Modell in Schichten zerlegt, das Infill berechnet und die Bewegungen des Extruders möglichst optimal ausgelegt. Die Kommandos für den Drucker werden als sogenannter „G-Code“ abgespeichert.

[2] Quelle: http://www.pi3dscan.com/images/scanner.jpg, aufgerufen am 11.12.2017

```
;Generated with Cura_SteamEngine 15.01
; Default start code
G28 ; Home extruder
G1 Z15 F100
M107 ; Turn off fan
G90 ; Absolute positioning
M82 ; Extruder in absolute mode
; Activate all used extruder
M104 T0 S210
G92 E0 ; Reset extruder position
; Wait for all used extruders to reach temperature
M109 T0 S210
;Layer count: 159
;LAYER:0
M107
G0 F9000 X28.246 Y60.863 Z0.300
G0 X28.031 Y61.039
;TYPE:SKIRT
G1 F1800 X28.246 Y60.863 E0.01386
G1 X29.220 Y60.410 E0.06745
G1 X29.988 Y60.131 E0.10822
G1 X30.102 Y60.097 E0.11415
G1 X30.322 Y60.013 E0.12590
G1 X31.027 Y59.868 E0.16181
G1 X31.156 Y59.820 E0.16868
G1 X31.911 Y59.691 E0.20689
G1 X32.075 Y59.691 E0.21507
G1 X32.504 Y59.637 E0.23665
G1 X32.947 Y59.624 E0.25876
G1 X37.935 Y59.632 E0.50761
G1 X43.812 Y59.629 E0.80081
G1 X46.920 Y59.638 E0.95587
   X50.353 Y59.643 E1.12715
   54.437 Y59.644 E1.82980
   841 Y59.628 E2.04952
```

Abbildung 3: Die ersten Zeilen des G-Codes für den Druck einer Handyhülle (insg. 221 770 Zeilen)

3.2. Drucken

4. Software

4.1.CAD-Programm

CAD steht für **C**omputer **A**ided **D**esign. Mit CAD-Programmen erstellt man 3D-Modelle. Je nach Anwendung gibt es für jeden das richtige Programm, von der kostenlosen OpenSource Freeware bis hin zum aufwendigen, teuren Programmen für Ingenieure, Architekten usw.

4.1.1. Autodesk TinkerCad

Für die ersten Erfahrungen in der 3D-Modellierung eignet sich dieses kostenlose Tool, das sogar in deinem Browser (=Firefox, Edge, Safari, Opera…) läuft. Du findest es nach einer kostenlosen Registrierung unter www.tinkercad.com/

Abbildung 4: Workflow unter TinkerCad: Elementare Formen werden zu einem neuen großen Ganzen kombiniert[3]

4.1.2. Autodesk Inventor Professional 2018

Dir soll hier ein Einblick in Techniken vermittelt werden, die auch in der Industrie eingesetzt werden. Daher verwenden wir *Inventor Professional 2018* des Herstellers *Autodesk*. Diese Software hat normalerweise einen Preis über 2000 € im Jahr[4], ist für Bildungszwecke aber kostenlos. Dafür muss man sich kostenlos bei *Autodesk* registrieren.

Die Software ermöglicht neben dem Erstellen von dreidimensionalen Zeichnungen auch die anspruchsvolle graphische Darstellung bis hin zu physikalischen Simulationen.

4.2. Slicer

Genau genommen ist der Slicer ein Programm, das das vorhandene 3D-Modell in Schichten zerlegt und die Wege des 3D-Druckers berechnet. Dieses Programm wird in Benutzerumgebungen eingebaut, so dass sie für uns komfortabel bedienbar sind. Der Einfachheit halber bezeichnen wir hier auch diese Benutzerumgebungen als Slicer.

4.2.1. MakerBot Print

Bei der Verwendung eines 3D-Druckers der Firma *MakerBot* bietet es sich an, die hauseigene Software *MakerBot Print* zu verwenden. Diese Programme nutzen wir auch im Unterricht. Der Slicing-Vorgang kann relativ einfach eingeleitet werden, indem voreingestellte Templates genutzt werden. Die fertigen Daten lassen sich per LAN oder USB an den Drucker senden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Dateien auf einem USB-Stick zum Drucker zu transportieren. Während dem Druck werden die aktuellen

4.2.2. Repetier-Host

[3] Screenshot der Website https://www.tinkercad.com, aufgerufen am 09.09.2017
[4] Quelle: http://www.cad-ausbildung.de/inventor-lizenz-preis.htm, aufgerufen am 05.09.2017

4.3. Slicer - Druckerparameter

4.3.1. Raft

Das *Raft* (engl. für Fundament) ist eine Filamentschicht, die unter das Objekt gedruckt wird, um die Auflagefläche zu vergrößern. Dadurch wird die Haftung des Objekts vergrößert und es kann gegen Warping (siehe ToDo) vorbeugen. Es lässt sich nach dem Druck recht einfach vom Modell abbrechen.

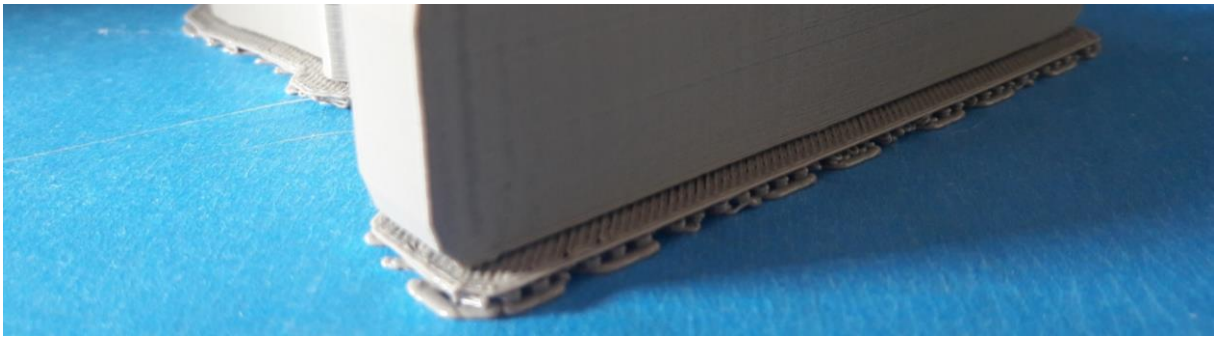


Abbildung 5: Raft unter einem Objekt

4.3.2. Skirt & Brim

Der *Skirt* (engl. „Rock“) umgibt das Objekt, ohne es zu berühren. Dadurch wird eine gleichmäßige Extrusion des Filaments zu Beginn des Drucks gefördert. Zudem können eventuelle Verunreinigungen an der „Nozzle“ (Düse des Extruders) abgestreift werden.

Der *Brim* (engl. „Krempe“) verbreitert die Basis des Objekts. Dadurch wird, ähnlich wie beim Raft, eine größere Auflagefläche und Haftung des Modells am Druckbett herbeigeführt. Im Gegensatz zum Raft werden hier jedoch wesentlich weniger Material und Zeit benötigt.

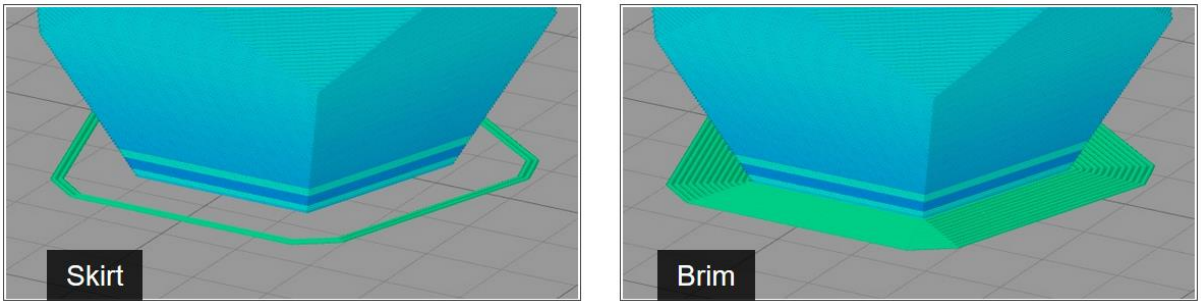


Abbildung 6: Skirt und Brim bei der Druckvorschau einer Vase[5]

4.3.3. Schichtdicke (layer height)

Die Schichtdicke macht sich in erster Linie bei runden Formen bemerkbar. Je höher die einzelnen Schichten sind, desto „eckiger“ sieht der Ausdruck aus. Die höchste Auflösung des MakerBot Replicator 5th Generation beträgt $0{,}1\ mm$ Schichthöhe, dies entspricht $100\ \mu m$.

[5] Quelle: https://www.simplify3d.com/support/articles/rafts-skirts-and-brims/ aufgerufen am 24.10.2017

Abbildung 7: Vergleich von zwei Ausdrucken mit verschiedener Auflösung[6]

4.3.4. Infill

Beim 3D-Druck größer Körper würde sehr viel Material verbraucht werden, wenn alle Hohlräume komplett mit Filament aufgefüllt werden würden. Daher lässt man mit dem Slicer eine gleichmäßige Struktur berechnen. Als Parameter lässt sich der prozentuale Grad des Infills übergeben (siehe Abbildung 8).

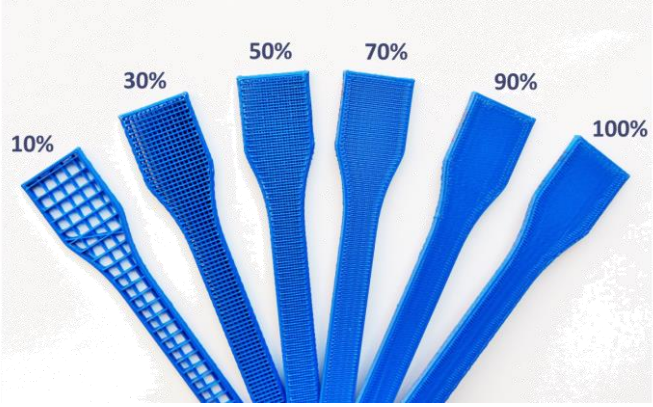


Abbildung 8: Infill verschiedenen Grades[7]

Die Entwickler der Slicer haben sich interessante, teils kuriose Muster ausgedacht. Abbildung 9 zeigt einige davon.

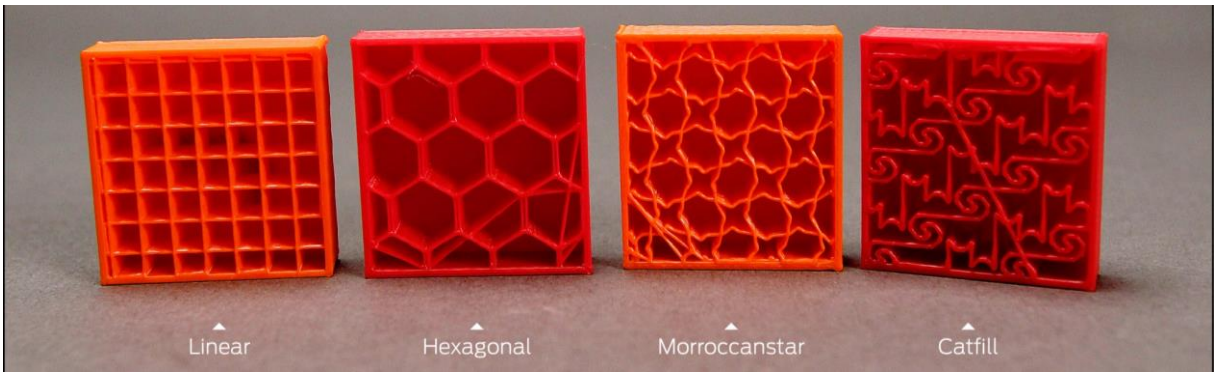


Abbildung 9: Verschiedene Infill-Muster von MakerBot-Print

[6] Quelle: https://www.sculpteo.com/blog/wp-content/uploads/2015/04/IMG_1476.jpg, 09.12.2017
[7] Quelle: http://www.3deee.ch/wp-content/uploads/2015/06/infillpercentimage.png, 10.12.2017

4.3.5. Drucktemperatur

Jedes Filament hat seinen eigenen Temperaturbereich, in dem es sich drucken lässt. Die beste Drucktemperatur hängt aber noch von weiteren Parametern wie der Druckgeschwindigkeit und der Beschaffenheit des Extruders ab.

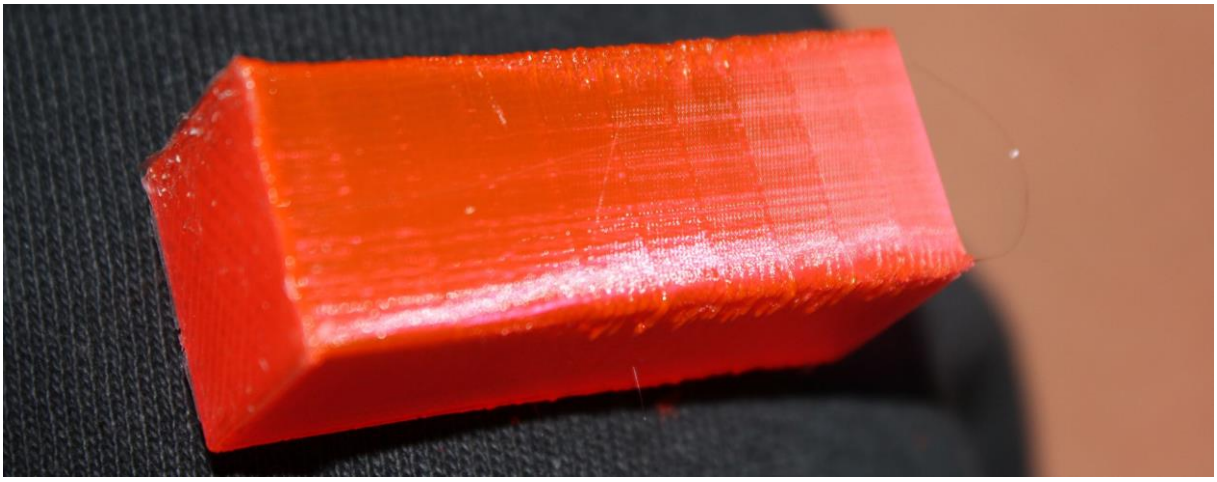


Abbildung 10: Druck mit verschiedenen Temperaturen von 250°C (links) bis 205°C (rechts) in Schritten von 5°C[8]

4.3.6. Geschwindigkeit

Auch bei der Geschwindigkeit muss man für seine Drucker-Filament-Kombination einen guten Wert finden. Hier gilt: Je langsamer, desto besser werden Kanten und Ecken gedruckt. Natürlich dauert der Druck dann aber auch entsprechend schneller.

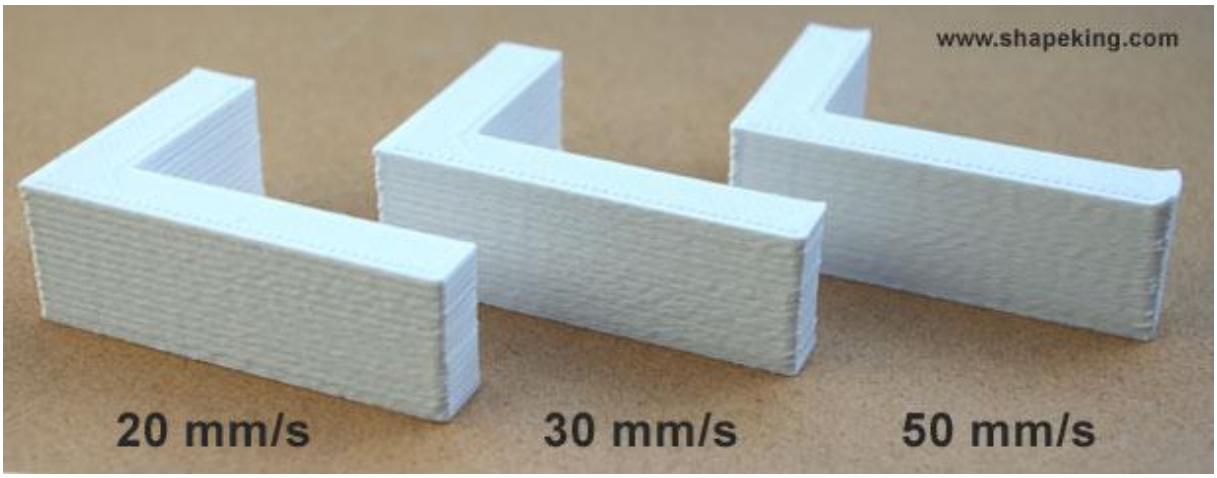


Abbildung 11: Das selbe Objekt, verschiedene Druckgeschwindigkeiten[9]

4.3.7. Überhänge / Support

4.3.8. Kalibrieren

4.4. Interessante Programme

4.4.1. Cookie-Caster

Zu Weihnachten steht Plätzchen-backen hoch im Kurs. Es bietet sich an, selbst Ausstechförmchen zu gestalten. Dies kann man einerseits durch 3D-Modellierung im CAD-Programm geschehen.

[8] Quelle: http://www.3d-druck-community.de/attachment.php?aid=2007, aufgerufen am 24.10.2017
[9] Quelle: http://www.shapeking.com/images/cms-print-speed-1.jpg, aufgerufen am 11.12.2017

Andererseits bietet das Online-Tool „Cookie-Caster“ eine einfache Möglichkeit, Plätzchen-Formen zu generieren.
http://www.cookiecaster.com/

4.3.2 Lightopane

TODO

http://3dp.rocks/lithophane/

5. Hardware

Im weiteren Verlauf wird näher 3D-Drucker eingegangen, die geschmolzenes Filament verwenden.

5.1. Filament

Als Filament bezeichnet man die Materialien, aus denen der Drucker das Modell aufbaut. Je nach verwendetem Extruder benötigt man es in der Stärke 1,75 mm oder 2,85 mm. Es wird auf Rollen aufgewickelt in verschiedenen Größen verkauft, üblich sind 0,5 kg oder 1,0 kg.

Am meisten verbreitet ist hier PLA (Polylactide), das zu den Polyestern gehört. Es ist ein regenerativer Kunststoff, der beispielsweise aus Maisstärke gewonnen wird. [10]

ABS

Weitere Gemische

Lagerung / aufbacken?

5.2. Extruder

5.3. Druckbett

Das Druckbett ist eine möglichst ebene Platte, auf die das Modell gedruckt wird. Hierfür werden üblicherweise Glasplatten oder Spiegel eingesetzt. Zur Erhöhung der Haftung wird die Glasplatte mit Klebeband oder speziellen Oberflächen präpariert werden.
Tipp: Sehr gut eignet sich blaues Malertape

Sollte sich das Druckmaterial dennoch vom Druckbett ablösen (durch das Abkühlen und Zusammenziehen der Schichten) lässt sich

5.4. Weitere Hilfsmittel (3D-Maus…)

Sehr praktisch beim Modellieren in einem CAD-Programm ist eine ***3D-Maus***. Diese ist zum Drehen und Verschieben der Ansicht da und wird zusätzlich zur normalen Maus in die andere Hand genommen. Der Workflow wird so noch intuitiver.

[10] Quelle: https://www.filamentworld.de/3d-druck-wissen/was-ist-pla/, aufgerufen am 10.09.2017

6. Aufgaben

Aufgabe 1: Hausbau in TinkerCAD

Starte dein erstes Projekt in TinkerCAD. Nach dem Login kannst du verschiedene Grundformen („Primitiven“) kombinieren. Baue so ein kleines Haus. Experimentiere mit den verschiedenen Blickwinkeln und Parametern. Probiere auch aus, was passiert, wenn du Formen addierst bzw. subtrahierst. Sei beliebig kreativ und füge Schornstein, Fenster und einen Garten mit Bäumen hinzu.

Aufgabe 2: Einkaufs-Chips in TinkerCAD

Erstelle einen Einkaufschip mit deinem eigenen Design in TinkerCAD. Gehe wie folgt vor:

a) ***Messe*** mit einem Messschieber ein 1 €-Stück aus.
b) ***Modelliere*** anhand der Messwerte einen Rohling in TinkerCAD.
c) ***Subtrahiere*** vom Rohling gewünschte Formen oder Texte, um dem Einkaufs-Chip dein eigenes Design zu geben.

Aufgabe 3: Plätzchenformen

Modelliere eine individuelle Plätzchen-Form. Fertige zunächst eine detaillierte Zeichnung an und übernimm diese ins digitale Heft. Achte auf optimiertes Design für Druck und Anwendung.
Zusatzaufgabe: Statte deine Plätzchenform mit einem „Auswerfer“ aus.

7. FAQ

***F**requently **A**sked **Q**uestions*

Woher bekommt man einen 3D-Drucker und das Filament?
Die junge Branche „3D-Druck“ ist noch recht speziell. Daher gibt es bisher nur wenige Geschäfte, in denen man sich Drucker, Filament und Zubehör vor Ort ansehen kann. Der Vertrieb geschieht hauptsächlich über das Internet. Dort findet sich allerdings inzwischen ein reichhaltiges Angebot von vielen Herstellern.

Wie viel kostet ein eigener Drucker?
Bausätze beginnen bei ca. 500 €. Dafür sollte man allerdings ein bisschen Liebe zum Schrauben und Löten mitbringen. Noch günstiger kann es gehen, wenn man die Kunststoffteile selbst ausdruckt (siehe RepRap) und die restlichen Teile selbst besorgt. Anleitungen stehen dafür gut dokumentiert im Internet zur Verfügung. Soll es eher die „plug&play“-Lösung sein, muss man etwas mehr Geld investieren. Unter 1000 € gibt es allerdings inzwischen schon sehr gute Produkte, die vor einiger Zeit noch zwischen 2000 € und 4000 € gekostet haben.

Wie sieht es mit den laufenden Kosten aus?
Filament ist zwar erst einmal nicht ganz günstig, hält dafür aber auch sehr lange. Ein Kilogramm kostet meist zwischen 20 € und 55 €, während ein einzelner Ausdruck oft nur wenige Gramm wiegt. Es ergeben sich pro Ausdruck daher meist Kosten von maximal 2,00 €.

Ich würde gerne nach dem Wahlkurs weiterhin 3D-Druck betreiben, möchte aber keinen Drucker kaufen. Geht das?
Ja! In jeder größeren Stadt gibt es inzwischen ein sogenanntes „FabLab“. Dies ist meist ein kleiner Verein von technikbegeisterten „Makern“. Dort gibt es eine Vielzahl von Geräten und Werkzeugen

(auch CNC-Fräsen, Laser-Cutter…) und Experten, die dir gerne helfen. Die Geräte lassen sich meist zu günstigen Konditionen mieten