

Teamprojektarbeit:

Open Source Rapid Prototyping – Präzisionsmessungen anhand des Ultimakers

Eva Gradl, Florian Horsch, Mariella Kraus, Marcel Mahler



Teamprojektarbeit:

Open Source Rapid Prototyping – Präzisionsmessungen anhand des Ultimakers

Eva Gradl, Florian Horsch, Mariella Kraus, Marcel Mahler

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Rössel

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper, Dr.-Ing. Stefan Freiberger, Dipl.-Ing. Christian Rössel

Beginn: 25. Mai 2011

Abgabe: 21. November 2011

Danksagungen

Unser besonderer Dank geht an folgende Personen und Unternehmen:

- Die Gründer und Mitarbeiter von Ultimaker Ltd.¹, namentlich: Erik de Bruijn, Martijn Elserman, Siert Wijnia und Harma Woldhuis für ihre außergewöhnliche Unterstützung unserer Arbeit.
- Paul Candler für den freundschaftlichen Erfahrungsaustausch und seine Arbeit im Bereich der von ihm entwickelten Netfabb Engine Druckprofile.
- Netfabb GmbH², insbesondere Alexander Oster und Carl Fruth für die erfolgreiche Zusammenarbeit.
- Erik van der Zalm und Bernhard Kubicek, Matthijs Keuper und Bradley Feldman für ihre Arbeit hinsichtlich der Ultimaker-spezifischen Anpassung³ der Marlin Firmware.
- Der gesamten Ultimaker Community⁴ für den gemeinsamen Erfahrungsaustausch und die unzähligen gegenseitigen Hilfestellungen.
- Dr.-Ing. Bernd Rosemann für die Bereitstellung eines praxisnahen Testkörpers sowie seiner hilfreichen Anmerkungen bezüglich der Messergebnisse.
- Unseren fleißigen Korrekturlesern Johanna Flick und Uwe Mahler.
- Dem gesamten Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik⁵ der Universität Bayreuth, der die Umsetzung des Projektes erst ermöglichte.
- Und insbesondere unseren Betreuern Dr.-Ing. Stefan Freiberger und Dipl.-Ing. Christian Rössel für die großartige Unterstützung.

¹ Ultimaker Ltd.: <http://ultimaker.com> (16.11.2011)

² Netfabb GmbH.: <http://www.netfabb.com> (16.11.2011)

³ Github „bkubicek / Marlin“: <https://github.com/bkubicek/Marlin> (16.11.2011)

⁴ Ultimaker Google Group: <http://groups.google.com/group/ultimaker> (16.11.2011)

⁵ Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik: <http://www.lup.uni-bayreuth.de> (16.11.2011)

Erklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel verwendet haben. Wörtlich oder sinngemäß übernommene Ausführungen sind als solche gekennzeichnet.

Bayreuth, den 21. November 2011

.....
Eva Gradl

.....
Florian Horsch

.....
Mariella Kraus

.....
Marcel Mahler

Abstract

Im Rahmen einer Teamprojektarbeit zum Thema „Open Source Rapid Prototyping“ am Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth hat unser Team zahlreiche Messungen durchgeführt, um eine Aussage über die Druckgenauigkeit des 3D-Druckers „Ultimaker“ treffen zu können. Mit Hilfe der Ergebnisse wurden Vergleiche zwischen den Soll- und Istwerten der nach dem Fused Deposition Molding Verfahren gedruckten Bauteile gezogen und mögliche Ursachen für die vorhandenen Fertigungstoleranzen abgeleitet. Die auffälligen Abweichungen in x- und y-Richtung sind vor allem durch die Massenträgheit der bewegten Hardwarekomponenten, fehlerhaft berechneter Motorschrittzahlen sowie unvorteilhaftes Materialverhalten bedingt. Andererseits sind mit dem Ultimaker minimale Schichtstärken erreichbar, welche die in der Fachliteratur genannten Kennzahlen deutlich unterschreiten. Zur Beseitigung der genannten Toleranzen, sowie der allgemeinen Optimierung der Druckergebnisse werden abschließend zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten vorgeschlagen.

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung.....	1
A. Rapid Prototyping Verfahren.....	2
1. 3D-Printing	2
2. 3D-Printing / PatternMaster™	4
3. Fused Deposition Modeling	6
4. Layer Lamine Manufacturing (Schicht-Laminat-Verfahren)	9
5. Selective Laser Sintering	12
6. Stereolithografie (Photopolymerisation).....	15
B. Open Source Rapid Prototyping Anlagen - RepRap	18
1. Historischer Überblick	18
2. Prinzipieller Arbeitsablauf des RepRap	19
3. RepRap-Modellversionen	20
II. Ultimaker.....	21
A. Aufbau.....	21
1. Rahmen	22
2. X-, Y- und Z-Motoren	25
3. X- und Y-Achsen.....	27
4. Druckkopf.....	30
5. Z-Plattform	33
6. Extrudereinheit.....	37
7. Anbau der Elektronik.....	39
B. Konfiguration / Optimierungen	41
1. Hardware	41
2. Software.....	43

C.	Testreihen	47
1.	Genauigkeit in X-,Y- und Z-Richtung	48
2.	Rundungen/Bohrungen	51
3.	Überhänge	54
4.	Druckkopfbewegung	56
III.	Schlussfolgerung	59
IV.	Ausblick	61
V.	Quellen	64
A.	Literaturverzeichnis	64
B.	Abbildungsverzeichnis	67
VI.	Anhang	70

Stichwortverzeichnis:

Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)

„Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat (Kurzzeichen ABS) ist ein synthetisches Terpolymer aus den drei unterschiedlichen Monomerarten Acrylnitril, 1,3-Butadien und Styrol und gehört zu den amorphen Thermoplasten.“⁶

CAD (computer-aided design):

Bezeichnung eines rechnerunterstützten Programmes zur Erstellung eines virtuellen 3D-Objektes.⁷

EEPROM

„EEPROM (engl. Abk. für *electrically erasable programmable read-only memory*, wörtlich: *elektrisch löschbarer programmierbarer Nur-Lese-Speicher*, auch E²PROM) ist ein nichtflüchtiger, elektronischer Speicherbaustein, der unter anderem in der Computertechnik und dort hauptsächlich in eingebetteten Systemen eingesetzt wird.“⁸

Endstop

Taster an den Enden der Achsen, die dafür sorgen, dass der Druckkopf zum Stehen kommt, wenn er die Clips berührt.⁹

Epoxydharz

„Ein Epox[y]dharz (Kurzzeichen EP) besteht aus Polymeren (*Polyether*), die je nach Reaktionsführung unter Zugabe geeigneter Härter einen duroplastischen Kunststoff von hoher Festigkeit und chemischer Beständigkeit ergeben.“¹⁰

⁶ Vgl. „ABS“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Acrylnitril-Butadien-Styrol> (16.11.2011)

⁷ Vgl. „CAD“: http://de.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design (14.11.2011)

⁸ Vgl. „EEPROM“: <http://de.wikipedia.org/wiki/EEPROM> (14.11.2011)

⁹ Vgl. „Cupcake Endstop Installation“: <http://wiki.makerbot.com/cupcake-cnc-10:cupcake-endstop-installation> (17.11.2011)

¹⁰ Vgl. „Epoxydharz“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Epoxydharz> (14.11.2011)

Extruder

„Extruder sind Fördergeräte, die nach dem Funktionsprinzip des Schneckenförderers feste bis dickflüssige Massen unter hohem Druck und hoher Temperatur gleichmäßig aus einer formgebenden Öffnung herauspressen. Dieses Verfahren wird als Extrusion bezeichnet.“¹¹

Feed Rate

„Feed Rate“ ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Druckkopf bewegt, wenn Material ausgegeben wird.¹²

Firmware

„Unter Firmware (von engl. „firm“ = fest) versteht man Software, die in elektronische Geräte eingebettet ist. [...] Der Begriff leitet sich davon ab, dass Firmware funktional fest mit der Hardware verbunden ist, was bedeutet, dass das eine ohne das andere nicht nutzbar ist. Sie nimmt eine Zwischenstellung zwischen Hardware [...] und der Software [...] ein.“¹³

G-Code

„Der Satz- und Adressaufbau der zu übermittelnden numerischen Steuerungs-Informationen ist in der Norm DIN 66025/ISO 6983, meist kurz DIN/ISO-Programmierung [bzw. G-Code] genannt, beschrieben.“¹⁴

Hardware

„Hardware [...] ist der Oberbegriff für die mechanische und elektronische Ausrüstung eines Systems z. B. eines Computersystems.“¹⁵

Inertgas

„Als Inertgase bezeichnet man Gase, die sehr reaktionsträge (*inert*) sind, sich also an nur wenigen chemischen Reaktionen beteiligen.“¹⁶

¹¹ Vgl. „Extruder“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Extruder> (14.11.2011)

¹² Vgl. „Configuring Skeinforge: Some Basic Terms...“: <http://davedurant.wordpress.com/2010/10/17/configuring-skeinforge-some-basic-terms/> (17.11.2011)

¹³ Vgl. „Firmware“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Firmware> (14.11.2011)

¹⁴ Vgl. „Computerized Numerical Control“: http://de.wikipedia.org/wiki/Computerized_Numerical_Control (14.11.2011)

¹⁵ Vgl. „Hardware“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hardware> (14.11.2011)

¹⁶ Vgl. „Inertgas“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Inertgas> (14.11.2011)

Kalibrierung

„Kalibrierung (auch Kalibration) in der Messtechnik ist ein Messprozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes oder einer Maßverkörperung zu einem anderen Gerät oder Maßverkörperung, das in diesem Fall als Normal bezeichnet wird.“¹⁷

MakerBot

Der MakerBot ist ein Open Source Rapid Prototyping 3D-Drucker des Unternehmens MakerBot Industries.¹⁸

Microstepping

Bei den Schrittmotoren kann ein Vollschrift in bis zu 16 Microschritte („Microsteps“) unterteilt werden. Durch dieses Microstepping erreicht man genauere Ergebnisse.¹⁹

Oozing

„Oozing“ beschreibt das unkontrollierte „Herausquillen“ von Material aus der Druckkopfspitze.²⁰

Open Source

Unter Open Source Software versteht man eine Software, die „in einer für den Menschen lesbaren und verständlichen Form“²¹ vorliegt. Sie „darf [sowohl] beliebig kopiert, verbreitet und genutzt“²² als auch „verändert und in der veränderten Form weitergegeben werden“.²³

Perimeterschichtstärke

Unter der Perimeterschichtstärke versteht man die Schichtstärke der Bauteilkontur.²⁴

Photopolymer

Monomeren („niedermolekulare, reaktionsfähige Moleküle“²⁵), die auf UV-Licht reagieren und sich folglich zu einem Polymer verfestigen.²⁶

¹⁷ Vgl. „Kalibrierung“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kalibrierung> (14.11.2011)

¹⁸ Vgl. „MakerBot“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Makerbot> (14.11.2011)

¹⁹ Vgl. „Ultimaker specs and features“: http://wiki.ultimaker.com/Ultimaker_specs_and_features (17.11.2011)

²⁰ Vgl. „oozing“: <http://www.thefreedictionary.com/oozing> (17.11.2011)

²¹ Vgl. „Open Source“: http://de.wikipedia.org/wiki/Open_source (14.11.2011)

²² Ebd. (14.11.2011)

²³ Ebd. (14.11.2011)

²⁴ Vgl. „Configuring Skeinforge: Some Basic Terms...“: <http://davedurant.wordpress.com/2010/10/17/configuring-skeinforge-some-basic-terms/> (17.11.2011)

²⁵ Vgl. „Monomer“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Monomer> (16.11.2011)

PID Temperatursteuerung

Die Temperatursteuerung läuft hier über einen PID-Regler. Der PID Regler ist der universellste der klassischen Regler und vereinigt die [...] Eigenschaften der [proportional-, integral- und differentialwirkenden] Regler.“²⁷

Polylactide (PLA)

„Polylactide, die auch Polymilchsäuren (kurz PLA, vom englischen Wort *polylactic acid*) genannt werden, sind durch Wärmezufuhr verformbare Kunststoffe [...].“²⁸

Plotter

„Ein Plotter (von engl. *plot* = zeichnen), im Deutschen auch als Kurvenschreiber bezeichnet, ist ein Ausgabegerät, das Funktionsgraphen, technische Zeichnungen und andere Vektorgrafiken auf verschiedenen Materialien darstellt. Sie gehören zu den wenigen Geräten, die unmittelbar Vektorgrafiken wiedergeben, ohne sie vorher in eine Rastergrafik umzurechnen.“²⁹

Polygon

Polygon: altgriechisch „Vieleck“. ³⁰

Rapid Prototyping

„Rapid Prototyping (übersetzt *schneller Modellbau*) ist der Überbegriff über verschiedene Verfahren zur schnellen Herstellung von Musterbauteilen ausgehend von Konstruktionsdaten. Rapid-Prototyping-Verfahren sind somit Fertigungsverfahren, die das Ziel haben, vorhandene CAD-Daten möglichst ohne manuelle Umwege oder Formen direkt und schnell in Werkstücke umzusetzen.“³¹

²⁶ Vgl. „Stereolithografie“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stereolithografie> (17.11.2011)

²⁷ Vgl. „Regelungstechnik“: <http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik#P-Regler> (15.11.2011)

²⁸ Vgl. „Polylactide“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide> (16.11.2011)

²⁹ Vgl. „Plotter“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Plotter> (14.11.2011)

³⁰ Vgl. „Polygon“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Polygon> (14.11.2011)

³¹ Vgl. „Rapid Prototyping“: http://de.wikipedia.org/wiki/Rapid_Prototyping (14.11.2011)

SD-Karte

„Eine SD Memory Card (Kurzform für Secure Digital Memory Card; deutsch *Sichere digitale Speicherkarte*) ist ein digitales Speichermedium, das nach dem Prinzip der Flash-Speicherung arbeitet.“³²

Skeinforge

Eine Open Source Toolchain bestehend aus diversen Python Skripten die ein 3D Modell in G-Code umwandelt.³³

Slicing

„Slicing“ nennt man das Zerlegen eines 3D-Bauteils in 2D-Schichten gleicher Stärke. Dies geschieht oft mit Hilfe einer Software, wie zum Beispiel Skeinforge oder Netfabb Engine.³⁴

Software

„Software [...] ist ein Sammelbegriff für die Gesamtheit ausführbarer Programme und die zugehörigen Daten.“³⁵

STL-Format

„Das STL-Format (Surface Tessellation Language) beinhaltet die Beschreibung der Oberfläche von 3D-Körpern mit Hilfe von Dreiecksfacetten (englisch *tessellation* = „Parkettierung“).“³⁶

Stringing

Der Begriff kommt aus dem Englischen und bedeutet „Fadenziehen“. Dieser Effekt tritt bei einem Travel Move in Kombination mit Oozing auf und macht sich optisch durch Materialfäden im Druckbild bemerkbar.³⁷

Supportmaterial

Supportmaterial wird verwendet, wenn die Bauteilgeometrien einen Druck ohne Stützkonstruktionen nicht zulassen.

³² Vgl. „SD-Karte“: <http://de.wikipedia.org/wiki/SD-Karte> (14.11.2011)

³³ Vgl. „Bits from Byte – Skeinforge“: <http://wiki.bitsfrombytes.com/index.php/Skeinforge> (16.11.2011)

³⁴ Vgl. „File preview and browsing“: http://www.netfabb.com/file_handling.php (15.11.2011)

³⁵ Vgl. „Software“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Software> (14.11.2011)

³⁶ Vgl. „STL-Format“: <http://de.wikipedia.org/wiki/STL-Format> (14.11.2011)

³⁷ Vgl. „Ultimaker specs and features“: http://wiki.ultimaker.com/Ultimaker_specs_and_features (15.11.2011)

Thermoplast

„Thermoplaste[...], auch Plastomere genannt, sind Kunststoffe, die sich in einem bestimmten Temperaturbereich [...] verformen lassen.“³⁸

Travel Move

Unter dem Begriff “Travel Move” versteht man die Bewegung des Druckkopfs, bei der kein Material ausgegeben wird.³⁹

Trovalieren

Dieser Schritt zur Oberflächennachbearbeitung wird auch „Trommeln“ genannt und dient der maschinellen Entgratung von Bohrungen.⁴⁰

³⁸ Vgl. „Thermoplast“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Thermoplast> (14.11.2011)

³⁹ Vgl. „Configuring Skeinforge: Some Basic Terms...“: <http://davedurant.wordpress.com/2010/10/17/configuring-skeinforge-some-basic-terms/> (17.11.2011)

⁴⁰ Vgl. <http://www.lasercut24.de/nachbearbeitung.htm> (15.11.2011)

I. Einleitung

Unter dem Motto „Vom Design über den Prototyp bis zur Serie“ findet vom 29. November bis 02. Dezember 2011 zum 18. Mal die „EuroMold“ in Frankfurt am Main statt. Sie ist die Weltmesse für Werkzeug- und Formenbau, Design und Produktentwicklung und „präsentiert [...] Produkte und Dienstleistungen, Technologien und Innovationen, Trends und Tendenzen für die Märkte der Zukunft“.⁴¹

Die „EuroMold“ ist Plattform sowohl für die Präsentation neuester Technologien als auch zum Informationsaustausch zwischen den verschiedensten Fachbereichen, welche von Anlagen- und Apparatebau über Luft- und Raumfahrt bis hin zur Verpackungsindustrie reichen. Es werden mehr als 1500 Aussteller aus über 90 Ländern erwartet, die ihre Produkte der jeweiligen Branche, wie zum Beispiel CAD-Software, Formenbauentwicklung und Engineering oder 3D Rapid-Prototyping, vorstellen.⁴²

An dem Thema „Rapid Prototyping“ besteht reges Interesse, da es sich in den vergangenen Jahren zu einem nicht mehr wegzudenkenden Herstellungsverfahren für Prototypen in der Industrie entwickelt hat. Die Unternehmen schätzen daran die hohe Qualität der Ergebnisse bei kaum vergleichbar schnellen Fertigungszeiten. Zudem wird eine direkte generative Herstellung nur auf Basis von 3D-Produktdaten ermöglicht.

Die Thematik findet nicht nur Zuspruch in der Industrie, sondern auch immer mehr Privatpersonen zeigen wachsendes Interesse an der Technologie. Um dieser Nachfrage gerecht zu werden, hat die Firma Ultimaking Ltd. aus den Niederlanden „den 3D-Drucker ‚Ultimaker‘ als Bausatz vorgestellt, der deutlich kostengünstiger ist als bisherige kommerziell erhältliche Anlagen“⁴³. Es ist nun zu klären, wie präzise die Drucke des Ultimakers ausfallen und gegebenenfalls optimiert werden können, sodass sich eventuell ein Einsatz der Bauteile in der Industrie ermöglichen lässt.

Im Rahmen dieser Teamprojektarbeit wird obige Fragestellung anhand von diversen Testreihen und Messungen untersucht, um verwertbare Aussagen über die Genauigkeit der Druckergebnisse treffen zu können.

⁴¹ Vgl. „EuroMold“: <http://www.euromold.com/index.php?id=16> (16.11.2011)

⁴² Vgl. „EuroMold“: <http://www.euromold.com/index.php?id=8> (16.11.2011)

⁴³ Vgl. Anhang: LUP Universität Bayreuth, erster Entwurf der Aufgabenstellung der Teamprojektarbeit „Open Source Rapid Prototyping“

A. Rapid Prototyping Verfahren

1. 3D-Printing

Grundkomponenten: Pulverkammer, Transportwalze, Extruder ⁴⁴

Das Verfahren des 3D-Printing ist dem des Selective Laser Sintering sehr ähnlich. Mit der Walze wird aus der Kammer Pulver entnommen und gleichmäßig auf der Bauteilplattform aufgetragen. Danach verfährt der Extruder in x- und y- Richtung und trägt mithilfe der Inkjet-Technologie tröpfchenweise flüssiges Bindematerial in Bauteilgeometrie auf. Die Pulverbereiche, die mit dem Binder in Berührung kommen, verfestigen sich sofort. ⁴⁵ Nach jeder gedruckten Schicht verfährt die Plattform in negativer z-Richtung um eine Schichtdicke und eine weitere Pulverschicht wird aufgetragen. ⁴⁶

Das vom Binder nicht benetzte Pulver dient als Stützmaterial und wird nach Fertigstellung des Druckes abgesaugt.

Materialien: Pulver: Stärke-Zellulose, Gips-Keramik (ZP 130)

Binder: Gemisch aus Wasser und Glycerin ⁴⁷

Vorteile:

- Geringe Kosten: Sowohl Anschaffungs- sowie Materialkosten sind bei 3D-Printing-Maschinen sehr gering.
- Kein Laser notwendig, da mit Bindematerial gedruckt wird.
- Einsatz im Büro möglich: Durch die geringe Umweltbelastung, die kurzen Bauzeiten (2-4 Schichten pro Minute ⁴⁸) und die einfache Handhabung des Systems wird eine 3D-Printing-Maschine bürotauglich. ⁴⁹
- Pulver kann recycelt werden. ⁵⁰

⁴⁴ Vgl. Roller u.a.(2006). "Fachkunde Modellbau-Technologie des Modell- und Formenbaus". Verlag Europa Lehrmittel, S. 159

⁴⁵ Vgl. Gebhardt, Andreas. (2007). "Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping-Rapid Tooling-Rapid Manufacturing". München. Carl Hanser Verlag, 2007, Seite 212

⁴⁶ Vgl. Roller u.a., S. 159

⁴⁷ Vgl. Gebhardt, Andreas, S. 213

⁴⁸ Ebd. S. 212

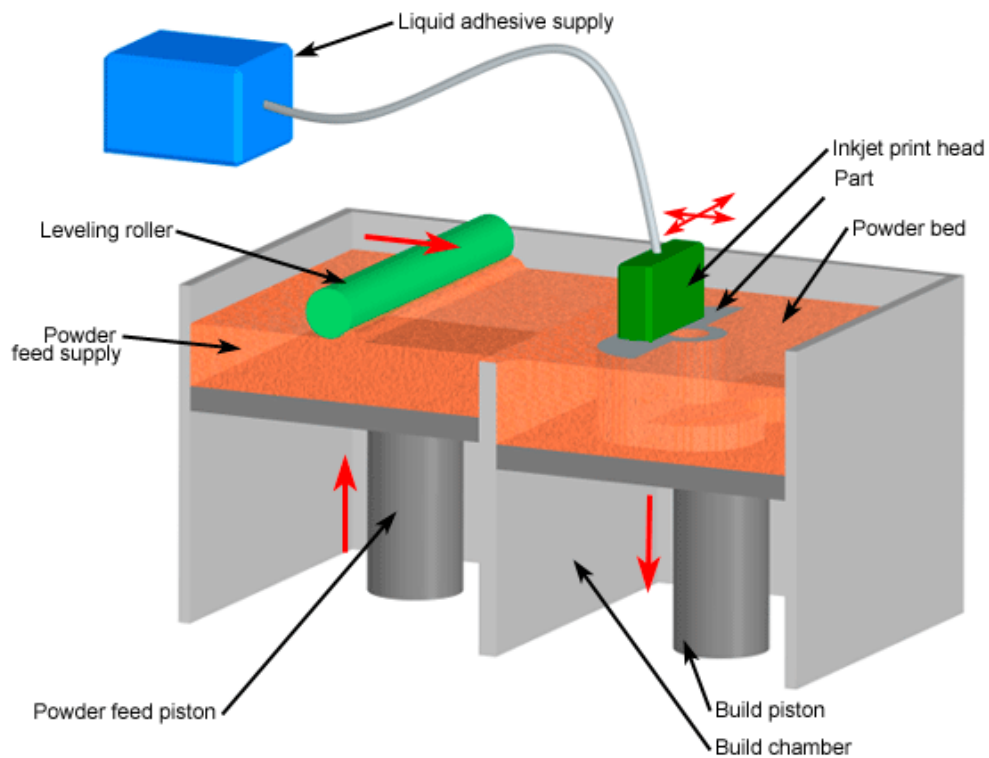
⁴⁹ Vgl. Roller u.a., S. 159

Nachteile:

- Ungenauer als Lasersintern und Stereolithographie: Abweichung liegt bei 0,3% - 0,5% und die Oberflächengüte ist sehr gering.
- Kleiner Bauraum: maximal 250 x 200 x 200 mm ⁵¹
- Durch die manuelle Handhabung kommt es leicht zu Beschädigungen des Modells. ⁵²

Kennzahlen:

- Schichtdicke: 0,075 – 0,25 mm ⁵³
- Fertigungstoleranzen: $\pm 0,004$ in. (ungefähr 0,1 mm) ⁵⁴



Copyright © 2008 CustomPartNet

Abbildung I-1: Funktionsschema einer 3D-Printing-Maschine - Quelle: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing> (10.11.2011)

⁵⁰ Vgl. Gebhardt, Andreas, S. 213

⁵¹ Vgl. Roller u.a., S. 159

⁵² Vgl. Gebhardt, Andreas, S. 213

⁵³ Vgl. Roller u.a., S. 159

⁵⁴ Vgl. "3D-printing": "<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>" (10.11.2011)

2. 3D-Printing / PatternMaster™

Grundkomponenten: Bauplattform, Extruder mit 2 Plot-Düsen, Führungssystem, 2 Behälter für Baumaterial, Präzisionsfräse⁵⁵

Das 3D-Printing / PatternMaster™ beruht auf der Inkjet-Technologie. Bei ebenjener werden die Materialien tröpfchenweise aus der Düse aufgetragen.⁵⁶ Das wachsähnliche thermoplastische Material für das Bauteil wird nun in kleinsten Tropfen Schicht für Schicht aufgetragen. Dabei verfährt der Druckkopf in x- und y- Richtung während sich die Bauteilplattform nach jeder Schicht in negative z-Richtung absenkt. In dem zweiten Extruderkopf befindet sich Material für eine Stützstruktur, die während des Druckes um das Bauteil herum aufgebaut wird. Mit einer Präzisionsfräse wird nach jeder aufgetragenen Schicht das Bauteil überfräst, damit die Oberfläche äußerst glatt und die Schichtdicke exakt wird.⁵⁷

Nach Fertigstellung des Bauteils wird die Stützstruktur „mit einem Lösungsmittel bei 40-60 °C entfernt.“⁵⁸

Als weitere Variante des 3D Printing wird das sogenannte „Jetted Photopolymer“ gehandelt. Hier wird das gedruckte Photopolymer Material durch UV Licht ausgehärtet.⁵⁹

Materialien: Thermoplasten, welche einen sehr niedrigen Schmelzpunkt aufweisen, synthetisches Wachs für die Stützstruktur⁶⁰

Vorteile:

- Oberflächenbeschaffenheit: Dank der Präzisionsfräse lassen sich hervorragende Oberflächen schaffen, so dass keine weitere Nachbehandlung notwendig ist.
- Es lässt sich eine Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm erreichen.⁶¹
- Präzise Herstellung der Modelle⁶²

⁵⁵ Vgl. Roller u.a.(2006).“Fachkunde Modellbau-Technologie des Modell- und Formenbaus“. Verlag Europa Lehrmittel, S. 160

⁵⁶ Vgl. „InkJet-Technologie“: <http://www.wolf-signiertechnik.de/de/lexikon/inkjet-technologie.html> (09.11.2011)

⁵⁷ Vgl. Roller u.a., S. 160

⁵⁸ Ebd., S. 160, 3. Abs.

⁵⁹ Vgl. „Jetted Photopolymer“: <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer> (10.11.2011)

⁶⁰ Vgl. Maschine+Werkzeug: <http://www.maschinewerkzeug.de/index.cfm?pid=1445&pk=53643> (24.10.2011)

⁶¹ Vgl. Roller u.a., S. 160

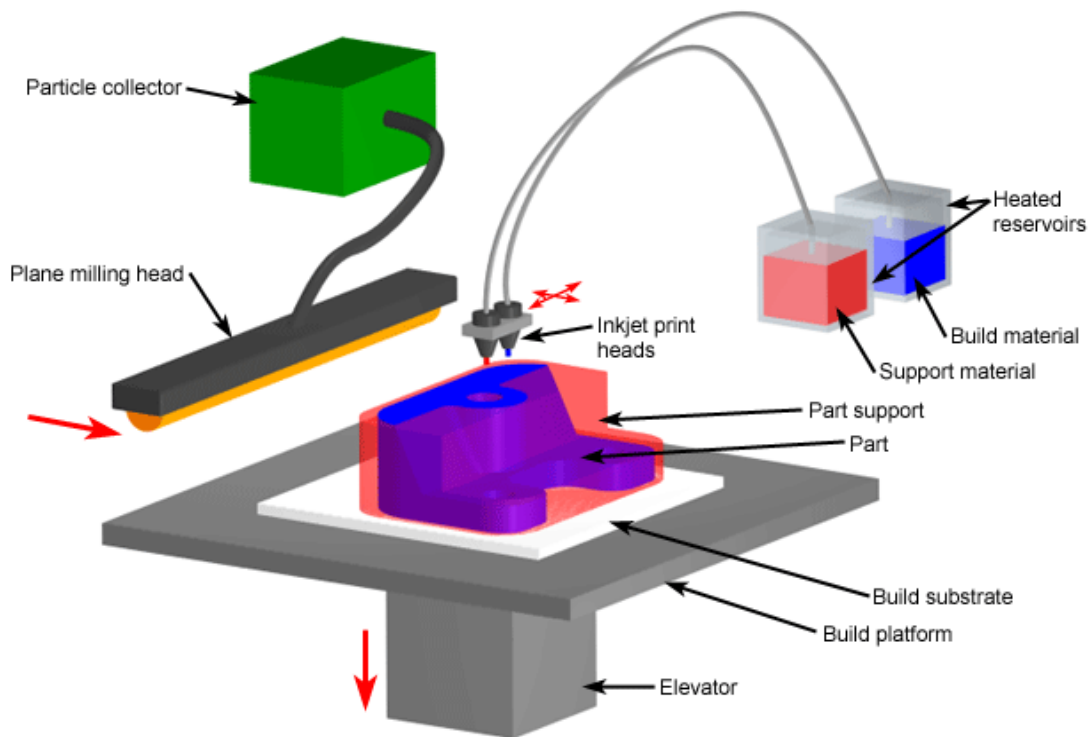
⁶² Vgl. Maschine+Werkzeug: <http://www.maschinewerkzeug.de/index.cfm?pid=1445&pk=53643> (24.10.2011)

Nachteile:

- Nur für kleine Teile geeignet: Größter Bauraum liegt bei 300 x 150 x 210 mm.
- Temperaturgrenze: Die Anlage ist nur unter 22 °C zu verwenden.
- Lange Bauzeit aufgrund der Präzision der einzelnen Bauteile⁶³

Kennzahlen:

- Schichtdicke: 0,013 – 0,076 mm⁶⁴
- Fertigungstoleranzen: $\pm 0,1$ mm⁶⁵



Copyright © 2008 CustomPartNet

Abbildung I-2: Funktionsschema einer Inkjet-Anlage - Quelle: <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing> (09.11.2011)

⁶³ Vgl. Roller u.a., S. 160

⁶⁴ Vgl. Maschine+Werkzeug: <http://www.maschinewerkzeug.de/index.cfm?pid=1445&pk=53643> (24.10.2011)

⁶⁵ Vgl. Roller u.a., S. 106

3. Fused Deposition Modeling

Grundkomponenten: Bauplattform, zwei Extruderdüsen mit thermoplastischem Material und/oder Wachsmaterial, Motor mit Materialspule⁶⁶

Das Fused Deposition Modeling, oder auch Extrusionsverfahren genannt, basiert auf dem Extrudieren von Kunststoff und Wachsmaterialien.⁶⁷ Das thermoplastische Material wird drahtförmig auf eine Spule aufgewickelt und über den Motor durch die Heizdüse gepresst.⁶⁸ In der Extruderdüse wird das Rohmaterial durch Hitze und innere Reibung bis zu einer Schmelztemperatur von 270 °C aufgeschmolzen und somit verflüssigt. Der Extruder verfährt nun in x- und y-Richtung und trägt das Baumaterial gemäß der Bauteilgeometrie auf der Plattform auf. Bei Berührung des Materials mit der Plattform bzw. der vorangegangenen Schicht erkaltet das Rohmaterial aufgrund der Wärmeleitung.⁶⁹ Um das gesamte Bauteil aufzutragen, senkt sich die Bauteilplattform nach jeder Schicht um eine Schichtdicke in negative z-Richtung. Ein weiterer Extruder-Kopf trägt die Stützkonstruktion mit dem jeweiligen Stützmaterial auf, welches sich im Nachhinein in einem Ultraschall-Wasserbad biologisch abbauen oder bei anderen Materialien mit der Hand abbrechen lässt.⁷⁰

Nachbehandlungen des Bauteils wie lackieren, fräsen, kleben oder drehen sind möglich, aber nicht erforderlich.⁷¹

Materialien: Polylactide (PLA), Polycarbonat (PC, PC-ISO), Polyphenylsulfonen (PPSF, PPSU), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS, auch ABSi)⁷²

66 Vgl. Roller u.a. (2006). „Fachkunde Modellbau-Technologie des Modell- und Formenbaus“. Verlag Europa Lehrmittel, S. 162

67 Vgl. Wikipedia „Fused Deposition Modeling“: http://de.wikipedia.org/wiki/Fused_Deposition_Modeling (27.10.2011)

68 Vgl. Roller u.a., S. 162

69 Vgl. Gebhardt, Andreas. (2007). „Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping-Rapid Tooling-Rapid Manufacturing“. München. Carl Hanser Verlag, 2007, Seite 199

70 Vgl. pro1o1ypen „Fused Deposition Modeling“: <http://www.1zu1prototypen.com/urmodelle/fdm.htm> (23.10.2011)

71 Vgl. 3D-Prototyp24 „FDM“: <http://www.3d-prototyp24.de/FDM.htm> (09.11.2011)

72 Vgl. Roller u.a., S. 162

Vorteile:

- Sämtliche schmelzbaren Werkstoffe sind nutzbar, auch niedrig schmelzende Werkstoffe.⁷³
- ABS hat eine hohe Festigkeit und ist sehr temperaturbeständig (> 200 °C).
- Verfahren ist kostengünstig: Anschaffungs- und Betriebskosten sind im Vergleich zu anderen Verfahren günstig.⁷⁴
- Einfache Verfahrenstechnik: Bürotauglich, da keine toxischen Materialien verwendet werden müssen.⁷⁵
- Die Prozess-Software ist einfach zu handhaben: Die Daten werden als STL-Datei ausgegeben.⁷⁶
- Kein Laser notwendig: Der Stromverbrauch ist somit geringer und es wird kein Kühlwasser benötigt.⁷⁷
- Kein Materialverlust: Materialien sind alterungsbeständig und resistent gegen Öle und Säuren.⁷⁸

Nachteile:

- Bauteilgeometrien werden durch Extrusionsbreite beschränkt⁷⁹
- Minimale Wanddicke liegt bei 0,6 – 0,7 mm
- Geringe Oberflächengenauigkeit: Es entsteht eine raue Oberfläche bei Schichtdicken > 0,1 mm.⁸⁰

⁷³ Vgl. Modelltechnik „Fused Deposition Modeling“:
http://www.modelltechnik.de/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=79&lang=de (09.11.2011)

⁷⁴ Vgl. Roller u.a., S. 162

⁷⁵ Vgl. Gebhardt, Andreas, S. 201

⁷⁶ Ebd., S. 198

⁷⁷ Vgl. Gebhardt, Andreas, S. 201

⁷⁸ Vgl. Roller u.a., S. 162

⁷⁹ Vgl. Modelltechnik : http://www.modelltechnik.de/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=79&lang=de (09.11.2011)

⁸⁰ Vgl. Roller u.a., S. 162

Kennzahlen:

- Schichtdicke: 0,127 – 0,330 mm⁸¹
- Bauraum: 600 x 500 x 600 mm (FDM-Maxum, Firma Stratasys)⁸²
- Fertigungstoleranzen: $\pm 0,1$ mm⁸³

Kommentar:

Die Kennzahlen (min. Schichtdicke, Fertigungstoleranz) und die Angabe bezüglich der minimalen Wandstärke sind der Fachliteratur entnommen (Erscheinungsjahr 2006/2007). Ihre Gültigkeit in Bezug auf den Ultimaker wird durch diese Arbeit bewertet.

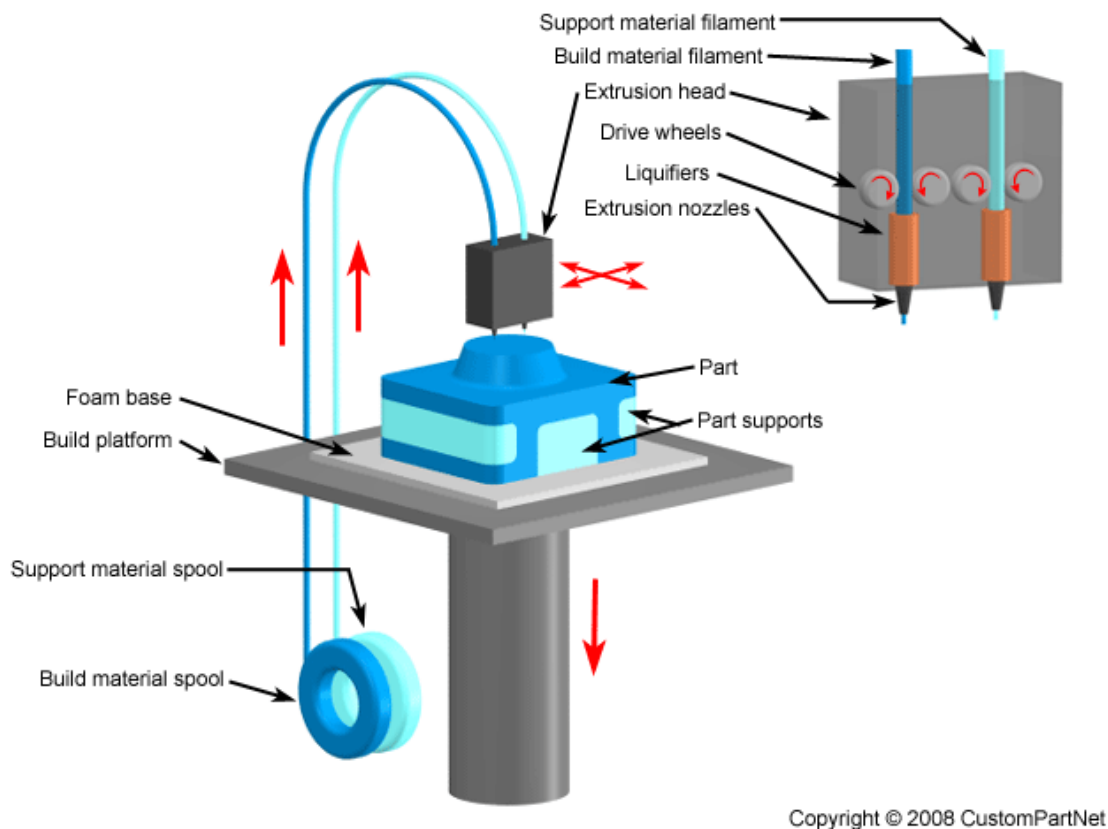


Abbildung I-3: Funktionsschema einer FDM-Maschine - Quelle: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> (23.10.2011)

⁸¹ Vgl. Gebhardt, Andreas, S. 199

⁸² Ebd., S. 202

⁸³ Vgl. Roller u.a., S. 162

4. Layer Lamine Manufacturing (Schicht-Laminat-Verfahren)

Grundkomponenten: CO₂-Laser mit Optik, beheizte Laminierwalze, Bauteilplattform, Einrichtung für die Zufuhr von folienförmigem Baumaterial, 2D-Plottermechanismus⁸⁴

Das Schicht-Laminat-Verfahren stellt kein rein additives Verfahren, sondern ein hybrides dar. Es setzt sich aus subtraktiven und additiven Schritten zusammen wie im Folgenden näher erklärt wird. Die erste Folienschicht wird mit Hilfe der Zufuhreinrichtung auf die Bauplattform gebracht. Das Fügen der einzelnen Folien erfolgt bei Kunststoffen über die beheizte Laminierwalze. Bei Papier und Holz wird simultan zur Folienzufuhr Kleber aufgetragen; Metallfolien verbindet man durch Diffusionsschweißen. Danach konturiert ein CO₂-Laser oder je nach Material ein Messer oder ein trennendes Werkzeug, welches durch den 2D-Plottermechanismus geführt wird, die einzelne Bauteilschicht nach der entsprechenden Geometrie. Sobald eine Schicht fertiggestellt worden ist, senkt sich die Bauplattform um eine Schichtstärke und der Prozess beginnt mit der Materialzufuhr von vorne. Bei Hohlräumen wird das zu entfernende Material vom Laser in würfelförmige Stücke geschnitten, sodass es später leichter entfernt werden kann.

Dieses Verfahren wird oft auch als „Laminated Object Manufacturing“ (LOM) bezeichnet. Diese Produktbezeichnung ist ein eingetragenes Markenzeichen der Firma Helisys, die die erste LLM-Anlage auf den Markt gebracht hat.⁸⁵

Materialien: Papier, Holz, Kunststoff, Metall und Keramik in Folienform⁸⁶

⁸⁴ Vgl. Roller u.a., S.163.

⁸⁵ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.50, S.172ff.

⁸⁶ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.172.

Vorteile:

- kostengünstiges Material, preiswerter Prozess: Vor allem bei Papier sind die Kosten für das Material und den Prozess gering.
- Große und massive Bauteile: Für solche Teile ist das Verfahren vorteilhaft, da „die aufwendige Schraffur großer Flächen entfällt“⁸⁷.
- „Nahezu unbeschränkte Materialpalette“⁸⁸: Da sich fast alle Materialien mit Lasern schneiden lassen, verfügt man hier über großen Spielraum.
- Einfachste Methode
- Problemlose Entsorgung bei Papier⁸⁹
- Keine Stützkonstruktionen: Das vom Modell abgetrennte Material bleibt meistens im Bauraum und erfüllt somit die Aufgabe einer Stützkonstruktion.
- Keine toxischen Materialien
- Schnelles Arbeiten bezüglich des Bauteilvolumens
- „[R]obust[e] und haltbar[e]“⁹⁰ Modelle
- „[N]ach Infiltration mit Epoxydharzen feuchtigkeitsbeständig“⁹¹

Nachteile:

- Material, das nicht verwendet wird, ist Abfall.
- „Deutlich unterschiedliche mechanisch-technologische Eigenschaften in und quer zur Schichtrichtung“⁹²
- Hoher Arbeitsaufwand: Bei komplexen Teilen ist der Aufwand für das Nacharbeiten sehr hoch.
- Anhalten des Prozesses: Einige Bauteile erfordern das Stoppen des Prozesses, um das Entfernen von Abfall zu ermöglichen.
- Schwierige Realisierung von Schrägen, deren Stufenbreiten kleiner als der Schneidspalt sind
- Innenräume: Diese müssen zum Entfernen von Abfall von außen gut zugänglich sein.⁹³
- Keine Ausschmelzbarkeit: Deswegen können die Modelle, die durch dieses Verfahren hergestellt werden, nicht als Urmodelle verwendet werden.⁹⁴

⁸⁷ Gebhardt, Andreas, „Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping-Rapid Tooling-Rapid Manufacturing“, S. 50

⁸⁸ Ebd.S. 50

⁸⁹ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.50.

⁹⁰ Vgl. Roller u.a., S.163.

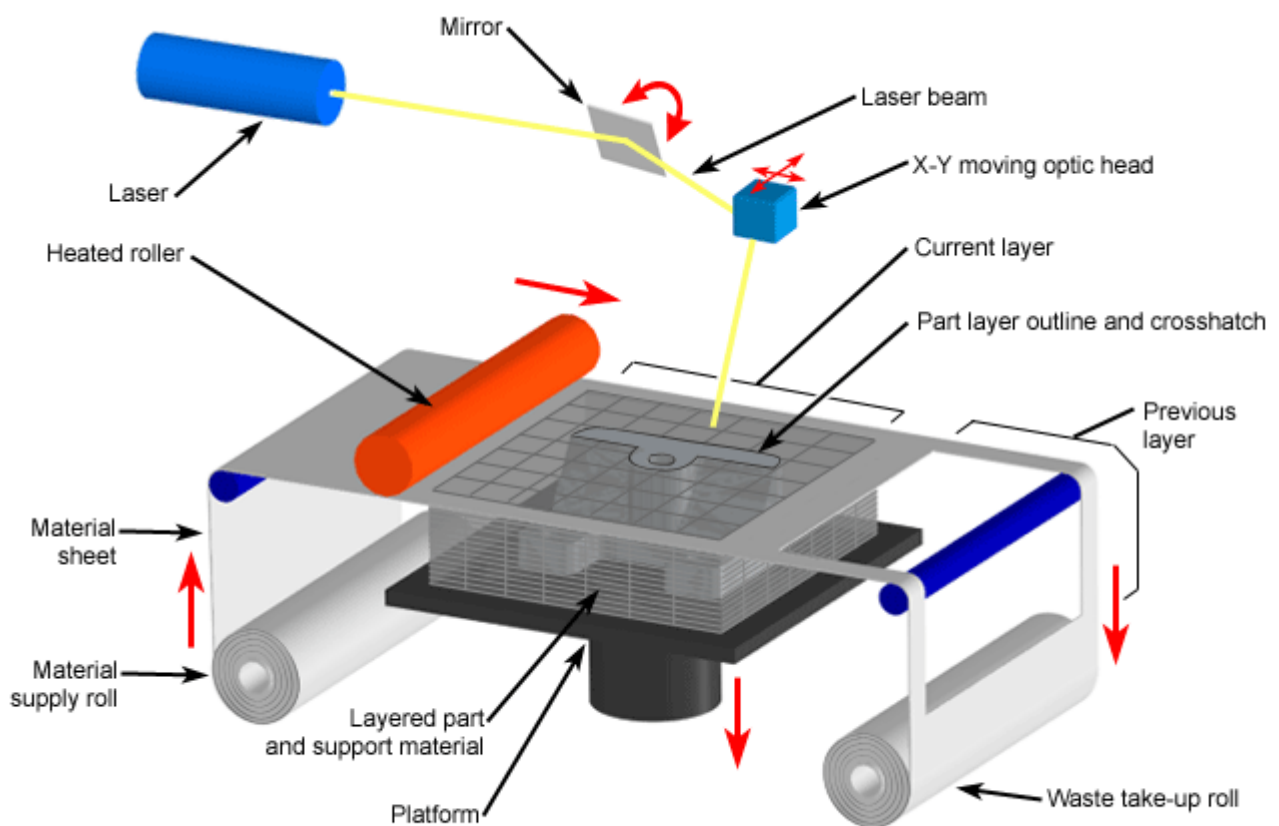
⁹¹ Roller u.a. „FachkundeModellbau“. Verlag Europa-Lehrmittel, 2006, S.163

⁹² Vgl. Gebhardt, Andreas, S.51.

⁹³ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.51.

Kennzahlen:

- Minimale Schichtstärke: 0,0508 mm⁹⁵
- Maximale Bauteilgröße: 1180 x 750 x 550 mm⁹⁶



Copyright © 2008 CustomPartNet

Abbildung I-4: Prinzip des LLM-Verfahrens - Quelle: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> (25.10.2011)

⁹⁴ Vgl. Roller u.a., S.163

⁹⁵ Vgl. "Laminated Object Manufacturing". <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> (25.08.2011)

⁹⁶ Vgl. "Laminated Object Manufacturing". <http://www.tedata.com/3232.0.html> (25.08.2011)

5. Selective Laser Sintering

Grundkomponenten: Prozesskammer, Pulverdosierv- und Beschichtungsmechanismus, Vorratsbehälter, Bauplattform, CO₂-Laser mit Optik, Scannerspiegel⁹⁷

Beim Selective Laser Sintern, kurz SLS, wird pulverförmiges Material durch eine Laser-Scanner-Einheit entsprechend der Bauteilgeometrie in der x/y-Ebene lokal an- bzw. aufgeschmolzen. Man versucht, durch Erhitzen des Pulvers auf Temperaturen in der Nähe des Schmelzpunktes („Temperaturen zwischen 170 °C und 210 °C“⁹⁸) die Energie des Laserstrahls möglichst gering zu halten.⁹⁹ Nach der Generierung einer Schicht senkt sich die Bauplattform um eine Schichtstärke in z-Richtung. Daraufhin erfolgt die Beschichtung mit Hilfe der Pulverdosierv- und Beschichtungseinheit, die gleichzeitig die Oberfläche glättet. Der Laser kann somit die Körner der nächsten Schicht verschmelzen. Nach Fertigstellen des Bauteils wird der Pulverkuchen mit weiteren Schichten aus Pulver bedeckt, um einen gleichmäßigen Auskühlvorgang gewährleisten zu können.¹⁰⁰ Dieser Abkühlprozess kann bei Kunststoffen mehrere Stunden dauern, was auf deren schlechte Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen ist. Abschließend legt man in einer Auspackstation die Bauteile frei und entfernt das nicht verschmolzene Pulver. Eventuell fallen Nachbearbeitungsprozesse wie zum Beispiel Schleifen, Sandstrahlen oder auch diverse Oberflächenbehandlungen („[T]ro[u]yalieren“¹⁰¹, Versiegeln mit Epoxydharzen oder Hartwachsen, etc.) an.¹⁰²

Anstatt der Laser-Scanner-Einheit kann der Vorgang durch Verwendung eines direkt abgelenkten Elektronenstrahls oder einer Infrarotheizung, die eine Maske beleuchtet, abgewandelt werden.¹⁰³

Materialien: Polyamid (PA, auch glasgefüllt), Polystyrol (PS), Metallpulver, Croning Sand¹⁰⁴

⁹⁷ Vgl. Roller u.a.(2006).“Fachkunde Modellbau-Technologie des Modell- und Formenbaus“. Verlag Europa Lehrmittel, S.157.

⁹⁸ Gebhardt, Andreas. (2007).“Generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping-Rapid Tooling-Rapid Manufacturing“. München. Carl HanserVerlag, 2007, Seite 124.

⁹⁹ Vgl.Gebhardt, Andreas, 2007, S.121ff.

¹⁰⁰ Vgl.Roller u.a., 2006, S.157.

¹⁰¹ Vgl.Gebhardt, Andreas, 2007, S.125.

¹⁰² Siehe Gebhardt, Andreas, 2007, S.124f.

¹⁰³ Ebd. S.121.

¹⁰⁴ Vgl. Roller u.a., S.157.

Vorteile:

- Vielfalt an Materialien: Die wichtigste Anforderung bleibt das thermoplastische Verhalten.
- Kein Stützmaterial notwendig: Das nicht verschmolzene Pulver hat genügend Tragkraft, um diese Aufgabe zu erfüllen.¹⁰⁵
- Kein abschließender Aushärtungsprozess erforderlich: Nur bei Materialien wie Sand oder Metall sind solche Vorgänge eventuell nötig. → „einstufiges Verfahren“¹⁰⁶
- Wenig Abfall: Nicht verschmolzenes Material kann unter Beimischung von Neupulver recycelt werden.¹⁰⁷
- Reinigung der Bauteile sehr einfach: Mit Hilfe von Druckluft, Pinseln oder Sandstrahlen kann das lose Pulver entfernt werden.¹⁰⁸
- Exzellente Genauigkeit, Oberflächenqualität, Form der Bauteile und dünne Wandstärken: Die geringen Korngrößen (0,1 – 0,2 mm bei Kunststoff und Sand, 0,02 – 0,1 mm bei Metall) und der schmale Laserstrahl ermöglichen eine solche Ergebnisqualität.
- Sofortige Einsetzbarkeit: Mit SLS können funktionelle Prototypen hergestellt werden, die oft als Endprodukte einzusetzen sind.¹⁰⁹

Nachteile:

- Stickstoff- (Inertgas-)Atmosphäre notwendig: Im Bauraum darf je nach Material nur noch 0,1 bis 3,5% Restsauerstoff vorhanden sein, um ein Oxidieren der Bauteile zu verhindern.¹¹⁰
- Schmales Temperaturband: Die Temperatur im Bauraum darf keinen großen Schwankungen unterliegen, da sonst das Pulver von alleine anschmilzt.
- „Bauteile neigen zum Wachsen“¹¹¹: Geometrische Ungenauigkeit kann auftreten, wenn loses Pulver an die warmen Teile „anbäckt“.
- Zeitaufwändig
- Begrenzte Modellgenauigkeit: Einschränkungen ergeben sich durch die Korngröße, den Laserstrahldurchmesser und die Abbildungsqualität der Maske.
- Interne Hohlräume sind schwierig zu reinigen.¹¹²
- Geringere Qualität, wenn die ganze Bauplattform für ein Bauteil ausgenutzt wird.¹¹³

¹⁰⁵ Vgl. Roller u.a., S.157

¹⁰⁶ Vgl. Roller u.a., S.157

¹⁰⁷ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.123.

¹⁰⁸ Vgl. Roller u.a., S.157.

¹⁰⁹ Vgl. Roller u.a., S.157.

¹¹⁰ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.121.

¹¹¹ Ebd.S.48

¹¹² Vgl. Gebhardt, Andreas, S.48.

Kennzahlen:

- Minimale Schichtstärke: 60 μm (Firma EOS)¹¹⁴
- Maximale Bauhöhe: 620 mm (Anlage „EOSINT P395“ von der Firma EOS)¹¹⁵

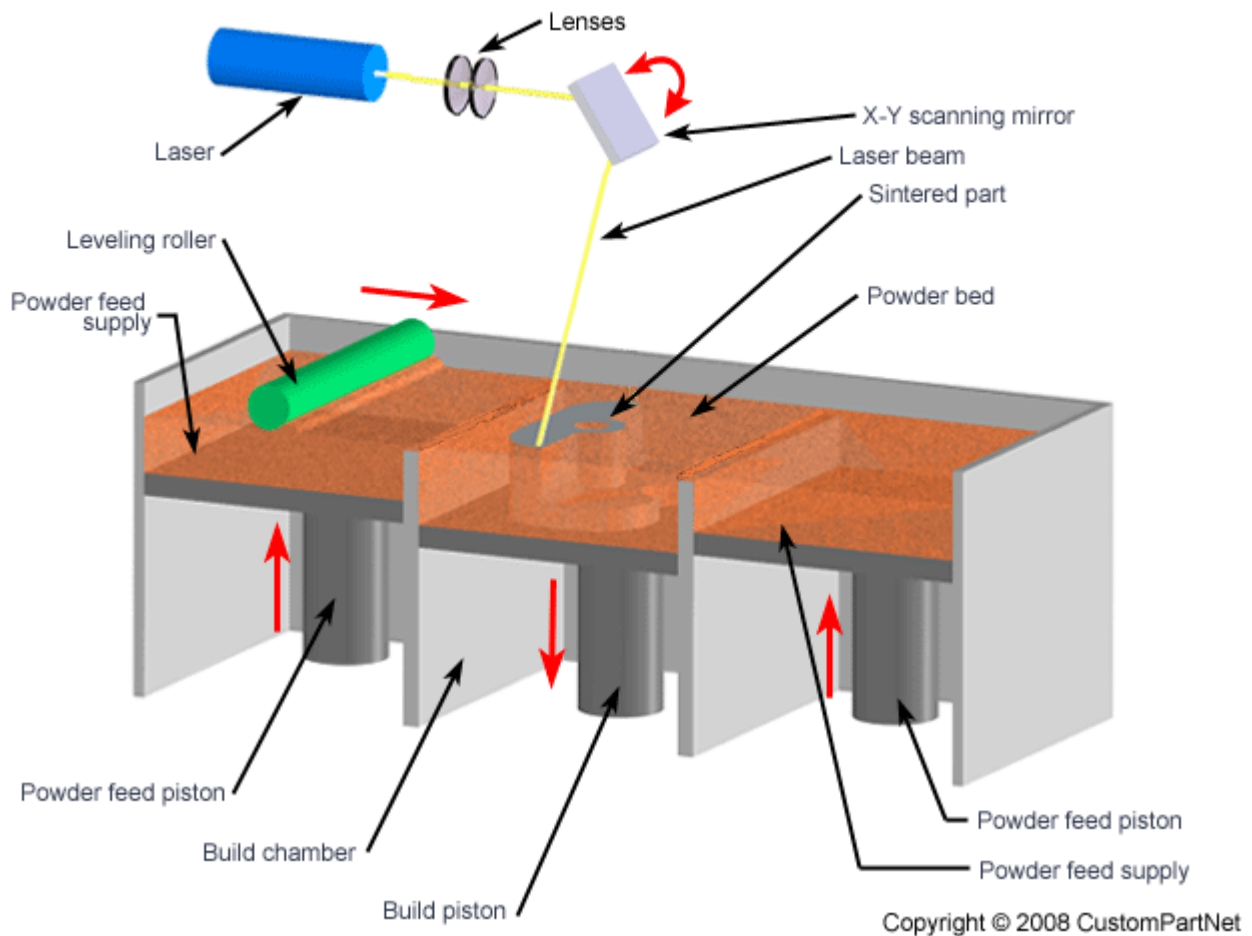


Abbildung I-5: Funktionsprinzip einer Lasersintermaschine - Quelle: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering> (25.10.2011)

¹¹³ Kamrani, Ali K., Nasr, "Engineering Design and Rapid Prototyping". SpringerVerlag, 2010, S.350.

¹¹⁴ Vgl. "Part Property Management". http://www.eos.info/fileadmin/user_uploads/downloads_presse/pdf_files/EOS_WP_PPP_d.pdf, S.5 (25.08.2011)

¹¹⁵ Vgl. "EOSINT P395". <http://www.eos.info/produkte/systeme-zubehoer/kunststoff-laser-sinter-systeme/eosint-p-395.html> (25.08.2011)

6. Stereolithografie (Photopolymerisation)

Grundkomponenten: Bauplattform, Harzbad, Wischvorrichtung, UV-Laser, Scannerspiegel

Das Verfahren der Stereolithografie zeichnet sich dadurch aus, dass ein durch einen Scannerspiegel abgelenkter UV-Laser jede einzelne Bauteilschicht entsprechend der Geometrie in der x-y-Ebene abfährt und somit das photosensitive Material aushärtet. Nach jeder Schicht senkt sich die Bauplattform um eine Schichtstärke in z-Richtung. Die Wischvorrichtung sorgt daraufhin dafür, dass die Oberfläche wieder mit flüssigem Harz bedeckt und glatt gestrichen wird („Recoating“¹¹⁶). Nun werden die vorhergehenden Schritte bis zur letzten Schicht wiederholt. Je nach Lage und Positionierung im Bauraum müssen Stützkonstruktionen an das Bauteil angebracht werden. Zum Post-Processing gehört neben der Reinigung auch das Entfernen der Stützen. Zur endgültigen Fertigstellung des Prototyps ist eine abschließende Aushärtung des Modells in einem UV-Schrank notwendig. Anschließend ist gegebenenfalls die Behandlung mit Lacken, Füllern oder auch Beschichtungen aller Art erforderlich.

Zu beachten ist, dass das flüssige Harz bei der Polymerisation an Volumen verliert. Dieses „Schrumpfen“ muss also bei der 3D-Konstruktion der Bauteile am Computer als Toleranz eingezeichnet werden.¹¹⁷

Weitere Verfahren der Stereolithografie: Maskenverfahren (Solid Ground Curing oder Projektionsverfahren), Druckkopf-Lampe-Verfahren

Materialien: „zähflüssige, un- oder niedrig vernetzte [photoempfindliche] Monomere“¹¹⁸

¹¹⁶ Gebhardt, Andreas. (2007). „Generative Fertigungsverfahren“, S.81.

¹¹⁷ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.80ff.

¹¹⁸ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.33.

Vorteile:

- Wenig Abfall: Nicht vernetztes Material kann recycelt werden.
- Genauestes Verfahren: Die Genauigkeit wird hier nur durch den Laserstrahldurchmesser limitiert.
- Auswaschbare Stützmaterialien: Kein großer Aufwand ist zu deren Entfernung notwendig.
- Komplexe Bauteile: Diese können in Einzelteilen konstruiert und anschließend zusammengefügt werden.
- Interne Hohlräume: Nicht nur deren Konstruktion, sondern auch deren Entleerung ist möglich. Gegebenenfalls kann durch Anbohren der Hohlräume das flüssige Monomer ablaufen.¹¹⁹

Nachteile:

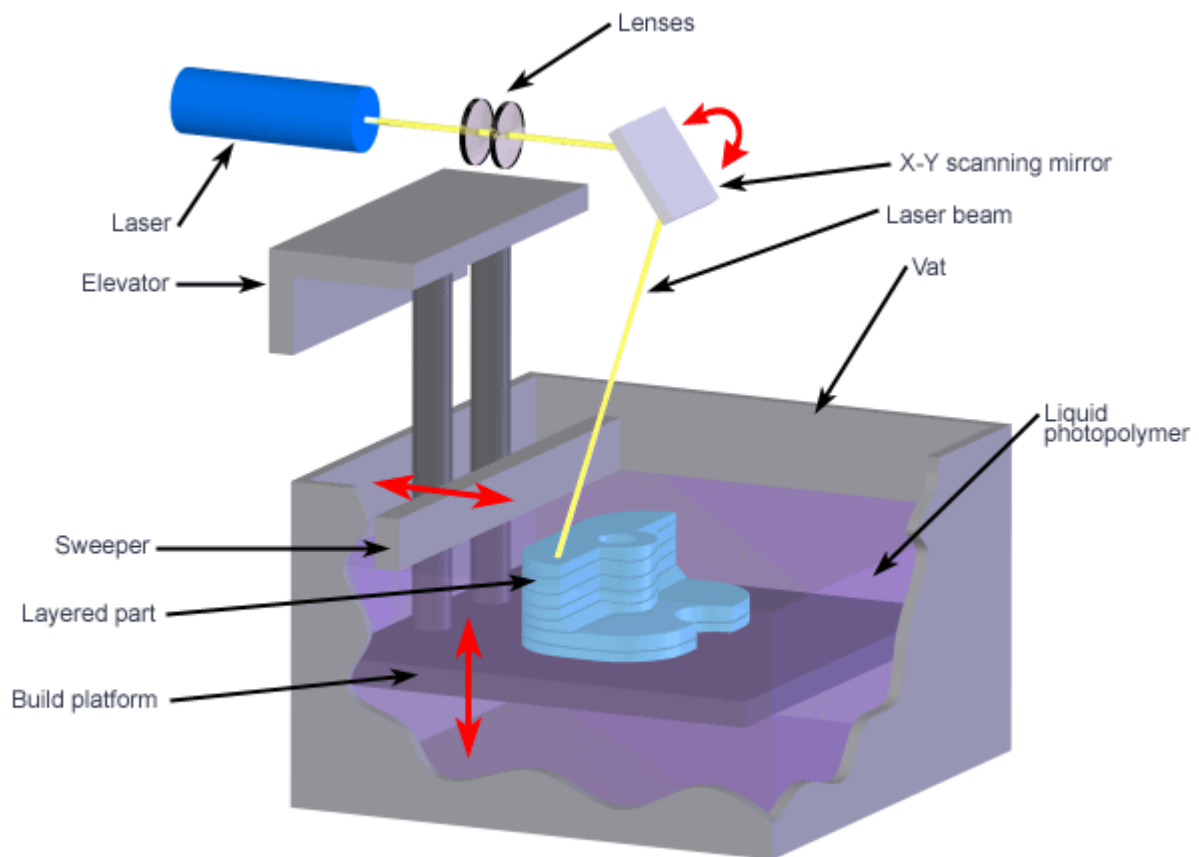
- Zerbrechlich: Die Bauteile können zerbrechen, wenn sie angebohrt werden.
- Hygroskopisch: Das Material nimmt Wasser aus der Umgebung auf.
- Stützkonstruktionen: Diese sind bei bestimmten Bauteilgeometrien notwendig und nach der Fertigstellung auch wieder zu entfernen.
- Photosensitives Material: Nur bei Monomeren, die auf UV-Licht reagieren und sich folglich zu einem Polymer verfestigen, ist Stereolithografie möglich. Damit rücken Materialeigenschaften wie Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Temperaturbeständigkeit in den Hintergrund.
- Zweistufiges Verfahren: Nach der Fertigstellung im Harzbad muss der sogenannte „Grünling“ noch in einem UV-Schrank vollständig aushärten.
- Lagerung und Entsorgung von Lösemitteln: Falls diese zur Reinigung benötigt werden, muss auch an die Lagerung und Entsorgung gedacht werden.¹²⁰

¹¹⁹ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.42.

¹²⁰ Vgl. Gebhardt, Andreas, S.43.

Kennzahlen:

- Minimale Schichtdicke: 0,05 mm¹²¹
- Maximaler Bauraum: 1500 x 750 x 550 mm (iPro 9000 XL von der Firma „3D Systems“)¹²²



Copyright © 2008 CustomPartNet

Abbildung I-6: Schematische Darstellung des Stereolithografieverfahrens - Quelle: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography> (25.10.2011)

¹²¹ Vgl. „iPro-Family“. <http://www.3dsystems.com/products/datafiles/ipro/iPro-Family-A4-DE.pdf> (25.08.2011)

¹²² Vgl. „iPro-Family“. <http://www.3dsystems.com/products/datafiles/ipro/iPro-Family-A4-DE.pdf> (25.08.2011)

B. Open Source Rapid Prototyping Anlagen - RepRap

1. Historischer Überblick

Das Prinzip des Replicating Rapid-Prototyper, kurz RepRap, umfasst die Fähigkeit dieser Anlage, sich selbst im größtmöglichen Umfang zu reproduzieren und zu vervielfältigen. Dies bedeutet, verwendete Bauteile weitestgehend selbst herzustellen und letztendlich nur die Komponenten, welche einen höheren mechanischen und elektrischen Anspruch erfordern - wie Motoren, Extruder etc. - von externen Quellen zu beziehen. Solche Komponenten können aufgrund ihrer Komplexität nicht durch eine Replicating Rapid Prototyping Maschine selbst hergestellt werden.¹²³

Der RepRap zählt neben Makerbot, Ultimaker und weiteren wenigen Anlagen zu der Kategorie von Druckern, die es ermöglichen, 3D-Objekte zu erstellen, welche vorher mithilfe von CAD-Applikationen konstruiert wurden.

Die Idee dieses Projektes wurde 2004 vom britischen Universitätsprofessor Adrian Bowyer in seinem Aufsatz „Wealth Without Money“ veröffentlicht. In diesem schildert er das Problem der Abhängigkeit des Konsumenten vom Produzenten. Dieses möchte er mit Hilfe einer bezahlbaren Maschine lösen, mit welcher man in der Lage ist, alltägliche Gebrauchsgegenstände selbst herzustellen.¹²⁴

Ein Jahr darauf ermöglichte Bowyer die Umsetzung seiner Konzeption als sogenanntes Open Source Projekt, das heißt, dass durch aktive Weiterentwicklung von Unternehmen sowie Privatpersonen eine permanente Verbesserung der Anlagen erreicht werden kann. Dabei unterliegt speziell die Software einer Reihe von Lizenzen der Open Source Initiative (OSI), die einen freien Zugang auf die Quelltexte gewährleisten.¹²⁵

Am 28. Mai 2008 gelang es der ersten RepRap Version Darwin¹²⁶ sich so weit wie möglich selbst zu reproduzieren.

¹²³ Vgl. Myfab: <http://www.myfab.de/drucker.html> (10.11.2011)

¹²⁴ Vgl. Golem: <http://www.golem.de/0806/60182.html> (10.11.2011)

¹²⁵ Vgl. Opensource: <http://www.opensource.org/licenses/gpl-license.php> (10.11.2011)

¹²⁶ Modellnamensgebung nach Charles Robert Darwin, vor allem durch seine herausragenden Beiträge zur Evolutionstheorie.

2. Prinzipieller Arbeitsablauf des RepRap

Die grundlegende Funktionsweise des RepRap, aber auch des Makerbots und des aktuell von uns behandelten Ultimakers liegt im Durchlaufen des Schmelzschichtverfahrens, kurz FDM (engl. Fused Deposition Modelling). Mit Hilfe eines Druckkopfes wird hier ein etwa 3 mm dünner Kunststoffaden in Dreiachsrichtung (x, y und z) entlang vorgegebener Koordinaten Schicht über Schicht auf eine Bauplattform aufgetragen. Der Ablauf dieses und weiterer Verfahren wurde bereits in Kapitel III A detailliert behandelt.

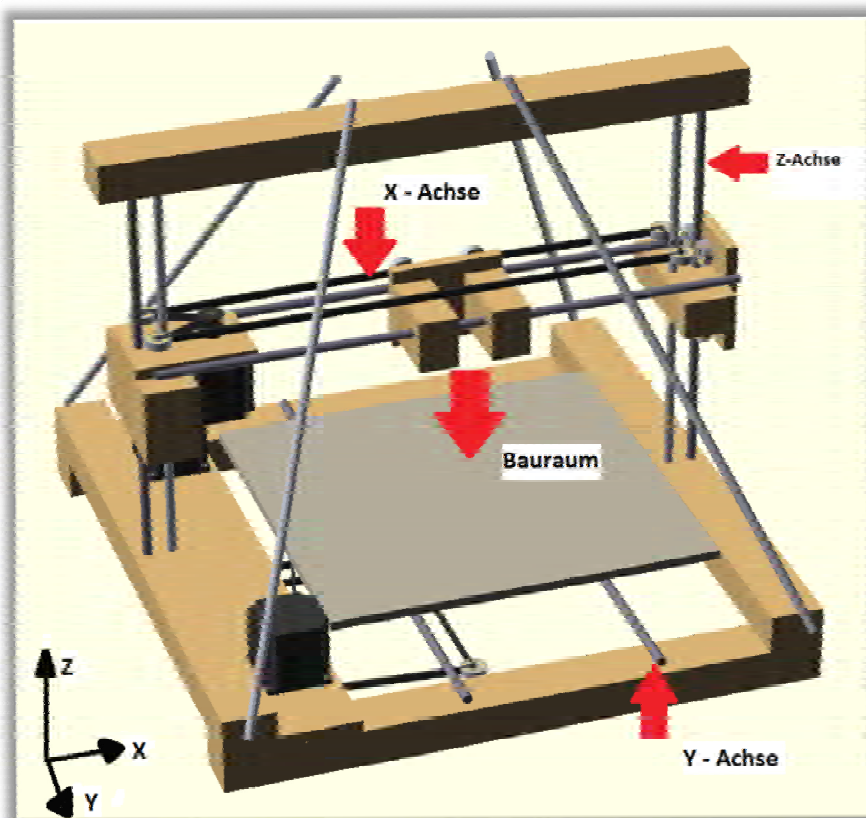


Abbildung I-7: Vereinfachter Aufbau eines RepRap Mendel mit Achsenbezeichnung – Quelle: <http://www.zzorn.net/2010/06/design-for-reprap-mendel-inspired.html> (10.11.2011)

3. RepRap-Modellversionen

Folgende Tabelle zeigt die Entwicklungsstadien der RepRap-Modellversionen in chronologischer Reihenfolge:

Modellbezeichnung	Eigenschaften & Fortschritt
1. Version Darwin	<ul style="list-style-type: none"> • Kleiner Druckbereich • Häufige Kollision auf der z-Achse aufgrund unausgereifter Bewegungsbeschränkung
2. Version Mendel Original	<ul style="list-style-type: none"> • Tadellose Funktionsweise bis heute • Hoher mechanischer Anspruch • Komplexe Justierung vieler Teile
3. Version Prusa Mendel (seit Oktober 2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Konzept ähnlich dem des Mendel Original • Geringere Komplexität des mechanischen Aufbaus • Kostengünstiger
4. Version Huxley (seit Mai 2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinere Motoren • Kleinerer Bauraum • Herstellung aller Prusa und Mendel Bauteile möglich

Abbildung I-8: RepRap Family Tree: http://reprap.org/wiki/RepRap_Family_Tree (10.11.2011)

Im folgenden Kapitel widmen wir uns dem Aufbau des Ultimakers Version „Batch 02“. Wir gehen dabei nach der Bauanleitung des Ultimaker-Wiki¹²⁷ vor.

¹²⁷ Vgl. „Ultimaker Assembly Rev2“: <http://wiki.ultimaker.com/UltimakerAssemblyRev2> (17.11.2011)

II. Ultimaker

A. Aufbau

Im Holzgehäuse des Ultimakers findet eine 21 cm auf 21 cm große Bauplattform Platz. Sie ist auf der z-Achse über eine Höhe von 22 cm einstellbar. Der Druckkopf bewegt sich frei an den x- und y-Achsen, welche an der Gehäuseoberseite gelagert sind. Er wird durch den auf der Rückseite montierten Extruder Mechanismus mit dem Druckmaterial versorgt.

Insgesamt sind vier Schrittmotoren im Einsatz, die jeweils eine Achse bzw. Funktion in jeweils beide Richtungen steuern:

- x-Stepper Motor: Bewegung des Druckkopfes nach links und rechts
- y-Stepper Motor: Bewegung des Druckkopfes nach vorne und hinten
- z-Stepper Motor: Absenken und Anheben der Bauplattform
- Extruder Stepper Motor: Ausgabe und Rückzug des Druckmaterials

Als weitere elektronische Funktionseinheit kommt das Heizelement im Druckkopf hinzu, das je nach Druckmaterial und gewählter Druckgeschwindigkeit Temperaturen zwischen 180°C und 280°C erzeugt. Hierdurch wird das Material eingeschmolzen und in dünnen Schichten (bis zu 20µm) auf das Druckbett aufgetragen. Die Steuerung der einzelnen Komponenten übernimmt die Ultimaker-Elektronik auf der Unterseite des Druckers, deren Hauptkomponente wiederum aus einer Arduino Mega 2560 Platine besteht. Hierüber wird eine USB-Schnittstelle zur Kommunikation mit einem Computer bereitgestellt.

Der Aufbau des Ultimakers gliedert sich somit in folgende Teile:

- Rahmen
- x-, y- und z-Motoren
- x- und y-Achsen
- Druckkopf
- Druckbett
- Extrudereinheit
- Elektronik

1. Rahmen

Der Rahmen des Ultimakers setzt sich aus insgesamt 5 Sperrholzteilen zusammen, die mit „Front“, „Left“, „Right“, „Back“ und „Bottom“ beschriftet sind. Bevor mit dem Zusammensetzen dieser Platten begonnen werden kann, müssen die Endstops montiert werden. Diese Taster befinden sich jeweils an den Enden der Achsen und sorgen dafür, dass der Druckkopf zum Stehen kommt, wenn er die Clips berührt. Dies sollte sich auch durch ein „Klick“-Geräusch bemerkbar machen.

Mit Hilfe von zwei 10-mm-Schrauben befestigt man die Endstops an den dafür vorgesehenen Stellen. Es ist darauf zu achten, dass die Schrauben nicht zu fest angezogen werden, da die endgültige Position der Taster erst bei Inbetriebnahme des Ultimakers festgelegt wird.

Die unterschiedlichen Farben der Kabel (x = blau, y = rot, z = schwarz) helfen dabei, die Endstops den richtigen Seiten zuzuordnen und erleichtern so später den richtigen Anschluss auf der Platine. Anders als bei vergleichbaren Bausätzen (z.B. Makerbot) werden je Achse zwei Endstops eingesetzt, anstatt mit einem softwareseitig konfigurierten maximalen Verfahrensweg zu arbeiten.

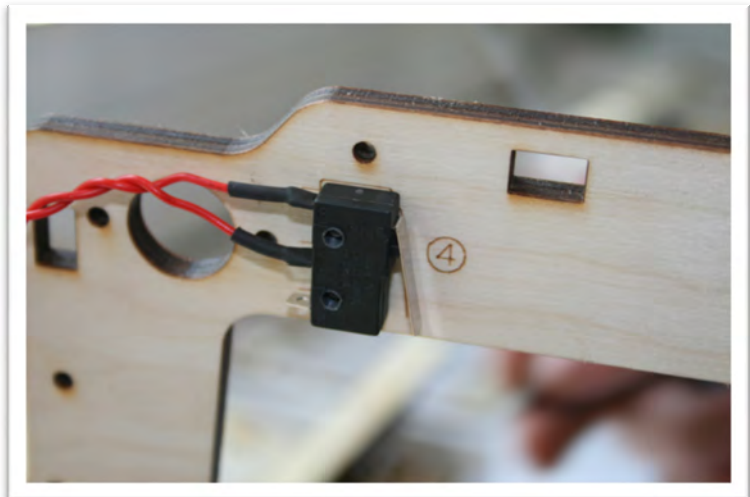


Abbildung II-1: Endstop



Abbildung II-2: Doppelte Ausführung der Endstops pro Achse

Sobald die Endstops an den markierten Stellen angebracht worden sind, kann der Rahmen zusammengesteckt werden. Die Back-Seite bildet hierfür die Grundlage und wird flach mit der Beschriftung nach innen auf den Tisch gelegt. Daraufhin steckt man vorsichtig die Top-Seite in die Kerben der Back-Platte. Ebenso verfährt man mit der Bottom-Seite. Danach ist die Front-Seite vorsichtig auf beiden zu

platzieren. Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht mit zu viel Kraftaufwand gearbeitet wird, da die Konstruktion noch sehr instabil ist und leicht nachgeben kann.

Im nächsten Schritt werden die vier Kabelführungen an den Ecken, die im Gehäuse liegen, angebracht. Es befinden sich zwei lange und zwei kurze Führungsschächte im Bausatz. Die langen Kabelführungen sind für die Befestigung an der Front-Seite, die kurzen für die Back-Seite vorgesehen.

Indem man die beiden Platten „Left“ und „Right“ auf den Rahmen aufsteckt, werden die Führungsschächte befestigt.

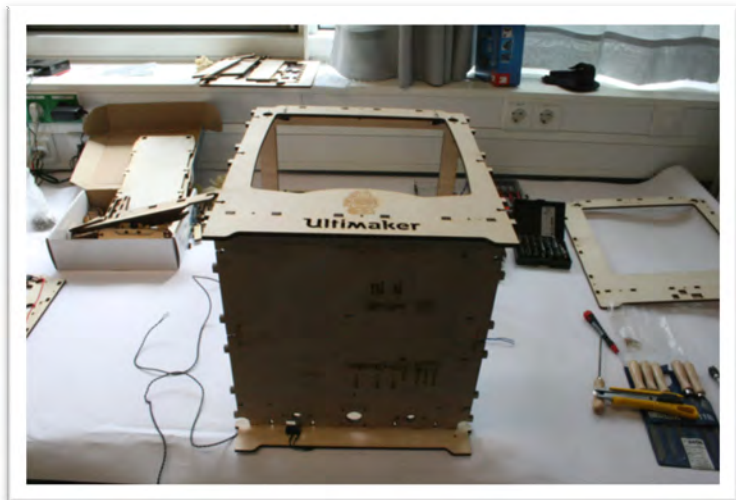


Abbildung II-3: Zusammenstecken der Holzplatten

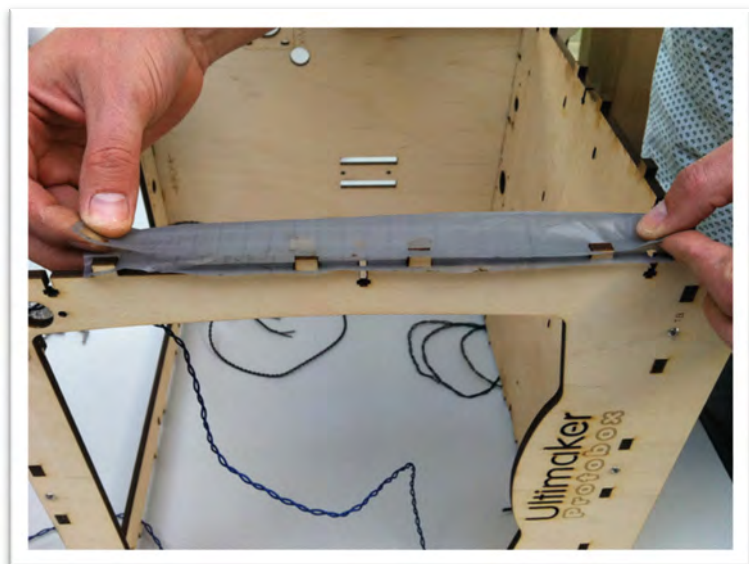


Abbildung II-4: Einlegen der Kabelführung

Zur endgültigen Montage des Rahmens werden quadratische Gewindemuttern in die sogenannten „T-Slots“ eingelegt, um die einzelnen Seiten fest durch 16-mm-Schrauben zu befestigen.

Daraufhin folgt das Verlegen der Endstop-Kabel durch die Kabelführungen. Wichtig hierbei ist, dass die einzelnen Kabel jeweils verdreht sind, da sie sonst anfällig für elektrische Interferenzen sind, die von den Schrittmotoren ausgehen.

Zum Schluss müssen die Kabel noch durch die Löcher in der Bottom-Seite gesteckt werden. In einem späteren Schritt werden sie mit der Elektronik verbunden.

An der Unterseite der Bottom-Platte angebrachte Klettverschlüsse helfen dabei, die Kabel ordentlich zu verstauen.

Als nächstes wird die Verankerung, in die später die Materialspule eingehängt wird, auf der Rückseite des Gerätes festgeschraubt. Außerdem sind zwei Deckel an die Unterseite des Rahmens zu schrauben. Diese gewährleisten einen festen Halt für die Achsen in z-Richtung, die später eingefügt werden.

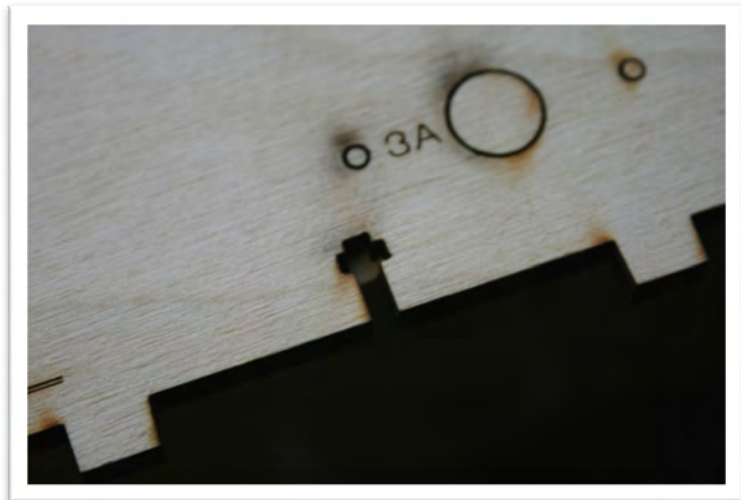


Abbildung II-5: "T-Slot"



Abbildung II-6: Unterseite des Ultimakers

2. X-, Y- und Z-Motoren

Bei den x-, y- und z-Motoren ist zu beachten, dass jeweils das schwarze und grüne, sowie das rote und blaue Kabelpaar verdreht sind.

Zur Vorbereitung werden die Riemenräder mit 5 mm Innendurchmesser mit der dünnen Seite zum Motor auf die x- und y-Motorachsen gesteckt. Die Räder sind dabei so festzuziehen, dass sie frei rotieren können.

Der nächste Arbeitsschritt besteht darin, den ersten U-förmigen Platzhalter 7C auf die x- und y-Motoren zu setzen, die Kabel durch die Öffnung zu stecken, einen kurzen Zahnriemen um das Riemenrad zu legen und zwei weitere Platzhalter (7B) darüber anzubringen. Die Motoren können daraufhin an den markierten Stellen montiert werden. Mit Hilfe von Unterlegscheiben wird verhindert, dass der Motor im Betrieb verrutscht. Die Schrauben dürfen aber nur leicht angezogen werden, da die endgültige Positionierung erst später stattfindet.

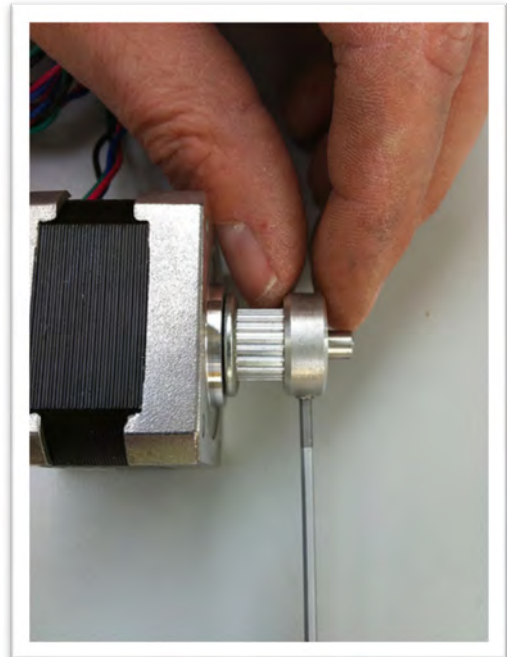


Abbildung II-7: Befestigung der Riemenräder



Abbildung II-9: Schrittmotor mit eingelegtem Zahnriemen

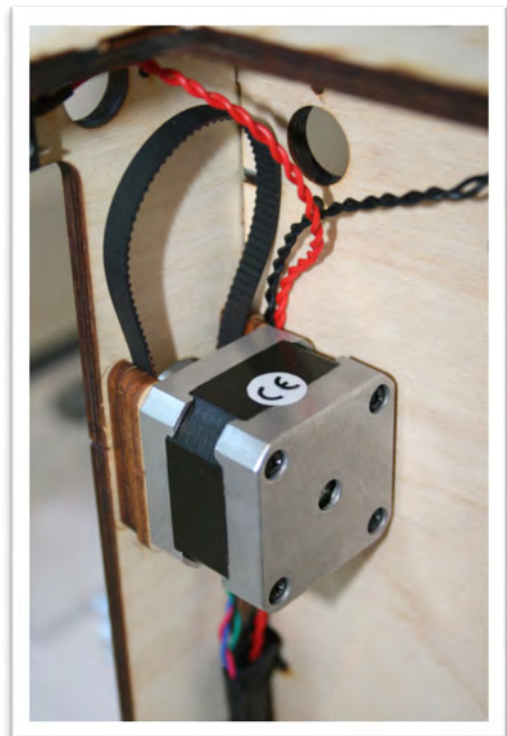


Abbildung II-8: Montierter y-Schrittmotor

Die Kabel der Motoren können nun durch die Kabelschächte geführt werden, sodass sie ebenfalls auf der Unterseite des Rahmens zum Vorschein kommen. Der Anschluss an die Elektronik erfolgt in einem späteren Arbeitsschritt.

Der z-Motor soll so an der Unterseite des Rahmengestells montiert werden, dass die Kabel zur Mitte der Bottom-Platte zeigen. Die im Paket enthaltene Kupplung steckt man daraufhin mit der Seite, die den 5 mm Durchmesser aufweist, auf die Motorachse und schraubt sie fest.

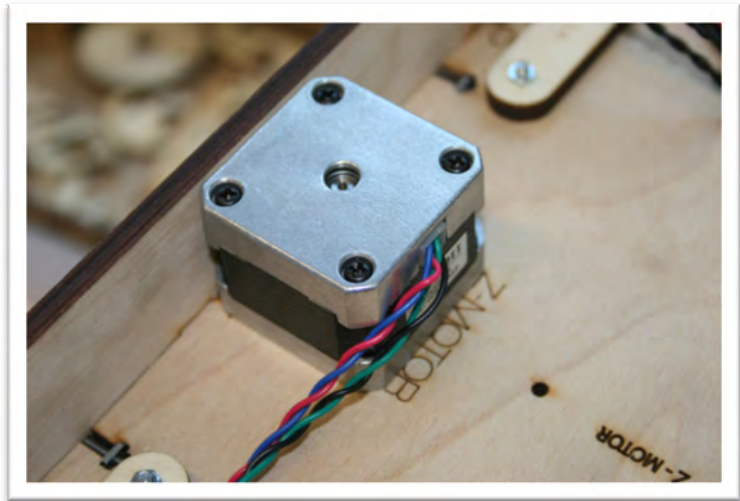


Abbildung II-10: z-Motor



Abbildung II-11: Montiertes Kupplungsteil

3. X- und Y-Achsen

Zuerst werden die acht Lager in die dafür vorgesehenen Stellen in den Rahmen gesteckt. Dabei ist darauf zu achten, dass sie bündig zur Innenseite eingesetzt werden, da sonst – verursacht durch Reibung zwischen Lagern und Abdeckplatten - keine optimale Druckqualität gewährleistet werden kann.

Daraufhin steht das Zusammensetzen der vier Gleitschuhe, die mit „Front“, „Left“, „Right“ und „Back“ bezeichnet werden, an. Die entsprechenden Teile steckt man in der Reihenfolge A bis F mit teilweise großem Kraftaufwand nacheinander auf das Lager auf. Folgendes sollte dabei beachtet werden: Die einzelnen Teile müssen exakt aufeinanderliegen, da sonst die Schrauben in einem nächsten Schritt nicht komplett durchgesteckt werden können. Dies ist ebenfalls beim Zusammenbau der vier Klauen, die später den Zahnriemen führen, wichtig. Die Klauen werden anschließend mit den Gleitschuhen verschraubt.

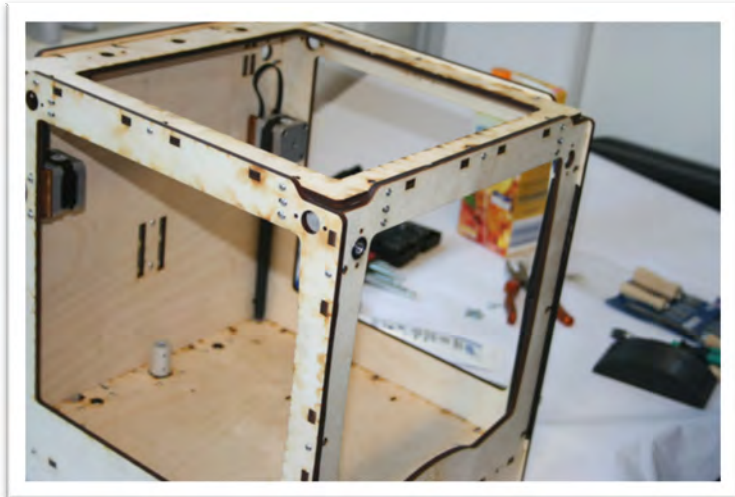


Abbildung II-12: Einsetzen der Lager

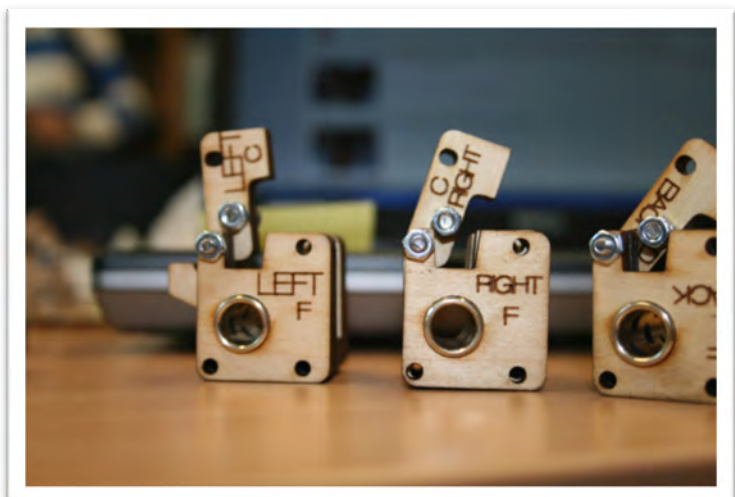


Abbildung II-13: Gleitschuhe mit montierten Klauen

Die Abdeckplatten (blaue Teile) und Führungshilfen (rote Teile) für die Achsen sind, wie auf dem folgenden Foto beschrieben, zu montieren. Dabei sollte man beachten, dass jeweils nur eine Abdeckkappe komplett verschraubt werden darf, da sonst die jeweiligen Achsen nicht mehr eingeführt werden können.

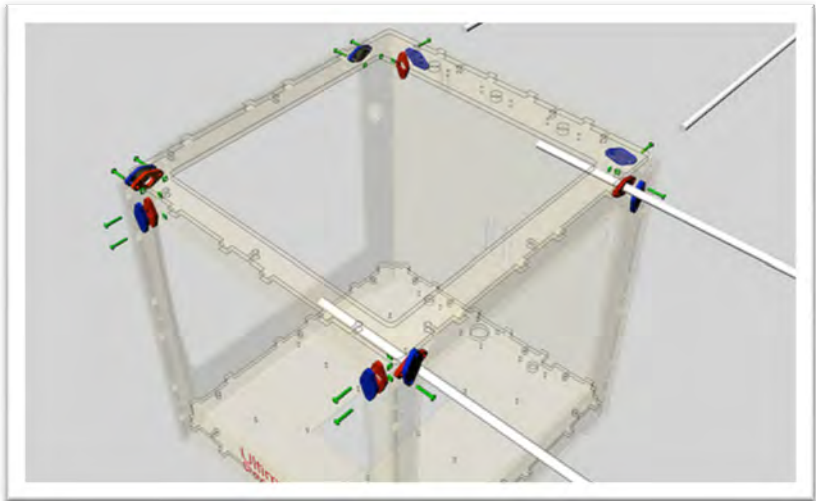


Abbildung II-14: Einbau der Achsen - Quelle:

http://wiki.ultimaker.com/Ultimaker_rev.3_assembly:_x-Y_axes (10.11.2011)

Wir starten mit der Front-

Achse: Zuerst schiebt man die Achse teilweise durch das Lager, danach werden ein Riemenrad und ein langer Zahnriemen auf die Achse gesteckt. Als nächstes kommt der Gleitschuh auf die Achse. Daraufhin folgt nochmal ein Riemenrad mit einem Zahnriemen. Zum Schluss steckt man die Achse in das gegenüberliegende Lager und die Abdeckkappe kann vollständig verschraubt werden.



Abbildung II-15: Vormontierte Abdeckkappe

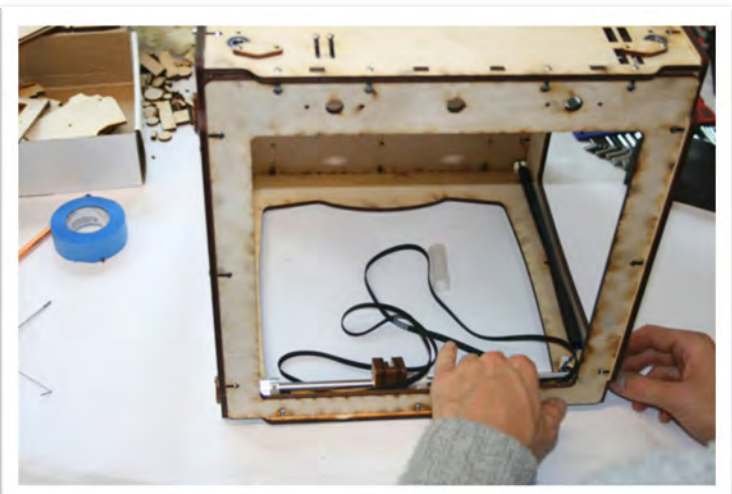


Abbildung II-16: Einlegen der Riemen, Riemenräder und Gleitschuhe

Der Einbau der verbleibenden Achsen erfolgt auf dieselbe Art und Weise bis auf eine Ausnahme: Bei der rechten und hinteren Achse wird zusätzlich noch ein drittes Riemenrad montiert, auf das jeweils der kurze Zahnriemen des x- beziehungsweise y-Schrittmotors aufgelegt wird.

Mit dem Verschrauben der Abdeckplatte ist der Einbau der x- und y-Achsen abgeschlossen.

Die Riemenräder werden nun an die Enden der Achsen geschoben und die Zahnriemen werden zur Vorbereitung des nächsten Schrittes in die Klauen der Gleitschuhe eingelegt.

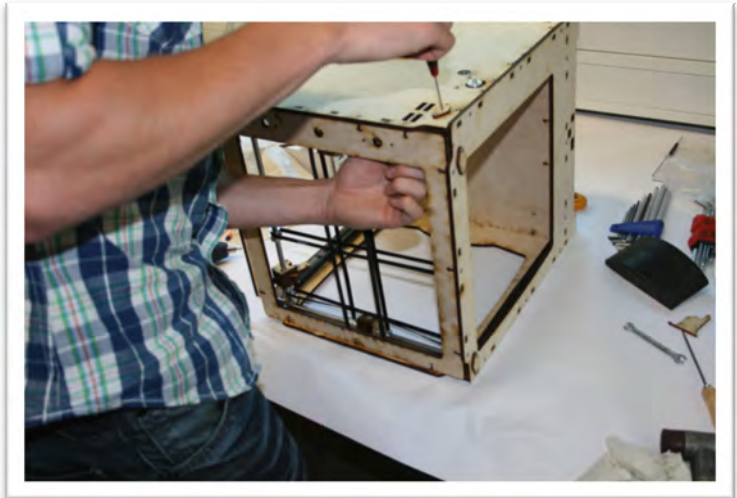


Abbildung II-17: Montage der Abdeckplatten



Abbildung II-18: Einlegen der Zahnriemen

4. Druckkopf

Der Druckkopf wurde fertig montiert dem Bausatz beigelegt. In aktuellen Versionen wird der Druckkopf in Einzelteilen ausgeliefert. Um ihn im Gehäuse zu befestigen schiebt man zunächst eine der 8-mm-Achsen durch das Lager im Druckkopf, welches sich näher am Heizelement befindet. Daraufhin wird diese Achse parallel zur Back-Seite eingebracht; sie stellt somit die x-Achse des Druckers dar.

Zur vorläufigen Befestigung steckt man die Enden der Achse in die entsprechenden Gleitschuhe und schließt letztere vorsichtig, so weit wie möglich, per Hand. Dabei ist darauf zu achten, dass sich auch der Zahnriemen zwischen der Klaue und dem Gleitschuh befindet.



Abbildung II-19: Druckkopf

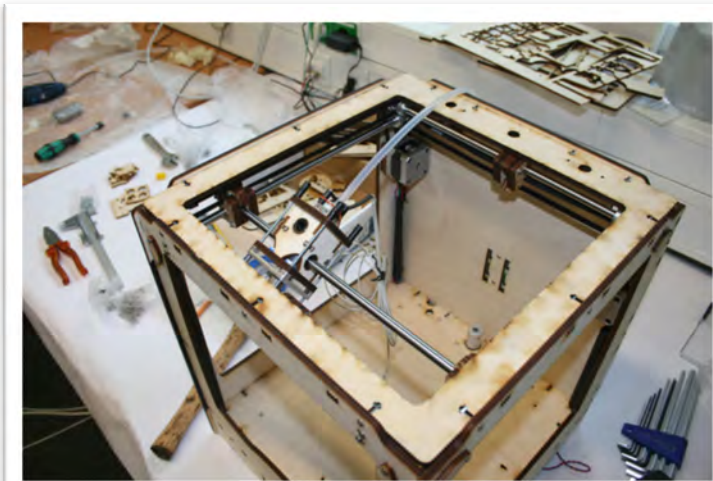


Abbildung II-20: Einführen der x-Achse

Nun kann die zweite Achse durch das andere Lager des Druckkopfgehäuses geschoben und in die noch offenen Gleitschuhe gesteckt werden.

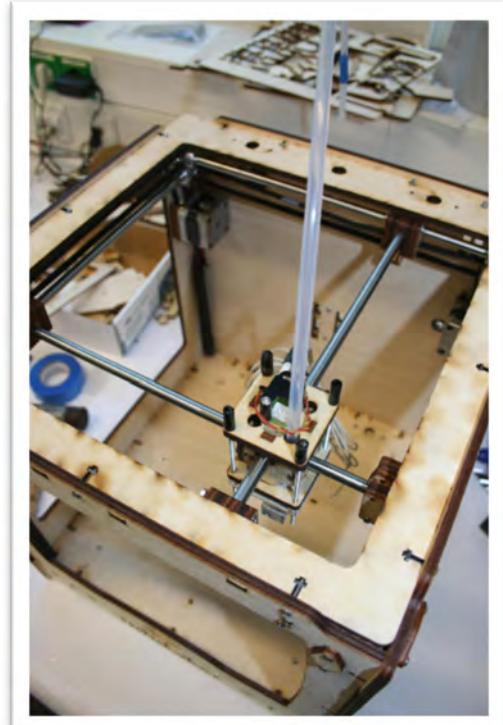


Abbildung II-21: X/Y Achsenkreuz

Das komplette Schließen der Klauen erfordert großen Kraftaufwand. Mit einer Rohrzange und passenden Holzunterlagen gestaltet sich diese Arbeit einfacher. In neueren Versionen wurde diese Komponente vollständig überarbeitet. Die letzte Schraube der einzelnen Gleitschuhe kann nun eingeführt und festgezogen werden.

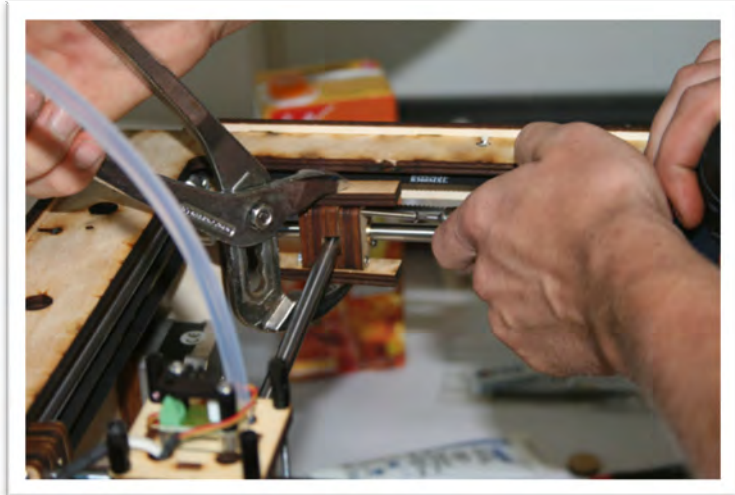


Abbildung II-22: Schließen der Klauen

Die Zahnriemen müssen nach dem Einbau des Druckkopfes eine gewisse Spannung aufweisen. Um dies im Rahmen der vorgesehenen Möglichkeiten genau einschätzen zu können, wird in der Bauanleitung darauf hingewiesen, dass beim Anzupfen der Riemen Töne entstehen sollen, die mit den Tönen einer mittleren Gitarrensaite vergleichbar sind. So kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Zahnriemen die notwendige Spannung aufweisen. Falls dies nicht der Fall sein sollte, müssen später Maßnahmen getroffen werden, um die Riemen stärker zu spannen.

Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Ausrichtung der Achsen. Dies ist notwendig, um den Kraftaufwand, den die Motoren zur Bewegung des Druckkopfes aufbringen müssen, so gering wie möglich zu halten und um gute Druckergebnisse zu erhalten. Hierfür lockert man zuerst alle acht Stellschrauben der Riemenräder. Danach versucht man die beiden Achsen exakt senkrecht zueinander zu positionieren. Mit Hilfe von gleichgroßen, rechteckigen Abstandshaltern kann auf jeder Seite einer Achse der gleiche Abstand zwischen Gleitschuh und Rahmenkonstruktion hergestellt werden. Dann können die Schrauben wieder festgezogen werden.



Abbildung II-23: Ausrichtung der Achsen

Ein weiterer Punkt, der unbedingt beachtet werden muss, ist die Tatsache, dass die Zahnriemen möglichst genau oberhalb der Achsen angeordnet werden. Hierzu kann mit einem Messschieber der Abstand abgemessen und eingestellt werden.

Nun folgt die Ausrichtung der x- und y-Motoren. Diese werden bei diesem Schritt so weit nach unten gezogen, bis der Zahnriemen gespannt ist. Der Motor wird in dieser Position durch vier Schrauben fixiert.



Abbildung II-24: Ausrichtung der Zahnriemen

Außerdem können jetzt die x- und y-Endstops endgültig fixiert werden. Um die optimale Position der Stops herauszufinden, führt man den Druckkopf an die Kanten des Gehäuses. Die Stops werden mit Hilfe der beiden Schrauben so befestigt, dass sie kurz vor der Kollision des Druckkopfes mit dem Gehäuse ausgelöst werden. Dies kann sowohl optisch als auch durch das bei Auslösung entstehende „Klick“-Geräusch überprüft werden.

Im nächsten Schritt folgt der Anbau des Lüfters und des Lüftungskanals. Der Lüftungsschacht kann einfach zusammengesteckt werden. Bei Bedarf hilft das mitgelieferte Klebeband diesen komplett abzudichten.



Abbildung II-25: Abdichten des Lüfters



Abbildung II-26: Lüfter am Druckkopf

5. Z-Plattform

Die z-Plattform wird von zwei Armen getragen, die beide aus fünf Ebenen bestehen. Zuerst legt man jeweils ein langes Linearlager auf Teil F. Daraufhin baut man die Arme Schicht für Schicht auf. Die einzelnen Ebenen müssen stark zusammengedrückt werden.

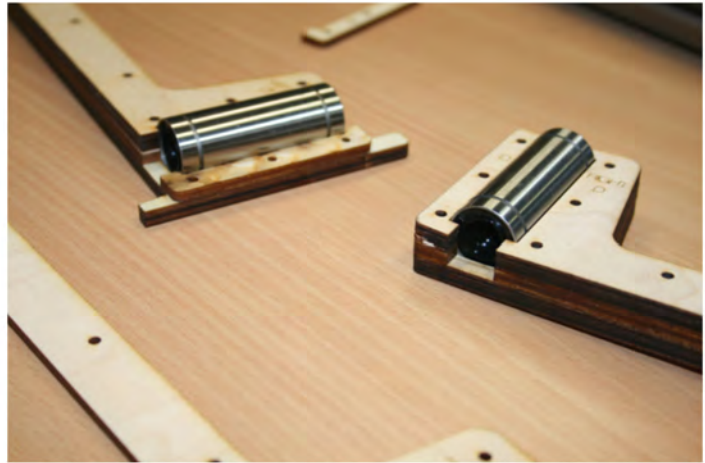


Abbildung II-27: Einlegen der Linearlager

Die Bauteile des Verbindungsstückes können nun mit der Antriebsmutter und den Armen zusammengesteckt und verschraubt werden.

Anschließend schraubt man die Bodenplatte mit den Armen und dem Mittelstück zusammen.



Abbildung II-28: Einsetzen des Mittelstücks

Bevor die Schrauben komplett fest angezogen werden, ist sicherzustellen, dass die Plattform eben ist. Diese Ebenheit kann erreicht werden, indem man die Platte gegen eine ebene Oberfläche - hier die Tischplatte - drückt und gleichzeitig die Schrauben festzieht.



Abbildung II-29: Endmontage in ebener Ausrichtung

Für die Montage der Acryl-Druckplatte werden jeweils vier Schrauben und Federn benötigt. Durch das Einbauen der Federn kann die Höhe der Druckplatte an den Ecken geringfügig verändert werden, falls diese nicht exakt parallel zur x/y-Ebene ausgerichtet ist. Nach Befestigen der Federn wird die Druckplatte aufgesetzt und mit den Schraubenköpfen eingehakt. So lässt sich das Druckbett flexibel aus- und einbauen.



Abbildung II-30: Befestigungsvorrichtung für das Druckbett

Nun kann die Druckplattform mit blauem Klebeband abgedeckt werden. Diese Maßnahme erhöht die Haftung des Druckergebnisses auf der Plattform.



Abbildung II-31: Vorspannung der Federn

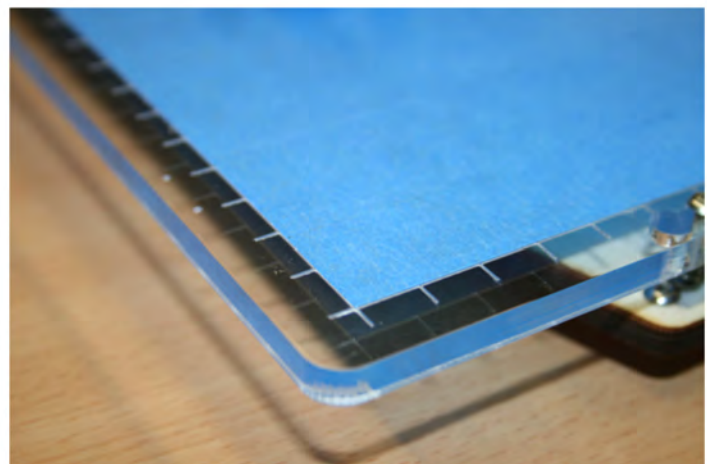


Abbildung II-32: Abkleben der Druckplattform

Im nächsten Schritt wird die Druckplattform im Druckergehäuse installiert. Dazu schiebt man die zwei 12-mm-Achsen durch die Öffnungen in der Oberseite, durch die Linearlager in der Plattform und schließlich in die Einfassungen in der Rahmenunterseite.

Anschließend ist die Arbeitsspindel im Drucker zu platzieren und so lange durch die Antriebsmutter zu drehen, bis sie in die Kupplung gesteckt werden kann. Dort wird sie dann mit Hilfe der Schrauben befestigt.

Der Aufbau des Rahmens ist damit abgeschlossen.



Abbildung II-33: Einbau der Druckplattform

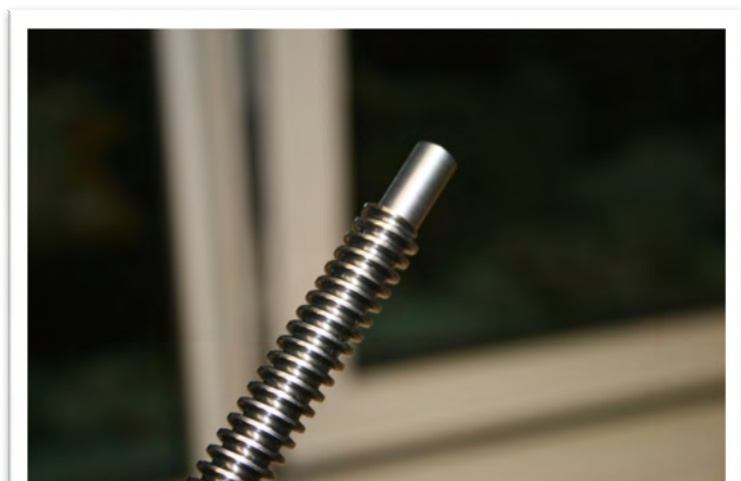


Abbildung II-34: Unteres Ende der Arbeitsspindel



Abbildung II-35: Eindrehen der Arbeitsspindel

[illegible]

36

6. Extrudereinheit

Für die Extrudereinheit wird ein Schrittmotor mit vormontiertem Zahnrad auf der Antriebswelle benötigt. Auf diesen werden die Teile 10 A und 10 B gelegt. Die „quick fit“ Schlauchkuppung kann nun in die T-förmige Aussparung gelegt werden. Darauf folgt Teil 10 C.

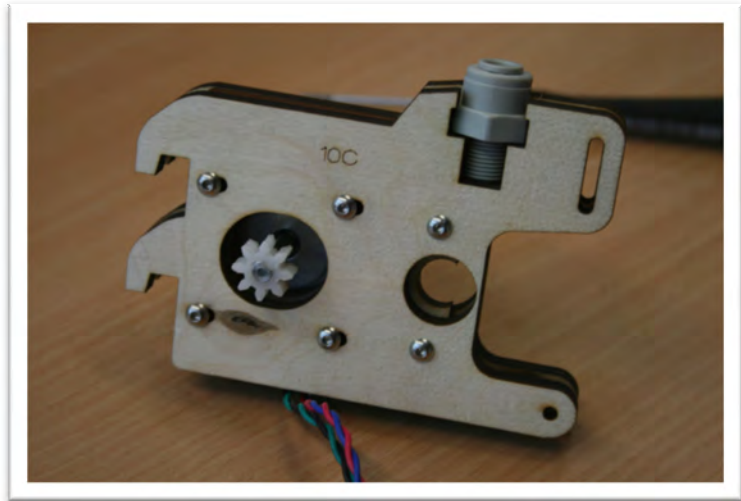


Abbildung II-38: Extrudereinheit

Im nächsten Schritt fügt man die Lager und die gerändelte Schraube ein. Letztere wird gegen eine Hutmutter gekontert.

Daraufhin ist die Klemmbacke aus den einzelnen Teilen zusammenzusetzen und zu verschrauben. Die schwarze Stellschraube dient zur Anpassung des Drucks auf den Kunststoffstrang. Je nach Bedarf kann so der Druck auf das Material verstärkt oder verringert werden.

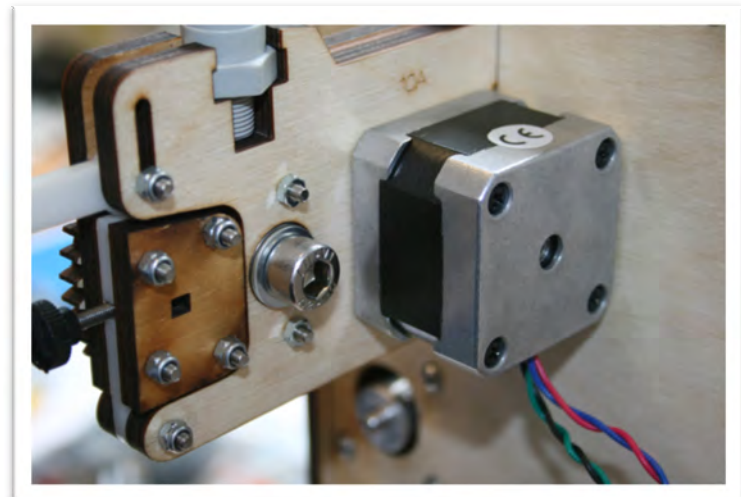


Abbildung II-39: Eingebaute Klemmvorrichtung

Man verschraubt nun die Klemmvorrichtung mit der Extrudereinheit und hängt das Bauteil in die dafür vorgesehenen Kerben an der Rückseite des Gehäuses. Die Kabel werden durch die Kabelschächte zur Unterseite des Rahmens geführt. Abschließend wird das große Holzzahnrad aufgesteckt.

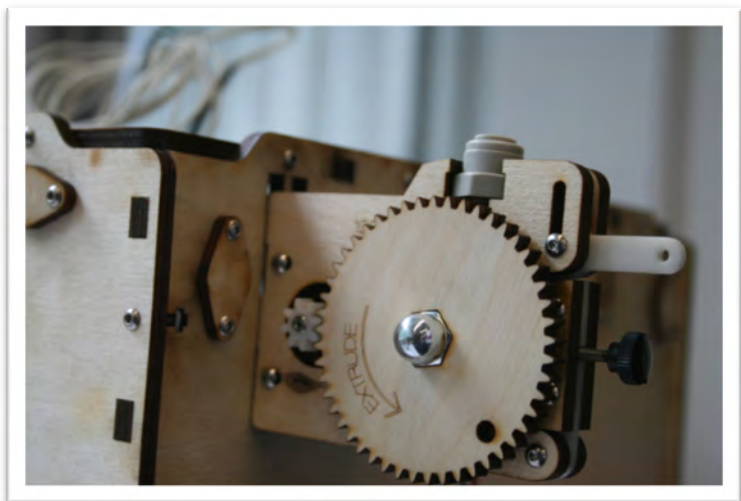


Abbildung II-40: Aufgestecktes Antriebszahnrad

Die Halterung für die Kunststoffspulen steckt man aus den entsprechenden Teilen zusammen und hängt sie in die Halterung an der Rückseite des Rahmens, die schon zu Beginn befestigt worden ist.

Auf die Halterung kann nun eine Materialsple mit dem gewünschten Material und Farbe aufgesetzt werden.



Abbildung II-41: Spulenhalterung

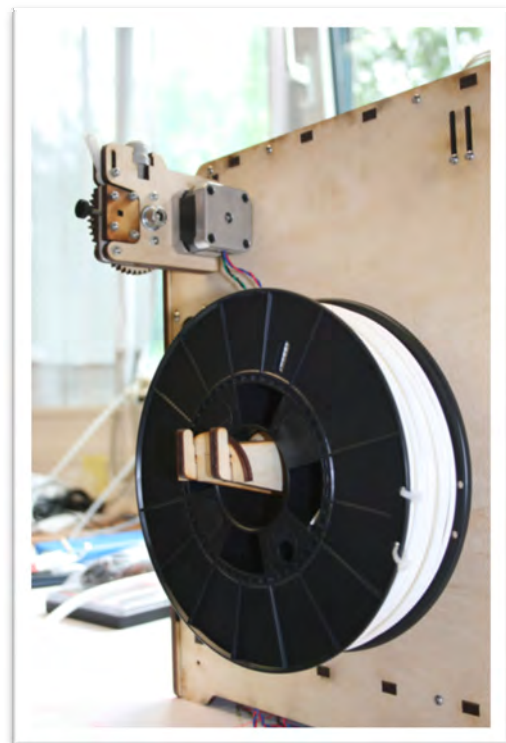


Abbildung II-42: Weiße PLA Spule

7. Anbau der Elektronik

Bevor man die Platine an der Unterseite des Gehäuses festschrauben kann, muss das Kühlungssystem zusammengebaut werden. Hierfür wird zunächst der Lüfter fest auf die Abdeckplatte geschraubt. Daraufhin sind der Lüftungsschacht, der laut Anleitung zusammengefasst werden muss, und dessen Abdeckung anzubringen. Mit Hilfe des blauen Tapes können alle undichten Stellen verklebt und somit unnötiger Kühlungsluftverlust vermieden werden.

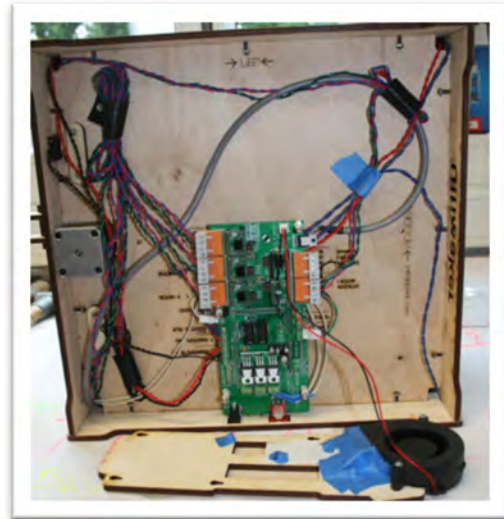


Abbildung II-43: Angeschlossene Elektronik

Nun folgt das Anstecken an die Elektronikplatine. Zusammen mit den Abstandshaltern wird die Elektronik an die Gehäuseunterseite geschraubt. Im Folgenden werden die Kabel an die Platine angeschlossen. Dabei helfen die Kennzeichnungen der einzelnen Anschlussstellen, die an der Unterseite des Bodens eingraviert sind.

Die Anschlussklemmen für den Druckkopf sind zum einen in die vorgesehenen Anschlussstellen am Druckkopf selbst zu stecken. Zum anderen werden die Kabel durch den Führungsschacht zur Gehäuseunterseite geführt und dort an die Platine angeschlossen. Zur Zugentlastung befindet sich ein schwarzes T-förmiges Kunststoffteil an der Oberseite des Druckkopfes, in welches man die Kabel einlegen kann. Das Kühlsystem kann nun auf die Platine gesteckt werden.

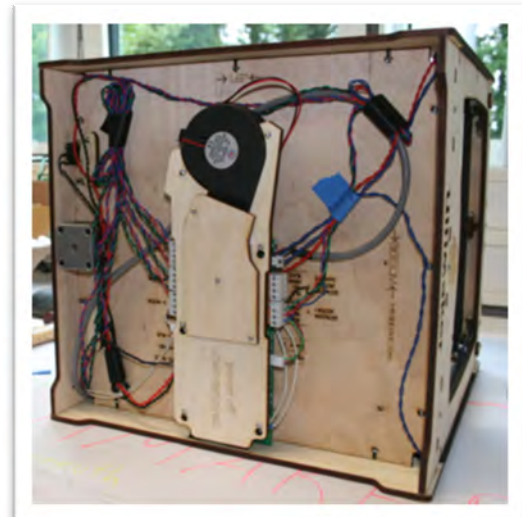


Abbildung II-44: Platine mit aufgestecktem Kühlsystem

Ein letzter wichtiger Aspekt ist die Ausrichtung der Bauplattform und des z-Endstops. Die Nivellierung wird durch die Einstellung eines gleichmäßigen Abstandes an allen vier Ecken der Bauplattform durch Justierung der Stellschrauben erreicht. Danach wird der z-Endstop so eingestellt, dass die Druckkopfspitze die Plattform berührt. Die exakte Feinausrichtung erfolgt softwareseitig, abhängig von der gewählten Schichtstärke. Falls eine Neuausrichtung der Bauplattform nötig ist, kann nun auch der z-Abstand durch die Stellschraube verändert werden.

B. Konfiguration / Optimierungen

1. Hardware

Zur Verbesserung der Druckergebnisse wurden zahlreiche Veränderungen an der Hardware vorgenommen.

Zahnriemen

Da wir nach dem Zusammenbau des Druckers festgestellt haben, dass die Riemen nicht die gewünschte Spannung aufwiesen, verwenden wir nun gewundene Torsionsfedern, auf die in der Ultimaker Mailingliste hingewiesen wurde.

Schrittmotoren

In Bezug auf die Motoren folgten wir dem aktuellen Ultimaker Design und setzten auf die längeren NEMA 17 Schrittmotoren. Der Austausch der Motoren führt dazu, dass mehr Kraft auf die Zahnräder ausgeübt werden kann. Somit sinkt die Gefahr deutlich, dass die Motoren Schritte verlieren. Durch Absenken der Betriebsspannung konnte auch die teils sehr hohe Temperaturentwicklung reduziert werden.

Lüfterschacht

Eine weitere Verbesserungsmaßnahme war das Anbringen eines selbstgedruckten Lüftungsschachtes. Bei dem Modell handelt sich um eine druckbare Nachahmung der faltbaren Originalkonstruktion. Der neue Schacht ist leichter und hat keine beweglichen Teile, somit wird das Risiko einer Druckbehinderung minimiert.

Isolierung des Heizelementes

Durch die Isolierung des Aluminiumheizblocks wurde dazu beigetragen, dass dessen Temperatur konstanter gehalten wird. Dies wurde durch Umwickeln mit Keramikband und anschließendes Abkleben mit Kapton-Klebeband erreicht.



Abbildung II-45: Isolierung des Heizelements

z-Stellschraube

Um den Abstand zwischen Druckkopf und Bauplattform komfortabler und genauer einstellen zu können, wurde eine entsprechende Erweiterung des Ultimaker Community Mitglieds „GeneralRulofDumb“¹²⁸ gedruckt und installiert.

Druckunterlage

Als Druckunterlage wurde ein neues Klebeband mit der Produktbezeichnung #3434 von 3M zum Abkleben der Druckplattform genutzt. Durch diese Maßnahme lassen sich die Bauteile leichter von der Plattform lösen. Die feinere Struktur verbessert zudem die Qualität der



Abbildung II-46: Klebeband als Druckunterlage

Druckunterseite geringfügig. Das von Ultimaker Ltd. ausgelieferte Klebeband #2090 (ebenfalls von 3M) erzielt durch eine bessere Haftung in Richtung des Druckgegenstandes weiterhin eine etwas höhere Präzision, insbesondere an Ecken und Kanten.

Schmierung der Achsen

Durch ständiges Ölen und Fetten der Achsen erhält man geschmeidige Bewegungen des Druckkopfes und der Gleitschuhe. Somit werden schnelle und akkurate Verfah Wege ermöglicht. Unzureichende Schmierung kann insbesondere bei der Arbeitsspindel in z-Richtung zu Problemen führen.

¹²⁸ Thingiverse Thing 11033: <http://www.thingiverse.com/thing:11033> (14.11.2011)

2. Software

Neben dem korrekten Aufbau und den gezielten Optimierungen der Hardware kommt auch der verwendeten Software eine entscheidende Rolle zu. Wir unterteilen den vollständigen Arbeitsablauf in vier Bereiche:

- Druckvorstufe
- Slicing
- Maschinenbedienung
- Firmware

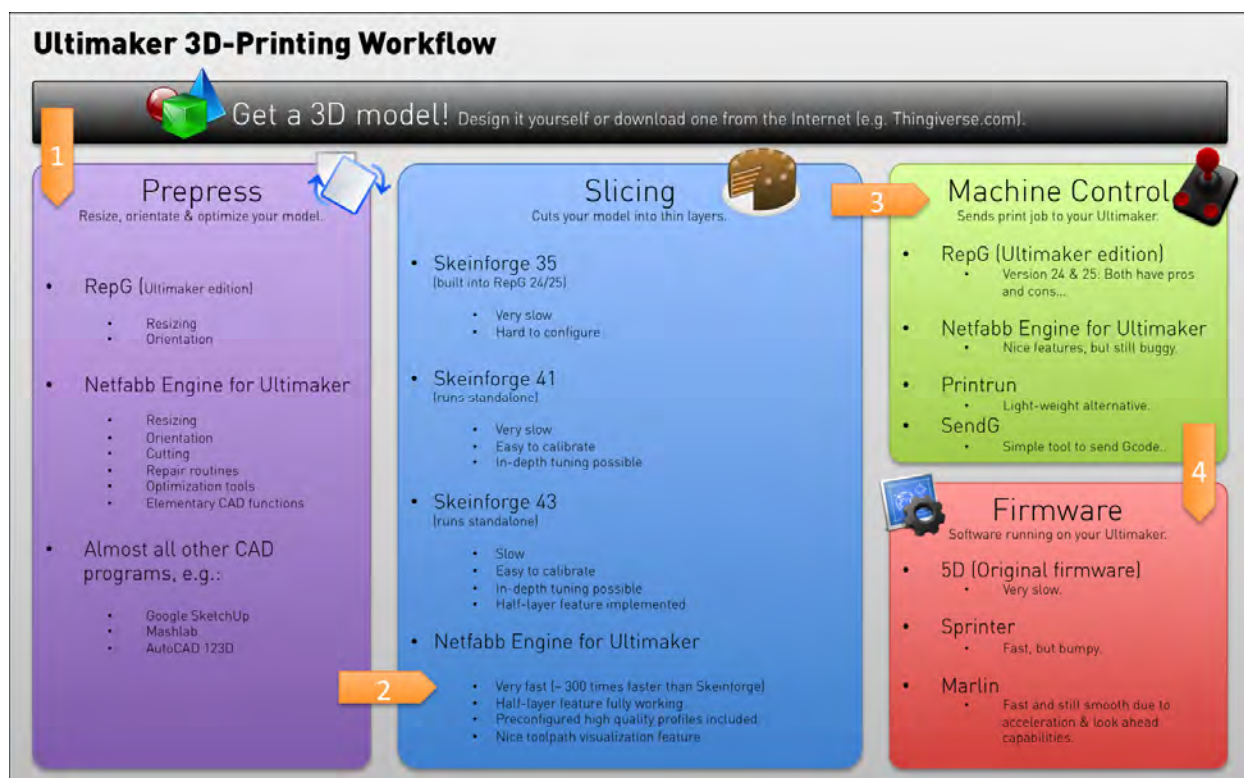


Abbildung II-47: Schema - Softwareseitiger Arbeitsablauf

Voraussetzung ist ein 3D-Modell im STL-Format (**S**urface **T**esselation **L**anguage) aus einer beliebigen CAD Applikation. Beim Export dieses Formats darauf zu achten, keine Details durch eine zu niedrige Polygonanzahl zu verlieren.

Druckvorstufe

Hier wird das vorliegende 3D-Modell im Druckraum ausgerichtet. Die Orientierung des zu druckenden Gegenstandes hat teilweise gravierende Auswirkungen auf die erzielte Druckqualität. Bei der Ausrichtung gilt es folgende Ziele anzustreben:

- Einhaltung des maximalen Bauvolumens
- Reduktion der zu druckenden Überhänge
- Sicherstellung von genügend Kontaktfläche zwischen Druckbett und Druckobjekt

Um dies zu erreichen stehen in der Regel folgende Grundfunktionalitäten zur Verfügung:

- Verschieben
- Drehen
- Skalieren

Erweiterte Funktionalitäten umfassen zum Beispiel:

- Zentrieren
- Auf Druckbett fixieren
- Vervielfachen
- Bauraum intelligent ausfüllen

Außerdem ist in diesem Schritt sicherzustellen, dass das Modell in einem einwandfreien Zustand vorliegt. Bei Löchern im Modell oder Einheitenfehlern muss per Hand oder mithilfe von Reparatur-routinen nachgebessert werden.

Slicing

Durch das sogenannte Slicing (Aufschneiden) wird das 3D Modell in ein zweidimensionales Schichtmodell zerlegt. Dieser Arbeitsschritt generiert den Werkzeugweg. Druckkopf, Druckbett und Extrudiereinheit folgen diesem festgelegten Weg während des Druckes. Die Güte eines Druckergebnisses hängt somit sehr stark von Präzision und Logik dieser Berechnung ab.

Nach der Kalibrierung der Extrusion können in diesem Arbeitsschritt eine Vielzahl von relevanten Parametern eingestellt werden, um die gewünschten Druckeigenschaften zu erzielen.

Grundlegend sind folgende Parameter zu beachten:

- Schichtdicke
- Geschwindigkeiten
- Bewegung mit Extrusion (Feed rate)
- Bewegung ohne Extrusion (Travel move)
- Temperatur
- Anzahl der Außenwände
- Anzahl der Boden- und Deckelschichten
- Ausfüllung Innenraum
- Support Strategie, also die Unterstützung von Überhängen durch weiteres Material
- Kühlung

Durch Druckprofile werden Kombinationen dieser und weiterer Einstellungen zusammengefasst und stehen zur späteren Nutzung bereit. Bei bestehenden Profilen muss demnach beim Slicing nur das für den Druckgegenstand Geeignete ausgewählt werden. Als Ergebnis generiert die Software den Werkzeugweg in Form von Maschinenbefehlen, dem sogenannten G-Code.

Maschinenkontrolle

Diese Funktionskomponente sendet den G-Code über die USB Schnittstelle an den Ultimaker. Außerdem stellt sie hilfreiche Funktionen zur Wartung und Justierung des Druckers zur Verfügung.

Gewählte Testumgebung

Neben diversen Open Source Applikationen für jeweils einen dieser Bereiche gibt es mit Netfabb Engine for Ultimaker¹²⁹ auch eine kommerziell vertriebene Komplettlösung. Seit Version 4.8 sind hier von der Ausrichtung des 3D Modells, über das Slicing bis hin zur Maschinenbedienung alle Funktionen vorhanden.

Durch diesen ganzheitlichen Ansatz und massive Geschwindigkeitsvorteile bei der Werkzeugwegberechnung gegenüber dem Open Source Slicer „Skeinforge“ war die Nutzung der Netfabb Engine als Testumgebung vorzuziehen.

¹²⁹ Netfabb.com, netfabb Engines: <http://netfabb.com/engines.php> (16.11.2011)

Bei den Testdrucken haben wir das Netfabb „ULTRA“ Profil von Paul Candler in der Variante „Filled Object“ verwendet. Die Standardschichtstärke beträgt hierbei 80 μm . Die Kontur wird mit einer Perimeterschichtstärke von 40 μm , also der halben Standardschichtstärke, gedruckt. Diese Schichten werden auch als „half layers“ bezeichnet. Durch dieses Verfahren wird die Auflösung der Außenflächen verdoppelt, ohne wesentlich längere Druckzeiten in Kauf nehmen zu müssen. Die Druckgeschwindigkeiten variieren zwischen 20 und 60 mm/s, abhängig von den zu druckenden Bereichen. Die Konturlinien werden zum Beispiel langsamer gedruckt als das Füllgitter. Für letzteres wurden Gitterlinienabstände von 1,8 mm bei allen Testkörpern verwendet. Bei Arbeitsbewegungen, bei denen kein Material ausgegeben wird (sogenannte „Travel Moves“), verfährt der Druckkopf mit einer Geschwindigkeit von 160 mm/s.

Firmware

Die Firmware ist auf dem EEPROM des Ultimaker Arduino Mega 2560 Boards gespeichert. Diese Software interpretiert den G-Code und steuert daraufhin die Motoren, den Lüfter wie auch das Heizelement an. Auch dieser Komponente kommt eine tragende Rolle zu. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung wurden hier im betrachteten Zeitraum große Fortschritte hinsichtlich der Druckgeschwindigkeit, aber auch bei der Druckqualität erreicht.

Im Folgenden ist eine kurze Übersicht über die bisher genutzten Firmwares und ihre charakteristischen Eigenschaften dargestellt:

- 5D Firmware: Original Firmware
- Sprinter Firmware: Schnellere Bewegungen und SD-Karten Unterstützung
- Marlin Firmware: Schnellere Bewegungen, kontrollierte Beschleunigung, PID Temperatursteuerung und SD-Karten Unterstützung

Die gesamte Testreihe wurde mit der Firmware „Marlin“ (Version vom 16. Oktober 2011) durchgeführt.¹³⁰

¹³⁰ Github.com, Quellcode Marlin: <https://github.com/bkubicek/Marlin/commit/9f57cdd6b4983b7357450b8f8da954ee57f73d4a> (16.10.2011)

C. Testreihen

Um Aussagen über die Präzision des Ultimakers treffen zu können, haben wir uns auf einzelne Bauteile beschränkt, die die grundlegendsten Geometrien aufweisen: Quader, Zylinder, Bohrung und Bauteile mit Überhang. Von jedem dieser Typen wurden mehrere Varianten angefertigt, die sich in Seitenlänge, Außen- bzw. Innendurchmesser oder Winkel unterscheiden. Zur Messung der z-Höhe haben wir ein Bauteil mit unterschiedlichen Treppenstufenhöhen konstruiert. Mit Hilfe einer Koordinatenmessmaschine konnten wir die einzelnen Bauteile vermessen. Die Oberflächengüte der Testkörper wird durch die mittlere Rauheit R_a und die gemittelte Rautiefe R_z beschrieben. Die Zylinder wurden auch hinsichtlich ihrer Rundheit vermessen. Unter der Rundheitsabweichung versteht man den „Abstand von zwei konzentrischen Kreisen, die die erfasste Umfangslinie berührend einschließen und deren radialer Abstand ein Minimum ist“¹³¹.

¹³¹ Vgl. Mitutoyo Form- und Lagerabweichungen: http://www2.mitutoyo.de/uploads/media/Poster_Form_und_Lageabweichungen_02.pdf (15.11.2011)

1. Genauigkeit in X-,Y- und Z-Richtung

Zielsetzung

In dieser Versuchsreihe ist es unser Ziel, die Größenabweichung der Bauteile sowohl in x- und y-, als auch in z-Richtung zu erfassen. Hierfür verwenden wir vier unterschiedliche Quader mit jeweils gleichen Seitenlängen. Für die z-Höhen-Bestimmung liegt ein weiteres stufenförmiges Bauteil vor.

Messergebnisse

Messung von Bauteilen mit quadratischer Grundfläche:

Testkörper 1 (10x10x10 mm)

[Einheit mm]	Sollwert	Istwert	Abweichung	relative Abw.
x-Richtung	10,000	10,089	+0,089	+0,890%
y-Richtung	10,000	10,116	+0,116	+1,160%

Testkörper 2 (20x20x10 mm)

[Einheit mm]	Sollwert	Istwert	Abweichung	relative Abw.
x-Richtung	20,000	20,117	+0,117	+0,585%
y-Richtung	20,000	20,301	+0,301	+1,505%

Testkörper 3 (40x40x10 mm)

[Einheit mm]	Sollwert	Istwert	Abweichung	relative Abw.
x-Richtung	40,000	40,248	+0,248	+0,620%
y-Richtung	40,000	40,371	+0,371	+0,928%

Testkörper 4 (100x100x10mm)

[Einheit mm]	Sollwert	Istwert	Abweichung	relative Abw.
x-Richtung	100,000	101,040	+1,040	+1,040%
y-Richtung	100,000	101,578	+1,578	+1,578%

Messung des stufenförmigen Bauteils (z-Richtung):

Einheit [mm]	Sollwert	Istwert	Abweichung	Relative Abw.
Stufe 1	5,000	4,783	-0,217	-4,340%
Stufe 2	10,000	9,818	-0,182	-1,820%
Stufe 3	20,000	19,868	-0,132	-0,660%
Stufe 4	40,000	39,965	-0,035	-0,087%
Stufe 5	100,000	100,020	+0,020	+0,020%

Gemittelte Oberflächengüte anhand aller gedruckten Testkörper 1-4:

Einheit [µm]	Ra	Rz
Unterseite	2,643	16,148
Seitenfläche	4,605	26,952
Oberseite	2,850	14,546

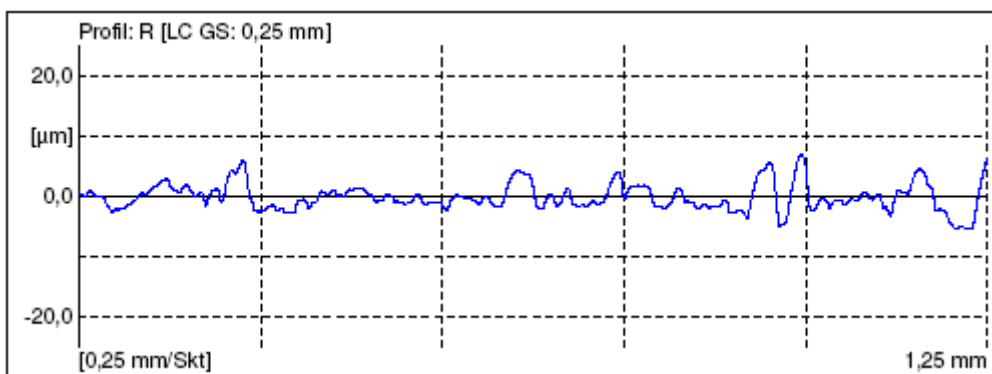


Abbildung II-48: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Unterseite - Testkörper 3: Ra 1,676 µm / Rz 8,553 µm

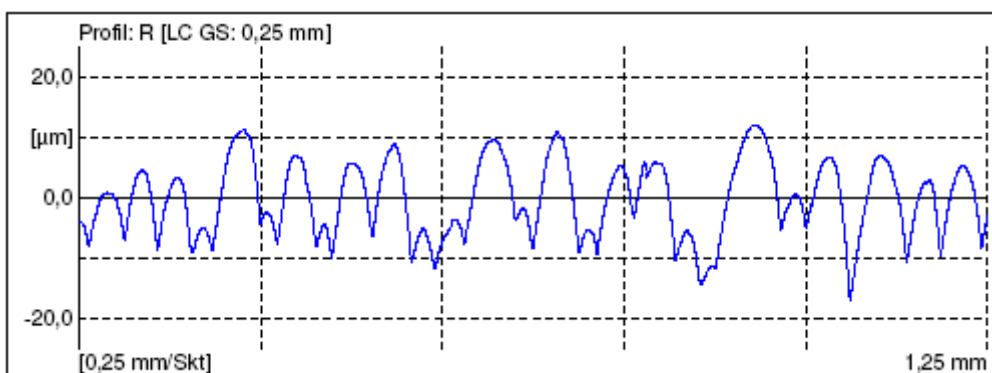


Abbildung II-49: Beste gemessene Oberflächengüte an den Seitenflächen - Testkörper 4: Ra 1,394 µm / Rz 9,638 µm

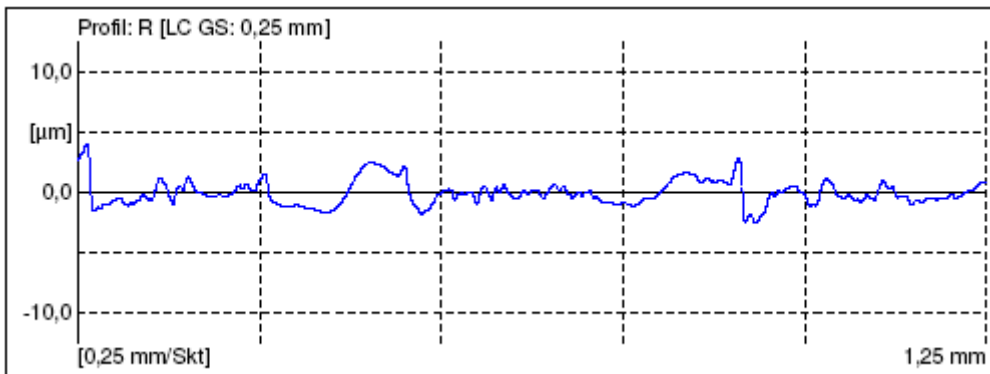


Abbildung II-50: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Oberseite - Testkörper 3: R_a 0,791 μm / R_z 3,828 μm

Auswertung

Bei allen Testquadern lässt sich erkennen, dass in x- und y-Richtung jeweils eine positive Abweichung vorliegt. Diese wächst mit zunehmender Seitenlänge. Die Spanne zwischen dem 10x10 mm und dem 100x100 mm Quader reicht dabei von +0,089 mm bis +1,040 mm in x-Richtung und von +0,116 mm bis +1,578 mm in y-Richtung. Desweiteren ist festzustellen, dass bei jedem Bauteil die y-Abweichung größer ist als die in x-Richtung.

Bei den Messungen der z-Höhe liegt eine negative Abweichung jeder Stufenhöhe vor. Der Sollwert wird also immer unterschritten. Mit zunehmender Stufenhöhe verringert sich allerdings die Differenz zum angestrebten Sollwert.

Die gemessenen mittleren Rauheiten (R_a) bewegen sich von durchschnittlich 2,643 μm auf den Unterseiten bis zu 4,605 μm an den Seitenflächen der Testkörper. Die gemittelten Rautiefen (R_z) hingegen erstrecken sich von durchschnittlich 14,546 μm auf den Oberseiten bis zu 26,952 μm an den Seitenflächen der Testkörper.

2. Rundungen/Bohrungen

Zielsetzung/Aufbau

Für die Messung von Rundungen greifen wir auf Zylinder unterschiedlicher Außendurchmesser zurück. Bei Bohrungen werden die entsprechenden Innendurchmesser erfasst und mit den Sollwerten verglichen.

Messergebnisse

Messungen mit zylindrischen Bauteilen

<i>[Einheit mm]</i>	Solldurchmesser	Istdurchmesser	Abweichung	relative Abw.	Rundheit
Testkörper 1	10,000	10,131	+0,131	+1,310%	0,053
Testkörper 2	20,000	20,228	+0,228	+1,140%	0,121
Testkörper 3	40,000	40,479	+0,479	+1,198%	0,077

Messungen von Bauteilen mit Bohrungen

<i>[Einheit mm]</i>	Solldurchmesser	Istdurchmesser	Abweichung	relative Abw.	Rundheit
Testkörper 1	5,000	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Testkörper 2	10,000	9,380	-0,620	-6,200%	0,113
Testkörper 3	20,000	19,987	-0,013	-0,065%	0,140

Gemittelte Oberflächengüte anhand aller zylindrischen Testkörper 1-3:

<i>Einheit [µm]</i>	Ra	Rz
Unterseite	2,928	16,233
Seitenfläche	4,732	25,606
Oberseite	2,096	11,778

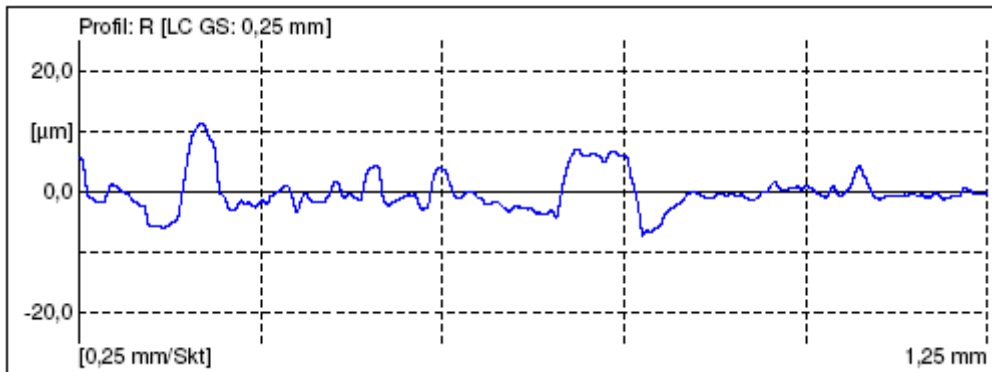


Abbildung II-53: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Unterseite - Testkörper 3: R_a 2,214 μm / R_z 10,959 μm

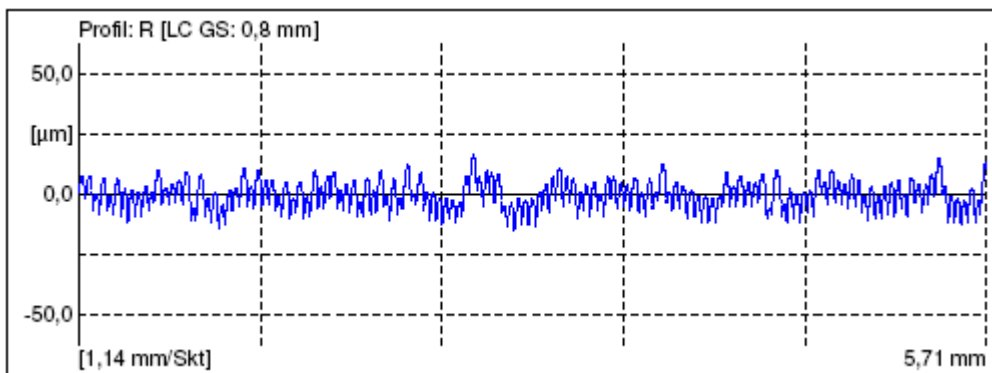


Abbildung II-51: Beste gemessene Oberflächengüte an der Seitenfläche - Testkörper 1: R_a 4,377 μm / R_z 26,097 μm

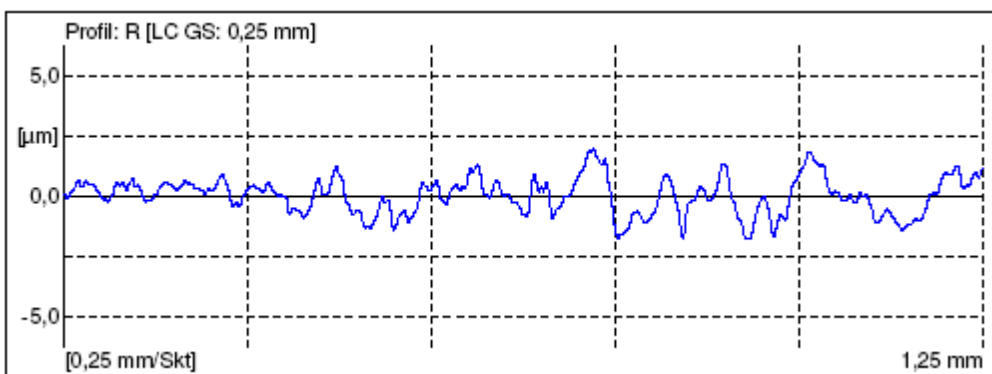


Abbildung II-52: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Oberseite - Testkörper 3: R_a 0,604 μm / R_z 2,742 μm

Auswertung

Die Messreihen der Zylinder liefern stets positive Abweichungswerte. Diese nehmen mit größer werdenden Außendurchmessern zu.

Bei der Vermessung der Bauteile mit Bohrungen fällt auf, dass deren Innendurchmesser kleiner sind als die angegebenen Sollwerte.

Durch Materialrückstände aufgrund von sogenannter Stringingbildung im Inneren der 5-mm-Bohrung konnte keine aussagekräftige Messung durchgeführt werden. Das „Stringing“ wird durch das konstruktiv bedingte „Oozing“ (Tropfen der Extrudermündung) verursacht und kann durch eine fehlende Optimierung in der Slicingsoftware derzeit nicht softwareseitig verhindert werden.

Die gemessenen mittleren Rauheiten (R_a) bewegen sich von durchschnittlich $2,096 \mu\text{m}$ auf den Oberseiten bis zu $4,732 \mu\text{m}$ an den Seitenflächen der Testkörper. Die gemittelten Rautiefen (R_z) erstrecken sich von durchschnittlich $11,778 \mu\text{m}$ auf den Oberseiten bis $25,606 \mu\text{m}$ an den Seitenflächen der Testkörper.

3. Überhänge

Zielsetzung

In dieser Testreihe wurden sechs Bauteile mit jeweils unterschiedlichem Überhangswinkel untersucht. Beim Druck der Teile war der Überhang zur Lüfteröffnung ausgerichtet. Somit konnte eine optimale Kühlung gewährleistet werden. Die Oberflächenrauheit wurde an der Überhangseite gemessen.

Messergebnisse

	Sollmaß [Winkel in Grad]	Istmaß [Winkel in Grad]	Abweichung [mm]	relative Ab- weichung	Oberflächenrauheit	
					R _a [µm]	R _z [µm]
Testkörper 1	10,000	n.m.	--		n.m.	n.m.
Testkörper 2	20,000	23,784	+3,784	+18,920%	n.m.	n.m.
Testkörper 3	25,000	25,940	+0,940	+3,760%	n.m.	n.m.
Testkörper 4	30,000	30,439	+0,439	+1,463%	n.m.	n.m.
Testkörper 5	45,000	45,106	+0,106	+0,236%	12,290	78,156
Testkörper 6	60,000	59,506	-0,494	-0,823%	2,728	10,869

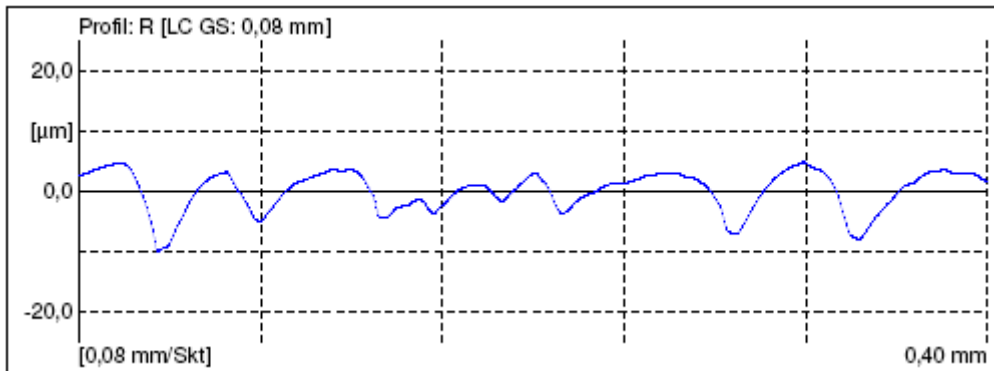


Abbildung II-54: Gemessene Oberflächengüte im 60° Überhang: Ra 2,728 µm / Rz 10,869 µm

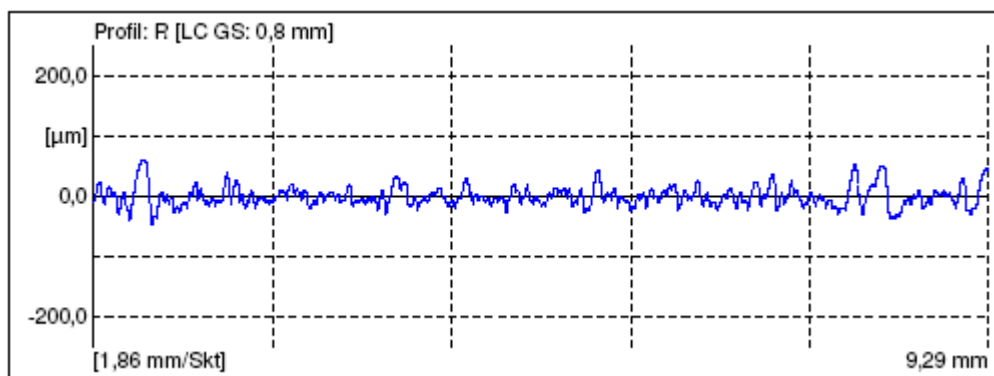


Abbildung II-55: Gemessene Oberflächengüte im 45° Überhang: Ra 12,290 µm / Rz 78,156 µm

Auswertung

Von „Testkörper 2“ (20°-Winkel) bis hin zum Bauteil mit einem 45°-Winkel (Testkörper 5) ist die Abweichung positiv und nimmt ab. Beim sechsten Testkörper, der einen Winkel von 60° aufweist, wird der Sollwert unterschritten (Istwert: 59,506°). „Testkörper 1“ (Sollwert: 10°) wies massive Mängel auf und konnte daher nicht sinnvoll vermessen werden.

4. Druckkopfbewegung

Zielsetzung

Ziel dieser Versuchsreihe ist es, den Einfluss der eigentlichen Druckkopfbewegung auf die Genauigkeit der Druckergebnisse zu untersuchen. Unter Ausblendung jeglicher Einflüsse durch Materialverhalten, Druckpfadgenauigkeit und einer präzisen Extrusionskalibrierung werden so tiefer liegende Schwächen sichtbar. Ein gedruckter Testkörper wird hierbei nicht vermessen, sondern die Position des Druckkopfes. Hierzu fährt dieser in x- und y-Richtung unterschiedlich lange Wege mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (langsam: 20 mm/s, schnell: 160 mm/s) ab. Jeder Durchlauf wird von Anfang bis Ende jeweils einzeln gemessen.

Messergebnisse

Testfahrten bei 20 mm/s:

x-Achse		Einheit [mm]
Sollwert	Istwert	Abweichung
10,000	9,458	-0,542
20,000	19,563	-0,437
30,000	29,768	-0,232
40,000	39,992	-0,008
50,000	50,062	0,062
60,000	60,217	0,217
100,000	100,773	0,773

y-Achse		Einheit [mm]
Sollwert	Istwert	Abweichung
10,000	9,850	-0,150
20,000	19,900	-0,100
30,000	30,071	+0,071
40,000	40,253	+0,253
50,000	50,376	+0,376
60,000	60,542	+0,542
100,000	100,953	+0,953

Testfahrten bei 160 mm/s:

x-Achse		Einheit [mm]
Sollwert	Istwert	Abweichung
10,000	9,594	-0,406
20,000	19,765	-0,235
30,000	29,896	-0,104
40,000	40,136	+0,136
50,000	50,292	+0,292
60,000	60,430	+0,430
100,000	100,952	+0,952

y-Achse		Einheit [mm]
Sollwert	Istwert	Abweichung
10,000	9,802	-0,198
20,000	20,041	+0,041
30,000	30,099	+0,099
40,000	40,160	+0,160
50,000	50,465	+0,465
60,000	60,590	+0,590
100,000	101,140	+1,140

Auswertung

Grundlegend ist festzustellen, dass keiner der im Test verwendeten Maschinenbefehle präzise durch die Druckkopfbewegung umgesetzt wurde. Es lässt sich erkennen, dass die gemessenen Istwerte sowohl in negative als auch in positive Richtung von den eingegebenen Sollwerten abweichen. Die Unter- bzw. Überschreitung der Sollwerte ist hierbei nicht beliebig. Bei kurzen Verfahrwegen wird der Sollwert unter-, bei längeren überschritten.

Bei der höheren Testgeschwindigkeit (160 mm/s) ist das Abweichungsspektrum im Vergleich zu den langsamen Testfahrten (20 mm/s) nach oben verschoben. Aufgrund der erkennbaren Muster in den Messergebnissen ist von mindestens zwei entgegengerichteten Einflussfaktoren auszugehen.

Zum einen wird durch die Massenträgheit des Druckkopfes, der zugehörigen Achse sowie der Gleitschuhe bei höherer Geschwindigkeit bzw. längerer Strecke der angestrebte Sollwert überschritten. Somit liegen die Abweichungen bei 160 mm/s in positive Richtung über denen der entsprechenden langsamen Testfahrten. Dies ist auf längere Bremswege bei höheren Verfahrgeschwindigkeiten zurückzuführen, die durch konstruktive Änderungen nie vollständig beseitigt werden können.

Zum anderen ist in der Konfiguration der aktuell verwendeten Firmware die Steuerung der Schrittmotoren fehlerbehaftet. Die Variable `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` in der Datei `Configuration.h` definiert die Einzelschritte der Motoren, die für 1 mm Achsenbewegung benötigt werden, in diesem Fall 79,87220447 Schritte/mm.

```
106
107 // default settings
108
109 #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {79.87220447,79.87220447,200*8/3,14}
110 #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {160*60, 160*60, 10*60, 500000}
111 #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {9000,9000,150,10000} // X, Y, Z, E maximum sta
112
113 #define DEFAULT_ACCELERATION 4600 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^
114 #define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 7000 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2
115
116 #define DEFAULT_MINIMUMFEEDRATE 0*60 // minimum feedrate
117 #define DEFAULT_MINTRAVELFEEDRATE 140*60
118
```

Abbildung II-56: Quelltextauszug aus `Configuration.h`, Konfigurationsdatei der Marlin Firmware

Dabei besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Variablen und der daraus resultierenden Strecke, das heißt durch einen zu niedrigen Wert bleibt auch die theoretisch zurückgelegte Strecke im gleichen Maß unter dem Sollwert. Mit doppelter Strecke ist demnach auch mit einer verdoppelten (negativen) Abweichung zu rechnen.

Die zu geringe Schrittzahl wird durch die entgegengesetzte Wirkung der Massenträgheit kompensiert, sodass sich bei zunehmender Strecke und/oder Geschwindigkeit positive Abweichungen ergeben.

Weitere Fehlerquellen können nicht ausgeschlossen werden, wie beispielsweise Rundungsfehler auf Firmware-Ebene und daraus resultierende Probleme in der Bewegungsabbildung durch das Microstepping der Motoren.

Unterschiede zwischen den konstruktiv gleich ausgelegten x- und y-Achsen sind durch zwei zusätzliche Einflussfaktoren zu erklären. Zunächst ist die Betriebsspannung der einzelnen Schrittmotoren nur separat manuell regulierbar. Auch bei der Vorspannung der Zahnriemen ergeben sich ähnliche Probleme. Dafür ist kein präzise einstellbarer Mechanismus in der Originalkonstruktion des Ultimakers vorgesehen.

Somit kann in beiden Fällen keine exakte Übereinstimmung der Einstellungen der x- und y-Achsen erreicht werden.

III. Schlussfolgerung

Die im Abschnitt IV-A-3 genannten Kennzahlen des FDM-Verfahrens bezüglich minimaler Wand- und Schichtdicke können nach unseren Erkenntnissen vom Ultimaker deutlich unterschritten werden. Der Drucker ist in der Lage durch seine 0,4 mm breite Düsenöffnung eine dementsprechende Wandstärke zu drucken. Auch die angegebene minimale Schichtdicke von 0,127 mm kann mit möglichen 0,04 mm Schichten des Ultimakers deutlich unterboten werden. Hierdurch profitiert auch die Oberflächengüte und Auflösung in z-Richtung wesentlich.

Durch eine Fertigungstoleranz von derzeit bis zu $\pm 1,6$ mm bei einer 100x100 mm Grundfläche erweist sich der industrielle Einsatz als nicht praktikabel. Bei kleineren Bauteilen hingegen relativiert sich dieser Umstand, erreicht aber auch dort nicht die in der Literatur beschriebene erreichbare Toleranz von $\pm 0,1$ mm.

Alle gedruckten Testkörper sind sowohl in x- als auch in y-Richtung zu groß. In z-Richtung kommt es aufgrund eines hohen Anpressdruckes der Düse innerhalb der ersten Schichten zu negativen Abweichungen, welche sich bei größeren Baugrößen in positive Abweichungen wandeln.

Umso interessanter sind in diesem Kontext die Ergebnisse bezüglich der Maschinenbewegung (ausschließlich x- und y-Richtung). Vernachlässigt man zunächst gedanklich die Massenträgheit, zeigt sich noch deutlicher, dass es einen Vergrößerungseffekt im eigentlichen Druckablauf geben muss, denn trotz zu kleiner Druckkopfbewegung werden die Bauteile größer als die Sollwerte.

Dies liegt unter anderem an ungünstigem Materialverhalten und mangelnden Kalibrierungsmöglichkeiten des Materialflusses. So ist durch das Wechselspiel zwischen schneller Erhitzung und darauffolgender Abkühlung von einer Ausdehnung des verwendeten PLA Materials auszugehen. Desweiteren gibt es Abweichungen von $\pm 0,1$ mm im Nenndurchmesser (2,9 mm) des ungeschmolzenen PLA Filaments, die keinerlei Beachtung im Kalibrierungsprozess erfahren und somit weitere Ungenauigkeiten verursachen.

Im Druckvorgang wird die Massenträgheit bei kurzen Verfahrenswegen und niedrigen Geschwindigkeiten weitestgehend durch die zu geringe Druckkopfbewegung kompensiert. Daher spielt die Trägheit vor allem für größere Geschwindigkeiten und längere Verfahrestrecken eine wesentliche Rolle.

Sie sorgt zusätzlich zu den oben genannten Faktoren zu einer weiteren Vergrößerung der Bauteile.

Die Ergebnisse hinterlassen somit ein differentes Bild aus einerseits bisher unerreicht dünnen Schichtstärken und andererseits vergleichsweise hohen Fertigungstoleranzen. Das folgende Kapitel stellt eine Vielzahl von Ansätzen vor, die in naher Zukunft eine neuerliche Bewertung der Industrietauglichkeit des Ultimakers erforderlich machen werden.

IV. Ausblick

Es ist davon auszugehen, dass nicht zuletzt durch die dynamische Natur einer Open Source Lizenz und die wachsende Benutzerbasis die inkrementelle Verbesserung der Ultimakerkonstruktion fortschreiten wird. So wurden im Testzeitraum bereits einige Detailverbesserungen in den aktuell vertriebenen Bausatz integriert:

- Dünnere x- und y-Achsen
- Bessere Gleitlager in den Gleitschuhen
- Überarbeitetes Gleitschuhdesign
- Dickere Acrylplatte als Druckbett
- Stärkere Schrittmotoren
- Überarbeiteter Kabelbaum

Um das bestehende „Stringingproblem“ zu beseitigen, ist eine Verbesserung im aktuellen Design notwendig. Dieses Problem ist zum einen auf den zu großen Abstand zwischen Druckkopf und Extrudiereinheit zurückzuführen. Zum anderen verursacht das im Zusammenhang mit einer reinen Arbeitsbewegung (Travel Move) auftretende Oozing beim abrupten Stoppen des Materialflusses die ungewollte Bildung von Materialfäden im Druckbild. Nach Lösungen wird derzeit noch gesucht.

Darüber hinaus sind diverse Funktionserweiterungen in Planung. Die Ergänzung des Druckkopfes mit einer weiteren Düse ist bereits durch entsprechende Bohrungen vorgesehen und wird in naher Zukunft den Druck mit zwei Materialien ermöglichen. Eine Vielzahl neuer Anwendungen wird daraus hervorgehen, beispielsweise zweifarbige Drucke, die die kombinierte Anwendung von zwei Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften ermöglichen. Dazu zählt auch lösliches Supportmaterial, welches nahezu beliebige Bauteilformen realisierbar macht.

Um grundlegend die Extrusionsgenauigkeit zu erhöhen, ist ein einheitlicher Durchmesser des Druckmaterials unumgänglich. Somit liegt es auch an den Materiallieferanten für höhere Präzision im Herstellungsprozess zu sorgen.

Softwareseitig besteht auch weiterhin Verbesserungspotential in allen eingesetzten Komponenten. Schon in der Modellvorbereitung und Ausrichtung sind automatisierte Routinen denkbar, die dem Nutzer die optimale Positionierung und die Auswahl geeigneter Druckprofile erleichtern. Ein ganzes Spektrum an neuen Funktionalitäten und Anforderungen wird mit einer zweiten Druckdüse einhergehen. Insbesondere weiter verfeinerte Supportstrategien, granulare Materialzuweisungen und diesbezüglich optimierte Werkzeugpfade werden hier Nutzung in den verwendeten Slicing-Applikationen finden.

In der Werkzeugwegberechnung selbst lässt sich noch eine Vielzahl von Ultimaker-spezifischen Problemen adressieren. So ist eine Beseitigung der oben genannten Stringing Problematik einerseits durch hardwareseitige Modifikationen denkbar, andererseits aber auch durch eine intelligentere Wegberechnung, bei der Travel Moves nur über bereits bedruckten Flächen stattfinden und eventuell auftretende Materialfäden im Druckergebnis eingeschlossen werden. Diese Funktionalität ist beispielsweise in dem Open Source Slicer „Skeinforge“ implementiert und unter der Bezeichnung „Comb“ bekannt.

Erhebliches Entwicklungspotential besteht auch weiterhin im Bereich der Firmware. Derzeit werden maßgeblich durch Erik van der Zalm und Bernhard Kubicek weitere Ultimaker-spezifische Anpassungen sowie allgemeine Optimierungen der Marlin Firmware umgesetzt. Nennenswert sind hier im Besonderen die geplante PID-geregelte Temperatureinstellung sowie eine ergänzende Kalibrierungssoftware „QTMarlin“¹³². Durch beide Erweiterungen wird versucht, eine konstantere Drucktemperatur zu erzielen. Auch die bereits erwähnte zweite Druckdüse und der hierfür benötigte zweite Extrudiermechanismus muss zukünftig firmwareseitig noch implementiert werden.

Um eine genauere Maschinenbewegung in x- und y-Richtung zu gewährleisten müssen festcodierte Variablen, wie die oben erwähnte `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT`, neu berechnet werden. Eine Einbeziehung der Massenträgheitseffekte ist hierbei unerlässlich, sollte aber im optimalen Fall nicht durch eine künstlich manipulierte Variable abgebildet werden. Vielmehr sollte die jeweils zurückgelegte Strecke und die genutzte Geschwindigkeit durch eine zusätzliche Formel dynamisch berücksichtigt werden.

¹³² Github.com, QTMarlin Quellcode: <https://github.com/bkubicek/QTMarlin> (16.11.2011)

Auch die vergleichsweise kleineren Abweichungen in z-Richtung sollten auf diese Weise weiter optimiert werden. Eine beheizte Druckunterlage kann den Einsatz des Klebebands obsolet machen und zusätzlich für eine höhere Genauigkeit in z-Richtung wie auch einer erhöhten Güte der Unterseiten sorgen.

Eine Vielzahl der oben erwähnten Optimierungen werden bereits durch den Hersteller Ultimaker Ltd. und Einzelpersonen aus der Ultimaker Community weiterverfolgt und umgesetzt. Auch durch die wachsende Nutzerbasis, sowie durch die gute Zugänglichkeit der zugrundeliegenden Konstruktionsprinzipien und Zeichnungen, ist mit weiteren Verbesserungen zu rechnen. Eine Neubewertung der Druckgenauigkeit in naher Zukunft erscheint somit sinnvoll.

V. Quellen

A. Literaturverzeichnis

Literatur

- Gebhardt, Andreas. *Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing*. München: Hanser Fachbuchverlag, 2007, 3. Auflage
- Kamrani, Ali K., Emad Abouel Nasr. *Engineering Design and Rapid Prototyping*. Berlin: Springer Verlag, 2010
- Roller, Rolf, u.a. *Fachkunde Modellbau: Technologie des Modell- und Formenbaus*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2006, 5. Auflage

Internetquellen

- 3D-Prototyp24. „FDM – Fused Deposition Modeling“ <http://www.3d-prototyp24.de/FDM.htm> (09.11.2011)
- Bits from Bytes. „Skeinforge“ <http://wiki.bitsfrombytes.com/index.php/Skeinforge> (16.11.2011)
- Custompart.net.
 - „3D-printing“ <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing> (10.11.2011)
 - „Jetted Photopolymer“ <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer> (10.11.2011)
 - „Laminated Object Manufacturing“ <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> (25.08.2011)
- Dave Durant`s Blog. „Configuring Skeinforge: Some Basic Terms“ <http://davedurant.wordpress.com/2010/10/17/configuring-skeinforge-some-basic-terms/> (17.11.2011)
- Eos.
 - „EOSINT P395“ <http://www.eos.info/produkte/systeme-zubehoer/kunststoff-laser-sinter-systeme/eosint-p-395.html> (25.08.2011)
 - „Part Property Management“ http://www.eos.info/fileadmin/user_uploads/downloads_presse/pdf_files/EOS_WP_PPP_d.pdf (25.08.2011)
- EuroMold.
 - „EuroMold Konzept“ <http://www.euromold.com/index.php?id=16> (16.11.2011)
 - „Über EuroMold“ <http://www.euromold.com/index.php?id=8> (16.11.2011)

- Github.
 - „Marlin“ <https://github.com/bkubicek/Marlin/commit/9f57cdd6b4983b7357450b8f8da954ee57f73d4a> (16.10.2011)
 - „QTMarlin“ <https://github.com/bkubicek/QTMarlin> (16.11.2011)
- Golem. „RepRap - 3D-Drucker baut sich selbst“ <http://www.golem.de/0806/60182.html> (10.11.2011)
- Ipro. „iPro-Family“ <http://www.3dsystems.com/products/datafiles/ipro/iPro-Family-A4-DE.pdf> (25.08.2011)
- Lasercut24. „Nachbearbeitung Oberflächen“ <http://www.lasercut24.de/nachbearbeitung.htm> (15.11.2011)
- MakerBot Industries. „Cupcake Endstop Installation“ <http://wiki.makerbot.com/cupcake-cnc-10:cupcake-endstop-installation> (17.11.2011)
- Maschine+Werkzeug. „Präzise und schnell zum Produkt“ <http://www.maschinewerkzeug.de/index.cfm?pid=1445&pk=53643> (24.10.2011)
- Mitutoyo. „Form- und Lagerabweichungen“ http://www2.mitutoyo.de/uploads/media/Poster_Form_und_Lageabweichungen_02.pdf (15.11.2011)
- Modelltechnik. „Fused Deposition Modeling“ http://www.modelltechnik.de/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=79&lang=de (09.11.2011)
- Myfab. „Drucker“ <http://www.myfab.de/drucker.html> (10.11.2011)
- Netfabb.
 - „3D Printing made easy“ <http://netfabb.com/engines.php> (16.11.2011)
 - „File preview and browsing“ http://www.netfabb.com/file_handling.php (15.11.2011)
- Open Source Initiative. „GNU General Public License Versions“ <http://www.opensource.org/licenses/gpl-license.php> (10.11.2011)
- Pro1o1ypen. „Fused Deposition Modeling“ <http://www.1zu1prototypen.com/urmodelle/fdm.htm> (23.10.2011)
- Roboternetz. „Regelungstechnik“ <http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik#P-Regler> (15.11.2011)
- Tedata. „Laminated Object Manufacturing“ <http://www.tedata.com/3232.0.html> (25.08.2011)
- Thingiverse. „Ultimaker Z-axis end-switch fine-adjuster“ <http://www.thingiverse.com/thing:11033> (14.11.2011)

- Ultimaker Ltd.
 - „Ultimaker“ <http://groups.google.com/group/ultimaker> (16.11.2011)
 - „Ultimaker Assembly Rev2“ <http://wiki.ultimaker.com/UltimakerAssemblyRev2> (17.11.2011)
 - „Ultimaker specs and features“ http://wiki.ultimaker.com/Ultimaker_specs_and_features (15.11.2011)
- Wikipedia.
 - „ABS“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Acrylnitril-Butadien-Styrol> (16.11.2011)
 - „CAD“ http://de.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design (14.11.2011)
 - „Computerized Numerical Control“
http://de.wikipedia.org/wiki/Computerized_Numerical_Control (14.11.2011)
 - „EEPROM“ <http://de.wikipedia.org/wiki/EEPROM> (14.11.2011)
 - „Epoxydharz“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Epoxydharz> (14.11.2011)
 - „Extruder“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Extruder>. (14.11.2011)
 - „Firmware“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Firmware> (14.11.2011)
 - „Fused Deposition Modeling“ http://de.wikipedia.org/wiki/Fused_Deposition_Modeling (27.10.2011)
 - „Hardware“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Hardware> (14.11.2011)
 - „Inertgas“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Inertgas> (14.11.2011)
 - „Monomer“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Monomer> (16.11.2011)
 - „Stereolithografie“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Stereolithografie> (17.11.2011)
 - „Polylactide“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide> (16.11.2011)
 - „Plotter“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Plotter> (14.11.2011)
 - „Polygon“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Polygon> (14.11.2011)
 - „Rapid Prototyping“ http://de.wikipedia.org/wiki/Rapid_Prototyping (14.11.2011)
 - „SD-Karte“ <http://de.wikipedia.org/wiki/SD-Karte> (14.11.2011)
 - „Software“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Software> (14.11.2011)
 - „STL-Format“ <http://de.wikipedia.org/wiki/STL-Format> (14.11.2011)
 - „Thermoplast“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Thermoplast> (14.11.2011)
- Wolf-Signiertechnik. „InkJet-Technologie“ <http://www.wolf-signiertechnik.de/de/lexikon/inkjet-technologie.html> (09.11.2011)

B. Abbildungsverzeichnis


Abbildung Titelseite: Ultimaker Produktfoto mit freundlicher Genehmigung von Ultimaker Ltd.	
Abbildung I-1: Funktionsschema einer 3D-Printing-Maschine - Quelle: http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing (10.11.2011)	3
Abbildung I-2: Funktionsschema einer Inkjet-Anlage - Quelle: http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing (09.11.2011)	5
Abbildung I-3: Funktionsschema einer FDM-Maschine - Quelle: http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling (23.10.2011)	8
Abbildung I-4: Prinzip des LLM-Verfahrens - Quelle: http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing (25.10.2011)	11
Abbildung I-5: Funktionsprinzip einer Lasersintermaschine - Quelle: http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering (25.10.2011)	14
Abbildung I-6: Schematische Darstellung des Stereolithografieverfahrens - Quelle: http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography (25.10.2011)	17
Abbildung I-7: Vereinfachter Aufbau eines RepRap Mendel mit Achsenbezeichnung - Quelle: http://www.zzorn.net/2010/06/design-for-reprap-mendel-inspired.html (10.11.2011)	19
Abbildung I-8: RepRap Family Tree: http://reprap.org/wiki/RepRap_Family_Tree (10.11.2011)	20
Abbildung II-1: Endstop	22
Abbildung II-2: Doppelte Ausführung der Endstops pro Achse	22
Abbildung II-3: Zusammenstecken der Holzplatten	23
Abbildung II-4: Einlegen der Kabelführung	23
Abbildung II-5: "T-Slot"	24
Abbildung II-6: Unterseite des Ultimakers	24
Abbildung II-7: Befestigung der Riemenräder	25
Abbildung II-8: Montierter y-Schrittmotor	25
Abbildung II-9: Schrittmotor mit eingelegtem Zahnriemen	25
Abbildung II-10: z-Motor	26

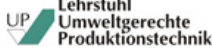
Abbildung II-11: Montiertes Kupplungsteil	26
Abbildung II-12: Einsetzen der Lager	27
Abbildung II-13: Gleitschuhe mit montierten Klauen	27
Abbildung II-14: Einbau der Achsen - Quelle: http://wiki.ultimaker.com/Ultimaker_rev.3_assembly:_x-Y_axes (10.11.2011)	28
Abbildung II-15: Vormontierte Abdeckkappe	28
Abbildung II-16: Einlegen der Riemen, Riemenräder und Gleitschuhe.....	28
Abbildung II-17: Montage der Abdeckplatten	29
Abbildung II-18: Einlegen der Zahnriemen	29
Abbildung II-19: Druckkopf	30
Abbildung II-20: Einführen der x-Achse.....	30
Abbildung II-21: X/Y Achsenkreuz.....	30
Abbildung II-22: Schließen der Klauen	31
Abbildung II-23: Ausrichtung der Achsen	31
Abbildung II-24: Ausrichtung der Zahnriemen.....	32
Abbildung II-25: Abdichten des Lüfters.....	32
Abbildung II-26: Lüfter am Druckkopf	32
Abbildung II-27: Einlegen der Linearlager	33
Abbildung II-28: Einsetzen des Mittelstücks.....	33
Abbildung II-29: Endmontage in ebener Ausrichtung.....	33
Abbildung II-30: Befestigungsvorrichtung für das Druckbett	34
Abbildung II-31: Vorspannung der Federn	34
Abbildung II-32: Abkleben der Druckplattform.....	34
Abbildung II-33: Einbau der Druckplattform	35
Abbildung II-34: Eindrehen der Arbeitsspindel	35
Abbildung II-35: Unteres Ende der Arbeitsspindel	35
Abbildung II-36: Mitgeliefertes Lagerfett.....	36

Abbildung II-37: Eingefettete z-Achsen und Arbeitsspindel	36
Abbildung II-38: Extrudereinheit	37
Abbildung II-39: Aufgestecktes Antriebszahnrad	37
Abbildung II-40: Eingebaute Klemmvorrichtung	37
Abbildung II-41: Spulenhalterung	38
Abbildung II-42: Weiße PLA Spule	38
Abbildung II-43: Angeschlossene Elektronik	39
Abbildung II-44: Platine mit aufgestecktem Kühlsystem	39
Abbildung II-45: Isolierung des Heizelements	41
Abbildung II-46: Klebeband als Druckunterlage	42
Abbildung II-47: Schema - Softwareseitiger Arbeitsablauf	43
Abbildung II-48: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Unterseite - Testkörper 3: Ra 1,676 µm / Rz 8,553 µm	49
Abbildung II-49: Beste gemessene Oberflächengüte an den Seitenflächen - Testkörper 4: Ra 1,394 µm / Rz 9,638 µm	49
Abbildung II-50: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Oberseite - Testkörper 3: Ra 0,791 µm / Rz 3,828 µm	50
Abbildung II-51: Beste gemessene Oberflächengüte an der Seitenfläche - Testkörper 1: Ra 4,377 µm / Rz 26,097 µm	52
Abbildung II-52: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Oberseite - Testkörper 3: Ra 0,604 µm / Rz 2,742 µm	52
Abbildung II-53: Beste gemessene Oberflächengüte auf der Unterseite - Testkörper 3: Ra 2,214 µm / Rz 10,959 µm	52
Abbildung II-54: Gemessene Oberflächengüte im 60° Überhang: Ra 2,728 µm / Rz 10,869 µm	55
Abbildung II-55: Gemessene Oberflächengüte im 45° Überhang: Ra 12,290 µm / Rz 78,156 µm	55
Abbildung II-56: Quelltextauszug aus Configuration.h, Konfigurationsdatei der Marlin Firmware	57

VI. Anhang

LUP Universität Bayreuth, erster Entwurf der Aufgabenstellung der Teamprojektarbeit „Open Source Rapid Prototyping“ (20.05.2011):

 UNIVERSITÄT
BAYREUTH

 Lehrstuhl
Umweltgerechte
Produktionstechnik

Teamprojektarbeit

Open-Source Rapid Prototyping

Der Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik möchte sich stärker in Richtung generativer Fertigungsverfahren (3D-Rapid Prototyping, 3D-RP) ausrichten, um dem gestiegenen Interesse an diesem Thema seitens der Industriepartner Rechnung zu tragen. Vor diesem Hintergrund sollen verschiedene Verfahren auf ihre Eignung im industriellen Einsatz untersucht werden. Die Firma Ultimaker Ltd. (Niederlande) hat kürzlich den 3D-Drucker „Ultimaker“ als Bausatz vorgestellt, der deutlich kostengünstiger ist als bisherige kommerziell erhältliche Anlagen. Thema der Arbeit ist die Untersuchung des Ultimaker auf seine Verwendbarkeit für den industriellen Einsatz.

Im Rahmen der Aufgabenstellung sollen folgende Ziele erfüllt werden:

- 1. Darstellung des Standes der Technik** von RP-Anlagen/-Verfahren und Aktivitäten des RepRap-Projektes
- 2. Aufbau des Ultimaker-Druckers** und Dokumentation des Zusammenbaus
- 3. Kalibrierung** und Anbindung an Pro/E-Schnittstelle
- 4. Tests zur Handhabung des Druckers:**
 - Ablösen des Modells von Bauplattform, Entfernen der Stützstrukturen
 - Maßhaltigkeit unterschiedlicher Modellgeometrien (Vergleich Konstruktion / 3D-Modell), Tests zu Baugenauigkeit in x-, y-, z-Richtung
 - Möglichkeiten zur Beeinflussung der Oberflächenrauheit der Modelle
 - Arbeiten mit unterschiedlichen Werkstoffen (ABS, PLA)
- 5. evtl. Ausarbeitung von Leitlinien und eines Bewertungskataloges**, für welche Geometrien und Bauteilausrichtungen im Bauraum sich der Ultimake-Drucker eignet

Betreuer:
Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik

Dr.-Ing. Stefan Freiburger	Dipl.-Ing. Christian Rössel
Tel.: 0921/55 7324	0921/55 7517
Email: stefan.freiberger@uni-bayreuth.de	Christian.roessel@uni-bayreuth.de

Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik

Kontakt:

Eva Gradi

Studentin Wirtschaftsingenieurwesen, Universität Bayreuth
eva.gradl@stmail.uni-bayreuth.de

Florian Horsch

Student Wirtschaftsingenieurwesen, Universität Bayreuth
florianh.horsch@stmail.uni-bayreuth.de

Mariella Kraus

Studentin Wirtschaftsingenieurwesen, Universität Bayreuth
mariella.kraus@stmail.uni-bayreuth.de

Marcel Mahler

Student Wirtschaftsingenieurwesen, Universität Bayreuth
marcel.mahler@stmail.uni-bayreuth.de
