



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jonas Matheus

Untersuchung des 3D-Drucks zur Herstellung formgebender Elemente im Werkzeugbau

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Jonas Matheus

Untersuchung des 3D-Drucks zur Herstellung formgebender Elemente im Werkzeugbau

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Produktionstechnik und -management
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Enno Stöver
Zweitprüfer/in: Dipl.-Ing. Benjamin Remmers

Abgabedatum: 29.08.2019

Zusammenfassung

Jonas Matheus

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung des 3D-Drucks zur Herstellung formgebender Elemente im Werkzeugbau

Stichworte

Additive Fertigung, Prägen, Losgröße „1“, Werkzeugbau in der Umformtechnik, Modularer Werkzeugbau, Industrie 4.0, Auslegung eines Prägestempels

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollte eine beispielhafte Untersuchung der Fertigung von Werkzeugen mit 3D-Druck durchgeführt werden und ein Vergleich mit alternativen Herstellungsverfahren im Rahmen von Umformversuchen betrachtet werden. Dazu wurden zwei Prägestempels mittels additiver und zerspanender Verfahren gefertigt. In einer Kleinserie wurden die Ergebnisse der Stempel untersucht und auf Durchführbarkeit, Unterschiede, Vor- und Nachteile beleuchtet. Die Ergebnisse haben einen Einsatz von 3D-Druck in der Umformtechnik bestätigen können. Die Erkenntnisse aus der Auswertung sind die Grundlage für eine Optimierung des Prägestempels und bieten einen Ausblick auf die Einsatzmöglichkeiten der additiven Fertigung in der Umformtechnik.

Jonas Matheus

Title of the paper

Investigation of 3D printing for the production of shaping elements in tool construction

Keywords

Additive manufacturing, embossing, batch size "1", toolmaking in forming technology, modular toolmaking, industry 4.0, design of an embossing die

Abstract

In the context of this bachelor thesis an exemplary investigation of the production of tools with 3D printing should be accomplished and a comparison with alternative manufacturing processes should be considered in the context of forming tests. For this purpose, two embossing dies were manufactured using additive and machining processes. In a small series, the results of the dies were examined and examined for feasibility, differences, advantages and disadvantages. The results have confirmed the use of 3D printing in forming technology. The findings from the evaluation are the basis for an optimization of the embossing die and offer an outlook on the application possibilities of additive manufacturing in forming technology.

Meiner Familie und Freunden

Ich möchte mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Enno Stöver und Herrn Dipl.-Ing. Benjamin Remmers für die Betreuung und tatkräftige Unterstützung bei dieser Bachelorarbeit bedanken.

Sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Thomas Hänert für die zerspanenden Bearbeitung des Werkzeugs und Herrn B. Eng. Hendrik Mietzner für die optische Messung der Stempel.

Außerdem möchte ich mich bei der Firma DMG Mori AG, insbesondere bei Herrn Ralf Riedemann und Herrn Jan Riewenherm, für die Zurverfügungstellung eines 3D gedruckten Stempels, ohne den eine Vergleich nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Zielsetzung der Bachelorarbeit	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Einprägen	2
2.2 Spindelpresse	5
2.3 Verfahren der additiven Fertigung	7
2.3.1 STL-Format.....	7
2.3.2 Verfahren der Schichtgenerierung	9
2.3.3 Recoating.....	11
2.3.4 Supportstruktur	12
2.3.5 Selektives Laser-Sintern	13
2.3.6 Schmelzen mit einer Pulverdüse	15
2.3.7 Extrusionsverfahren – Fused-Filament-Fabrication	17
2.4 Losgröße „1“	19
2.4.1 Die individuelle Massenfertigung	19
2.4.2 Industrie 4.0	20
2.5 Einfahrverhalten von Umformwerkzeugen	21
2.6 Messung von geometrischen Größen	23
2.6.1 SmartSCAN von AICON	23
2.6.2 Einflüsse auf die Messergebnisse	25
2.7 Modularer Werkzeugbau.....	26
3 Erstellung eines Prägestempels.....	27
4 Additive Fertigungsverfahren in der Umformtechnik.....	32
4.1 Anwendung und Besonderheiten des SLS	32
4.2 Anwendung und Besonderheiten des DMD-Verfahrens	33
4.3 Anwendung und Besonderheiten des FFF-Verfahrens.....	34
4.4 Additive und herkömmliche Herstellung von Werkzeugen	35
5 Werkzeugbau und Auswertung	39
5.1 Werkzeugbau am Beispiel eines Prägestempels.....	39

5.1.1	Vorbereitung	39
5.1.2	Fertigung.....	40
5.1.3	Nacharbeit	41
5.1.4	Darstellung der Arbeitsschritte.....	42
5.1.5	Verbesserung beim Werkzeugbau.....	42
5.2	Auswertung an einer Kleinstserie	44
5.2.1	Einfahren der Werkzeuge	44
5.2.2	Fertigung einer Kleinstserie	45
5.2.3	Auswertung anhand der Kleinserie	47
6	Fazit und Ausblick	52
7	Literatur	53
8	Anhang	56
8.1	Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Formänderungswiderstand für verschiedene Werkstoffe.....	4
------------	--	---

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Fertigungsverfahren nach DIN 8583-5	2
Abbildung 2: Spindelpresse mit 3-Scheiben-Zylindergetriebe	5
Abbildung 3: Darstellung einer STL-Datei über einer CAD-Datei	8
Abbildung 4: Darstellung des Maskenverfahrens anhand von Kippspiegeln	10
Abbildung 5: Anwendungsbeispiele aus Kupfer zum selektiven Laser-Sintern	13
Abbildung 6: Generelles Funktionsprinzip vom selektiven Laser-Sintern	14
Abbildung 7: Darstellung einer DMD-Anlage beim Auftragen einer Kontur auf ein Werkstück.....	16
Abbildung 8: Darstellung einer FFF-Anlage der Firma 3DGence nach dem Bauprozess.....	17
Abbildung 9: SmartSCAN bei der Vermessung eines Werkstücks mittels Strichmuster.....	24
Abbildung 10: Ishikawa-Diagramm von Einflüssen auf Messwerte	25
Abbildung 11: Darstellung des Musterwerkstück für das Ergebnis.....	27
Abbildung 12: Isometrische Ansicht des Prägestempels.....	28
Abbildung 13: Darstellung der Halterung.....	29
Abbildung 14: Darstellung des Zusammenbaus von Stempel, Halterung und Grundplatte	29
Abbildung 15: Darstellung des Werkzeugs mit Blick auf die untere Grundplatte	30
Abbildung 16: Darstellung der Arbeitsschritte beim Werkzeugbau.....	42
Abbildung 17: Veränderung des 3D gedruckten Stempels über 50 Werkstücke	45
Abbildung 18: Veränderung des gefrästen Stempels über 50 Werkstücke	46
Abbildung 19: Darstellung der Verschiebung der Gravur des gefrästen Stapels.....	47
Abbildung 20: Abweichung zwischen CAD-Datei und Messung mit Skalierung	48
Abbildung 21: Veränderung der Werkstücke des gefrästen Stempels	49
Abbildung 22: Veränderung der Werkstücke des 3D gedruckten Stempels	50

Abkürzungsverzeichnis

A	mm ²	Stempelfläche
A _{Pr}	mm ²	Projektionsfläche des Prägeteiles
b	mm	Breite
D ₀	mm	Rohlingdurchmesser
F	N	Prägekraft
h	mm	Stempelweg
I _d	kg•m ²	Massenträgheitsmoment
k _w	N/mm ²	Formänderungswiderstand
l	mm	Länge
NC		numerical control
n _s	min ⁻¹	Drehzahl des Schwungrades
V _G	mm ³	Volumen der Gravur
W	Nm	Prägearbeit / Arbeitsvermögen
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
x		Verfahrens faktor

1 Zielsetzung der Bachelorarbeit

Am Institut für Produktionstechnik der HAW Hamburg wurde das Konzept „modularer Werkzeugbau“ entwickelt, das u.a. die Einführung des agilen Projektmanagements in die Entwicklung und Herstellung von Umformwerkzeugen vorsieht. Ein kritisch zu beleuchtender Punkt ist der Baustein „Werkzeugbau“, d.h. die Fertigung des Umformwerkzeugs, da dieses zeitlich standardisiert in den Sprint-Ablauf eingebaut werden muss – sowohl für die Erstanfertigung wie für notwendige Anpassungen in fortlaufenden Sprintphasen.

Hier stellt der metallische 3D-Druck technologisch eine Verfahrensvariante mit großem Potential insbesondere für die formgebenden Elemente des Werkzeugs dar.

Ziel dieser Arbeit ist die beispielhafte Untersuchung der Fertigung von Werkzeugen mit 3D-Druck im Vergleich mit alternativen Herstellverfahren im Rahmen von Umformversuchen. Hierzu soll das bestehende Netzwerk im Bereich Umformtechnik und 3D-Druck genutzt werden.

Schwerpunkte:

- Einarbeitung in das Konzept modularer Werkzeugbau und Definition von Anforderungen an die Fertigung der Werkzeuge
- Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Herstellverfahren für Umformwerkzeuge
- Recherche aktueller Stand zur Fertigung von Umformwerkzeugen mit metallischem 3D-Druck
- Definition und Herstellung eines Referenzwerkzeuges
- Durchführung und Auswertung von Umformversuchen mit alternativ hergestellten Werkzeugen

2 Grundlagen

2.1 Einprägen

Einprägen wird den Druckumformverfahren zugeordnet und ist ein Kaltumformverfahren, bei dem eine Matrize, oft auch als Prägestempel bezeichnet, in die Oberfläche eines Werkstücks eingedrückt wird. Die verschiedenen Arten des Prägens werden beim Deutschen Institut für Normung unter der DIN 8583-5 eingeordnet und begrifflich unterteilt. In Abbildung 1 wird die Einordnung zur Verdeutlichung noch einmal dargestellt.

[4, 5]

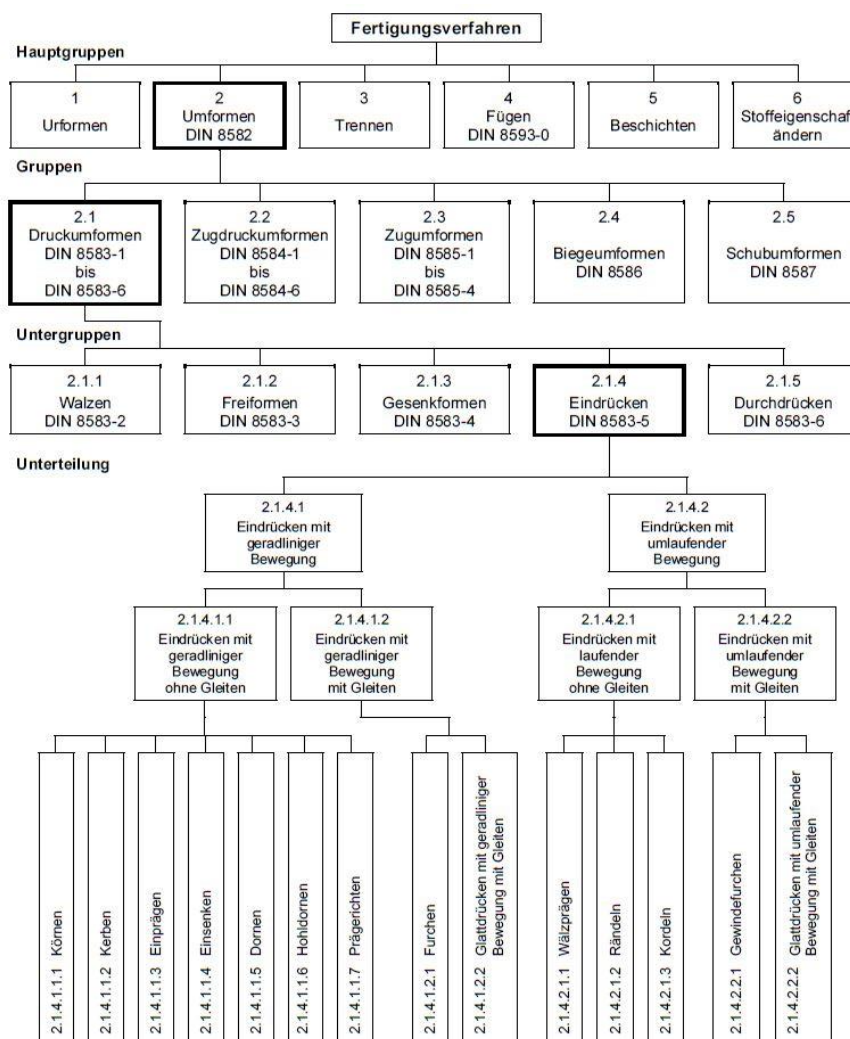


Abbildung 1: Übersicht über die Fertigungsverfahren nach DIN 8583-5

Beim Prägen wird zwischen den beiden Arten Hohlprägen und Vollprägen unterschieden. Beim Hohlprägen wird die Dicke des Werkstücks nur geringfügig geändert, beim Vollprägen wird die Werkstückdicke gezielt an einigen Stellen geändert. Diese Unterscheidung ist für die Berechnung der benötigten Kräfte und Arbeit notwendig, da der Formänderungswiderstand k_w davon abhängig ist.

Der wohl erste Anwendungsfall für das Einprägen war das Münzprägen. Die Geschichte geht bis Ende des 7. Jahrhunderts vor Christus zurück. Im Jahre 600 v. Chr. wurden schon bei den meisten Großmächten im Mittelmeerraum Münzen mittels der Hammerprägung geprägt. 1550 wurden Münzen erstmals mittels der Walzprägung hergestellt. Dies erleichterte die Herstellung von Münzen erheblich. Heutzutage prägen moderne Prägemaschinen in den Münzprägeanstalten der Welt bis zu 20.000 Münzen pro Minute.

Das Prägen kann auch zur Verbesserung von Eigenschaften eines Werkstücks beitragen. So kann beispielsweise das Glattprägen die Oberflächengüte verbessern. Dabei wird die Werkstückoberfläche mittels eines feingeschliffenen Stempels durch feine Kaltstauchungen bearbeitet. Werden bei Prägeprozess präzise Anschläge eingesetzt, spricht man auch vom Maßprägen. Dadurch ist es möglich, zwei Flächen sehr genau auszurichten. Üblicherweise werden hierfür Kniehebelpressen verwendet, die an ihrem unteren Totpunkt bei kleinen Wegen sehr große Kräfte aufbringen können.

[4, 5, 7, 29]

Berechnung der Prägearbeit

Die Stempelfläche kann mit den folgenden beiden Formeln berechnet werden, dabei hängt die Wahl der Formel von der Form des Stempels ab. Formel 2.1.1 wird für runde Stempel verwendet und Formel 2.1.2 bei rechteckigen Stempeln.

$$A = \frac{D_0^2 \cdot \pi}{4} \quad [2.1.1]$$

$$A = l \cdot b \quad [2.1.2]$$

Die Prägekraft beim Vollprägen ist abhängig vom Formänderungswiderstand k_W , der Tabelle 1 entnommen werden kann und berechnet sich nach der Formel 2.1.3.

$$F = k_W \cdot A \quad [2.1.3]$$

Werkstoff	kw [N/mm ²]	
	Gravurprägen	Vollprägen
Aluminium 99%	50 bis 80	80 bis 120
Aluminium-Leg.	150	350
Messing CuZn37	200 bis 300	1500 bis 1800
Kupfer (weich)	200 bis 300	800 bis 1000
Stahl	300 bis 400	1200 bis 1500
Rostfreier Stahl	600 bis 800	2500 bis 3200

Tabelle 1: Formänderungswiderstand für verschiedene Werkstoffe

Der voraussichtliche Stempelweg kann mit der folgenden Formel berechnet werden.

$$h = \frac{V_G}{A_{Pr}} \quad [2.1.4]$$

Die Prägearbeit kann unter Einbezug des Verfahrensfaktors x errechnet werden. Der Verfahrensfaktor kann in diesem Fall mit $x \approx 0,5$ angenommen werden.

$$W = F \cdot h \cdot x \quad [2.1.5]$$

[4]

2.2 Spindelpresse

Die Spindelpresse zählt zu den arbeitsgebundenen Umformmaschinen. Das Arbeitsvermögen wird von einem rotierenden Schwungrad bezogen. Die Drehzahl und die Abmessungen des Schwungrades entscheidet dabei über die Höhe des Arbeitsvermögens, somit lassen sich die wirkenden Kräfte einstellen. Die Spindelpresse wird durch das Fehlen eines fixierten Totpunkts und einen robusten Aufbau charakterisiert. Das Schwungrad überträgt das Moment auf eine Gewindespindel, mit einem nicht selbsthemmenden Gewinde. Mit dieser Art von Gewinden werden die Verluste, die durch Reibung entstehen, vernachlässigbar klein. Die Spindel überträgt über das Gewinde das Arbeitsvermögen an den Stößel. Der Stößel dreht sich dabei nicht mit, da dieser über Führungen geleitet wird.

Eine übliche Antriebsform für eine Spindelpresse ist der Reibradantrieb mit Dreischeiben-Zylinderreibgetriebe mit einer vertikalen Spindel, wie in Abbildung 2 dargestellt ist. Ein Elektromotor treibt über einen Flachriemen die Antriebswelle an und damit die darauf befindliche Treibräder. Die Antriebswelle ist horizontal angebracht, diese dreht sich mit gleichbleibender Drehzahl und ist axial verschiebbar.

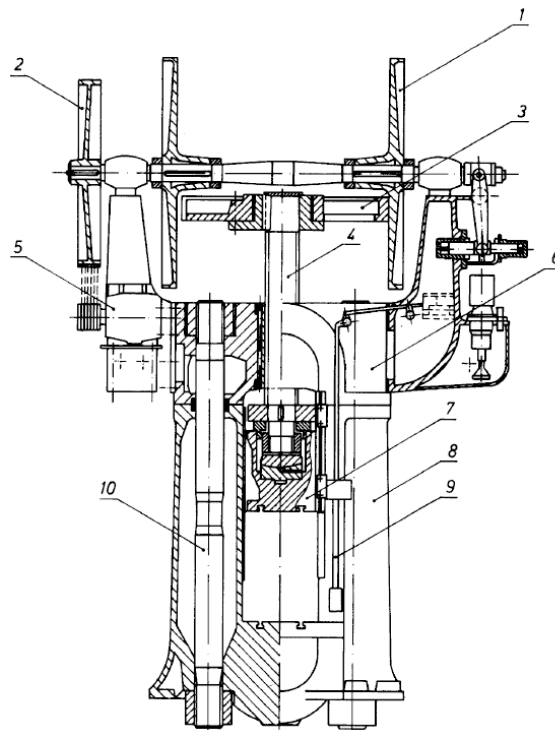


Abbildung 2: Spindelpresse mit 3-Scheiben-Zylindergetriebe - 1 Treibrad, 2 Keilriemscheibe, 3 Schwungrad, 4 Spindel, 5 Motor, 6 Kopfstück, 7 Stößel, 8 Ständer, 9 Führung, 10 Zuganker

Wird ein Arbeitshub ausgelöst überträgt das Treibrad mittels Reibschluss. Durch das nun am Schwungrad anliegende Moment dreht sich die Spindel und der Stößel wird nach unten bewegt. Nach der Beschleunigung des Schwungrades trennen sich Treibrad und Schwungrad und der Stößel bewegt sich ohne weitere Beschleunigung nach unten. Durch die Trennung der beiden Räder wird eine Beschädigung an der Presse verhindert. Daraus ergibt sich eine maschinenspezifische Höchstpunkt, den das Werkstück nicht überschreiten darf. Diese Höchstpunkt ergibt sich aus dem Punkt an dem Treibrad und Schwungrad entkoppelt werden. Der Stößel wird mit dem gleichen Prinzip auch wieder nach oben geholt. Mit einem zweiten Treibrad, welches auf der anderen Seite der Antriebswelle angebracht ist, wird das Schwungrad durch Reibschluss in entgegengesetzte Drehrichtung versetzt und der Stößel wird durch die Spindel nach oben gefördert.

[3, 4, 9]

Arbeitsvermögen

Das Arbeitsvermögen einer Spindelpresse ist der relevanteste Faktor bei dieser Pressenart, da eine Spindelpresse eine arbeitsgebundene Presse ist. Das Arbeitsvermögen ergibt sich aus den Abmessungen und der Drehzahl des Schwungrades. Die Drehzahl lässt sich über die Beschleunigungsdauer des Schwungrades steuern. Aus diesen beiden Komponenten folgt Formel 2.2.1.

[3]

$$W = \frac{\omega^2}{2} \cdot I_d = \frac{\pi \cdot n_S}{30} \cdot \frac{I_d}{2} \quad [2.2.1]$$

2.3 Verfahren der additiven Fertigung

Bei der additiven Fertigung wird zwischen drei Bereichen unterschieden. Dazu zählt das Rapid Prototyping, dort werden Prototypen und Modelle hergestellt. Die Modelle verfügen nur über ausgewählte Eigenschaften, wie beispielsweise Geometrie und Haptik, außerdem entspricht der Werkstoff nicht unbedingt dem fertigen Produkt. Der zweite Bereich ist das Rapid Manufacturing. Dabei werden serienreife Produkte gefertigt, die über die richtigen Eigenschaften und den geeigneten Werkstoff verfügen. An dieser Stelle kann auch von Serienteilen gesprochen werden. Der letzte Bereich ist das Rapid Tooling. Bei diesem Verfahren wird mit Hilfe der additiven Fertigung ein Werkzeug erstellt mit dem ein Prototyp aber auch Serienteile gefertigt werden können.

Als additive Verfahren werden Verfahren bezeichnet, welche schichtweise Modelle erstellen. Dabei werden formlose (Flüssigkeiten, Harze und Pulver) oder formneutrale (Draht oder Folien) Materialien mit einem chemischen und/oder mit einem physischen Prozess verbunden. Eine Besonderheit der additiven Verfahren ist, dass sie ohne traditionelle Werkzeuge (Fräser, Bohrer, Formen etc.) auskommen, obwohl sie alle urformende Verfahren sind. Fast alle additiven Fertigungsanlagen arbeiten heutzutage mit einem STL-Datenformat und generieren aus dieser ein fertiges Modell, Muster, Prototypen, Werkzeug oder Endprodukt.

Jedes additive Fertigungsverfahren funktioniert mit einem schichtweisen Aufbau von Material. Diese unterscheiden sich teils stark, können aber in die folgenden Schritte zusammengefasst werden. Die erste Schicht wird auf die Bauplattform aufgebracht, welche sich in der z-Achse verschieben lässt. Der Bauraum wird durch die Längen der Achsen bestimmt, dieser begrenzt die maximal mögliche Größe des Modells. Nach dem Aufbringungen der ersten Schicht kann diese konturiert oder verfestigt werden. Damit ist die erste Schicht fertiggestellt. Im Anschluss wird die Bauplattform um eine Schichtdicke bewegt und der Prozess beginnt aufs Neue bis das Modell fertig gestellt ist.

2.3.1 STL-Format

Heutzutage wurde bei den meisten additiven Fertigungsmaschinen eine gemeinsame Schnittstelle festgelegt. Dabei handelt es sich um die STL-Schnittstelle. STL steht dabei für „Standard Tessellation Language“.

Die STL-Datei speichert die Oberfläche in approximierten Dreiecken ab. Dazu werden Knotenpunkte mit dazugehörigen Koordinaten definiert. Aus jeweils drei Knotenpunkten werden Dreiecke gebildet, die zu einem Gitternetz über das Objekt zusammengefügt werden. Die Reihenfolge der Koordinatenpunkte spielt eine wichtige Rolle. Die Fläche, die entsteht, wenn die Punkte gegen

den Uhrzeigersinn verbunden werden, bildet die Außenfläche. So bekommt jedes Dreieck eine eindeutige Orientierung im dreidimensionalen Raum und ggf. kann auch eine RGB-Farbkodierung abgespeichert werden.

Durch die Approximation der Oberfläche kann es zu Formabweichungen kommen. Dieser Fehler tritt häufig bei Rundungen auf und kann auch nicht verhindert werden, denn beispielsweise kann eine Kugel nicht durch eine endliche Zahl von Dreiecken dargestellt werden. Gut zu sehen ist dies in der Abbildung 3, in der ein STL-Modell abgebildet ist, dass nicht mit dem CAD Modell übereinstimmt. Der Grad der Abweichung lässt sich mit der Anzahl der Dreiecke einstellen. Je größer die Anzahl der Dreiecke, desto genauer stimmt das Modell mit der CAD-Datei überein. Allerdings vergrößert sich das Speichervolumen der Datei exponentiell zur Steigerung der Anzahl der Dreiecke. Um dem entgegenzuwirken gibt es bestimmte Programme, die mit Hilfe eines hinterlegten Algorithmus erkennen, welche Bereiche über mehr Dreiecke verfügen sollten und welche über weniger. Dadurch wird das zu approximierende Objekt weniger von seiner eigentlichen Form verfremdet und es können trotzdem Dateien mit verhältnismäßig wenig Speicherplatz generiert werden.

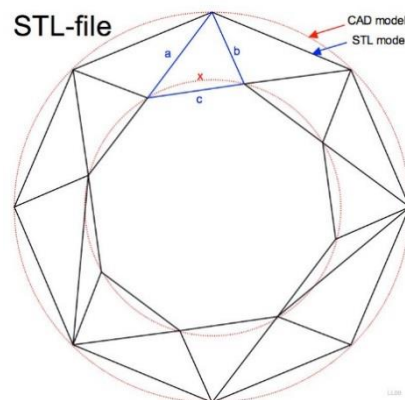


Abbildung 3. Darstellung einer STL-Datei über einer CAD-Datei

Es kommt immer zu einer Approximation beim Konvertieren vom CAD-Modell zum STL-Modell. Außerdem gehen jegliche Informationen aus dem CAD-Modell verloren, wie Bemaßungen, Toleranzen oder ähnliches. Die STL-Datei beinhaltet ein reines Oberflächenmodell.

Es gibt drei Fehlerarten, welche sich nicht unbedingt auf die STL-Datei auswirken, sondern auf die additive Fertigung. Die erste Fehlerart ist ein konstruktiver Fehler, welcher seinen Ursprung in der CAD-Datei hat. Diese kommen durch die fehlerhafte Vereinigung von Objekten zustande, wirken sich allerdings nur bei schneidenden Verfahren aus, da jede Lücke mit einem Schnitt versehen wird.

□

Die Fehlerart des Umsetzungsfehlers entsteht durch das Approximieren und wurde bereits im vorherigen Absatz erläutert. Die letzte Fehlerart ist der syntaktische Fehler. Dabei handelt es sich um einen Beschreibungsfehler. Der Fehler bildet sich bei der Erstellung der STL-Datei. Lücken zwischen Dreiecksfacetten, Überlappung von Dreiecken oder die falsche Orientierung sind die Folge.

Die drei Fehlerarten sind alle durch die richtige Einstellung der Software oder durch bestimmte Korrektursoftware zumindest soweit zu beheben, dass eine Abweichung der Datei kleiner als die Genauigkeit der Verfahren ist und somit keinen Einfluss hat.

[6]

2.3.2 Verfahren der Schichtgenerierung

Bei den additiven Verfahren gibt es viele unterschiedliche Arten eine Schicht zu verfestigen. Die meisten Hersteller von RP-Anlagen besitzen ein Patent auf eine spezielle Art von Schichtgenerierung. So gibt es allein in der Stereolithografie mindestens sieben eigenständige Verfahren und die Zahl ist weiter steigend. Zum besseren Verständnis werden an dieser Stelle die markantesten drei Verfahren erläutert und unterschieden. Besonderheiten bestimmter Verfahren werden anschließend genauer beleuchtet.

Das Vektorverfahren ist ein konturierendes Verfahren. Dabei wird der Laser, Düsenkopf oder das Messer vektoriell in der Ebene verfahren. Zuerst werden die äußeren Konturen abgefahren und die Innenfläche nachträglich, wie zuvor programmiert, gefüllt. Es kann eine Strahlenweitenkompensation durchgeführt werden, wobei die äußerste Kontur in der Software um einen halben Strahlendurchmesser nach innen versetzt wird, damit die äußerste Kontur mit den Sollmaßen übereinstimmt. Die Dauer der Schichtgenerierung hängt hierbei von der Komplexität der Schicht ab. Dies ist im Allgemeinen das genaueste aber auch langsamste Verfahren.

Das Rasterverfahren baut die Schicht zeilenweise auf. Dieses Verfahren ist vergleichbar mit dem zweidimensionalen drucken. Ein Druckkopf verfährt zeilenweise und nimmt dabei die komplette Breite des Bauraums ein. Der Druckkopf ist mit vielen Düsen über die komplette Breite versehen. Jede Düse kann einzeln angesteuert werden. Bei diesem Verfahren kommt es zu einem sogenannten Treppenstufeneffekt in x-y-Ebene. Durch das punktuelle Einspritzen von Bindern oder Farben und den Abstand der Düsen voneinander kommt es zur Bildung von Pixeln (Punkten), welche beim fertigen Modell sichtbar sind. Der Treppenstufeneffekt kommt bei jedem Verfahren in der z-Richtung vor, da beim Verfahren der Bauplattform in z-Richtung eine Stufe im Modell entsteht, daher wird bei allen additiven Fertigungsverfahren eigentlich von einem 2,5D-Verfahren gesprochen. Das Rasterverfahren ist im Allgemeinen das schnellste, allerdings auch das ungenaueste Verfahren.

Das Maskenverfahren bearbeitet, anders als die anderen Verfahren, eine ganze Schicht gleichzeitig. Dazu wird eine maßstäblich verkleinerte Maske erstellt. Die Erstellung von Masken bietet viele Möglichkeiten. Beispielsweise ist es möglich, wie bei einem Over-Head-Projektor, eine Folie oder Maske zu drucken und zu belichten. Außerdem gibt es die Möglichkeit einen Strahl auf eine Fläche mit Kippspiegeln zu projizieren. Die Kippspiegel lassen sich steuern und jeder Spiegel stellt dabei einen Pixel dar. Die Stellung der Spiegel entscheidet, ob ein Pixel angezeigt wird oder nicht, wie in Abbildung 4 dargestellt. Das Licht fällt von unten rechts auf die Fläche, auf der die Kippspiegel angebracht sind. Von dort strahlt das Licht von unten auf eine Scheibe, auf der sich das zu verfestigende Material befindet. Durch die komplette Belichtung einer Schicht wird bei diesem Verfahren mehr Energie benötigt. Die Dauer der Schichtgenerierung ist unabhängig von der Komplexität. Die Schnelligkeit und Genauigkeit im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren hängt von der Generierung der Maske ab. Allerdings kann auch gesagt werden, je genauer die Maske ist desto länger dauert die Herstellung der Maske.

[6]

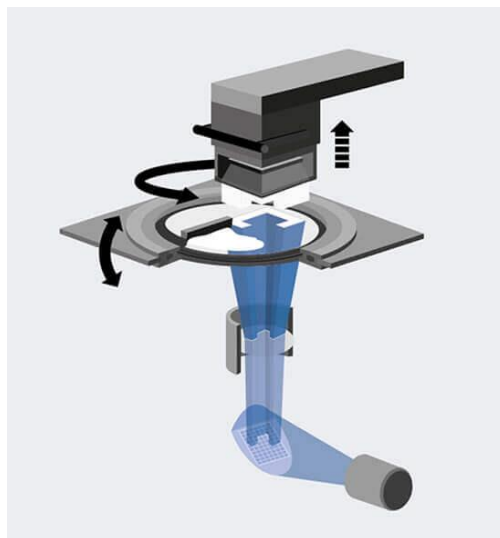


Abbildung 4: Darstellung des Maskenverfahrens anhand von Kippspiegeln

2.3.3 Recoating

Einige Verfahren in der additiven Fertigung sind auf das Auftragen einer neuen Schicht angewiesen. Dabei wird immer eine ganze Schicht mit einem Harz oder Granulat mit einer definierten Dicke aufgetragen, welche noch unbehandelt ist - weder verfestigt noch mit Härter versehen. Diese Art der Schichtgenerierung kann passiv oder aktiv ausgeführt werden.

Passives Recoating funktioniert nur bei den Verfahren mit Harzen. Dabei wird das Deep-Dip-Verfahren („tiefes Tauchen“) verwendet. Die Bauplattform wird auf den Grund des mit Harz gefüllten Beckens gefahren und zurück bis zur Tiefe einer Schichtdicke unter der Oberfläche nach oben gefahren. Schließlich wird das Harz von einem Wischer geglättet und eine neue Schicht kann nach dem Beruhigen der Harzoberfläche bearbeitet werden.

Aktives Recoating kann bei jedem Verfahren angewendet werden. Dabei wird neues Material aus einem Vorratsbehälter aufgetragen und direkt im Anschluss von einem Wischer geglättet. Überflüssiges Material wird dabei aufgefangen und kann in den Vorratsbehälter zurückgeführt werden. Diese Art des Recoatings ist genauer, schneller und verhindert sogenannte „Trapped Volumes“ (nicht benetzte Flächen). Dadurch werden die Maschinen allerdings komplexer und es immer teurer.

[6]

2.3.4 Supportstruktur

Die Supportstruktur, oder kurz Support, ist eine Ergänzung zum eigentlichen Modell. Sie wird in die STL-Datei durch eine sogenannte Slicing-Software eingebunden. Die Slicing-Software ist dafür zuständig, dass Modell in Schichten zu schneiden. Die Parameter, wie beispielsweise die Schichtdicke, können eingestellt werden. Die so entstandenen Schichten werden in Verfahrenswege der Anlage umgewandelt und hier entscheidet sich, ob Support benötigt wird.

Die Supportstruktur hat die Aufgaben das Modell zu unterstützen. Die Art der Unterstützung hängt dabei vom Verfahren ab. Die Aufgabenbereiche reichen dabei vom Stützen der Struktur bis hin zur Abführung von Wärme. Die genauen Aufgaben des Supports werden bei der Beschreibung der Verfahren erläutert.

Die Slicing-Software übernimmt die Generierung der Supportstrukturen. Sie berechnet an welchen Stellen sie notwendig wird. Der Support ist nicht Teil des Modells und muss zwingend in einer Nacharbeit entfernt werden. Um den Arbeitsaufwand so gering wie möglich zu halten, gibt es die Möglichkeit die Intensität der hinzugefügten Strukturen zu beeinflussen. Die Wahl zwischen keiner Supportstruktur und der kompletten Unterfütterung des Modells hat maßgebliche Eigenschaften auf die Genauigkeit. Oft wird ein Kompromiss gefunden. Alternativ ist es in manchen Programmen möglich besonders wichtige Stellen gezielt mit mehr Stützstrukturen zu versehen. So beschränkt sich die Nacharbeit auf ein Minimum und es können trotzdem gute Ergebnisse erzielt werden.

[6]

2.3.5 Selektives Laser-Sintern

Dieses Verfahren arbeitet mit dem selektiven Aufschmelzen von Granulaten. Die meisten Werkstoffe können bei diesem Verfahren genutzt werden. Es gibt nur wenige Ausnahmen, denn die Werkstoffe müssen sich schmelzen und fügen lassen. Somit lassen sich Duroplasten und Elastomere aus dem Bereich der Kunststoffe nicht verarbeiten. Im Bereich der Metalle können nur die schweißbaren Sorten verwendet werden. Beispiele zur Anwendung vom selektives Laser-Sintern (SLS) sind in Abbildung 5 zusehen. Diese Modelle können nur mit der additiven Fertigung hergestellt werden.

[6, 22]



Abbildung 5: Anwendungsbeispiele aus Kupfer zum selektiven Laser-Sintern

Generierung der Schicht

Bei der Bearbeitung von Metallen muss der Bauraum mit einer Schutzgasatmosphäre ausgestattet werden, damit eine Korrosion oder die Entstehung von Poren verhindert wird. Die Anlage wird dadurch komplexer und teurer. Bei Kunststoffen kann man auf eine Schutzgasatmosphäre verzichten. Außerdem ist es notwendig den Bauraum nahe dem Schmelzpunkt des Granulats aufzuheizen, damit der Laser weniger Energie zum Versintern benötigt.

Die erste Schicht wird mittels aktiven Recoating erzeugt. Dieses Verfahren arbeitet mit einer vektoriellen Führung eines Lasers, welcher das Material aufschmilzt und ist damit ein Vektorverfahren. Der Laser ist ortsfest und strahlt auf einen Spiegel, der angesteuert wird. In diesem Zusammenhang wird auch von einem Laserscanner gesprochen.

Der Laserscanner schmilzt nun Schicht für Schicht selektiv auf bringt infolge des Schmelzprozesses Wärme ein. Die Wärme führt zum Verzug des Modells, weshalb Support an das Modell angefügt werden. Das umliegende Granulat wirkt wärmedämmend, allerdings kann die Wärme über die Supportstruktur an die Bauplattform abgegeben werden und somit schneller auskühlen.

Nach der Fertigstellung des Modells müssen mit dem Recoater noch mehrere Schichten Granulat über das Modell gegeben werden, damit das Modell gleichmäßig auskühlen kann. Nach einigen Stunden der Ruhe kann das überschüssige Granulat abgesaugt werden und das Modell kann nun aus der Anlage entfernt werden. Die Nacharbeit besteht im Entfernen des Supports und im Abtragen der Partikel, die sich an der Außenkontur mit angeheftet haben. Zusammenfassend ist das Verfahren nochmals in Abbildung 6 dargestellt.

[6]

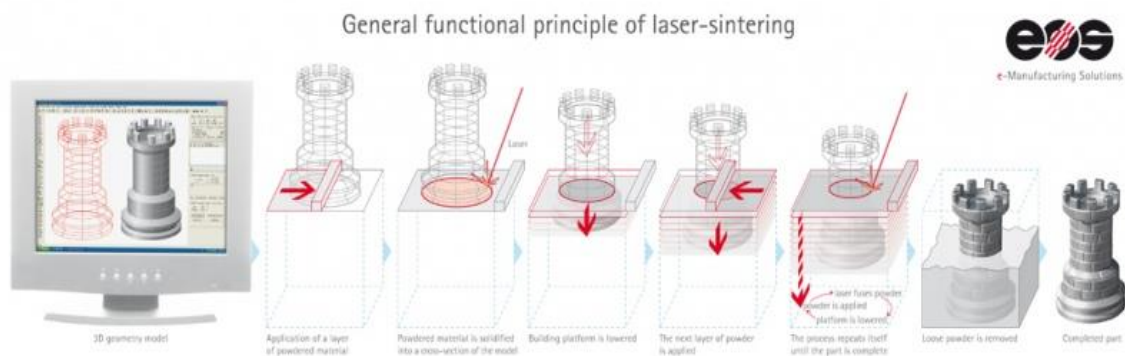


Abbildung 6: Generelles Funktionsprinzip vom selektiven Laser-Sintern

Abbildung 6: https://www.rapidobject.com/csdata/image/1/de/prozess-selektives-lasersintern_1426_600.jpg, (letzter Zugriff: 07.10.2018)

2.3.6 Schmelzen mit einer Pulverdüse

Das Laser-Schmelzen mit einer Pulverdüse ist ein Hybridverfahren welches ursprünglich aus dem Bereich der Fügetechnik stammt. Es wird auch als „Direct Metal Deposition“ (DMD) bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine Mischform aus dem FFF- und dem SLS-Verfahren. Bei dem DMD-Verfahren wird auf die Füllung des Bauraums mit Metallgranulat verzichtet. Das Metallgranulat wird mit mehreren Düsen in den Fokuspunkt des Lasers versprüht und dort aufgeschmolzen.

Das DMD-Verfahren ist eine Technologie aus der Beschichtung. Hierbei kann eine Schicht auf einem Werkstück aufgeschweißt werden, die zum Verschleißschutz gegen mechanische oder chemische Einwirkung eingesetzt wird. Dies wird seit den 70er Jahren durchgeführt und ist inzwischen ein übliches Verfahren für die Beschichtung von Werkstücken. Der Vorteil dieser Art der Materialzufuhr ist die nahezu grenzenlose Vielfalt, da das Granulat zu der Legierung gemischt werden kann, wie sie benötigt wird. Dies ist nur möglich, da nicht der komplette Bauraum mit dem Granulat gefüllt werden muss, sondern nur die benötigte Menge.

[6]

In der Abbildung 7 ist aufgezeigt wie der Prozess funktioniert. In diesem Fall ist ein Düsenkopf in einer Drehmaschine eingespannt. Mittels Auftragschweißen wird eine neue Kontur auf eine Welle aufgebracht. Der Düsenkopf könnte alternativ auch an einem Roboterarm angebracht sein. Deutlich zu erkennen sind die Rohrleitungen, welche das Pulver mit Druckluft vor der Düse fokussieren. Es müssen mindestens drei Zuläufe von Material vorhanden sein, weil sonst eine dreidimensionale Bewegung des Düsenkopfes nicht möglich wäre. Mittig aus dem Düsenkopf kommt der Laserstrahl. Der Strahl scheint durch mehrere Linsen, um einen gebündelten Laserstrahl zu erhalten und ihn genau im Fokus des Metallgranulats zu konzentrieren. Nur beim Übereinstimmen der beiden Punkte wird ein gutes Ergebnis erzielt.



Abbildung 7: Darstellung einer DMD-Anlage beim Auftragen einer Kontur auf ein Werkstück

Generierung der Schicht

Bei dem DMD-Verfahren handelt es sich um ein Vektorverfahren. Ein Recoating Prozess ist hierbei ebenfalls nicht notwendig, da das Material lokal durch den Düsenkopf aufgetragen wird. Die Generierung der Schicht bei einem DMD-Verfahren funktioniert wie bei dem FFF-Verfahren und kann im Kapitel 2.3.7 nachgelesen werden. Es gibt allerdings Ausnahmen, von denen eine nun näher erläutert wird.

Bei dem DMD-Verfahren wird häufig kein Werkstück aus dem Granulat erstellt, sondern Werkstücke mit einer zusätzlichen Kontur versehen. Beispielsweise ist es möglich notwendige Konturen zu erstellen, die sonst nur unter der Abtragung von viel Material möglich wären oder eine zu große Komplexität aufweisen. Durch das Anmischen des Granulats aus den Grundwerkstoffen ist jede vorstellbare Legierung möglich und macht das Verfahren für diese Anwendung außerordentlich attraktiv.

[6]

2.3.7 Extrusionsverfahren – Fused-Filament-Fabrication

Die Extrusionsverfahren sind Verfahren bei denen die formneutralen Werkstoffe in einer oder mehreren Düsen aufgeschmolzen und im zähflüssigen Zustand aufgetragen werden. Im Weiteren wird es um das Fused-Filament-Fabrication (FFF) Verfahren gehen, da dieses, vor allem in privaten Bereich, das bekannteste und verbreitetste Verfahren ist.

Bei den Werkstoffen, die für das Extrusionsverfahren verwendet werden, handelt es sich meist um Kunststoffe in Drahtform. Das Verarbeitungsmaterial wird als Filament bezeichnet. Das Filament wird auf Spulen aufgewickelt und von der Anlage selbstständig von einem Extruder in die Düse geführt. Die Farbe des Filaments ist die Farbe des Endmodells. Mit zwei oder mehr Düsen besteht die Möglichkeit Farben oder Materialien im Herstellungsprozess zu wechseln. Außer der Farben, kann ein Filament auch bestimmte Eigenschaften aufweisen. Es kann fluoreszierend sein oder sich mit einer Lauge auswaschen lassen, womit es hervorragend für die Support-Strukturen geeignet ist.

Hierbei handelt es sich um ein Vektorverfahren bei dem Recoating nicht notwendig ist, da das Filament aus der Düse austritt. Dieses Verfahren ist das einzige, bei dem die Generierung in Schichten zwingend notwendig ist. Es ist möglich einen Düsenkopf mit einer Filament-Zufuhr an einem Roboterarm anzubringen und so in allen Ebenen oder über Ebenen hinweg zu arbeiten ohne Einfluss auf das Modell. Ein Beispiel dafür sind die 3D-Druck-Stifte, welche für kleines Geld zu erwerben sind. Eigentlich gedacht, um die Kreativität von Kindern zu fördern, beweisen sie jedoch anschaulich die Möglichkeiten für dieses Verfahren. In Abbildung 8 ist eine FFF Anlage nach der Fertigung eines komplexen Modells aus Kunststoff dargestellt.

[6]

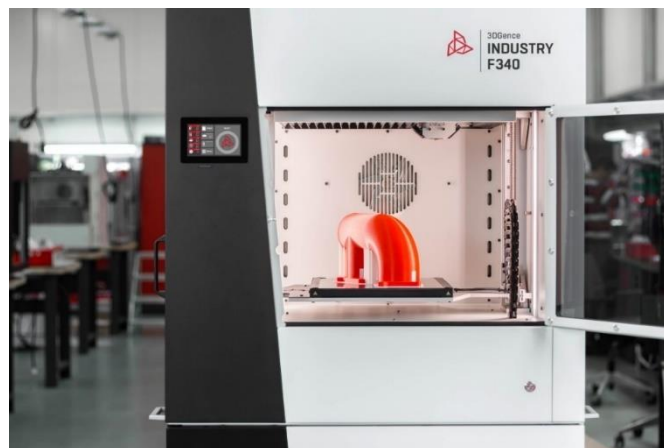


Abbildung 8: Darstellung einer FFF-Anlage der Firma 3DGence nach dem Bauprozess

Abbildung 8: <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2018/02/1.-INDUSTRY-F340-industrial-PEEK-3D-printer.jpg>, (letzter Zugriff: 07.10.2018)

Generierung der Schicht

Anders als bei anderen Verfahren ist das FFF-Verfahren an eine solide Basis gebunden. Kleine Modelle oder Modelle mit wenig Grundfläche auf der Bauplatzform sind auf ein sogenanntes Raft angewiesen. Ein Raft ist eine Grundfläche auf der Bauplatzform, die drei bis fünf Schichtdicken trägt. Dies ist notwendig, da die Düse das geschmolzene Material aufdrückt und das Modell umkippen könnte. Außerdem wird der Support auch auf dem Raft aufgebaut. Zusätzlich gleicht das Raft kleine Unebenheiten auf der Bauplatzform aus.

Die erste Schicht wird auf das Raft aufgetragen. Die Schichtgenerierung wird mittels Vektorverfahren durchgeführt. So trägt der Düsenkopf eine Schicht auf. Sind zwei Düsen im Druckkopf, so kann in der Schicht die Farbe oder das Material gewechselt werden. Zum Erzielen eines besseren Ergebnisses wird das aufgeschmolzene Material nach dem Auftragen abgekühlt. Dadurch wird der Verzug minimiert und die Formgenauigkeit gehalten, dies kann zusätzlich mit einem beheizten Bauraum unterstützt werden.

Bei der Genauigkeit spielt die Maßhaltigkeit auch eine wichtige Rolle. Diese ist gegeben, wenn die Software zur Schichtgenerierung über eine Strahlenweitenkompensation verfügt. Das bedeutet, dass der Verfahrensweg der Düse um einen halben Düsendurchmesser in die Kontur verschoben wird. Allerdings verfügt nicht jede Software über diesen Zusatz.

Support hat bei der Erstellung von FFF-Modellen einen besonderen Stellenwert, da ein Überhang im Modell mit einer Steigung über 45° nur schwer zu realisieren ist. Im Gegensatz zu den vorherigen Verfahren ist außerdem kein anderes Material im Bauraum, welches eine stützende Wirkung erzeugt. Nach der Erstellung des Modells durch die FFF-Anlage kann das Modell nach einer Auskühlpause von der Bauplatzform entfernt werden. Schlussendlich müssen Raft und Support entfernt werden.

[6]

2.4 Losgröße „1“

Als Losgröße wird im Allgemeinen die Menge eines Produktes in einem Auftrag definiert. Dabei spricht man von einer sogenannten Losfertigung, in der diese bestimmte Menge alle Stufen der Fertigung als eine Einheit durchläuft. Der Begriff wird ebenfalls bei dem Transport von mehreren Werkstücken verwendet. So ist die Losgröße zum Beispiel die Menge, aller Produkte, die auf eine Palette passen.

Die Losgröße ist von der Stückzahl zu unterscheiden. Die Stückzahl ist eine beliebige Anzahl an Stücken. Sie ist unabhängig von der Produktion, Lagerung und dem Transport. Man kann die Stückzahl der produzierten Werkstücke pro Zeiteinheit angeben oder auch die Stückzahl einer Losgröße.

Mit Losgröße „1“ zu fertigen bedeutet eine Umstellung nach jedem Werkstück. Hierbei ist zu unterscheiden, ob Unikate oder Varianten gefertigt werden. Unikate unterscheiden sich mindestens in einer Eigenschaft, wie Form, Farbe, Funktion oder anderer Charakteristika. In der Medizin werden beispielsweise Zahnprothesen individuell für den Patienten angefertigt. Die Form und Farbe der Prothese wird an das Gebiss des Patienten angepasst und ist somit ein Unikat. Eine Variante ist eine Montage von Teilen aus der Massenproduktion. Eine Variante kann auch ein Unikat sein, wenn es einmalig vorkommt.

[15, 32]

2.4.1 Die individuelle Massenfertigung

Ein gern genutzte Wortneuschöpfung in diesem Bereich ist die „Individuelle Massenfertigung“, zwei Begriffe, die sich eigentlich widersprechen. Mit anderen Worten, eine individuelle Produktion in Losgröße „1“ mit einer schnellen Durchlaufzeit, störungsfreien Produktion, kalkulierbarer Kosten und einem hohen Maß an Automatisierung.

Bei einer solchen Produktion muss jeder Teil der Fertigung genau überwacht und gesteuert werden. Dazu gehört als erstes eine Angebotskalkulation, damit der Kunde im Vorwege weiß was sein Wunschprodukt kosten wird. Ein gutes Beispiel dafür sind die Konfiguratoren der meisten Automobilhersteller. Dort hat man die Möglichkeit sich sein „Traumauto“ mit allen Zusätzen und Komfortmöglichkeiten zusammenzustellen, die der Hersteller anbietet. Ergänzend kommt eine Kostenübersicht zu den möglichen Konditionen hinzu.

Desweiteren gehört zu einer individuellen Massenfertigung auch eine automatisierte Qualitätssicherung (QS) dazu, welche schon in der Produktion eingreifen kann. Nur mit dem richtigen „Know-how“ ist es der Fertigung möglich auf die Auswertungen der QS zu reagieren. So ist es beispielsweise möglich bei bestimmten Anwendungen automatisch Werkzeuge nachzustellen

oder zu wechseln, damit eine gleichbleibende Qualität gewährleistet ist. Außerdem muss sichergestellt werden, dass die benötigten Werkstücke oder Kaufteile immer im ausreichenden Maß zur Verfügung stehen.

[28]

2.4.2 Industrie 4.0

Um die „individuelle Massenfertigung“ in einem Unternehmen zu etablieren, muss Industrie 4.0 weiter voranschreiten. Die im letzten Absatz genannten Punkte sind alle ein Teil von Industrie 4.0. Industrie 4.0 bedeutet in dem Zusammenhang eine Vernetzung der Produktionsstätten. Die kommunikativen der Anlagen untereinander, aber auch zwischen den Menschen, der Logistik und den Werkstücken. Die Grundlage dafür ist ein intelligentes und digitales System, welches die Organisation übernimmt oder an die richtigen Stellen weiterleitet. Dadurch ist ein flexibles und schnelles Reagieren möglich, das den Produktionsprozess kontinuierlich zum Weiterlaufen bewegt.

Die Fertigung in kleinen Losgrößen kann zu vielen Problemen führen. Zum einen müssen Störungen vermieden werden. Dabei kann ein gutes Supply-Chain-Management (SCM) behilflich sein. SCM bedeutet die Organisation der Lieferkette oder Wertschöpfungskette. Im Fokus stehen die Übergänge zwischen den Fertigungsschritten, aber auch vom Zulieferer bis in die Fertigung. Bei der Wirtschaftlichkeit werden häufig Zeiten und Kosten verglichen. Bei einer Fertigung mit Losgröße „1“ werden zwangsweise Rüstzeiten verlängert, Lagerkosten und Personalkosten erhöht. Diese Faktoren müssen bei wirtschaftlichem Erfolg berücksichtigt werden. Als Beispiel kann man Audi heranziehen. Dort ist es in den Lackieranlagen möglich nach jedem Lackiervorgang die Farben zu wechseln. Audi ließ jedoch davon ab, da es aus umwelttechnischen Gründen besser ist nur bei jedem zehnten Fahrzeug die Farben zu wechseln. Daher ist immer abzuwägen, welches Vorgehen gewählt werden sollte.

[25]

Es zeichnet sich momentan ein Trend ab, welcher in die Richtung der additiven Fertigung geht. Diese Anlagen eignen sich hervorragend für Fertigung mit Losgröße „1“, da diese additive Fertigungsmethode prinzipiell nur Unikate fertigt. Bei diesen Verfahren werden Materialien aufgetragen, laminiert und konturiert oder verklebt.

[33]

2.5 Einfahrverhalten von Umformwerkzeugen

Ein Tryout ist ein Verfahren, in dem geprüft wird, ob ein Umformwerkzeug die Anforderungen für die Produktion leisten kann. Dieses ist trotz vorheriger Simulation notwendig, da der reale Umformprozess zu vielen Einflüssen unterliegt. Deshalb wird jedes Umformwerkzeug nachdem es gefertigt wurde, auf einwandfreie Funktion getestet. Bei kleinen und einfachen Werkzeugen werden dabei vergleichsweise wenig Probleme auftreten. Industriell genutzte Umformwerkzeuge sind heutzutage jedoch sehr groß und umfangreich. In der Autoindustrie werden beispielsweise Umformwerkzeuge mit Abmaßen von 4500x2400mm verwendet. Diese besitzen ein Gewicht von bis zu 60t. Diese großen Werkzeuge müssen immer für den geforderten Prozess individuell nachgearbeitet werden.

Grund hierfür sind beispielsweise Verformungen des Werkzeuges, welche nicht optimal simuliert werden können. Ebenso hat die Reibung der Werkzeuge, die von der Oberflächengüte abhängt, einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Somit musste früher mit Hilfe von vielen Versuchen die Optimierung des Umformwerkzeuges stattfinden. Seit ca. 10 Jahren ist die Simulation in diesem Bereich deutlich besser geworden. Dies ist auf eine bessere Rechenleistung und detaillierteste Programme zurück zu führen. Durch diese Verbesserungen fallen häufige Tuschier-Vorgänge, kostspieliges Aufschweißen und Korrekturschleifen weg. Tuschieren ist ein Verfahren, bei dem die Werkzeugelemente, welche die Arbeit verrichten mit Spezialfarbe bestrichen werden. Danach wird das Werkzeug zusammengesetzt und es wird geschaut, an welchen Stellen Farbe auf dem Werkzeug abgetragen bzw. auf dem Gegenstück aufgetragen wurde. Es ermöglicht Stellen zu erkennen, welche eine Nacharbeit benötigen.

Für das Tryout werden verschiedene Maschinen auf dem Markt angeboten, die speziell deren Anforderungen leisten. Hydraulische Tuschier- und Tryoutpressen beispielsweise, weisen möglichst nahe Bedingungen gleich der Produktion auf. Der Bediener kann jeder Zeit die maximale Kraft der Presse verwenden und kann die Hubwege von einzelnen Stößeln langsam oder schnell durchführen. Zum Tuschieren wird beispielsweise die langsame und feinfühligste Steuerung verwendet. Die Werkzeughöhen beim Einrichten sind einfach zu variieren. Doppeltwirkende Pressen finden sowohl in doppelt als auch ein einfach wirkenden Betrieb Verwendung.

Hydraulische Multicurvepressen bieten eine exakte Simulation der Stößelkinematik von allen Pressetypen. Somit besitzt sie eine Ziehgeschwindigkeit von bis zu 500 mm/s. Es wird darauf geachtet, dass der Vorgang möglichst Produktionsnah ist und es ist möglich ein identisches Tischkissen für die Befestigung des Werkzeuges zu verwenden.

Die Kombination von mehreren oder verschiedenen Tryoutpressen bezeichnet man als Tryoutzentren. Durch die Kombination erhält man eine größere Flexibilität und Vielfalt der möglichen Anwendungen. Vor den Pressen stehen oft Werkzeugwender. Diese sorgen dafür, dass der Ein-

und Ausbau der Werkzeuge möglichst schnell und einfach abläuft. Ebenso ist mit ihnen ein ergonomisches Bearbeiten der gedrehten Werkzeuge möglich. Um alle Arbeitsgänge auf einander abzustimmen, werden externe Simulationen für die Maschinen angeboten. In dieser Simulation werden Rüst- und Einarbeitungszeiten und der Materialfluss berücksichtigt. Damit die Simulation möglichst realistisch ist werden zufällige Störungen mit simuliert. Dadurch lassen sich Staus vor den Maschinen frühzeitig erkennen und eine erhöhte Maschinenlaufzeit ist zu realisieren.

Umformwerkzeuge, die mit Hilfe von 3D-Druck hergestellt werden, müssen diese Schritte ebenfalls durchlaufen. Hierbei ist es je nach verwendetem Verfahren möglich das Werkzeug zu bearbeiten oder nicht. Beispielsweise ist es schwer auf Kunststoffteile zusätzliches Material aufzuschweißen. Es sollte ein neues Werkzeug gedruckt werden. Das Drucken von neuen Werkzeugen nimmt, verglichen mit dem gängigen Verfahren, weniger Zeit in Anspruch. Bei Verfahren, in denen Metalle verarbeitet werden, ist das Aufschweißen jedoch möglich.

[12, 23, 27]

2.6 Messung von geometrischen Größen

Die Messtechnik gewinnt, mit steigendem Anspruch an die Werkzeugmaschinen und der Werkstücke, immer mehr an Bedeutung. Die Maschinengenauigkeit hat sich in den letzten 250 Jahren deutlich verbessert und damit auch die Messtechniken. Bei der Messtechnik kann in berührende und berührungslose Verfahren unterschieden werden. Es können noch viele weitere Unterscheidungen getroffen werden, wie beispielsweise analog oder digital.

Die ältesten und verbreitetsten Messmittel sind die berührenden Messtechniken. Dazu zählen beispielsweise Messschieber, Messuhr, Endmaße, Lehren und Rauigkeitsmessgeräte. Diese Messverfahren können sehr einfach aufgebaut werden, da kein hoher Grad an Digitalisierung notwendig ist. Viele der berührungslosen Methoden funktionieren auch rein analog. Dadurch werden die Verfahren kostengünstiger sind aber stark von der Fertigungsgenauigkeit der Messmittel abhängig.

Die berührungslosen Verfahren sind aufgebaut, haben dafür aber einige Vorteile gegenüber der berührenden Messverfahren. Der Fortschritt dieser Messtechniken hängt mit den Forschungsfortschritten im Bereich der Optik und der Computertechnologie zusammen. Der Vorteil der berührungslosen Messtechnik liegt schon im Namen verborgen. Die kontaktlose Messung von Objekten beschädigt die Oberflächen nicht und es wird keine Krafteinwirkung benötigt, die das Objekt verformen könnte. Außerdem eignen sich diese Art der Messung sehr gut für die Automatisierung und kann dabei deutlich schneller durchgeführt werden.

[3, 11]

2.6.1 SmartSCAN von AICON

Bei dem SmartSCAN handelt es sich um einen kompakten und mobilen 3D Weißlichtscanner der Firma AICON. Dieses optische Messsystem wird im Zuge dieser Arbeit für die Vermessung der Prägestempel verwendet. Dabei werden der 3D gedruckter und gefräster Prägestempel im Verlauf einer Kleinserie in regelmäßigen Abständen vermessen.

Das SmartSCAN-System projiziert mit der mittleren Linse ein vordefiniertes Muster auf das Objekt, dabei kann es sich beispielsweise um Streifen- oder Schachbrettmuster handeln, wie in Abbildung 9 dargestellt. Auch weitere Muster sind denkbar. Die beiden Objektive an den Seiten haben einen definierten Abstand zueinander, der von der Software für die Berechnung notwendig ist. Das Messobjekt liegt vor dem optischen Scanner auf einem Drehtisch. Der Scanner macht mit beiden Objektiven ein Bild von dem Messobjekt und der Drehtisch bewegt das Objekt nun einige Grad weiter. So entsteht eine Bilderreihe, die durch eine Software zu einem 3D-Modell

zusammengesetzt wird. Die Bereiche, welche von der Optik nicht erfasst werden können, kann auch keine Berechnung eines 3D-Modelles stattfinden. Dazu muss das Messobjekt auf dem Drehtisch neu positioniert werden.

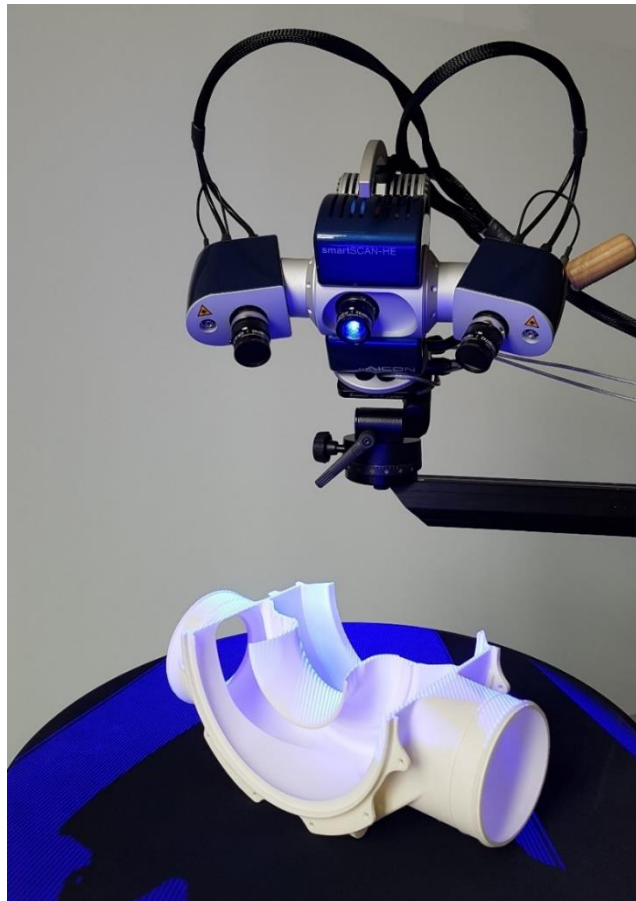


Abbildung 9: SmartSCAN bei der Vermessung eines Werkstücks mittels Strichmuster

In der Messsoftware können im Nachhinein verschiedene Messmethoden angewendet werden. So ist es beispielsweise möglich Abstände, Winkel oder Durchmesser am erzeugten 3D-Modell zu vermessen. Eine noch genauere Methode ist ein Vergleich des CAD-Modells. So kann beispielsweise das CAD-Modell des Konstrukteurs und das erzeugte von der SmartSCAN-Software übereinandergelegt werden und die Software wertet die Unterschiede aus. Diese Variante kann auch automatisiert werden und es können Toleranzen hinterlegt werden. Dadurch kann die Software selbstständig über Gutteil und Ausschuss entscheiden.

[17]

2.6.2 Einflüsse auf die Messergebnisse

Die Einflussfaktoren auf die Ergebnisse bei der Messung sind sehr zahlreich. Einerseits gibt es Faktoren, die auf die Genauigkeit des Messmittels eine Auswirkung haben. Andererseits gibt es Faktoren, die das Messobjekt beeinflussen. Zudem können berührende Messmittel auch einen Einfluss haben, indem sie beispielsweise Kräfte aufbringen.

Es gibt viele Möglichkeiten die Messergebnisse zu verbessern, indem Einflussfaktoren minimiert werden. So wird beispielsweise versucht durch einem klimatisierten Raum die Temperatur zu regulieren und die Verschmutzung auf ein Minimum zu reduzieren. Die Zahl der Einflussgrößen ist sehr groß und kann nahezu nicht kompensiert werden. Die möglichen Einflussgrößen können nach Ursache-Wirkung-Richtung aufgetragen werden. Daraus ergibt sich das Ishikawa-Diagramm, welches in einer vereinfachten Version in Abbildung 10 dargestellt ist.

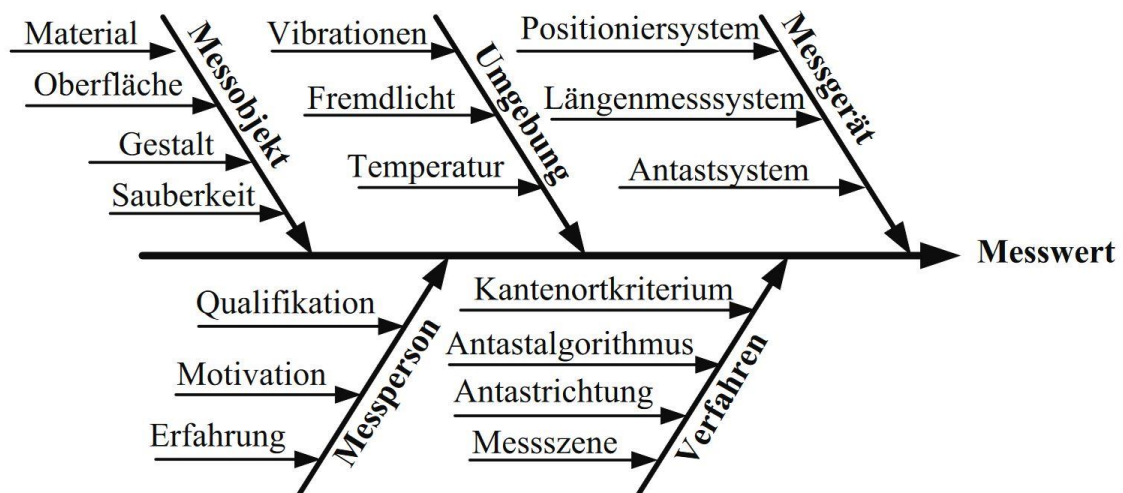


Abbildung 10: Ishikawa-Diagramm von Einflüssen auf Messwerte

Aus der Summe der Einflüsse ergibt sich die Messabweichung. Abweichungen bei einer Messung lassen sich nicht vermeiden, jedoch sollten bekannte Einflussfaktoren möglichst vermieden werden. Besonders bei der berührungslosen Messmitteln spielt die Oberflächenbeschaffenheit eine relevante Rolle. So ist beispielsweise bei dem zuvor genannten SmartSCAN die Spiegelung von Oberflächen ein Problem. Bei einer Messung sollte das Messobjekt, falls es spiegelt, mit einem Puder benetzt werden, welches das Messobjekt mit einer matten Oberfläche versieht.

[30, 34]

2.7 Modularer Werkzeugbau

Beim modularen Werkzeugbau in der Umformtechnik wird ein komplexes Werkzeug in verschiedene aufgabenspezifische Module aufgeteilt. In der Umformtechnik ist dieses Verfahren besonders beliebt, da die Werkzeuge sehr komplex und teuer sind. Der modulare Werkzeugbau lässt sich mit den Anfängen des Buchdrucks vergleichen. Beim Buchdruck werden die Stempel der einzelnen Buchstaben auf einen Rahmen angeordnet und verpresst, sodass diese nicht herausfallen. Diese Stempel werden mit Tinte getränkt und samt dem Rahmen auf ein Stück Papier gepresst. Dadurch überträgt sich die Tinte an den Erhebungen der Stempel auf das Papier und der Text hat sich auf das Papier übertragen. Die so erstellten Stempel sind durch den Austausch der Buchstaben somit modular und der Text kann angepasst werden.

Im modularen Werkzeugbau mit Fokus auf die Umformtechnik ist dies sehr ähnlich. Das Unterwerkzeug ist vergleichbar mit dem Rahmen des Buchdrucks und ist für das Zusammenhalten der Module verantwortlich. Außerdem verlaufen darin die notwendigen Anschlüsse für beispielsweise pneumatische Elemente, Schmierung oder Messmittel. Jedoch ist das Unterwerkzeug nicht so universell einsetzbar, wie der Rahmen des Buchdrucks. Es wird an bestimmte Anwendungsgebiete angepasst und ist damit nicht universell einsetzbar. Werden jedoch Änderungen an dem zu bearbeitenden Werkstück gemacht, können die entsprechenden Module ausgetauscht werden. Die einzelnen Module haben für sich genommen nur eine oder wenige Aufgaben bei der Herstellung. Diese können beispielsweise Stanzen, Messen, Biegen, Verformen und Prägen sein, jedoch sind auch viele andere Verfahren möglich.

Durch den modularen Aufbau sind kleine Veränderungen an einem komplexen Werkzeug einfach zu realisieren und kostengünstiger. So kann auch ein defektes Modul schneller ersetzt werden und eine neue Herstellung des gesamten Werkzeugs entfällt. Bei einem Austausch von Modulen muss trotzdem das komplette Umformwerkzeug aus der Presse entfernt werden, da das Werkzeug nur mit allen Modulen für die Fertigung bereit ist.

3 Erstellung eines Prägestempels

Bei der Planung eines Werkzeugs sind viele verschiedene Faktoren maßgeblich für die Qualität des damit erstellten Werkstücks entscheiden. Ein Prägestempel zählt zu den formgebenden Werkzeugen und überträgt seine Form auf das Werkstück. Jede Ungenauigkeit oder Fehler überträgt sich damit auch auf das Werkstück.

Das fertige Werkstück soll den Schriftzug „HAW 3D“ und das Logo der HAW zieren. Bei dem Format handelt es sich um das kasachische Visitenkarten-Format mit 85mm x 55mm. Die Erstellung eines Werkzeugs sollte sowohl durch ein additives Verfahren als auch durch ein konventionelles Verfahren möglich sein. Durch diese Festlegung war ein Mindestabstand von 2mm notwendig, da ein Schafffräser dieses Werkzeug auch bearbeiten können muss. Durch diese Festlegung musste der Schriftzug und das Logo verhältnismäßig groß gewählt werden. Der begrenzte Platz auf dem Rohling und eine Vergrößerung von Schrift und Logo hatte zur Folge, dass das Logo nicht vollständig abgebildet werden kann. Mit dieser behelfsmäßigen Lösung ist eine Darstellung von dem Schriftzug und dem Logo in der geforderten Größe möglich, außerdem ist beides im Corporate Design der Hochschule für angewandte Wissenschaften. In Abbildung 11 ist das Resultat einmal dargestellt.

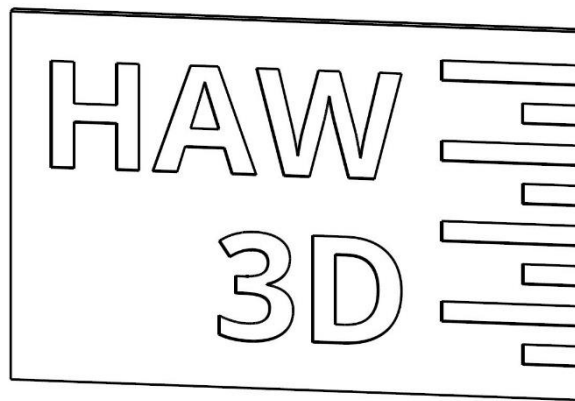


Abbildung 11: Darstellung des Musterwerkstück für das Ergebnis

Der Prägestempel bildet dabei das negativ zu dem Musterwerkstück ab. Dies bedeutet, dass die Schrift auf dem Stempel spiegelverkehrt sein muss und die Einprägetiefe vorgegeben wird. Der Prägestempel soll einerseits durch ein additives Fertigungsverfahren und durch ein konventionelles hergestellt werden. Bei dem additiven Verfahren handelt es sich um das Selektive Laser Sintern. Durch dieses Verfahren können auch hochfeste Stähle verarbeitet werden, die bei einem Prägestempel notwendig sind. Bei dem konventionellen Verfahren handelt es sich, um das Fräsen mit einer 5-Achs CNC-Fräsmaschine. Die Bearbeitung mit einem werkzeuggebundenen Verfahren gibt auch einige Parameter vor. Der kleinste Durchmesser eines Schaftfräser für Hartmetalle gibt in diesem Fall den kleinstmöglichen Radius an. Daraus ergeben sich im Schriftzug weitere Radien, die im Musterbeispiel nicht vorhanden sein sollten. Dies wird in Abbildung 12 deutlich.

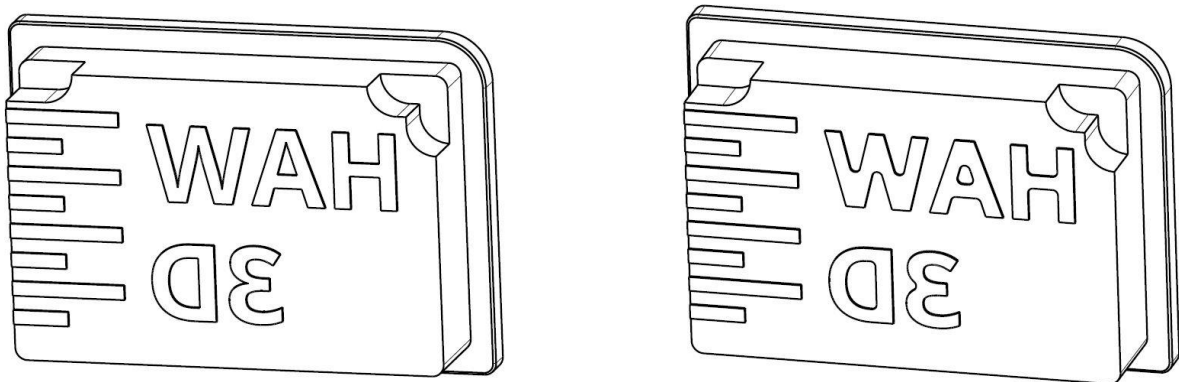


Abbildung 12: Isometrische Ansicht des Prägestempels - Links: Idealer Stempel - Rechts: Optimierte zum Fräsen

Auf der Stempelfläche gibt es in den beiden oberen Ecken eine Aussparung, die für die Führungsstifte gedacht ist. Dies ist notwendig, da der Stempel etwas größer als das Visitenkartenformat ist. Damit ist gewährleistet, dass das Logo der HAW auch über die Seiten des Musters hinweg ausläuft und nicht im sichtbaren Bereich endet. Der abstehende Absatz auf der Rückseite ist die Aufnahme der Halterung.

In der oberen rechten Ecke ist der Radius des Absatzes wesentlich größer gewählt, da so ein falsches Einsetzen des Stempels verhindert wird. Diese Vorsichtsmaßnahme ist nicht notwendig, unterstützt aber den Werker an der Maschine bei der Arbeit. Es ist beispielsweise denkbar, dass der Stempel in seiner Form gleichbleibt, allerdings der Schriftzug abgewandelt werden kann. Dadurch können Werkstücke individualisiert werden bei gleichbleibender Werkzeugaufnahme und wechselndem Stempel. Die Prägung bleibt dabei immer richtig herum, ohne nochmalige Kontrolle durch den Werker.

Die Halterung ist für die Positionierung des Stempels notwendig. Dieser verpresst den Stempel auf die obere Grundplatte. Der abstehende Absatz des Stempels passt in die Tasche der Halterung. Die Halterung wird mit vier M6 Schrauben auf der oberen Grundplatte fixiert. Die großen Fasen in jeder der vier Ecken der Halterung sind für die Reibspindelpresse notwendig. Diese verfügt über einen runden Arbeitsraum mit einem Durchmesser von. Die Halterung wird in einer isometrischen Darstellung in Abbildung 13 dargestellt.

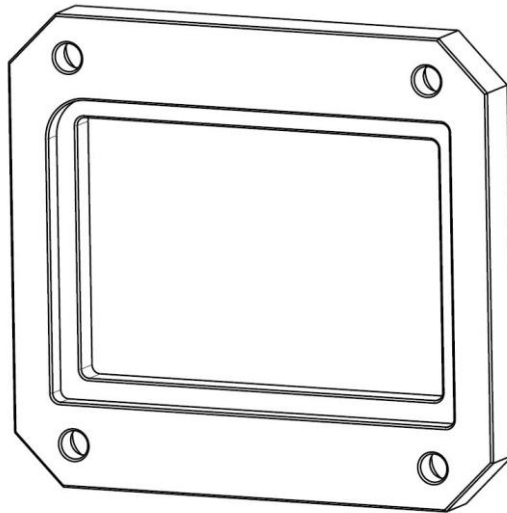


Abbildung 13: Darstellung der Halterung

Die Fase findet sich auch auf den beiden Grundplatten wieder. Diese gewährleisten, dass der Durchmesser von 150mm an keiner Stelle überschritten wird. In Abbildung 14 ist der Zusammenbau von Stempel, Halterung und oberer Grundplatte dargestellt.

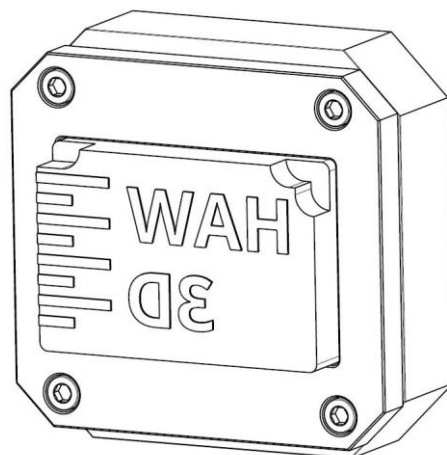


Abbildung 14: Darstellung des Zusammenbaus von Stempel, Halterung und Grundplatte

Abbildung 13: Selbsterstellte isometrische Darstellung der Halterung

Abbildung 14: Selbsterstellte isometrische Darstellung des Zusammenbaus von Stempel, Halterung und oberer Grundplatte

Das Werkstück wird auf die untere Grundplatte gelegt und mit drei Zylinderstiften mit einem 6mm Durchmesser fixiert. Es wurde sich für drei Zylinderstifte entschieden, da dies ein Verwackeln unmöglich macht und so ein gleichbleibendes Ergebnis bringt, wie in Abbildung 15 dargestellt ist. Die untere Grundplatte verfügt, wie die Halterung und die obere Grundplatte über eine Fase, damit das Werkzeug im Arbeitsraum der Presse bleibt.

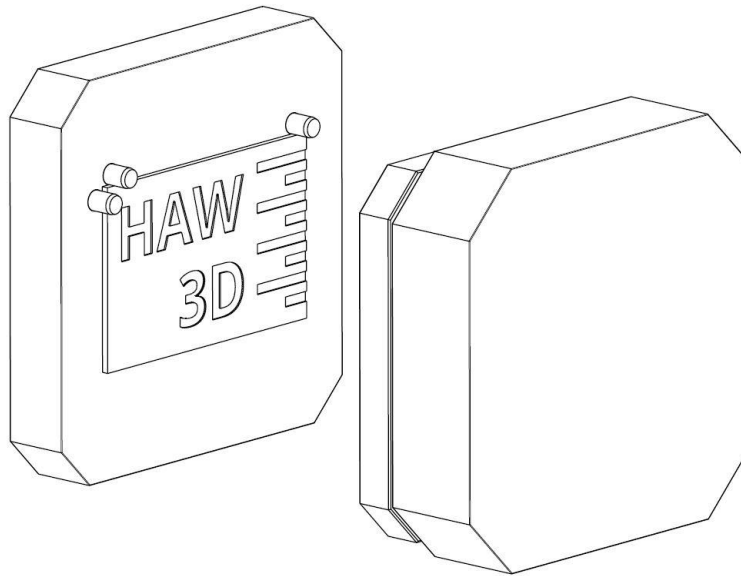


Abbildung 15: Darstellung des Werkzeugs mit Blick auf die untere Grundplatte

Für den Prägevorgang werden die Teile in der folgenden Reihenfolge gestapelt. Zuerst wird die untere Grundplatte mit den Zylinderstiften in den Arbeitsraum gelegt. Danach kommt das Werkstück auf die untere Grundplatte und wird gegen die drei Zylinderstifte gelegt. Dabei kann es zu keinerlei Fehler kommen, da das Werkstück nur richtig liegt, wenn alle Zylinderstifte berührt werden. Außerdem gibt es keine definierte Ober- oder Unterseite. Zuletzt wird der obere Teil, bestehend aus Stempel, Halterung und oberer Grundplatte mit dem Stempel, auf dem Werkstück platziert. Hierbei kann es auch zu keinerlei Fehlpositionierungen kommen, da die Aussparungen des Stempels nur auf eine Weise passen. Auf eine Führung des oberen Teils des Werkzeugs wurde verzichtet, da dies nicht zwingend notwendig ist. Beim Prägevorgang schlägt die Presse auf die Rückseite der oberen Grundplatte und diese überträgt die Schlagenergie auf den Stempel. Dieser prägt wiederum seine Kontur in das Werkstück.

Der gefräste und 3D gedruckte Prägestempel bestehen aus unterschiedlichen Materialien mit vergleichbarer Härte und Eigenschaften. Der gefräste Prägestempel besteht aus X45NiCrMo4 (1.2767). Die beiden Grundplatten und die Halterung bestehen aus demselben Material. Der Werkstoff eignet sich besonders gut für Prägewerkzeug. Der 3D gedruckte Stempel besteht aus X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709). Beide Stempel müssen gehärtet werden, damit diese im Fertigungsprozess nicht verformt werden. Umformwerkzeuge müssen eine hohe Härte aufweisen, um eine lange Haltbarkeit zu gewährleisten. Die notwendige Härte hängt von dem Verfahren und den wirkenden Kräften ab, allerdings ist ein härteres als notwendiges Werkzeug nicht von Nachteil.

Beim Härten von Werkzeugen sind folgende Schritte einzuhalten. Das Werkzeug muss auf die Härtetemperatur gebracht werden, die werkstoffabhängig ist. Im Anschluss wird das Werkzeug abgeschreckt. Das Medium, in dem abgeschreckt wird, ist auch werkstoffabhängig. Außerdem kann die Temperatur des Abkühlmediums entscheidend sein. Der letzte Schritt beim Härten ist das Anlassen. Dabei sollte eine niedrige Temperatur eingehalten werden, weil das Werkzeug sonst an Härte verliert. Nach dem Erreichen der Anlasstemperatur kann das Werkzeug langsam auf Umgebungstemperatur abkühlen und ist somit einsatzbereit. Das Anlassen verhindert die Bildung von Rissen in dem Werkzeug.

Der Werkstoff des gefrästen Stempels lässt sich maximal auf 56 HRC härten. Dazu ist eine Härtetemperatur von ca. 840 °C notwendig. Als Abschreckmedium eignet sich Öl, Druckgas, Luft oder ein Warmbad bei 180-220 °C. Als Anlasstemperatur wird 50-100 °C empfohlen. Der Werkstoff des 3D gedruckten Stempels lässt sich maximal auf 52 HRC härten. Die notwendige Härtetemperatur liegt bei 500 °C. Diese Temperatur muss über einen Zeitraum von sechs Stunden gehalten werden. Zum Abkühlen muss die Ofentemperatur gleichmäßig reduziert werden mit einer Abkühlgeschwindigkeit von 2 °C/min. Nach dem Erreichen von 300 °C kann das Werkzeug an der Luft auskühlen. Dieses Art des Härtens wird auch Lösungsglühen mit anschließendem Warmausglühen genannt.

[13, 18, 19, 24]

4 Additive Fertigungsverfahren in der Umformtechnik

Die additive Fertigung hat im Gegensatz zu anderen Fertigungsverfahren verschiedene Vor- und Nachteile. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten dieses Verfahren einzusetzen. Im Zuge dieser Arbeit sollen die Möglichkeiten der additiven Fertigung in der Umformtechnik diskutiert werden. Es gibt sehr viele denkbare Einsatzmöglichkeiten, daher wird ein Ausblick der Möglichkeiten der genannten additiven Fertigungsverfahren bedeutet.

4.1 Anwendung und Besonderheiten des SLS

Das SLS-Verfahren wird auch als „das RP-Verfahren der Zukunft“ bezeichnet. Die fertigen Modelle aus der Anlage entsprechen nahezu Serienmodellen und weisen eine relativ, verglichen mit anderen Verfahren, ausgenommen die Stereolithografie, gute Oberflächengüte auf. Da das nicht versinterte Granulat stützend wirkt wird der Support nur zur Auskühlung benötigt, was die Nacharbeit vereinfacht.

Die Nachteile dabei sind die Homogenität des Modells, da es nur möglich ist ein Granulat pro Modell zu verwenden. Prinzipiell ist es möglich unterschiedliche Granulate zu verwenden, aber die Wiederverwertbarkeit des Granulats geht damit verloren. Die Modelgenauigkeit ist an die Körnung des Granulats gebunden und somit physikalisch limitiert, Körnchen unter 20 µm verdampfen beim versintern.

Außerdem ist der Verzug ein Problem. Es gibt Programme zur Berechnung der Schrumpfung und des Verzugs, allerdings ist es nicht möglich den Fehler komplett zu kompensieren. Die Anlagen müssen recht komplex sein, damit das Recoating, die Schutzgasatmosphäre und die erhöhte Temperatur im Bauraum umzusetzen sind. Schließlich kommt noch die notwendige Ruhezeit hinzu, welche das Modell einhalten muss, damit es sich nicht mehr als nötig nach der Bearbeitung verändert.

Allgemein kann man über das SLS sagen, dass es sich für alle Anwendungen eignen würde, allerdings kommen die vielen Einschränkungen dazu. Wenn die Zeit und der Anschaffungspreis einer Anlage bei der Erstellung eines Modells keine Rolle spielt ist dies eine der besten Alternativen unter den Verfahren der additiven Fertigung, um Serienteile aus nahezu jedem Material zu fertigen.

4.2 Anwendung und Besonderheiten des DMD-Verfahrens

Durch die besonderen Eigenschaften hat das DMD-Verfahren viele Anwendungsbereiche. Ein Beispiel ist das Veredeln von Werkstücken. Hierbei werden bestimmte Bereiche eines Werkstückes beschichtet, um die Eigenschaften lokal zu verändern. Das DMD-Verfahren wird beispielsweise angewendet, um die Werkzeuge von Baustellenfahrzeugen vor dem Verschleiß zu schützen.

Außerdem können beschädigte Bereiche mit demselben Material aufgefüllt oder abgebrochene Teile ersetzt werden. Natürlich ist es auch möglich, wie bei den vorherig genannten Verfahren, Werkstücke zu erstellen.

Die Technologie des Verfahrens ist nur gut einsetzbar, wenn der Düsenkopf an einen Roboterarm befestigt ist. Dadurch kann auf Support verzichtet werden. Bei dem Verschmelzen der einzelnen Schichten wird die vorherige Schicht mit angeschmolzen und bildet damit ein homogenes Material. Es ist durch die Erstellung eines Schliffbilds nicht möglich die einzelnen Lagen nachzuweisen, was für die gute Qualität des Erzeugnisses spricht.

Derzeit steckt das Verfahren trotz seiner alten Herkunft noch in den Kinderschuhen. Es gibt kaum Anlagen oder Software in diesem Bereich. Meist sind die Anlagen noch in einem experimentellen Zustand oder werden nur für ganz bestimmte Anwendungsbereiche benutzt. Außerdem ist die Erstellung von Werkstücken nur mit der Hilfe des DMD-Verfahrens schwer, da es nicht die Möglichkeit gibt schräge Flächen zu konstruieren. Dieses Verfahren ist darauf ausgelegt immer vertikal zu fertigen. Es ist möglich das Werkstück darunter in die notwendige Position zu bringen, allerdings macht das die Anlagen groß, komplex und teuer. Außerdem wird die erste Lage fest mit der Bodenplatte verschweißt und diese muss in der Nacharbeitung entfernt werden oder bleibt Bestandteil des Werkstücks.

[6]

4.3 Anwendung und Besonderheiten des FFF-Verfahrens

Beim FFF-Verfahren kann nur mit Materialien gearbeitet werden, die sich in einer Düse aufschmelzen lassen. Außerdem muss das Material danach zäh genug sein, damit die gedruckte Form beibehalten wird.

Das Fraunhofer Institut IKTS hat im Jahr 2018 eine Presseinformation veröffentlicht, in der die Verarbeitung von Keramiken mit dem FFF-Verfahren beschrieben wird. Dies wird durch ein innovatives Filament möglich. Das Filament beinhaltet einen neuen organischen Binder und keramisches Pulver. Beim Druck wird der Binder viskos und kann wie beschrieben verbreitet werden. Durch den Druckprozess entsteht ein sogenannter Grünling, dem der Binder in einem Ofen ausgetrieben werden muss, damit die Körner sich verbinden können. Dadurch entsteht das fertige Modell. Es gibt auch schon erste Versuche mit metallischem Pulver.

Laut der Firma „TeileFabrik“ ist es auch mit Kunststoffen möglich ein Werkzeug für Umformmaschinen zu fertigen. Einer ihrer Kunden hat dort eine Form in Auftrag gegeben, welche funktionsfähig ist. Dabei handelte es sich um ein sehr massives Werkzeug mit engen Wabenmuster im Inneren. Es war möglich Bleche bis 5mm zu biegen, ohne die Form zu zerstören.

Das FFF-Verfahren wird in der Regel zum Erstellen von Prototypen benutzt, da die Anlagen nicht so komplex sein müssen wie bei den anderen Verfahren. Daher ist es möglich FFF-Anlagen in einer Büroumgebung zu betreiben. Außerdem sind die Modelle durch den Einsatz von Kunststoff sehr günstig, brauchen wenig bis keine Nacharbeit und die Modelle lassen sich recyceln. Das ist auch ein Grund, warum sich dieses Verfahren im privaten Bereich so durchgesetzt hat.

4.4 Additive und herkömmliche Herstellung von Werkzeugen

Bei der Fertigung der jeweiligen Prägestempel sind wesentliche Unterschiede aufgefallen. An dieser Stelle werden die gewonnenen Erfahrungen aufgezeigt, am Beispiel der Prägestempel. Diese Erfahrungen können im Nachhinein eine Grundlage bilden, um den Prozess zu verbessern, Außerdem kann im Voraus entschieden werden, ob ein additives oder herkömmliches Verfahren verwendet werden sollte.

Der gefräste Stempel ist an der HAW Hamburg mit dem 5-Achs Bearbeitungszentrum Spinner U-620 gefertigt worden. In Vorbereitung auf die Bearbeitung muss ein NC-Programm geschrieben werden. Dazu ist es notwendig eine Reihenfolge der Bearbeitungsschritte festzulegen. Bei dieser Festlegung sind verschiedene Faktoren für die Machbarkeit relevant. Die Auswahl der Werkzeuge entscheidet einerseits über die Geschwindigkeit der Bearbeitung, da die Werkzeuge verschiedene Technologiewerte besitzen, welche z.B. den maximalen Vorschub bestimmen. Nur bei Einhaltung der vom Hersteller gegebenen Technologiewerte kann eine möglichst lange Lebensdauer der Werkzeuge gewährleistet werden. Ein höherer Verschleiß der Werkzeuge kostet daher mehr Ressourcen und Zeitaufwand.

Der Werkstoff des Werkstücks beeinflusst außerdem die Zerspanbarkeit. Bestimmte Werkstoffe setzen auch bestimmte Werkzeuge voraus, da nicht jedes Werkzeug für jeden Werkstoff geeignet ist. So ist ein häufiger Wechsel von verschiedenen Werkstoffen mit Werkzeugwechseln und ggf. mit neuer Beschaffung von Werkzeugen verbunden. Bei besonders harten Werkstoffen, wie sie üblich bei Umformwerkzeugen sind, macht sich ein hoher Verschleiß von Werkzeugen bemerkbar. Die Geometrie des Werkstücks hat sowohl auf das NC-Programm einen Einfluss als auch auf die Auswahl der Werkzeuge. Es muss darauf geachtet werden, dass das Werkzeug nicht aus Versehen das Werkstück berührt oder ggf. die Aufnahme des Werkzeugs. Die Einspanneinrichtung, in der das Werkstück fixiert wird, darf auch nicht vom Werkzeug berührt werden. Bestimmte Geometrien sind mit einer Fräsmaschine oder Drehbank gar nicht zu erreichen und sind nur durch ein additives Fertigungsverfahren umsetzbar.

Beim Erstellen des NC-Programms ist die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für die Genauigkeit des Werkstücks sehr wichtig. Diese Reihenfolge ist bei jeder Geometrie anders und kann pauschal nicht bestimmt werden. Allgemein kann man nur sagen, dass besonders wichtige Stellen mit kleinen Toleranzen möglichst zum Ende hin bearbeitet werden sollen, da durch die Bearbeitung Kräfte vom Werkzeug auf das Werkstück übertragen werden. Somit kann es zu Verformungen des Werkstücks kommen.

Der Prägestempel, der mit einem additiven Verfahren hergestellt wurde, ist durch das SLS-Verfahren entstanden. Die Firma DMG Mori hat dieses Werkzeug freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Über die Herstellungsdauer hat DMG Mori leider nicht informiert, allerdings sind alle bekannten SLS-Verfahren langsamer als ein zerspanendes Verfahren. Beim SLS-Verfahren ist die Länge in Z-Richtung für die Fertigungsdauer der relevanteste Faktor. Diese Länge sollte kleinstmöglich gewählt werden. Dies kann durch die Orientierung des Werkstücks im Bauraum bestimmt werden. Weitere Informationen dazu lassen sich in den Grundlagen dieser Arbeit nachschlagen.

Bei den additiven Fertigungsverfahren spielt die Komplexität des Werkstücks keine Rolle. Dadurch kann der Nachteil der längeren Fertigungsdauer bei kleineren Serien eingeholt werden. Bei den additiven Fertigungsverfahren wird nur das CAD-Modell und eine Slicing-Software, welche in den meisten Fällen vom Hersteller einer additiven Fertigungsanlage gestellt wird. Aus den CAD-Daten werden die geometrischen Daten des Werkstücks übernommen und es müssen nur noch die für den Werkstoff relevanten Fertigungsparameter eingestellt werden. Damit ist die additive Fertigungsanlage einsatzbereit und kann das Werkstück fertigen. Bei Bedarf können auch mehrere Werkstücke auf eine Plattform gleichzeitig gefertigt werden. Dadurch wird die Fertigungsdauer verlängert, allerdings ist dies auch vom Verfahren abhängig. Im Allgemeinen ist es sinnvoll die Grundfläche des Bauraums optimal auszunutzen, um eine höhere Produktivität zu gewährleisten.

Die Vorbereitung bei der Werkzeugauswahl und die Erstellung des NC-Programms fallen in dem Beispiel weg und eine Beaufsichtigung bei der Fertigung ist auch nicht notwendig, wenn die Maschine richtig eingestellt wurde. Damit werden auch die Kosten des Werkers eingespart der bei einem zerspanenden Verfahren, besonders bei kleineren Serien, immer an der Maschine verfügbar sein muss.

Vor- und Nachteile der Verfahren

An dieser Stelle werden die Vor- und Nachteile der zerspanenden und der additiven Fertigung diskutiert. Diese beruhen auf den gewonnenen Erfahrungen, die bei der Erstellung des Prägestempels gemacht wurden.

Die zerspanende Fertigung ist zwingend auf ein händisch geschriebenes NC-Programm angewiesen. Der dafür notwendige Zeitaufwand hängt von der Komplexität des Werkstücks ab. Die notwendigen Werkzeuge werden dabei festgelegt und müssen ggf. besorgt werden. Dadurch kann sich der Start der Fertigung verschieben. Dies gilt auch bei Defekten oder Zerstörten Werkzeugen. Bei jedem Fertigungswechsel muss die Maschine gerüstet werden. Darin ist die Überprüfung der Werkzeuge und das Einspannen des Rohmaterials enthalten, ggf. müssen die Werkzeuge und/oder das Rohmaterial ausgemessen werden. Beim Fertigen eines Werkstücks zum ersten Mal ist besondere Vorsicht geboten und der Maschinenbediener muss genau auf mögliche Fehler im NC-Programm achten. Dadurch werden Fertigung von Einzelstücken oder kleineren Serien sehr zeitaufwendig. Der Prozess der Zerspanung geht relativ schnell. Durch einen geschickten Einsatz von Werkzeugen und Positionierungen kann viel Zeit gespart werden. Nach der Bearbeitung muss das Werkstück von möglichem Grad, Späne und Schmieröl befreit werden und die Fertigung eines Werkstücks mit einem zerspanenden Verfahren ist abgeschlossen.

Die additive Fertigung benötigt für den Start der Bearbeitung nur die CAD-Daten in einem neutralen Datenformat. Die CAD-Daten werden dann in einem virtuellen Raum in der Slicing-Software für die additive Fertigungsanlage in das NC-Programm umgewandelt. In dieser können die verschiedenen Parameter und die Orientierung des Werkstücks im Bauraum festgelegt werden. Die Parameter sind für den zu verarbeitenden Werkstoff spezifisch, wenn einmal die Werte für ein optimales Ergebnis gefunden sind, wird an ihnen in der Regel nichts mehr verändert. Die Fertigung des Werkstücks ist stark von dem Verfahren abhängig, im Allgemeinen dauert diese Verfahren aber wesentlich länger als die Zerspanende. Im Anschluss an die Fertigung muss das Werkstück noch nachbearbeitet werden. Es gibt viele verschiedene Arten der Nacharbeit. Diese hängen sowohl von Material, Fertigungsverfahren und Slicing-Software ab.

Die beiden Verfahren sind recht unterschiedlich und haben daher auch sehr unterschiedliche Einsatzgebiete. Additive Verfahren eignen sich besonders gut bei Einzelstücken oder kleineren Serien. Gerade unter dem betrachteten Gesichtspunkt der Fertigung von Umformwerkzeugen ist dies sehr interessant, da Werkzeuge dieser Art häufig nur einmal hergestellt werden und sehr aufwendig gestaltet sein können. Bei den Werkstoffen werden häufig Hartmetalle verwendet, die hervorragend durch additive Verfahren verarbeitet werden können. Der erhöhte Zeitbedarf bei den additiven Verfahren spielt bei einer so kleinen Auflage meist keine Rolle und durch den modularen Aufbau von Umformwerkzeugen können die zu fertigenden Einzelteile kleiner und einfach zu fertigen sein. Die Oberflächengüte bei solchen Werkzeugen ist leider sehr grobkörnig. Dieser Effekt kann gewollt sein, falls jedoch nicht ist eine komplizierte Nacharbeit notwendig. Dies muss im Vorhinein geklärt werden, da hierfür ein Aufmaß notwendig ist. In einem solchen Fall muss das Umformwerkzeug durch ein zerspanendes Verfahren nachbearbeitet werden. Dabei wird nur wenig Material abgenommen.

Die additiven Verfahren eignen sich sehr gut für die Erstellung von Umformwerkzeugen, allerdings müssen die genannten Schwächen berücksichtigt werden. In solch einem Fall bietet sich eine Kombination aus beiden Verfahren an. Eine Verschmelzung von zwei verschiedenen Verfahren in der Erstellung von Werkzeugen hat es bereits gegeben. Ein gutes Beispiel dafür ist die Herstellung von Hartmetallbohrern. Diese müssen aus einem hochfesten Stahl bestehen und benötigen spiralförmige Bohrungen im Inneren für das Schmiermittel. Außerdem müssen Rillen an den Außenseiten vorhanden sein, um den Span abzuführen. Ein zerspanendes Verfahren stößt dabei an seine Grenzen. Die spiralförmigen Bohrungen sind so nicht zu fertigen, daher greift man auf das Sintern zurück. Dabei wird Metallpulver des gewünschten Materials in eine Form gegeben und in einem Ofen erhitzt. Das Metallpulver wird dabei teilweise aufgeschmolzen und verbindet sich somit. Beim anschließenden Erkalten entsteht der Grünling. Dieser wird nochmals in einem Ofen nachbehandelt und die Schneiden werden geschärft, damit ist das Werkzeug fertiggestellt.

Eine solche Kooperation der Verfahren bietet sich in diesem Fall auch mit der additiven und der zerspanenden Fertigung an. Mit der additiven kann das Werkzeug grob vorgefertigt werden und falls notwendig mit einem zerspanenden Verfahren nachbearbeitet werden. Im Anschluss an dieses Kapitel wird noch der Vergleich an einen additiv und einem zerspanend hergestellten Prägestempel durchgeführt.

5 Werkzeugbau und Auswertung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Umformwerkzeug konstruiert, gefertigt und verwendet. Dieses Kapitel zeigt die notwendigen Stationen im Werkzeugbau auf und im Anschluss folgt eine Auswertung an einer Kleinstserie. Dabei sollen die Durchführung und die daraus resultierenden Ergebnisse aufgezeigt werden.

5.1 Werkzeugbau am Beispiel eines Prägestempels

In diesem Kapitel werden die durchlaufenden Arbeitsschritte und notwendig gewordenen Entscheidungen dokumentiert, die für die Erstellung eines Umformwerkzeugs notwendig sind. Dies beinhaltet einerseits die konventionelle Herstellung durch ein Zerspanendes Verfahren, sowie durch ein additives Verfahren.

5.1.1 Vorbereitung

In der Vorbereitung müssen bestimmte Fragen beantwortet werden, bevor ein Umformwerkzeug geplant werden kann. Es sollten so viele Fragen wie möglich zuvor geklärt werden, um einen sauberen Ablauf bei der Fertigung und der Nacharbeit zu gewährleisten.

Zuerst sind die Parameter des Umformwerkzeuges festzulegen. In den meisten Fällen wird ein Endprodukt definiert und dies soll im Anschluss gefertigt werden. Am Beispiel dieser Arbeit handelt es sich um eine Einprägung des Schriftzuges „HAW 3D“ mit dem Logo der Hochschule für angewandte Wissenschaften. Schriftzug und Logo sind auf ein Blech mit Visitenkartenformat, mit den Abmessungen 85x55mm, zu prägen. Die Einprägetiefe ist dabei bei maximal 0,5mm angesiedelt. Als Presse für die Einprägung wurde sich auf eine Spindelpresse geeinigt. Diese hat einen begrenzten Bauraum, welcher bei der Werkzeuggröße beachtet werden muss. Bei der Konstruktion des Umformwerkzeugs muss auf die Konstruierbarkeit geachtet werden. In diesem speziellen Fall besonders, da der Stempel mit zwei unterschiedlichen Verfahren gefertigt wird. Dabei ist besonders auf die Werkzeuge bei den zerspanenden Verfahren zu achten, da bestimmte Geometrien nicht zerspanend hergestellt werden können. Bei den additiven Verfahren sind andere Geometrien des Werkstücks für den Prozess ungeeignet.

Die Werkstoffauswahl spielt im Vorwege eine wichtige Rolle, da dies über die Werkzeugauswahl bei den zerspanenden Verfahren entscheidet. Außerdem müssen ggf. Werkstoffe und Werkzeuge beschafft werden. In diesem Fall wurde der Werkstoff 45NiCrMo16 (1.2767) ausgewählt, da dieser laut „Tabellenbuch Metall“ als Werkstoff für Prägewerkzeuge geeignet ist.

5.1.2 Fertigung

Die Fertigung des Prägestempels und der Halterungen begrenzt sich auf die gefrästen Teile, da der 3D gedruckte Stempel bei DMG Mori gefertigt wurde. Der 3D gedruckte Stempel hatte bei Anlieferung eine Härte von 485HB. Dieser Stempel besteht aus dem Werkstoff X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709), da der gewünschte Werkstoff leider nicht vorrätig ist.

Für den Start der zerspanenden Fertigung mussten die notwendigen Werkzeuge bestellt werden. Neue Werkzeuge müssen vor dem Einsatz ausgemessen werden und die Werte müssen in die CNC-Maschine eingetragen werden. Dadurch kann das Werkstück präzise bearbeitet werden. Das angelieferte Material ist in einem Block mit den Abmessungen 120x120x500mm angekommen. Für eine Weiterverarbeitung musste der Block in handlichere Stücke gesägt werden, dabei wurde mit einer Zugabe von 10mm in der Höhe gerechnet, damit das Rohmaterial noch genug Fläche zum Einspannen in der Fräsmaschine hat. Dadurch ist gewährleistet, dass das Rohmaterial während der Bearbeitung fest in der gewünschten Position bleibt. Die Notwendigen NC-Programme für die Fertigung wurden ShopMill von der Firma Siemens geschrieben. Insgesamt sind so acht NC-Programme entstanden, für jedes Teil und pro Seite jeweils ein Eigenes.

Bei der Bearbeitung von Werkstücken beim ersten Mal ist behutsames Vorgehen zu empfehlen, da sich trotz einer 3D-Simulation des Programms und Überprüfung zu Fehler kommen kann. Auch durch den relativ harten Werkstoff bleibt ein Wechsel der Werkzeuge nicht aus. Nach jedem Wechsel und umspannen der Werkstücke ist ein erneutes Ausmessen notwendig, außerdem sollten wichtige Maße nach der Fertigung überprüft werden. Dadurch ist eine Maßhaltigkeit gewährleistet. Diese Handlungen sind sehr zeitintensiv und müssen in die zeitliche Planung mit einfließen. Bei Fertigung mit höherer Stückzahl wird der Zeitaufwand pro Einheit geringer.

Im Anschluss müssen die gefrästen Teile in der Regel noch von Grat befreit werden. Durch den Grat ist eine Verletzungsgefahr gegeben und wird dadurch beseitigt. Bei diesem Vorgang handelt es sich nicht um eine Notwendigkeit, sondern ermöglicht eine unbedenkliches anfassen des Werkstücks und wird üblicherweise immer durchgeführt.

5.1.3 Nacharbeit

Die Nacharbeit der Teile ist von dem Fertigungsverfahren abhängig. Die notwendige Nacharbeit für das SLS-Verfahren, mit dem der 3D gedruckte Stempel gefertigt wurde, ist in dem Kapitel 2.3.5 in dieser Arbeit nachzulesen. Der 3D gedruckte Stempel wurde im Anschluss noch auf der Unterseite plangefräst, um gerade Grundfläche zu erzeugen.

In der gefrästen oberen Grundplatte sind Bohrungen vorhanden, die für die Verschraubung von Grundplatte und Halterung notwendig sind. Die Gewinde in den Bohrungen wurden nicht mit der CNC-Fräsmaschine geschnitten, da die Gefahr des Abbrechens der Gewindeschneider in Hartmetall sehr hoch ist. Diese wurden also im Nachhinein per Hand eingebracht.

Umformwerkzeuge benötigen einen hohen Härtewert, damit diese bei der Bearbeitung nicht verformt werden. In diesem Fall werden die obere und unter Grundplatte auf einen Wert zwischen 46 bis 48 HRC gehärtet. Der gefräste Stempel wird auf 54 bis 56 HRC und der 3D gedruckt auf einen Wert von 50 bis 55 HRC gehärtet. Die gefrästen Teile aus dem Werkstoff 45NiCoMo16 sind bei einem externen Dienstleister gehärtet worden. Der 3D gedruckte Stempel ist im Härteofen der HAW Hamburg gehärtet worden.

Mit dem Härten sind die Werkzeuge und die Werkzeughalterung für die Versuchsreihe einsatzbereit.

5.1.4 Darstellung der Arbeitsschritte

In der folgenden Grafik sind die Durchgeführten Arbeitsschritte vereinfacht dargestellt. Diese Reihenfolge und die dazu notwendigen Arbeitsschritte sind beim Werkzeugbau von Umformwerkzeugen durchzuführen. Der Umfang der einzelnen Punkte in der Abbildung 16 kann stark variieren, dies ist von den Anforderungen und der Geometrie des Werkzeugs abhängig.

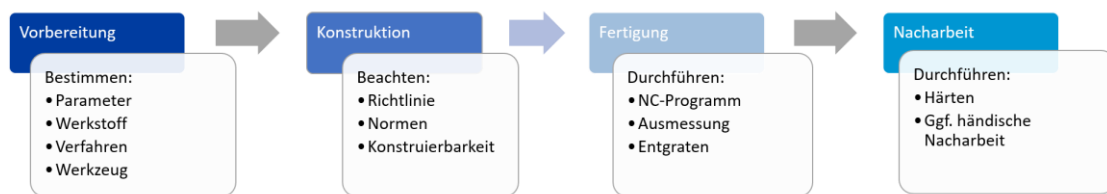


Abbildung 16: Darstellung der Arbeitsschritte beim Werkzeugbau

5.1.5 Verbesserung beim Werkzeugbau

In diesem Abschnitt werden mögliche Verbesserungen aufgezeigt. Diese basieren auf den Erfahrungen, die beim Durchlaufen der Prozesse zum fertigen eines Umformwerkzeugs aufgefallen sind.

Die Parameter für das Werkzeug sollten so einfach wie möglich definiert werden. Diese haben eine Auswirkung auf nahezu alle Bearbeitungsschritte eines Umformwerkzeugs, daher sollte das KISS-Prinzip greifen. Dieses Prinzip bedeutet „Keep it simple, stupid“ und meint für ein Problem eine möglichst einfache Lösung anzustreben.

Der Werkstoff hat besondere Auswirkung auf die Haltbarkeit, Zerspanbarkeit und den Prozess des Härten. Der ausgewählte Werkstoff sollte leicht zerspanbar und einfach zu härten sein. Die Haltbarkeit darf darunter nicht leiden, da sonst das Werkzeug ggf. unter den Umformkräften verschleißt würde. Der in dieser Arbeit gewählte Werkstoff weist eine schlechte Zerspanbarkeit auf und ist daher eher ungeeignet.

Bei den additiven Fertigungsverfahren gibt es viel Auswahl, jedoch sollte dies folgenden Punkte berücksichtigt werden. Das Verfahren muss den gewünschten Werkstoff mit der erforderlichen Genauigkeit verarbeiten können. So ist es beispielsweise möglich bei einer anschließenden Nacharbeit mit einem zerspanenden Verfahren ein Zeitersparnis bei der additiven Fertigung zu gewährleisten. Die einzelnen Vor- und Nachteile der additiven Verfahren sind in dem Kapitel 4 innerhalb dieser Arbeit nachzulesen und sollte eine Entscheidung vereinfachen.

Die Auswahl der Werkzeuge hängt sowohl von den Kosten als auch der Verfügbarkeit ab. Die zerspanenden Werkzeuge sollten auf den zu bearbeitenden Werkstoff abgestimmt sein und eine lange Haltbarkeit ist von Vorteil.

Die Konstruktion vereint die verschiedenen Parameter zu einer Geometrie. Besonders bei Umformwerkzeugen ist eine einfache Geometrie zu wählen, da hohe Kräfte auf das Werkzeug wirken und es beispielsweise zu einer Kerbwirkung kommen kann, die das Werkzeug zerstört. An dieser Stelle sollte die entsprechende Literatur hinzugezogen werden und Erfahrungswerte sind auch hilfreich. Außerdem sind bei der Konstruktion bestimmte Normen und Richtlinien einzuhalten, welche besonders beim Einsatz genormter Bauteile notwendig werden. Besonders sollte auf die Konstruierbarkeit geachtet werden. Dies ist verfahrensabhängig und sollte frühestmöglich beachtet werden, um Anpassungen im Verlauf der Fertigung zu vermeiden.

Die Erstellung eines NC-Programms ist für CNC-Maschinen jeglicher Art von elementarer Wichtigkeit. Bei den additiven Verfahren besteht der Vorteil darin, dass das NC-Programm nur ein paar werkstoffabhängige Parameter benötigt und die Fertigung starten kann. Bei den zerspanenden Verfahren ist mehr Aufwand notwendig. Eine zeitliche Einsparung lässt sich hierbei durch einfache Geometrien und wenige Bauteile erhöhen.

Überprüfung der Maße und ein anschließendes Entgraten ist nur bei zerspanenden Verfahren notwendig. Bei den additiven Verfahren kommt es zu Schrumpfung durch die hohe Einbringung von Wärme. Dies kann durch Berechnungen in einer Software kompensiert werden, allerdings wird die Genauigkeit von zerspanenden Maschinen bislang nicht erreicht. Gewisse Toleranzen sind daher bei der Konstruktion, abhängig vom Verfahren, einzuplanen.

Das Härten der stark belasteten Bauteile ist in der Umformtechnik notwendig, um eine hohe Verschleißfestigkeit zu gewährleisten. Bei den zerspanenden Verfahren ist dieser Prozess in jedem Fall notwendig. Bei den additiven Verfahren kann der Prozess ggf. eingespart werden. Nicht jedes Verfahren lässt dies zu, jedoch ist es denkbar, dass bei der Wärmebehandlung des Grünlings die gewünschte Härte erreicht werden kann. Allerdings lassen sich die additiv hergestellten Bauteile auf die gleiche Weise härten.

5.2 Auswertung an einer Kleinstserie

Für einen repräsentativen Vergleich von gefrästen und 3D gedruckten Umformwerkzeugen wird eine Kleinserie von jeweils 50 Stück gefertigt. Während der Fertigung werden regelmäßig die Werkstücke und der Stempel überprüft.

5.2.1 Einfahren der Werkzeuge

Bei einem neuen Umformwerkzeug sollte dies erst eingefahren werden. Dazu wird das Werkzeug mit einer niedrigen Schlagenergie gestartet. In diesem Fall wird mit einer Schlagenergie von 1250Nm gestartet und wird stufenweise um 50Nm erhöht. Die Schlagenergie wird solange erhöht, bis das Werkstück dem gewünschten Ergebnis entspricht. Bei jeder Erhöhung der Schlagenergie werden die Werkstücke und das Werkzeug untersucht. Das Werkstück wird auf Einprägertiefe, Dicke, Breite, Länge und Qualität der Prägung untersucht. Der Stempel wird vorwiegend auf Verschleiß untersucht. Dabei wird die Höhe geprüft und die Oberfläche wird auf Risse untersucht. Beim Erreichen des gewünschten Ergebnisses wird die Kleinserie gestartet. Dieses vorsichtige Verfahren ist notwendig, damit die Unikate der Stempel nicht beschädigt werden.

Durch die weichen Aluminiumwerkstücke stellte sich schnell die optimale Schlagenergie heraus. Diese wurde auf den minimalen Wert von 1500Nm belassen, da die Werkstücke schon bei dieser Energie ausreichend verformt werden konnten.

Die Werkstücke haften sehr fest an den Stempeln, daher wurde ein innerhalb der Vorserie mit dem Einsatz von Schmierstoff experimentiert. Dabei stellte sich heraus, dass die Prägekanten eine größere Schräge erhielten. Der Schmierölfilm hat keinen positiven Effekt auf die Haftung am Stempel ausgeübt, daher wurde auf den Einsatz von Schmieröl verzichtet. Der Grund für die starke Haftung sollte in der Fertigung der Kleinserie weiter untersucht werden.

5.2.2 Fertigung einer Kleinstserie

Bei der Fertigung der Kleinserie konnte auf den Erkenntnissen der Vorserie aufgebaut werden und die Parameter konnten beibehalten werden. Die Schlagenergie wurde auf 1500Nm festgelegt und auf einen Schmierstoff wurde verzichtet.

Während der Fertigung der Kleinserie musste auf die Verformung des Werkzeugs und ggf. auf Veränderungen am Werkstück geachtet werden. Dazu wurden die beiden Komponenten nach jedem Hub einer Sichtprüfung unterzogen.

Für die Auswertung wurde außerdem eine Messung des Stempels vorgenommen. Dazu wurde jeder Stempel nach dem zehnten, zwanzigsten, fünfzigsten, hundertsten und zweihundertsten Werkstück gemessen. Für die Messung wurde das optische Messsystem SmartSCAN der Firma AICON verwendet. Für die Dauer der Messung wurde der Stempel in der Halterung gewechselt.

Aufgrund der starken Haftung der Werkstücke auf dem Stempel mussten diese mechanisch von dem Stempel entfernt werden und wurden teilstark verformt. Eine Auswertung der Werkstücke erfolgt daher nicht.

Über die Spanne der gefertigten Teile ist an den Stempel eine optische Veränderung sichtbar geworden. In Abbildung 17 wird die Veränderungen am 3D gedruckten Stempel dargestellt.

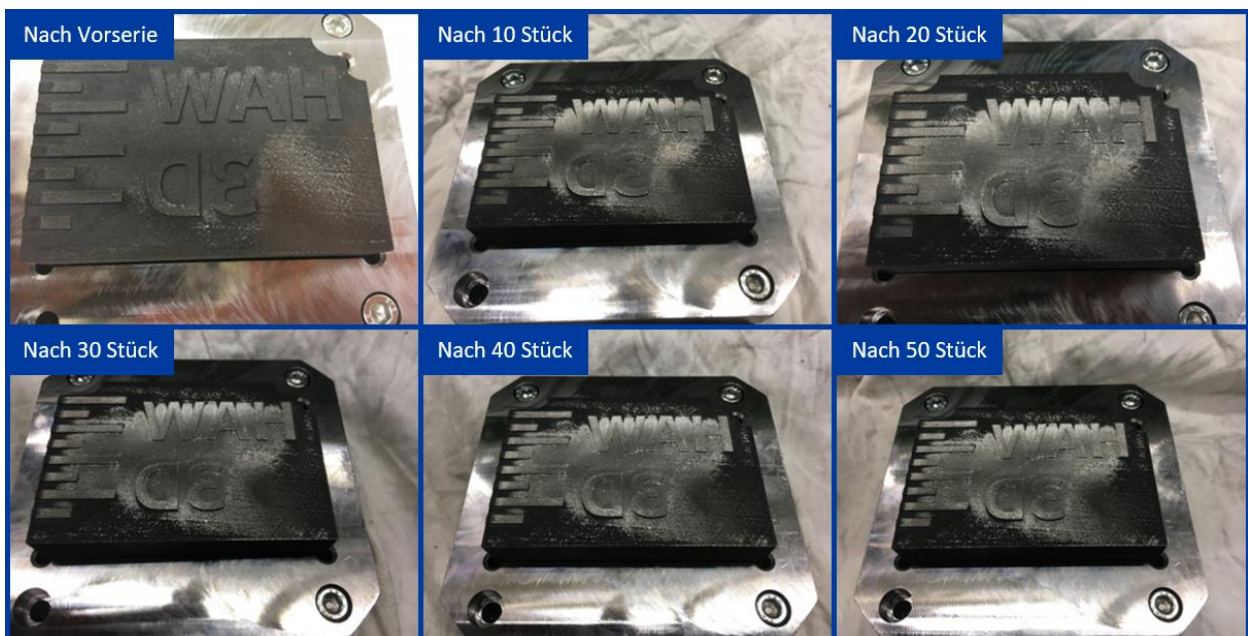


Abbildung 17: Veränderung des 3D gedruckten Stempels über 50 Werkstücke

Abbildung 17: Eigene Darstellung der Veränderung des 3D gedruckten Stempels

In Abbildung 18 ist die Veränderung des gefrästen Stempels über die ersten 50 Werkstücke dargestellt.



Abbildung 18: Veränderung des gefrästen Stempels über 50 Werkstücke

Über den Verlauf der ersten 50 Werkstücke sind klare Abnutzungserscheinungen erkennbar. Besonders deutlich wird dies bei der durch das Härten aufgebrachten Zunderschicht. Diese wird bei der Beanspruchung durch das Prägen abgetragen. Dadurch tritt die originale Oberfläche des Prägestempels zum Vorschein und der Stempel wirkt blanker. Über den betrachteten Zeitraum wirkt sich dies beim Stempel erstmals an den hoch beanspruchten Flächen aus.

Die am stärksten beanspruchten Stellen befinden sich an den Kanten der Prägeflächen. An diesen Stellen fließt das Material am stärksten während der Verformung. Dadurch lässt sich der Abtrag eindeutig nachvollziehen.

5.2.3 Auswertung anhand der Kleinserie

Bei der Durchführung und der Auswertung der Messergebnisse haben sich einige Erkenntnisse ergeben, die im folgenden Kapitel diskutiert werden.

Die starke Haftung der Werkstücke an dem Stempel ließ sich über den gesamten Fertigungsprozess beobachten. Da dies sowohl bei dem 3D gedruckten und den gefrästen Stempel aufgetreten ist, lässt sich das Herstellungsverfahren des Prägestempels ausschließen. Die beim Härten entstandene Zunderschicht ist über den gesamten Prozess abgetragen worden. Eine Verbesserung beim Haften der Werkstücke war nicht erkennbar. Das Fehlen von Entformungsschrägen scheint dafür verantwortlich zu sein. Dies wird durch die Tatsache der besonders starken Haftung nahe des Innenraumes der Buchstaben A und D. Dieser Verdacht konnte leider im Rahmen dieser Arbeit nicht endgültig widerlegt werden, bietet allerdings ein Verbesserungspotential bei der Konstruktion der Prägestempel.

Bei der Auswertung der Messergebnisse im Vergleich zu den CAD-Daten ist bei dem gefrästen Stempel eine Verschiebung der Prägung aufgefallen. Die ist deutlich in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 19: Darstellung der Verschiebung der Gravur des gefrästen Stapels

Für einen besseren Vergleich würden die Mess- und CAD-Daten übereinandergelegt. Bei dem grauen Bereich handelt es sich um die Oberseite der CAD-Datei, beim orangen Bereich um die Messdaten. Die Gravur des gemessenen Stempels ist um einige Millimeter nach links verschoben. Dies ist auf eine Nullpunktverschiebung bei der Erstellung des NC-Programms beim Fräsen zurückzuführen. Bei der händischen Erstellung eines NC-Programms und bei der anschließenden Ausmessung des Rohteils gibt es viele Fehlerquellen und diese Verschiebung ist ein repräsentatives Beispiel dafür.

In der Auswertung des 3D gedruckten Stempels gab es eine hohe Übereinstimmung mit dem gewünschten CAD-Modell. Dies ist durch das Fertigungsverfahren gegeben. Bei den additiven Verfahren wird der Verfahrenweg der Maschine aus den CAD-Daten abgeleitet und bildet daher keine weitere Grundlage für Fehler. Die Abweichung zwischen CAD-Daten und dem Endergebnis sind auf Herstellung des additiven Verfahrens oder durch die anschließende Härtung zurückzuführen. In Abbildung 20 ist der Vergleich der CAD-Daten und der Messung des 3D gedruckten Stempels farblich dargestellt.

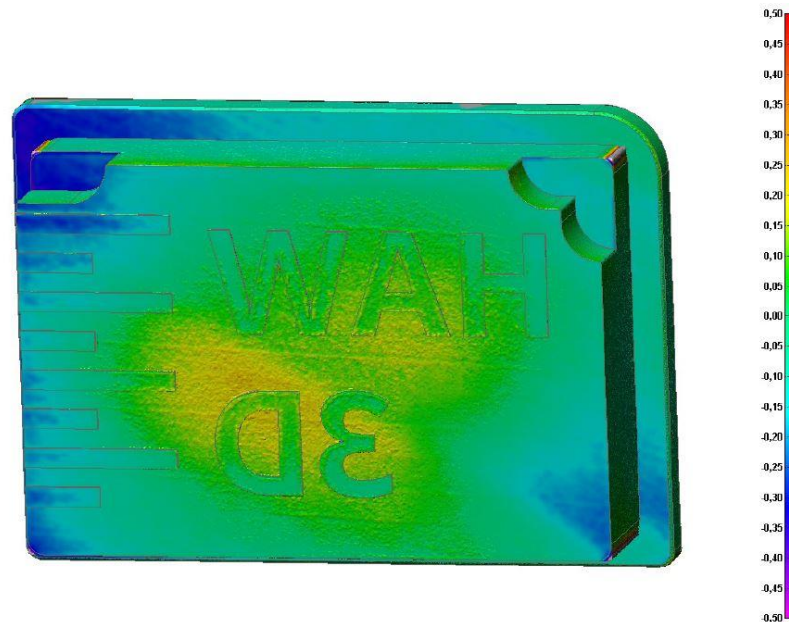


Abbildung 20: Abweichung zwischen CAD-Datei und Messung mit Skalierung

An der Skala an der rechten Seite lässt sich die Abweichung erkennen. Daraus ergibt sich eine maximale Abweichung von 0.23mm bis -0.21mm auf der Oberseite des Stempels. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, schwankt die Abweichung von einem Aufmaß im Mittelpunkt bis hin zu einem Untermaß in den Randgebieten. Diese Art der Abweichung ist typisch bei diesem Verfahren und lässt sich auf die schlechte Abführung von Wärme zurückführen. Beim Gießen lässt sich ein solches Verhalten auch beobachten. Da es sich dabei um eine wiederkehrende Art von Fehler handelt kann dieser gegebenenfalls durch eine Software kompensieren werden.

Eine Verformung der Stempel konnte über eine Serie von 50 Teilen nicht festgestellt werden. Bei den gemessenen Werten für beide Stempel ist eine Abweichung von einem hundertstel Millimeter nicht überschritten worden. Trotz der unterschiedlichen Werkstoffe und Herstellungsverfahren könnte kein Unterschied beim Verschleiß aufgezeigt werden. Für eine langfristige Aussage ist eine größere Serie von Teilen notwendig, allerdings ist die Vergleichbarkeit von Kleinserien bestätigt.

Eine eindeutige Vergleichbarkeit der Werkstücke ist durch das mechanische Entfernen vom Stempel leider nicht gegeben, dennoch lassen Gemeinsamkeiten erkennen. In Abbildung 21 sind die Werkstücke des gefrästen Stempels in Zehnerschritten dargestellt.

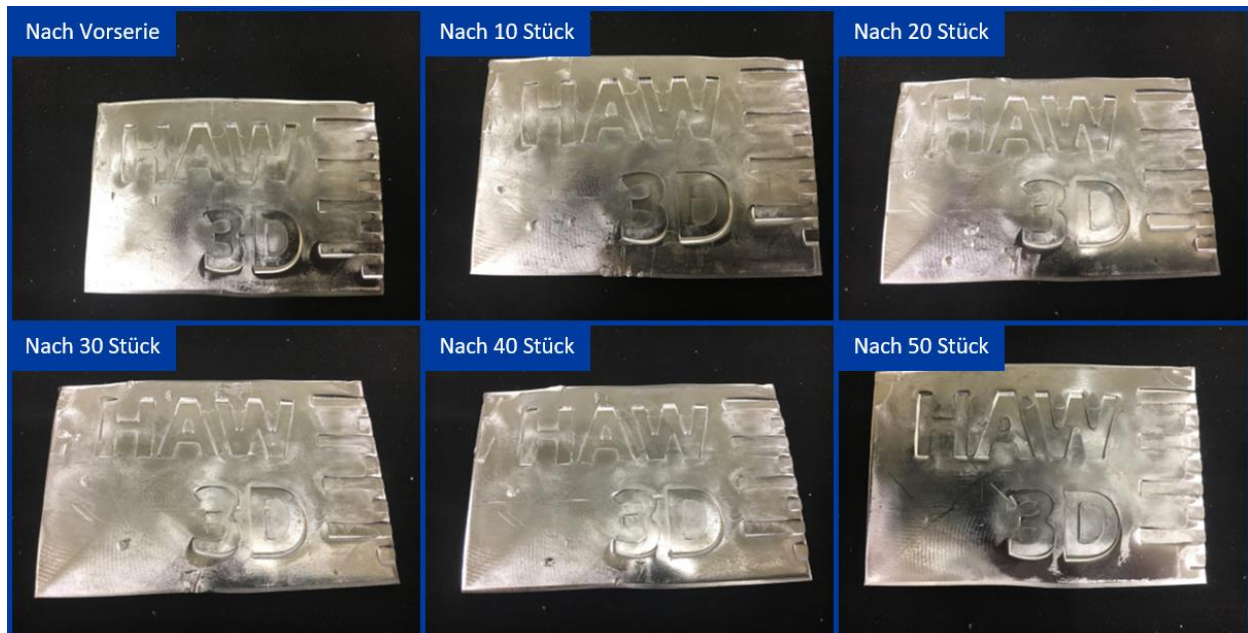


Abbildung 21: Veränderung der Werkstücke des gefrästen Stempels

Die Verformung durch das Ablösen und das anschließende Richten der Werkstücke ist an den kleineren Unebenheiten und Wellen erkennbar. Die Prägung hat sich vollständig auf das Werkstück übertragen und weist keine Veränderung innerhalb der Kleinserie von 50 Stück auf. In den Randbereichen der Prägung ist ein fließen des Materials an den schrägen erkennbar.

Durch den Wechsel der Werkzeuge ist es beim Fräsen der Gravur zu einem unerwünschten Absatz auf der Werkzeugoberfläche gekommen. Dieser hat sich auch auf das Werkstück übertragen und ist um den Buchstaben W und dem Logo der HAW Hamburg auf der rechten Seite erkennbar.

Die starke Haftung der Werkstücke lässt sich durch eine Entformungsschräge von etwa 2° an den Konturen der Gravur beheben. Wird ein größerer Winkel gewählt kann sich dieser optisch deutlich auf dem Werkstück abzeichnen.

Die Problematik der starken Haftung ist auch am 3D gedruckten Stempel negativ aufgefallen, dennoch lassen sich auch hier einige Schlussfolgerung schließen. In Abbildung 22 ist die Veränderung über 50 Prägungen exemplarisch dargestellt.

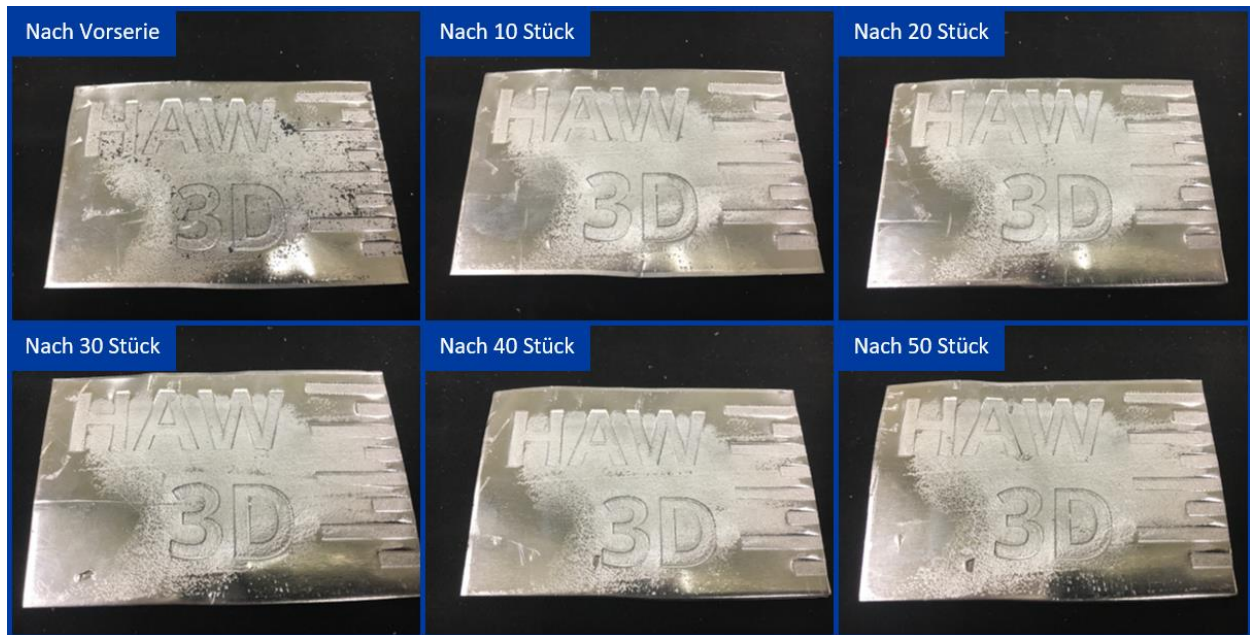


Abbildung 22: Veränderung der Werkstücke des 3D gedruckten Stempels

Auch bei diesen Werkstücken fällt eine Verformung durch das Ablösen auf. Auffällig ist schwarze Verfärbung der ersten Teile. Dies lässt sich am Beispiel des Werkstücks nach der Vorserie erkennen. Die Verfärbung kann mehrere Gründe haben. Es kann sich dabei um die Zunderschicht auf dem Stempel handeln, oder um Pulver, welches nach dem SLS-Verfahren haften blieb. Dies hat sich allerdings nicht negativ auf den Prozess ausgewirkt und war nur auf den ersten Teilen zu erkennen. Eine vorangestellte Reinigung des Stempels kann die Qualität der Werkstücke verbessern.

Die Randbereiche der Prägung sind wesentlich besser auf das Werkstück übertragen worden und ein fließen der Ränder ist weniger ausgeprägt im vergleich zum gefrästen Stempel. Die rauere Oberfläche des Stempels kann dazu geführt haben. Leider lässt sich dies an dieser Stelle nicht eindeutig beweisen, da ein Vergleich im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

Die spitzen Ecken der Gravur, welche nur bei dem 3D gedruckten Stempel vorhanden sind, lässt sich ein gute Übertragung auf das Werkstück feststellen. Die Ecken laufen bis zu ende spitz zu und sind nicht vom fließen des Werkstoffs nicht negativ beeinflusst worden.

Im Vergleich der Werkstücke weisen beide Stempel eine vollständige Übertragung der Einprägung auf das Werkstück auf. Die Einprägetiefe von 0,5mm wurde in beiden Fällen erreicht, dadurch übertragen sich auch die Unebenheiten der Grundfläche. Besonders deutlich wird dies durch die Abbildung der Absätze des gefrästen Stempels und die raue Oberfläche des 3D gedruckten Stempels. Dieser unerwünschte Effekt lässt sich durch eine konstruktive Veränderung der Stempel bereinigen. Dafür muss die Gravur weiter Heraussehen und fester Anschlag für die Presse muss eingerichtet werden. Der Festanschlag sollte dabei so bemaßt werden, dass die Grundfläche des Stempels das Werkstück nicht berührt. Somit ist eine Übertragung von unerwünschten Eigenschaften der Grundfläche ausgeschlossen.

Die Werkstücke des 3D gedruckten Stempels weisen einen deutlichen Vorteil gegenüber dem gefrästen Stempel auf. Die spitzen Ecken der Gravur sind nur bei einem additiven Verfahren möglich und ermöglichen damit einen deutlich höheren Freiheitsgrad bei der Erstellung eines Werkzeugs. Der Vergleich der Werkstücke beweist außerdem, dass diese korrekt auf das Werkstück übertragen werden.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein Vergleich zwischen den additiven und zerspanenden Verfahren zu Erstellen von Umformwerkzeugen angestellt. Dabei wurde der gesamte Prozess zur Erstellung, Umsetzung und Auswertung eines Umformwerkzeugs durchlaufen.

Die Herstellung eines Prägestempels lieferte wichtige Erkenntnisse über den Prozess des Werkzeugbaus. Die notwendigen Gesichtspunkte wurde dabei in dieser Arbeit dokumentiert und bildet dabei die Komplexität ab. Die sich daraus ergebende Konstruktion kann für weitere Versuche dieser Art genutzt werden und die Dokumentation bietet Ansätze für Anpassungen des Prägestempels im Rahmen einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit.

Die additive Fertigung bietet viele Möglichkeiten für die Erstellung von Bauteilen und stellt dabei mehr Freiheitsgrade bei der Konstruktion zur Verfügung als zerspanende Fertigungsverfahren. Bereits bei der Konstruktion des Werkzeugs stellten sich die vielversprechenden Möglichkeiten der additiven Fertigung heraus. Durch die erweiterten Freiheitsgrade dieses Verfahrens waren konstruktive Einschränkungen unerheblich.

Die Auswertung der gefertigten Werkstücke, sowie der Prägestempel, hat den Einsatz von additiv hergestellte Werkzeuge bestätigt und zeigt Vor- und Nachteile des Verfahrens auf. Die Erkenntnisse dieser Arbeit bieten eine Grundlage für den Einsatz von 3D gedruckten Werkzeugen und kann die Vorteile können positiv genutzt werde. Die Nachteile der additiven Fertigung können mittels einer zerspanenden Nacharbeit kompensiert werden und bieten so ein rundes Gesamtkonzept. Daraus ergibt sich für den modularer Werkzeugbau der Umformtechnik eine neue Möglichkeit.

Der Einsatz von additiv hergestellten Werkzeugen bietet durch den erweiterten Freiheitsgrad mehr Möglichkeiten bei der Entwicklung von Umformwerkzeugen bei gleichbleibender Qualität. Die Möglichkeiten der additiven Fertigung bilden besonders in der Umformtechnik umfangreiche Einsatzgebiete, die bisher noch nicht ausgeschöpft werden.

Wie diese Arbeit zeigt ist die Verbindung dieser beiden Verfahren vorteilhaft und bietet eine gute Ergänzung zum typischen Werkzeugbau in der Umformtechnik.

7 Literatur

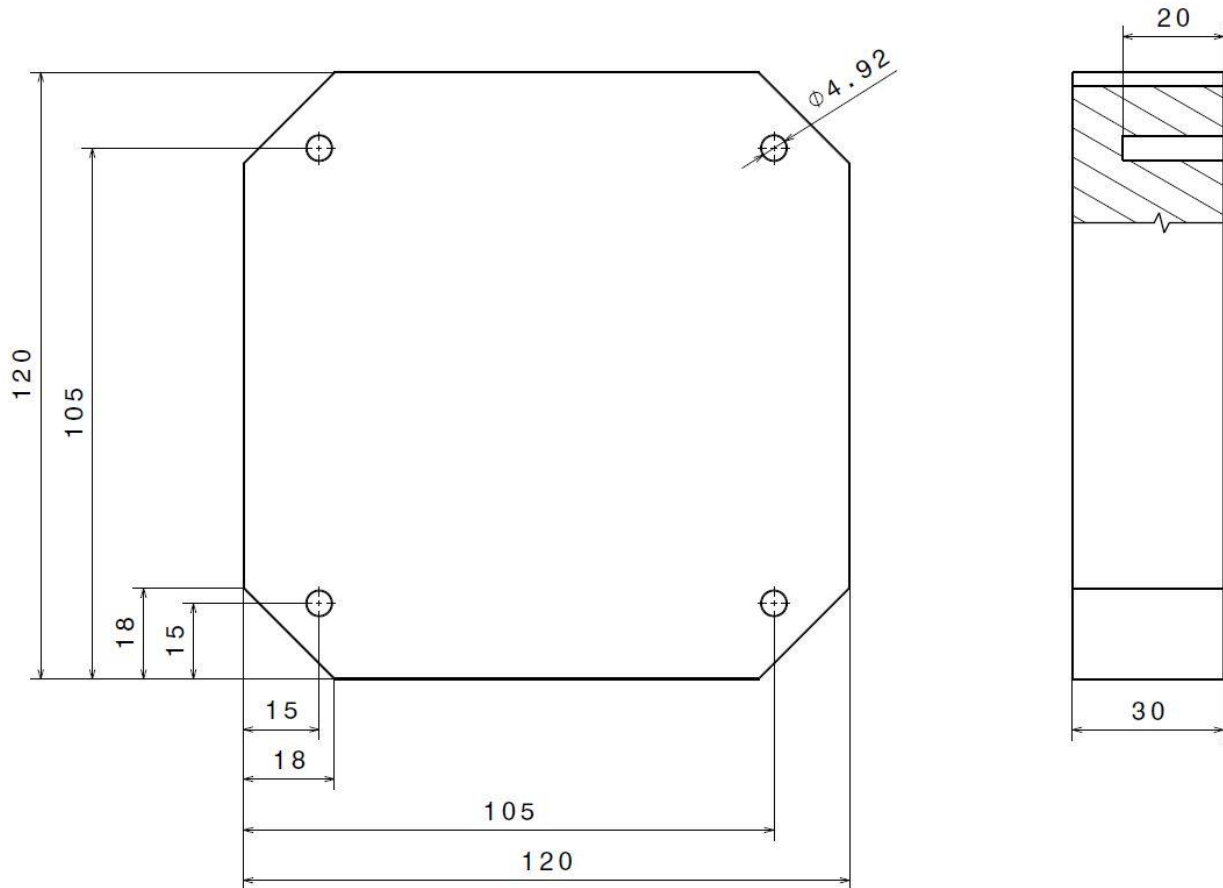
- [1] Abel, Johannes (2018): „Additive Fertigung von keramischen Bauteilen über Fused-Filament-Fabrication“, URL: https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/downloads/jahresberichte/jb2017/11_Additive_Fertigung_von_keramischen_Bauteilen_ueber_Fused-Filament-Fabrication.pdf (letzter Zugriff: 25.08.2019)
- [2] Beste, Dieter (2016): „Hartmetallwerkzeuge aus dem 3D-Drucker“, URL: <https://www.springerprofessional.de/additive-fertigung/metalle/hartmetallwerkzeuge-aus-dem-3d-drucker/10861576> (letzter Zugriff: 10.08.2019)
- [3] Brecher, Christian; Weck, Manfred (2019): „Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche“, 9. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-662-46564-6
- [4] Dietrich, Jochen (2018): „Praxis der Umformtechnik – Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschine“, 12. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-19530-4
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.(2003): Fertungsverfahren Begriffe, Teil 5: Eindrücken, 01.040.25; 25.020; 25.120.10 DIN 8583-5
- [6] Friedrich, Roland (2017): „Rapid Prototyping“, Skript aus der Rapid Prototyping Vorlesung, HAW Hamburg, Department Maschinenbau und Produktion
- [7] Fritz, Alfred Herbert (2018): „Fertigungstechnik“, 12. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, ISBN 978-3-662-56534-6
- [8] Gomerringer, Roland (2014): „Tabellenbuch Metall“, 46. Auflage, Haan-Gruiten, Europa-Lehrmittel, ISBN 978-3-8085-1726-0
- [9] Hirsch, Andreas (2016): „Werkzeugmaschinen - Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele“, 3. Auflag, Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-14248-3
- [10] Itasse, Stéphane (2014): „Die additive Fertigung ist noch nicht weit genug“, URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/die-additive-fertigung-ist-noch-nicht-weit-genug-a-460069/> (letzter Zugriff: 10.08.2019)
- [11] Keferstein, Claus; Marxer, Michael; Bach, Carlo (2018): „Fertigungsmesstechnik - Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik“, 9 Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-17755-3
- [12] Kuhn, Dietmar (2018): „Opel arbeitet Umformwerkzeuge mit Schnupp-Hubgestellen ein“ URL: <https://www.blechonline.de/opel-arbeitet-umformwerkzeuge-mit-schnupp-hubgestellen-ein> (letzter Zugriff: 27.07.2019)

-
- [13] Liedtke, Dieter (2014): „Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen“, 8. Auflage, Renningen, expert verlag, ISBN 978-3-8169-2901-7
- [14] O.A. (2016): „3D-Druck ermöglicht die präzise Fertigung von Mikro-Umformwerkzeugen“, URL: https://www.ivam.com/research/executive_panel/NeMa_2_2016_3 (letzter Zugriff: 10.08.2019)
- [15] O.A. (2016): „Losgröße 1: Revolution in der Einzelfertigung“, URL: <https://abas-erp.com/de/news/losgr%C3%B6%C3%9Fe-1-revolution-der-einzelfertigung> (letzter Zugriff: 06.05.2018)
- [16] O.A. (2018): „3D-Drucker für Formen aus Stahl, Implantate aus Titan und reines Kupfer“, URL: <https://medizin-und-technik.industrie.de/3d-druck/3d-drucker-fuer-formen-aus-stahl-implantate-aus-titan-und-reines-kupfer/> (letzter Zugriff: 10.08.2019)
- [17] O.A. (O.J.): „AICON SmartScan - Kompakter, mobiler 3D Weißlichtscanner“, URL: www.hexagonmi.com/de-DE/products/white-light-scanner-systems/aicon-smartscan (letzter Zugriff: 07.07.2019)
- [18] O.A. (O.J.): „Datenblatt für 1.2709 von Dörrenberg Edelstahl“, URL: https://www.doerrenberg.de/uploads/tx_c1x1downloads/1.2709_de_01.pdf (letzter Zugriff: 04.08.2019)
- [19] O.A. (O.J.): „Datenblatt für 1.2767 von Dörrenberg Edelstahl“, URL: https://www.doerrenberg.de/uploads/tx_c1x1downloads/1.2767_de_01.pdf (letzter Zugriff: 04.08.2019)
- [20] O.A. (O.J.): „Industrieller 3D-Druck für den Werkzeugbau - Funktionsintegration, schnellere Amortisation“, URL: https://www.eos.info/branchen_maerkte/werkzeugbau (letzter Zugriff: 10.08.2019)
- [21] O.A. (O.J.): „Industrieller 3D-Druck optimiert den Werkzeug- und Formenbau“, URL: <https://www.protiq.com/3d-druck/anwendungsgebiete/werkzeugbau/> (letzter Zugriff: 10.08.2019)
- [22] O.A. (O.J.): „Materialdatenblatt Laserschmelzen“, URL: https://www.protiq.com/pdfs/PROTIQ_Additive-Manufacturing_Materialdatenblatt_Laserschmelzen_DE.pdf (letzter Zugriff: 09.06.2018)
- [23] O.A. (O.J.): „Tryout“, URL: <https://www.autoform.com/de/glossar/tryout/> (letzter Zugriff: 27.07.2019)
- [24] O.A. (O.J.): „Umrechnungstabelle“, URL: http://www.haertereihaupt.de/wp-content/uploads/2017/11/Haupt_Downloads-2017_Umrechnungstabelle_D.pdf (letzter Zugriff: 04.08.2019)

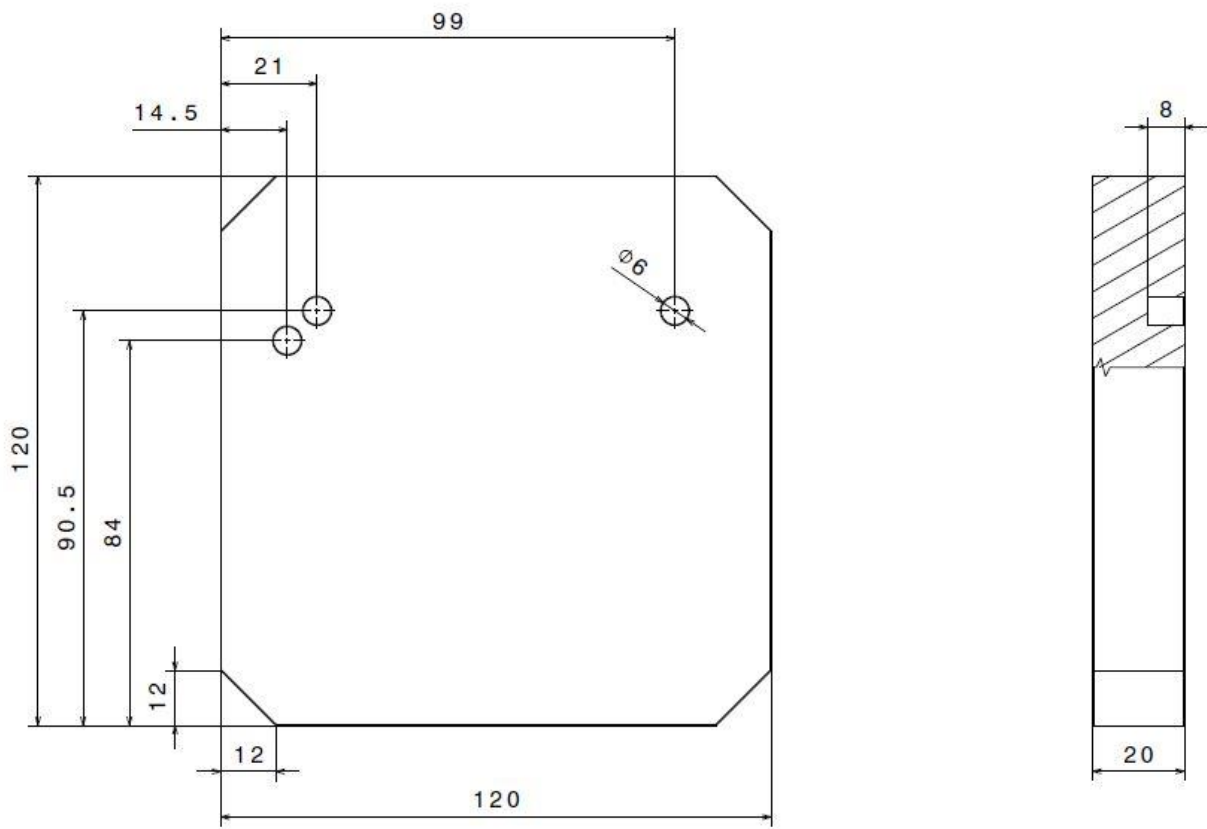
-
- [25] O.A. (O.J.): „Was ist Industrie 4.0?“, URL: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (letzter Zugriff: 06.05.2018)
- [26] Pötschke, Johannes (2018) „PRESSEINFORMATION - Härtere Werkzeuge aus dem 3D-Drucker“ URL: https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/pressemedien/pressemitteilungen/2018/Presseinformation_20181110.pdf
- [27] Roll, Karl; Ziebert, Carlos (2007): „Innovative Methoden zur Auslegung von Umformwerkzeugen im Fahrzeugbau“, URL: https://www.researchgate.net/publication/237658233_Innovative_Methoden_zur_Auslegung_von_Umformwerkzeugen_im_Fahrzeugbau_BMBF-Verbundprojekt_IMAUF (letzter Zugriff: 27.07.2019)
- [28] Sackmann, Florian (O.J.): „Massenfertigung in Losgröße 1: Individuelle Produkte profitabel herstellen“, URL: <http://www.produktion-neu-denken.de/fachbeitraege/massenfertigung-in-losgroesse-1-individuelle-produkte-profitabel-herstellen/> (letzter Zugriff: 06.05.2018)
- [29] Scheuerer, Kurt (O.J.): „Die Entwicklung der Münzprägung“, URL: www.golstadt.de/stadtmuseum/scheuerer/museum/mz-ant01.htm (letzter Zugriff: 12.06.2019)
- [30] Schmidt, Ingomar (2014): „MESSGENAUIGKEIT IN DER KOORDINATENMESSTECHNIK - Einflussgrößen, Erfassung und Optimierung“, URL: www.werth.de/fileadmin/media/pdf/Praxistipps/Praxistipp-Messgenauigkeit_in_der_Koordinatenmesstechnik-QZ_02.2014.pdf (letzter Zugriff: 08.07.2019)
- [31] Tassilo, Moritz (O.J.): „Industrielösungen – Additive Fertigung“, URL: https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/downloads/profile/IKTS_Industrieloesungen_Additive_Fertigung.pdf (letzter Zugriff: 25.08.2019)
- [32] Weiler, Adrian (2015): „Der Kunde ist König – Individualisierte Produktion mit Losgröße 1“, URL: <https://www.inform-software.de/blog/post/der-kunde-ist-koenig-individualisierte-produktion-mit-losgroesse-1> (letzter Zugriff: 06.05.2018)
- [33] Weinzierl, Stefan (2017): „Klarer Trend zu Losgröße 1“, URL: <https://www.produktion.de/nachrichten/unternehmen-maerkte/klarer-trend-zu-losgroesse-1-323.html> (letzter Zugriff: 06.05.2018)
- [34] Weißensee, Karina (2010): „Beitrag zur automatisierbaren Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren“, URL: <https://d-nb.info/1016367821/34> (letzter Zugriff: 08.07.2019)

8 Anhang

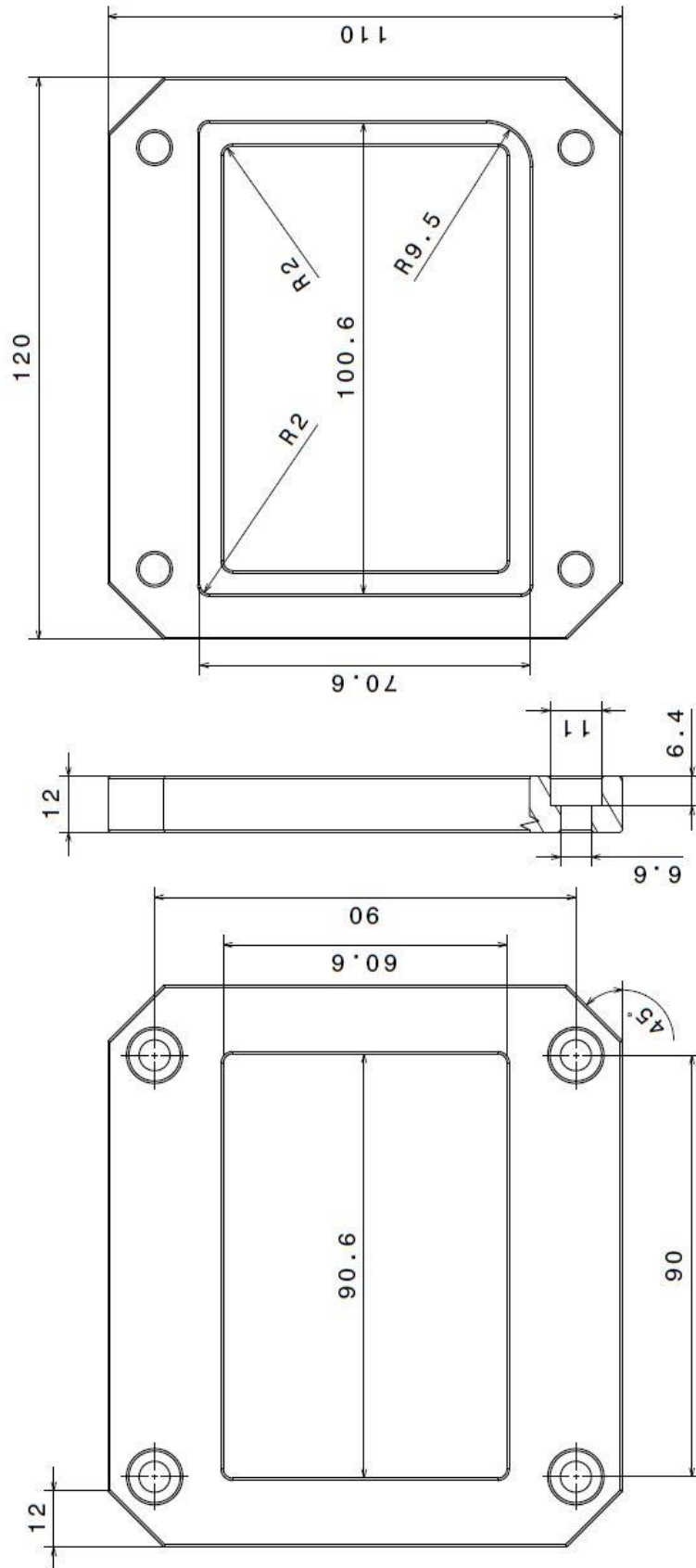
Technische Zeichnung der oberen Grundplatte



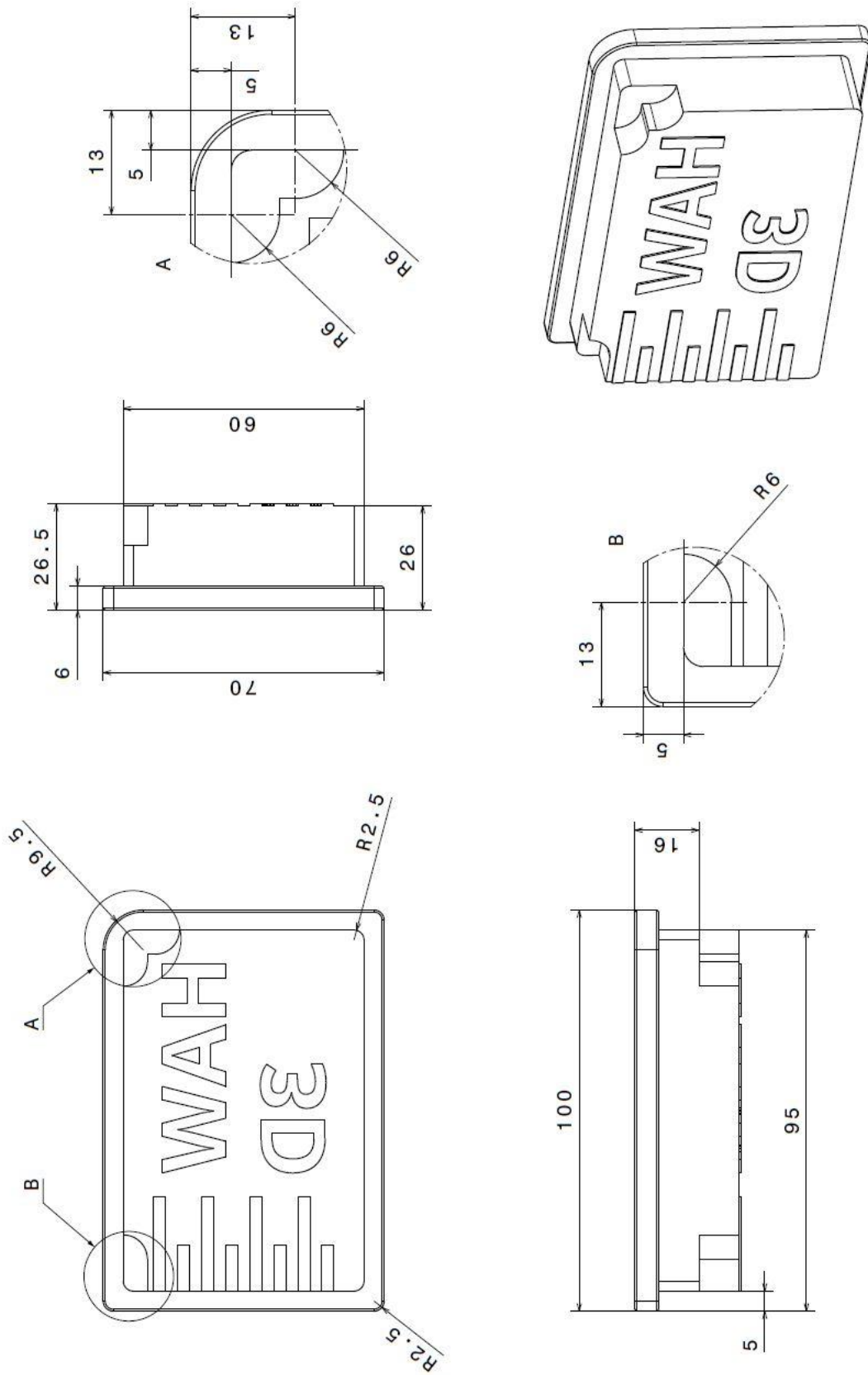
Technische Zeichnung der unteren Grundplatte



Technische Zeichnung der Halterung



Technische Zeichnung des Stempels



8.1 Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Matheus

Vorname: Jonas

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Untersuchung des 3D-Drucks zur Herstellung formgebender Elemente im Werkzeugbau

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

29.08.2019

Datum

Unterschrift im Original