

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt - gefördert unter dem Az:  
36028/01-21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

---

***Ressourcenschonender Beschichtungsprozess***

**Förderbeginn:** 01.07.2021

**Förderende:** 30.09.2023

**Aktenzeichen:** 36028/01-21/2

**Zuwendungsempfänger:**

Rybak + Hofmann rhv-Technik GmbH & Co. KG

Eisentalstr. 27

71332 Waiblingen

**Geschäftsführerin:** Dipl.-Kffr. Claudia Hofmann

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) Martin Dauner

**Verfasser:**

Hochschule Aalen:

Prof. Dr. Matthias Haag

Johannes Wanner [M.Sc.]

Marco Santin [M.Sc.]

Rybak + Hofmann rhv-Technik GmbH + Co. KG:

Dipl.-Ing. (FH) Martin Dauner

Waiblingen, den 23.10.2023

# 1 Inhaltsverzeichnis

1.1	Abbildungsverzeichnis.....	3
1.2	Tabellenverzeichnis .....	4
1.3	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....	5
2	Zusammenfassung.....	6
3	Einleitung und Projektmotivation .....	7
4	Hauptteil.....	11
4.1	AP 1: Erstellung Gesamtkonzept .....	11
4.2	AP 2: Scan-Prozess standardisieren.....	12
4.3	AP 3: Maskierung als Schnittstelle .....	17
4.4	AP 4: Materialforschung bei unterschiedlichen Druckverfahren .....	18
4.5	AP 5: Recycling der Maskierungen .....	23
4.5.1	Kompostierversuch zur Ermittlung der biologischen Abbaubarkeit verschiedener additiver Materialien.....	23
4.5.2	Recyclingversuch additiver Materialien unter Simulation des thermischen Beschichtungsprozesses .....	25
4.6	AP 6: Konstruktion eines optimierten Modells aus verschiedenen Materialien und materialeffizientem Aufbau & AP 7: Drucken serientauglicher Prototypen.....	28
4.6.1	Finaler Konstruktionsprozess .....	31
4.7	AP 8: Tests zum Veralten der Maskierungen beim Spritz-/ Beschichtungsprozess im Fertigungsbetrieb & AP 9: Redesign.....	33
4.8	Zusammenfassung.....	38
4.8.1	Ökologische Betrachtung .....	40
4.8.2	Ökonomische Betrachtung.....	42
4.8.3	Verbreitung der Ergebnisse.....	43
5	Fazit und Ausblick.....	45
6	Literaturverzeichnis.....	47
7	Anhänge.....	51
7.1	Anhang 1 Evaluation der zu beschichtenden Bauteile und der Verfahren .....	51
7.2	Anhang 2 Nutzwertanalyse .....	52
7.3	Anhang 3 Einfluss der Maßhaltigkeit durch Recycling .....	58
7.4	Anhang 4 Ablauf des Konstruktionsprozesses der Maskierungen .....	60
7.5	Anhang 5 Maskierung 3D gedruckt vs. Klebeband.....	63
7.6	Anhang 6 Veröffentlichung Limes .....	68
7.7	Anhang 7 Veröffentlichung Schweißen und Schneiden .....	70

## 1.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mit Klebeband maskierte Bauteile zur Beschichtung .....	7
Abbildung 2: Prozessablauf nach der Projektzielsetzung.....	8
Abbildung 3: Kriterien, Zielvariablen und Erläuterung der Nutzwertanalyse [eigene Darstellung].....	11
Abbildung 4: Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien [eigene Darstellung] .....	12
Abbildung 5: Beispielbauteil 3D-Scanner [eigene Darstellung].....	15
Abbildung 6: Entwickelte Kantenkonturen .....	18
Abbildung 7: Maskierung als Handlingstool in Stahlkabine und auf der Spritzbank.....	18
Abbildung 8: Karte für den Vorversuch zur thermischen Beschichtung [eigene Darstellung].....	19
Abbildung 9: Strahlen der Karten, schematische Darstellung [eigene Darstellung] .....	20
Abbildung 10: Rohrmaskierung Konstruktion [eigene Darstellung] .....	22
Abbildung 11: Standzeitversuch der Rohrmaskierungen, schematische Darstellung [eigene Darstellung] .....	22
Abbildung 12: Beschichtung der Rohrmaskierungen mit verschiedenen Beschichtungsverfahren .....	22
Abbildung 13: Gefäß für den Kompostiersversuch und Kompostierstäbchen [eigene Darstellung].....	24
Abbildung 14: Kompletter Kompostiersversuchsaufbau [eigene Darstellung] .....	24
Abbildung 15: Versuchsablauf Recyclingprozess .....	26
Abbildung 16: 3DBenchy [#3D15] .....	26
Abbildung 17: 3DBenchy Onyx original [eigene Darstellung] .....	27
Abbildung 18: 3DBenchy Onyx einmal recycelt [eigene Darstellung].....	27
Abbildung 19: 3DBenchy GreenTEC Pro original [eigene Darstellung] .....	27
Abbildung 20: 3DBenchy GreenTEC Pro einmal recycelt [eigene Darstellung].....	27
Abbildung 21: 3DBenchy GreenTEC Pro zweimal recycelt [eigene Darstellung] .....	27
Abbildung 22: Maßabweichung des mit Recyclat gedruckten Modells. ....	28
Abbildung 23: side core small CAD-Modell [eigene Darstellung] .....	29
Abbildung 24: side core big CAD-Modell [eigene Darstellung] .....	29
Abbildung 25: Konstruierte Maskierungshülle [eigene Darstellung] .....	29
Abbildung 26: Konstruierte Hartschale [eigene Darstellung] .....	30
Abbildung 27: Erster Konstruktionsentwurf der vollständigen Maskierung [eigene Darstellung] .....	30
Abbildung 28: Rendering der finalen Maskierung für den side core small [eigene Darstellung] .....	32
Abbildung 29: Rendering der finalen Maskierung für den side core big [eigene Darstellung] .....	32
Abbildung 30: Rendering der finalen Maskierung für den side core small [eigene Darstellung] .....	33
Abbildung 31: Einspannung im Versuch zur mechanischen Belastbarkeit [eigene Darstellung].....	34
Abbildung 32: Simulation der mechanischen Belastung bei side core small [eigene Darstellung] .....	34
Abbildung 33: Maskierungsbauteile nach dem Versuch zur mechanischen Belastung [eigene Darstellung] .....	35
Abbildung 34: Side core big beim finalen Beschichtungsversuch [eigene Darstellung] .....	36
Abbildung 35: Side core big mit Maskierung nach dem Beschichtungsprozess [eigene Darstellung]..	36
Abbildung 36: Maskierter side core big mit Klebeband [eigene Darstellung] .....	38
Abbildung 37: Hohe Qualität der Beschichtung .....	39
Abbildung 38: Finale Maskierung als Materialverbund aus weichem Material innen und Hartschale außen.....	39
Abbildung 39: Diagramm CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Beschichtungsdurchläufe beim side core small [eigene Darstellung] .....	41
Abbildung 40: Diagramm Break-even-Point beim side core small [eigene Darstellung] .....	42
Abbildung 41: Diagramm Break-even-Point beim side core big [eigene Darstellung].....	43

## 1.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Scanner, Hersteller und Verfahren [eigene Darstellung] .....	13
Tabelle 2: Bewertung des zeitlichen Aufwands des Artec Eva [eigene Darstellung] .....	13
Tabelle 3: Einlernzeit und Zeit zum Scannen des Testteils [eigene Darstellung] .....	14
Tabelle 4: Maximale und Summe der Messabweichungen der 3D-Scanner [eigene Darstellung] .....	16
Tabelle 5: Geschwindigkeiten und Temperaturen thermischer Beschichtungsverfahren [eigene Darstellung] .....	20
Tabelle 6: Rangliste der Kartenmaterialien [eigene Darstellung] .....	21
Tabelle 7: Erfassung des biologischen Abbaus .....	24
Tabelle 8: Nutzwertanalyse der finalen Maskierung .....	40

### 1.3 Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

bzgl.	bezüglich
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C°	Grad Celsius
d.h.	das heißt
DIN	Deutsche Industrie Norm
EN	Europäische Norm
etc.	et cetera
ev.	eventuell
FDM	Fused Deposition Modeling
LCD	Liquid Crystal Display
FEMA	Fehler – Möglichkeits- und Einflussanalyse
FKM	Rechnerische Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen
h	Stunde(n)
ISO	Internationale Organisation für Normung
m	Meter
max.	Maximum
min	Minute(n)
min.	Minimum
mm	Millimeter
ms	Millisekunde(n)
N	Newton
sek.	Sekunde(n)
sog.	sogenannt
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	Watt
z.B.	zum Beispiel

## 2 Zusammenfassung

Die grundlegenden Neuerungen im Forschungsvorhaben, sind ein 3D-Scan des Bauteils vor und nach der Beschichtung und eine additiv gefertigte Maskierung der Bauteile. Es wurden im Expertenteam die Anforderungen an die nachhaltig gefertigten Maskierungen für den Beschichtungsprozess definiert. Diese setzten sich sowohl aus Technik-, Nachhaltigkeits- als auch aus Wirtschaftlichkeitsaspekten zusammen. Bestimmung exemplarischer Beschichtungsverfahren und komplexer Geometrien wurden durch Experten des Beschichtungsprozesses, Experten verschiedener Scanverfahren und 3D Druckexperten systematisch bewertet. Hierzu wurden die Kriterien, Abschätzung der Standzeit, Kantenkontur, Formstabilität, Geometrie der Oberfläche und Temperaturbeständigkeit, welche im Anschluss einer Nutzwertanalyse zugeführt wurden, erarbeitet. Des Weiteren wurde zur Findung der Gewichtung der Kriterien ein paarweiser Vergleich im Expertenteam vorgenommen. Der Prozess des 3D-Scannens ist im Prozess notwendig, um die Herstellbarkeit realistischer Bauteile zu beurteilen und große Freiformflächen, zu denen keine CAD-Dateien vorliegen, abbilden zu können. Hierzu wurden verschieden Scanverfahren hinsichtlich Qualität und Prozessdauer analysiert und bewertet. Um die additiv gefertigten Maskierungen herzustellen, wurden geeignete additive Fertigungsverfahren ermittelt. Zur Herstellung nachhaltiger Maskierungen ist das LCD- und FDM-Verfahren besonders geeignet. Es wurden verschiedene Materialien auf ihre Tauglichkeit in einer praxisnahen Umgebung untersucht. Zusätzlich wurde ein Standzeitversuch mittels Lichtbogen-Spritzen und Plasma-Spritzen die technische Eignung der Materialien detailliert ermittelt. Im Recyclingversuch wurde erprobt, ob und wie oft die Materialien werkstofflich recycelt werden können. Hierbei wurden Maschinen verwendet, die auch bei geringerem Materialaufkommen, Rezyklat herstellen können. Ergänzend wurde die Biologische - Abbauarbeit der Druckmaterialien untersucht. Es wurde eine Rangliste der in Summe geeignetsten Materialien erstellt. Für die Maskierungshüllen, kommt zukünftig ein Harz im LCD-Verfahren zum Einsatz, durch welches sich gummiartige Bauteile fertigen lassen. Aber auch TPU Materialien die im speziellen FDM druck (bspw. Prusa MK4) hergestellt werden können wurden untersucht. Für die harten Schalen, welche sich als Schnittstelle zu einer maschinellen Aufnahme auslegen lassen, kommt ein Biopolymer im FDM-Verfahren zum Einsatz. Aufgrund der zu maskierenden Bauteilgröße sind große Bauräume, sowie aufgrund Hinterschnitte der Maskierung Dualextruder notwendig (bspw. Snapmaker Artisan). Der neu erforschte Maskierungsprozess für das thermische Beschichten verknüpft die Vorteile des LCD- und FDM-3D-Drucks. Ergänzend bietet sich die Kombination der Materialien im selben Druckprozess an. Dies ist durch den Bambu p1p realisierbar. Anhand der Versuche zur Standzeit und zur mechanischen Belastbarkeit, haben sich final wichtige Erkenntnisse für die Konstruktion, aber auch den Gebrauch der Maskierungen ergeben. Die Qualität der Kantenkontur, des zu beschichtenden Bauteils, ist bei der Verwendung der gummiartigen Maskierungshüllen sehr gut. Durch eine Standardisierung und eine vorgegebene Konstruktion, können Maskierungsbauteile direkt nach dem 3D-Scan der Beschichtungsbauteile konstruiert und gefertigt werden. Der Vorteil von additiv gefertigten Maskierungen liegt in ihrer Präzision und Wiederverwendbarkeit gegenüber dem einmaligen Gebrauch von Klebebändern. Diese lassen sich durch die Mitarbeitenden simpel aufstecken und die gummiartigen Maskierungshüllen sind so konstruiert, dass sie eine Haltefunktion beinhalten. Dadurch lassen sich Fehler durch Formschlüsse und die Haltefunktionen minimieren. Ein weiterer Fokus liegt hierbei auf der Umsetzbarkeit in kleinen und mittleren Unternehmen. Aufgrund dessen wird Wert auf die Ökologie und Ökonomie des neuen Prozesses gelegt. Der zeitliche Vorteil in der Produktion, und der Aufwand für die Konstruktion und den 3D-Druck wurde detailliert erforscht.

### 3 Einleitung und Projektmotivation

Thermische Beschichtungen werden erfolgreich zum Schutz von Oberflächen vor Verschleiß- und Reiboxydation, Erosion, Korrosion und Kavitation an Bauteilen eingesetzt. Auch elektrisch oder thermisch leitende oder isolierende Schichten sind Beispiele für funktionale Bauteiloberflächen. Bei einer maximalen Grundwerkstoffbelastung von ca. 100°C werden die Beschichtungen aufgebracht. Eine Vielzahl möglicher Spritzmaterialien, die sich zu verschiedensten Schichtzusammensetzungen kombinieren lassen, ermöglichen beinahe unbegrenzte Anwendungsmöglichkeiten. Das Verfahren eignet sich zur Beschichtung nahezu jeden Grundwerkstoffs und auch nicht nur Neuteile können mit einer thermischen Spritzschicht versehen werden. Auch Reparaturen sind möglich und vor allem schneller durchgeführt als die Beschaffung neuer, teurer Ersatzteile. Wenn etwa bei Dichtungs- oder Pumpensystemen Revisionen anstehen, ist eine rasche Aufarbeitung, etwa von Pumpendichtsitzen oder ähnlichen Bauteilen, leicht möglich. Schon allein hierdurch werden durch den Einsatz des thermischen Beschichtens Energie und Rohstoffe eingespart, da kein Neuteil hergestellt werden muss. Die durch thermische Spritzverfahren herstellbaren Schichtdicken liegen in einem Bereich zwischen 40 µm bis zu einigen Millimetern. Die Haftung zwischen Substrat und Spritzschicht erfolgt aufgrund folgender Mechanismen: Mikro-Verklammerung, Mikro-Verschweißung, chemisch-metallurgische Wechselwirkungen und Adhäsion durch physikalische und chemische Adsorption. Zur Erzielung der optimalen Haftung der Spritzschicht ist eine sorgfältige Vorbereitung der Werkstückoberfläche erforderlich. Hierzu muss die Oberfläche entfettet und durch Strahlen aufgeraut werden. Da selten das komplette Bauteil beschichtet werden darf, muss es zudem aufwendig händisch mit verschiedenen Lagen Klebeband abgedeckt werden. Bei der rhv-Technik kommen aktuell drei verschiedene Klebebänder mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz. Dabei wurden im Jahr 2018 ca. **40.000 m** Klebeband allein bei der Firma rhv-Technik verbraucht. Nach dem Beschichtungsprozess muss das Bauteil wieder von den verschiedenen Klebebändern händisch befreit werden. Hier entsteht eine große Menge an Abfall, der aufgrund der Anhaftung des Beschichtungswerkstoffs nicht wieder recycelt werden kann. Zudem bleiben meist Klebereste am Bauteil haften. Diese müssen mittels eines aggressiven Lösungsmittels wieder von Hand entfernt werden. Hierfür sind Absauganlagen, Gefahrstoffschränke und Sicherheitssysteme bzw. umfassende Schutzeinrichtungen für die Mitarbeiter notwendig.

Unabhängig von der Beschichtungstechnologie stellt das Maskieren mittels Klebebandes, wie in Abbildung 1 dargestellt, grundsätzlich einen Kompromiss dar.



Abbildung 1: Mit Klebeband maskierte Bauteile zur Beschichtung

Zunächst muss die Information betreffend die abzulebende Grenze den Mitarbeiter/innen exakt bekannt gemacht werden und diese muss möglichst wiederholgenau eingehalten werden. In der Praxis kommt es an diesen Schnittstellen immer wieder zu Verwechslungen oder die spezifischen Informationen für das Bauteil fehlen. Auch streuen die manuell angebrachten Klebekanten naturgemäß. Auch technologisch stellen die Klebebänder keine verlässliche Abdeckung dar. Vielmehr kommt es zu Ablöseprozessen, dem örtlichen Durchdringen oder zu Verletzungen der Klebebandschicht beim Handhaben. Das mehrschichtige Abkleben stellt einen notwendigen jedoch sicher nicht zufriedenstellenden Kompromiss dar. Das Verfahren entzieht sich einer automatisierten Lösung weitgehend, schon allein aufgrund des biegeweichen Klebebandes und dem Drapiervorgang. Im weiteren Verlauf wird ein Anteil der Bauteile noch spanend bearbeitet, bevor sie schließlich zur Endkontrolle kommen. Zur Qualitätssicherung wird eine Schichtanalyse durchgeführt, um die Erfüllung der Angaben über die Schichtdicke überprüfen zu können. An bestimmten Stellen findet dies bei einer zerstörungsfreien Prüfung mittels Bügelmessschraube oder Schichtdickenmessgerät statt, dies ist aber nicht in allen Anwendungsfällen möglich.

Zielsetzung dieses Projektes war es, mittels 3D-Scanner und 3D-Drucker für jedes beliebige Bauteil eine spezifische Maskierung zu erstellen, die die gewünschten Stellen abdeckt, welche beim thermischen Spritzverfahren nicht beschichtet werden sollen. Abbildung 2 zeigt die notwendigen Schritte zur thermischen Beschichtung.

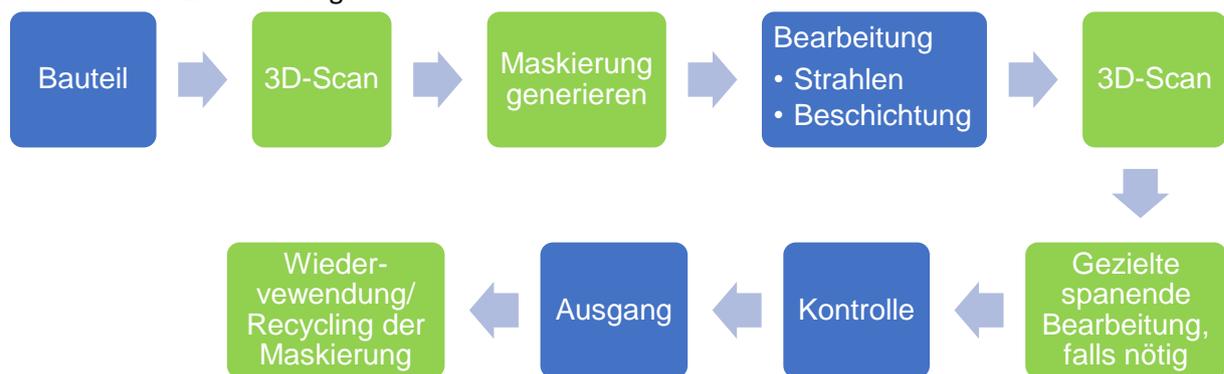


Abbildung 2: Prozessablauf nach der Projektzielsetzung

Die Maskierungen können mehrfach verwendet werden wodurch die Umwelt erheblich entlastet und die Unternehmen zudem von deutlich schnelleren Bearbeitungszeiten profitieren. Bisher mussten alle Werkstücke aufwendig per Hand abgeklebt werden und die verschiedenen Prozessschritte durchgeführt werden, während denen die Klebebänder nicht beschädigt werden durften. Außerdem ist es nicht mehr nötig, Klebereste mittels der aggressiven Lösungsmittel zu entfernen. Zusätzlich soll durch die 3D-Scans mögliche zielgerichtete Rückführung des Schichtauftrags Werkstoff eingespart werden. Dieser ist bei der Herstellung und Verarbeitung energieaufwändig und teuer. Nachdem der jeweilige Auftrag abgeschlossen und auch kein weiterer vorhersehbar ist, soll die entsprechende Maskierung recycelt werden können, um weitere Rohstoffe und Transportwege einzusparen.

Der 3D-Scanner muss in der Lage sein, das Bauteil vollständig zu erfassen und die Daten in eine 3D-Software zum virtuellen Modulieren von Oberflächen, Stichwort: „Aufdicken“, zu übertragen. Aus den 3D-Daten des Scanners berechnet dann die CAD-Software auf dieser Basis dann die optimale ein- oder mehrteilige Maskierung. Die entweder aus einem bestehenden Bestand entnommen wird, oder durch einen 3D-Drucker angefertigt werden soll. Außerdem ist es durch die Erfassung und den Vergleich der Daten vor und nach der Beschichtung möglich, eine exakte Aussage über Verzug, Beschädigungen o.ä. zu geben. Dies ist insbesondere bei der Bearbeitung von Reparaturen erforderlich, um

das Ersatzteil wieder voll funktionstüchtig zu machen und so eine energetisch und ressourcentechnisch aufwändige Neufertigung zu umgehen. Der Beschichtungsprozess wird bedarfsgerecht ausgehend von der tatsächlich vorhandenen Topologie in Bezug auf die gewünschte Form hin angepasst. Zudem kann der Beschichtungsprozess so optimiert werden, dass nahezu kein Material zu viel aufgetragen wird, das nach aktuellem Stand in einem weiteren Schritt wieder spanend abgetragen werden muss.

Aus Vorversuchen ist bereits bekannt, dass sich Verbundstoff aus Nylon und Kohlefaser deutlich besser eignen als ABS Druckwerkstoff. Nylon und Kohlefaser sind jedoch nicht gut recyclebar und im Grundmaterial nicht umweltfreundlich. Deshalb muss weitergesucht werden. Es sollen noch weitere Druckmaterialien und -verfahren untersucht und getestet werden, die möglichst umweltfreundlich sind und trotzdem den Beschichtungsprozess gut überstehen. Ziel ist es, ein Druckmaterial zu finden, das es erlaubt die verwendeten Maskierungen, die nicht mehr gebraucht werden, vor Ort aufzubereiten und erneut als Druck-Filament zu verwenden. Die während der Zyklen voraussichtlich hinein diffundierenden Oxide/Karbide sollen dabei einen positiven Effekt auf die zukünftige Lebensdauer leisten und nicht aufwendig getrennt werden. So kann eine enorme Menge an Material und Müll eingespart werden.

## Aufgabenstellung

Im Weiteren werden die Aufgaben, in Arbeitspakete gegliedert, stichpunktartig aufgeführt.

### AP 1: Erstellung Gesamtkonzept

Bestimmung exemplarischer Beschichtungsverfahren und Bauteilgeometrien im Expertenteam. Erarbeiten einer Bewertungsmatrix zur objektiven Evaluation der Maskierungen.

### AP 2: Scan-Prozess standardisieren

Aufzeichnung des Scann Prozesses mittels Beschleunigungssensorik am Scanner und Kamerasystem. Zuerst im Labor unter idealen Bedingungen dann bei der rhv-Technik. Entwicklung einer treffsicheren Überführung der 3D Oberflächendaten in passgenaue STL-Datensätze für 3D-Drucker. Empirisch durch iterative Bearbeitung der aufgearbeiteten Scandaten. Empirisch generieren von Codes für 3D Drucker unter Berücksichtigung der Daten aus Vorversuch. Entwicklung der Haltefunktion der Maskierung auf den Bauteilen. Konstruktion mehrere Muster in verschiedenen Materialien. Qualitätsprüfung und -sicherung der Maskierungsgeometrie. Literatur und Strömungssimulation. Anschließend empirische Versuche bei unterschiedlichen Materialien. Simulation, Fertigung und Lösungsansätze durch HS, Konstruktion und Versuche durch rhv-Technik, Auswertung gemeinsam. temporäres Scannen der Kontur zur Bewertung des Schichtaufbaus auf der Maskierung.

### AP 3: Maskierung als Schnittstelle

Untersuchung zur Tauglichkeit der Maskierung als Handlings Tool. Dauerfestigkeitsprüfung bei verschiedenen Materialien auf Zugversuch Maschine. Entwicklung der Schnittstelle zur Spritzbank.

### AP 4: Materialforschung bei unterschiedlichen Druckverfahren

Untersuchung von umweltfreundlichen Druckmaterialien auf ihre Widerstandsfähigkeit. Entsprechende Proben aus dem Material drucken / Proben anfordern. Lateraler Austausch mit 3D Drucklabor (Neu) und Experten der Kunststofftechnik an der HS Aalen. Scannen der Oberflächen Daten für Abrasion und Schichtaufbau. Untersuchung verschiedener Druckverfahren. Empirische Versuche zu

verschieden Maskierungen aus verschiedenen bereits als tauglich ermittelten Materialien. Subjektiv durch Expertenteam aus 3D Labor und Kunststofftechnik nach Punktesystem 1-10 mit Bewertungshilfe

#### AP 5: Recycling der Maskierungen

Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit; Reinigung der Maskierung, Maskierungen aus verschiedenen Materialien beschichten. Ergänzend bereits beschichtete Teile aus vorherigen Versuchen reinigen. Iteratives Vorgehen zur Reinigung, Mikroskopaufnahmen der Oberfläche Energiemessung möglicher Hilfsgeräte

#### AP 6: Konstruktion eines optimierten Modells aus verschiedenen Materialien und materialeffizientem Aufbau

Abhängig von bisherigen Ergebnissen, können sich verschiedenen Materialien in ihren Eigenschaften ergänzen. Bsp. technisch strapazierfähiges Material außen, recyclebares Material innen. Oder recyceltes Material außen, neues Material innen. Schnittstellen definieren und Prototypische Maskierungen aus entsprechenden Materialien Drucken und angelehnt wie in 2.3 bis 4.2 evaluieren.

#### AP 7: Drucken serientauglicher Prototypen

Erweiterung der exemplarischen Bauteile auf Weitere. Tauglichkeit des gesamten Ablaufs empirisch zu Referenzieren der externen Validität. Scannen der Bauteile und Überarbeitung der Daten nach standardisiertem Ablauf. Drucken der Maskierungen anhand überarbeiteter Daten und Kombination verschiedener Materialien.

#### AP 8: Tests zum Veralten der Maskierungen beim Spritz-/ Beschichtungsprozess im Fertigungsbetrieb

Verhalten sich die Maskierungen auch bei allen anderen Bauteilen wie gemäß den Forschungsergebnissen der exemplarischen Bauteile. Standzeit bei technisch nicht hochbelasteten Prozessen. Gebrauchstauglichkeit der Maskierungen für MA.

#### AP 9: Redesign

Zusammenfassen der allgemeingültigen statistisch belastbaren Ergebnisse. Iterativ nach Forschungsstand sind die Teilprozesse zu überarbeiten.

## 4 Hauptteil

Im Folgenden wird das Vorgehen, die Methodik, durchgeführte Versuche und Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspakete erläutert.

### 4.1 AP 1: Erstellung Gesamtkonzept

Bestimmung exemplarischer Beschichtungsverfahren und komplexer Geometrien. Diese wurden durch Experten des Beschichtungsprozesses, Experten verschiedener Scanverfahren und 3D Druckexperten systematisch bewertet. Siehe hierzu Anhang 1. Das Weiteren wurden mögliche nötige Änderungen im Projektablauf, geschuldet durch die Zeitdifferenz zwischen Beantragung und Bewilligung, besprochen und Versuchspläne / Versuchsabläufe, neue Materialien und Verfahren wo nötig aktualisiert. Eine erneute hier vorausgegangene Literaturrecherche war dazu nötig. Diese wurde zuerst mit dem Schneeballsystem nach (M.Pieruschka 2022), dann strategisch nach (Dr. Oliver Obst 2011) durchgeführt.

#### Bewertungsmatrix

Die gestrahlten und flammbeschichteten Versuchsträger werden nach der Vermessung in einem Expertenteam bewertet. Die Kriterien, welche im Anschluss einer Nutzwertanalyse zugeführt werden, sind Abschätzung der Standzeit, Kantenkontur, Formstabilität, Geometrie der Oberfläche und Temperaturbeständigkeit. Die Abschätzung der Standzeit der einzelnen Kartenmaterialien erfolgt durch das Vermessen der Karten. Anhand des Abtrags in Millimeter wird dargestellt, welches Material im Vergleich eine höhere Standzeit aufweist. Die restlichen Kriterien werden optisch bewertet. Bei der Kantenkontur wird die Karte auf Risse und Abplatzungen und deren unterschiedlich starke Ausprägung betrachtet. Die Formstabilität wird durch Verformung der Karten und deren Stärke beschrieben. Um die Geometrie der Oberfläche zu beurteilen, wird eine Änderung dieser z.B. in Form von Blasenbildung betrachtet. Die Temperaturbeständigkeit wird durch Verbrennungen unterschiedlicher Stärke beschrieben.

Diese Kriterien und deren Zielvariablen bilden die Grundlage der folgenden Nutzwertanalyse.

Kriterium/ Zielvariable	Erläuterung Nutzen
<b>Abschätzung Standzeit (anhand des Abtrags) [mm]</b>	über 0,16mm; 0,16mm bis 0,13mm; 0,12mm bis 0,09mm; 0,08mm bis 0,04mm; unter 0,04mm = 0; 1; 2; 3; 4 Punkte
<b>Kantenkontur [starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen]</b>	[starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen] = 0 ... 4 Punkte
<b>Formstabilität [starke Verformung ... keine Verformung]</b>	[starke Verformung ... keine Verformung] = 0 ... 4 Punkte
<b>Geometrie der Oberfläche [starke Änderung ... keine Änderung]</b>	[starke Änderung ... keine Änderung] = 0 ... 4 Punkte
<b>Temperaturbeständigkeit [starke Verbrennungen ... starke Verbrennungen]</b>	[starke Verbrennungen ... keine Verbrennungen] = 0 ... 4 Punkte
<b>Gesamtnutzen</b>	

Abbildung 3: Kriterien, Zielvariablen und Erläuterung der Nutzwertanalyse [eigene Darstellung]

Des Weiteren wird zur Findung der Gewichtung der Kriterien ein paarweiser Vergleich im Expertenteam vorgenommen. Das Expertenteam, welches auch die Bewertungen durchführt, besteht aus zwei Personen der Hochschule Aalen und zwei Mitarbeiter der rhv-Technik. In Abbildung 4 der paarweise Vergleich zur Gewichtung der Kriterien für die folgende Nutzwertanalyse dargestellt.

Fragestellung: Welche Eigenschaften sind wichtiger?							
	Abschätzung Standzeit	Kantenkontur	Formstabilität	Geometrie der Oberfläche	Temperaturbeständigkeit	Summe	%
Abschätzung Standzeit		0	2	2	2	6	30%
Kantenkontur	2		1	2	2	7	35%
Formstabilität	0	1		1	1	3	15%
Geometrie der Oberfläche	0	0	1		1	2	10%
Temperaturbeständigkeit	0	0	1	1		2	10%

Abbildung 4: Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien [eigene Darstellung]

#### 4.2 AP 2: Scan-Prozess standardisieren

Wie in der Zielsetzung beschrieben, ist der Prozess des 3D-Scannen notwendig, um die Herstellbarkeit realistischer Bauteile zu beurteilen und große Freiformflächen, zu denen keine CAD-Dateien vorliegen, abbilden zu können. Für jedes nötige Bauteil soll eine Maskierung erstellt werden können. Außerdem soll der Prozess des thermischen Beschichtens durch 3D-Scans vor und nach der Beschichtung nachhaltiger gestaltet werden, indem durch den erneuten Scan ein Rückschluss über den Schichtauftrag geschlossen werden kann und somit spanendes Nacharbeiten nur noch in geringem Ausmaß nötig gemacht wird. Aufgrund dessen wurde ein geeigneter 3D-Scanner und das damit einhergehende 3D-Scanverfahren ermittelt werden.

Die Scanner und deren Verfahren; welche hierbei analysiert werden, stellen sich wie folgt in Tabelle 1 dar:

Bezeichnung	Hersteller	Verfahren
Artec Eva	Artec 3D	Lichtstreifenprojektion
Artec Eva HD	Artec 3D	Lichtstreifenprojektion
Artec Space Spider	Artec 3D	Lichtstreifenprojektion
EinScan HX	Shining3D	Lichtstreifenprojektion
VIVID VI-9i	Konica Minolta	Lasertriangulation
VL	Keyence	Photogrammetrie
Comet LED 2M	Steinbichler	Lichtstreifenprojektion

Tabelle 1: Scanner, Hersteller und Verfahren [eigene Darstellung]

Es soll ein möglichst genauer und schneller 3D-Scan der Bauteile ermöglicht werden. Hierfür ist für die Untersuchung interessant, ob zeitliche und qualitative Unterschiede bestehen. Deshalb wird an dieser Stelle neben dem Lichtstreifenprojektionsverfahren ein Lasertriangulationsverfahren und ein Photogrammetrie Verfahren mit einbezogen. Die 3D-Scanner von Artec 3D sind als Handscanner ausgeführt. Bei den anderen Geräten handelt es sich um stationäre Systeme.

Der zeitliche Aufwand der verschiedenen 3D-Scanner wird zum einen anhand der nötigen Fachkompetenz bei einer Person mit Vorkenntnissen als Techniker oder mit einem Maschinenbau Studium gemessen. Dabei wird die Einlernzeit bei einem Probanden dargestellt, welcher dieser Gruppe zugeordnet werden kann. Zum andern wird die benötigte Zeit von der Vorarbeit über den Scanprozess bis hin zur Nacharbeit gemessen. Als Endpunkt wird die druckfähige STL-Datei festgelegt.

Artec Eva - Antonius Köster GmbH & Co. KG			
Bewertungskriterien	Tätigkeit	Fachkompetenz gemessen an Einlernzeit mit Vorkenntnisse Studium Maschinenbau/ Techniker [h]	Zeit Testteil [min]
Vorarbeit/ vorbereiten/ Messraumanforderung	Besprühen, Hintergrund schwarz, Beleuchtung	0 h	5 min
Scanprozess	Teil mit Handscanner abfahren	0-1 h	15 min
Zusammenfassen Scandaten/ Nacharbeit	Grob überarbeiten in Scanprogramm, überschüssig erfasste Konturen entfernen	0-1 h	15 min
Überarbeitung Scandaten/ Nacharbeit	Geomagic, Löcher schließen, Glätten, Kanten, Flächennetz erzeugen, in .STP-Datei umwandeln, CAD, Bohrungen einfügen	0-1 h	45 min
<b>Summe</b>		<b>3std</b>	<b>1 std 20 min</b>
Anzahl Systeme	Programm Handscanner, Geomagics		
Anschaffungskosten	22.000€ neu mit Software, 13.000€ ohne Software		
Betriebskosten	Strom Scanner/PC		

Tabelle 2: Bewertung des zeitlichen Aufwands des Artec Eva [eigene Darstellung]

Anhand des in Tabelle 22 dargestellten Bewertungsmusters, werden die verschiedenen Verfahren analysiert. Bei einer Zeitspanne wird jeweils der maximale Wert angenommen, um den schlechtesten Fall abzubilden. Die Zeit zum Scannen des Testteils ist hierbei die relevante Größe, da die Einlernzeit nur beim ersten Benutzen des Scanners besteht. Die Ermittelten Zeiten für alle Scanner lassen sich wie folgt in Tabelle 3 zusammenfassen:

3D-Scanner	Einlernzeit	Zeit zum Scannen des Testteils
Artec Eva	3 h	1 h 20 min
Artec Eva HD	3 h	1 h 20 min
Artec Space Spider	3 h	1 h 20 min
EinScan HX	3 h	1 h 35 min
VIVID VI-9i	10 h	2 h 25 min
VL	3 h	Die Daten können nicht umgewandelt werden.
Comet LED 2M	7 h	2 h 20 min

Tabelle 3: Einlernzeit und Zeit zum Scannen des Testteils [eigene Darstellung]

Wie in Tabelle 33 dargestellt, können die Dateien bei dem Scansystem von Keyence leider nicht durch die Software in STL-Dateien umgewandelt werden. Dies stellt ein Problem dar, da nur mithilfe dieses Dateiformats ein 3D-Druck ermöglicht werden kann.

Man kann erkennen, dass das Verfahren keinen direkten Einfluss auf die Zeit zum Scannen des Testteils hat. Der 3D-Scan mit dem Comet LED 2M benötigt fast die doppelte Zeit als ein Handscanner von Artec 3D. In der Einlernzeit gibt es auch größere Unterschiede. Die Handscanner schneiden mit maximal drei Stunden am besten ab. Der Scanner von Konica Minolta schließt am schlechtesten ab. Zusammenfassen lässt sich sagen, dass aufgrund der zeitlichen Aufwände die Handscanner zu bevorzugen sind. Um die Qualität des Scandaten zu erfassen, wird ein beispielhaftes Bauteil mit allen 3D-Scannern digitalisiert. Die Maße des Bauteils werden zunächst mit einem Messschieber bzw. einer Bügelmessschraube gemessen und mit den Dateien der 3D-Scanner verglichen. Die Daten werden anhand einer CAD-Software ausgelesen und mit dieser gemessen.

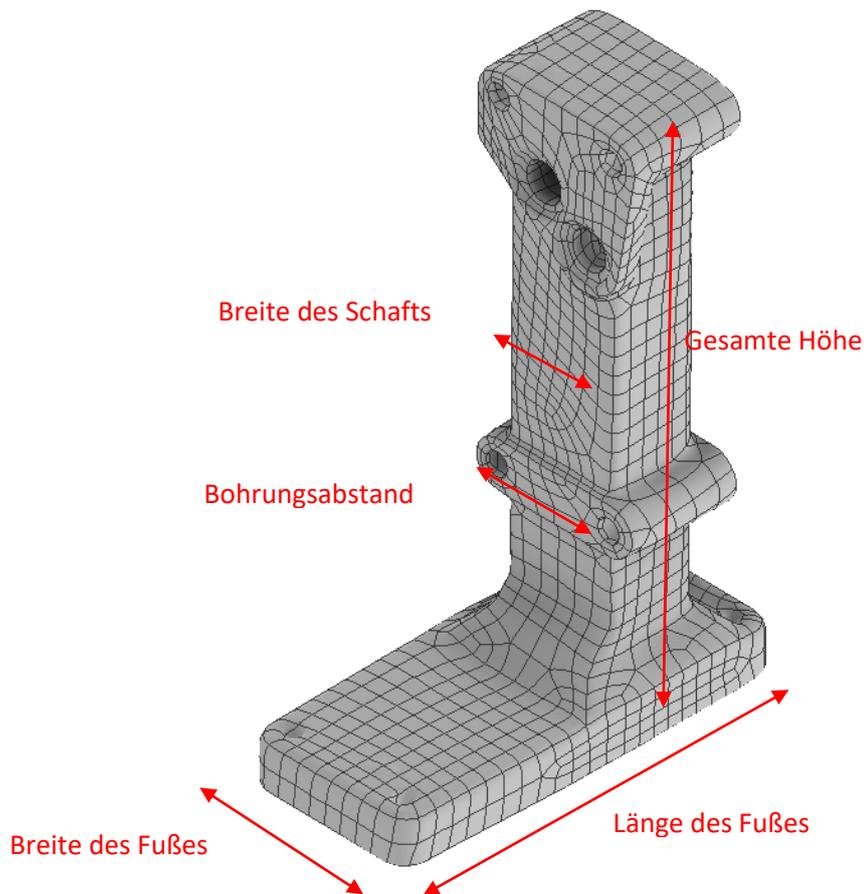


Abbildung 5: Beispielbauteil 3D-Scanner [eigene Darstellung]

In Abbildung 5 5 kann man die Messpunkte des beispielhaften Bauteils erkennen. Gemessen wurde

- die Höhe,
- die breite des Fußes,
- die Länge des Fußes,
- der Bohrungsabstand der mittleren Bohrungen,
- die Höhe des Fußes und
- die Breite des Schafts.

Die Messung der Dateien in CAD wurde über neu erstellte Ebenen auf dem vorhandenen Netz vorgenommen. Für den Abstand der Bohrungen wurde mit zwei projizierten Kreisen die Bohrungen angepeilt und der so entstandene Abstand gemessen. Diese Methoden bergen eine Abweichung, die allerdings in einem sehr kleinen Bereich stattfinden. Die ermittelte maximale Messabweichung und die Summe der Messabweichung an den dargestellten Messpunkten der verschiedenen 3D-Scanner stellen sich wie folgt dar:

3D-Scanner	Maximale Messabweichung	Summe der Messabweichungen
Artec Eva	0,878 mm	2,114 mm
Artec Eva HD	0,637 mm	2,191 mm
Artec Space Spider	0,764 mm	3,057 mm
EinScan HX	0,790 mm	2,113 mm
VIVID VI-9i	0,987 mm	2,580 mm
VL	Messung nicht möglich	Messung nicht möglich
Comet LED 2M	0,791 mm	2,244 mm

Tabelle 4: Maximale und Summe der Messabweichungen der 3D-Scanner [eigene Darstellung]

Anhand der Daten, die in Tabelle 4 dargestellt sind, lässt sich die Aussage treffen, dass der Handscanner Artec Eva HD am besten abschneidet in der maximalen Messabweichung. In der Summe der Messabweichungen schneidet der Artec Eva am besten ab, allerdings kann man sagen, dass die Scanner keine größeren Unterschiede aufweisen. Einzig der VIVID VI-9i fällt negativ in der maximalen Messabweichung auf. Die Erkenntnis aus der Bewertung der 3D-Scanverfahren ist, dass es zwischen den Verfahren keine größeren Unterschiede gibt. Anhand des zeitlichen Aufwandes kann man allerdings erkennen, dass die Handscanner wesentlich schneller in der Einlernzeit und der benötigten Zeit um das beispielhafte Bauteil zu Scannen sind. Die Qualität der Scandaten ist sehr ähnlich, allerdings schneiden auch hier die Handscanner gut ab. Für den Prozess der Maskierungskonstruktion muss jedoch eine gewisse Toleranz bei den Scandaten eingeplant werden. Vergleicht man die Kosten der Scanner, kann man sagen, dass die Handscanner mit ca. 20000 Euro (Artec Eva) im Mittelfeld der Scanner angesiedelt sind. Ein enormer Vorteil der Handscanner ist, dass größere Freiflächen ohne Probleme aufgenommen werden können. Insbesondere Bauteile, die bei anderen Scannern nicht auf den Drehtisch passen, können mit Handscannern gescannt werden. Auch der mobile Einsatz in einem Unternehmen ist ein großer Vorteil. So können teile z.B. direkt am Wareneingang, aber auch in der Produktion gescannt werden. Aufgrund dessen wird für den Zweck der Maskierungsherstellung bzw. des Gesamtprozesses ein Handscanner bevorzugt.

Eventuell kann in Zukunft auf günstigere und kompaktere Lösungen zurückgegriffen werden. Die Möglichkeiten durch z.B. Smartphones oder kleinere Handgeräte, welche in wenigen Minuten einen 3D-Scan darstellen können, würden hier einen großen Vorteil darstellen, sind allerdings noch nicht ausgereift.

### 4.3 AP 3: Maskierung als Schnittstelle

Für den Demonstrator (Hülse) wurden Vorrichtungen für das Strahlen und für das Beschichten konstruiert und gebaut. Für die gedruckten Maskierungen wurden verschiedene Konturen untersucht, um eine möglichst präzise Kante zwischen Bauteil und Beschichtung zu erhalten (Abbildung 6). Es zeigt sich, dass die Kontur 5 am besten bzgl. Kantenkontur und Anbackungen am Bauteil abschneidet. Diese Kontur ist die Grundlage für die Rohrmaskierungen, die zur Untersuchung der Druckmaterialien mit verschiedenen Beschichtungsverfahren dient.

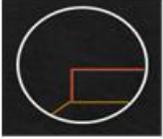
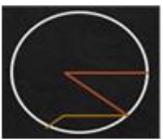
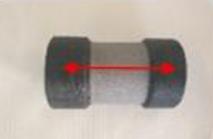
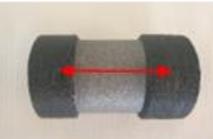
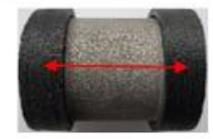
Bild (Hülse)	Bild (Maskierung + Beschichtungsrichtung)	Sektion Bild	Kontur
	 1		
	 2		
	 3		 45°
	 4		 30°
	 5		

Abbildung 6: Entwickelte Kantenkonturen

In Abbildung 7 wird eine komplexe Maskierung gezeigt, wie sie als Handlings-Tool in der Strahlkabine und im Spannelement der Spritzbank eingesetzt wird.



Abbildung 7: Maskierung als Handlingtool in Stahlkabine und auf der Spritzbank

#### 4.4 AP 4: Materialforschung bei unterschiedlichen Druckverfahren

In diesem AP werden nun nach den Ergebnissen aus AP2, Materialien im FDM- und LCD-Verfahren in einem Versuch dem thermischen Beschichtungsprozess zugeführt. Es werden im Vorversuch Materialien ausgeschlossen, die technisch dem gesamten Prozess des thermischen Beschichtens, also dem Strahlen und Beschichten, nicht standhalten können. Um die Reliabilität und die Generalisierbarkeit zu gewährleisten werden zunächst die Materialien und die Methoden des Versuches genau erläutert. Die Kartenproben werden mit den im Labor zur Verfügung stehenden 3D-Druckern gefertigt. Für die FDM-Karten kommt ein Anycubic Chiron und ein Markforged Desktop Series Drucker zum Einsatz. Der Markforged hat den Vorteil, dass hier verstärkte Proben mit Endlofaser gedruckt werden können. Für die LCD-Proben wird ein Elegoo Saturn S verwendet.

Die Materialien, die für diesen Versuch ausgewählt werden, lassen sich in vier Kategorien einordnen:

1. **Standardmaterialien:** Hier werden alle Materialien eingeordnet, welche häufig bei den LCD- und FDM-Verfahren verwendet werden. Typische Vertreter sind hier z.B. Standardharze oder im FDM-Verfahren PLA- und ABS-Filamente.
2. **Verbundmaterialien:** Diese Kunststoffe sind mit anderen Werkstoffen vermischt und erreichen somit bessere technische Eigenschaften. Beispiele hierfür sind kohlefaserverstärkte Filamente. Hierbei wird eine längere Standzeit erhofft, da die Verbundmaterialien höheren Temperaturen standhalten können.
3. **Flexible Materialien:** Diese Materialien weisen eine höhere Flexibilität als Standardmaterialien auf. Insbesondere wird hier erhofft, dass diese Materialien beim Strahlvorgang mit Korund besser abschneiden.

4. **Umweltfreundliche Materialien:** Als besonders umweltfreundlich lassen sich Materialien einordnen, welche biologisch abbaubar sind, oder auf Pflanzenbasis hergestellte Harze. Sollten sich diese Materialien als tauglich erweisen, wird der Prozess deutlich nachhaltiger gestaltet werden können.
5. **Temperaturbeständigere Materialien:** Davon ausgehend, dass die Hitze des thermischen Beschichtungsprozesses eine der größten Herausforderungen darstellt, werden Materialien getestet, die höhere Temperaturen aushalten können als die Standardmaterialien.

Die dargestellten Materialien werden im FDM- und LCD-Verfahren gefertigt. Die ausgewählte Geometrie ist eine Karte mit einer Dicke von 1 mm. Bei den im LCD-Verfahren gedruckten Karten werden verschiedene Nachhärtezeiten ebenfalls in den Versuch eingebaut, um hier einen potenziellen Unterschied zu erkennen. Abbildung 8 stellt den Versuchsträger in Form einer EC-Karte dar.

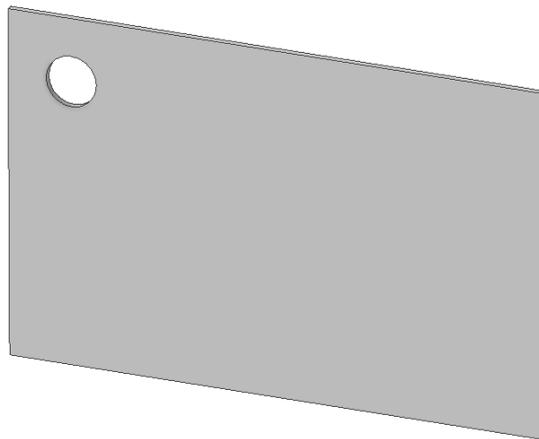


Abbildung 8: Karte für den Vorversuch zur thermischen Beschichtung [eigene Darstellung]

Diese Karte bietet eine große Fläche, um das Strahlen und thermische Beschichten durchzuführen. Die Dicke von 1 mm soll eine möglichst geringe Dicke der Maskierung darstellen. Aus der Maskierung mittels Klebebandes ist bereits bekannt, dass möglichst dünne Maskierungen die Qualität der Beschichtung im Randbereich erhöhen. Die Karten werden bei diesem Vorversuch einem Flamm-spritzverfahren zugeführt. Wie in Tabelle 5 dargestellt, gibt es Verfahren mit deutlich höheren Temperaturen, aber auch Verfahren, welche niedrigere Temperaturen aufweisen. Die Geschwindigkeiten mit denen beschichtet wird sind im Vergleich zu anderen Verfahren gering.

Thermisches Beschichtungsverfahren	Geschwindigkeit der Flamme und Beschichtungspartikel	Temperatur der Flamme
Lichtbogenspritzen	bis zu 150m/s [vgl. PAW08, S. 81]	bis zu 6100K [vgl. PAW08, S. 80]
Drahtflammspritzen	80m/s - 100m/s [vgl. PAW08, S. 72]	3000K - 3350K [vgl. PAW08, S. 71]
Pulverflammspritzen	80m/s - 100m/s [vgl. PAW08, S. 72]	3000K - 3350K [vgl. PAW08, S. 71]
Plasmaspritzen (typischer Plasmabrenner)	bis zu 800m/s [vgl. PAW08, S. 76]	ca. 14000K [vgl. PAW08, S. 76]
Hochgeschwindigkeits-spritzverfahren (HVOF)	1600m/s - 2000m/s [vgl. PAW08, S. 88]	2500K - 3000K [vgl. PAW08, S. 88]
Laserspritzverfahren (Laser-Assisted Cold Spray)	ca. 400m/s [vgl. FAU14, S. 343]	650°C - 900°C [vgl. FAU14, S. 343]

Tabelle 5: Geschwindigkeiten und Temperaturen thermischer Beschichtungsverfahren [eigene Darstellung]

Um den gesamten Prozess zu simulieren, wurden die Karten zunächst mit Korund gestrahlt. Dies wird durch Aufkleben der Karten auf einer Schiene realisiert (siehe Abbildung 9).

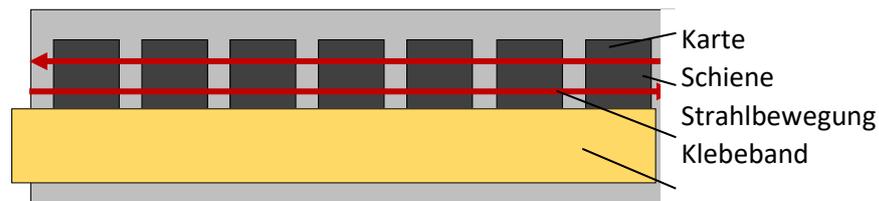


Abbildung 9: Strahlen der Karten, schematische Darstellung [eigene Darstellung]

Die roten Pfeile markieren die Strahlbewegung. Im Anschluss wurden die Karten vermessen. Schließlich wurde derselbe Versuchsaufbau dem Flammspritzverfahren zugeführt. Die Beschichtungsbewegung verläuft hierbei genau wie beim Strahlen von links nach rechts und wieder zurück. Nach dem Vorgang wurde ebenfalls wieder vermessen. Zur Vermessung der Karten wurde zunächst deren Ausgangsmaß bestimmt. Unterschiede in den 3D-Druckverfahren ergaben unterschiedliche Dicken, die allerdings für diesen Vorversuch keine größere Rolle spielen, da nur der Abtrag, bzw. der eventuelle Auftrag von Bedeutung ist. Da die Karten, wie auch die Bauteile bei rhv-Technik unter realen Bedingungen von Hand gestrahlt und beschichtet wurden, können Unebenheiten in der Oberfläche entstehen. Um diesen Ungleichmäßigkeiten beim Messen der Dicke entgegenzuwirken, wurden fünf Messstellen definiert und die Abweichung zur Ausgangsdicke gemittelt.

Die Nutzwertanalyse mit Ergebnissen wird in Anhang 2 ausführlich dargestellt. Zur besseren Übersicht der Ergebnisse wurde eine Rangliste anhand der Punkte erstellt, siehe Tabelle 6.

Rang	Bezeichnung	Verfahren	Eigenschaft	Punkte
1	Prima Creator Flex	LCD	Flexibel	4,00
2	Liqcreate Flexible-X	LCD	Flexibel	4,00
3	Markforged Onyx HSHT Glass	FDM	Verbundmaterial	3,90
4	Elegoo plant based tough	LCD	Umweltfreundlich	3,70
5	Markforged Onyx Fiberglass	FDM	Verbundmaterial	3,60
6	Markforged Onyx Kevlar	FDM	Verbundmaterial	3,60
7	Markforged Onyx	FDM	Verbundmaterial	3,50
8	Extrudr GreenTEC pro	FDM	Umweltfreundlich	3,40
9	Anycubic Eco UV	LCD	Umweltfreundlich	3,35
10	Anycubic Craftsman white	LCD	Standardmaterial	3,15
11	Markforged Onyx carbon	FDM	Verbundmaterial	3,15
12	Alphacam ABS	FDM	Standardmaterial	3,10
13	Esun3D ePA-CF	FDM	Verbundmaterial	3,05
14	Anycubic Craftsman apricot	LCD	Standardmaterial	3,00
15	Extrudr GreenTEC pro carbon	FDM	Verbundmaterial	2,55

Tabelle 6: Rangliste der Kartenmaterialien [eigene Darstellung]

Weitere Erkenntnisse aus dem Versuch sind, dass das Flex-Material von Prima Creator unter dem Einfluss des Flammstrahlens sehr weich wird. Außerdem haftet das Beschichtungsmaterial nicht an den Karten. Ein Materialauftrag war nicht zu messen oder optisch zu erkennen. Des Weiteren sind Materialien ermittelt worden, die diesem Versuch nicht standhalten konnten. Das Phrozen TR300, was als ein Material gilt, welches laut Hersteller hohen Temperaturen standhalten kann, wurde bei diesem Versuch zerstört. Die Extrudr GreenTEC und Extrudr Wood Materialien wurden ebenfalls zerstört. Die beiden Materialien ordnen sich im Bereich der Umweltfreundlichkeit ein. Grundsätzlich ließ sich daraus schließen, dass flexible Materialien am besten geeignet sind. Verbundmaterialien, umweltfreundliche Materialien und Standardmaterialien sind ebenfalls unter den besten 15. Interessant ist, dass temperaturbeständigere Materialien entweder zerstört oder sehr stark deformiert wurden. Insbesondere das Strahlen mit Korund wurde von diesen Materialien nicht gut standgehalten. Die Ergebnisse dieses Vorversuchs werden in einem Standzeitversuch anhand von Rohrmaskierungen wieder aufgenommen. Dem Standzeitversuch anhand der Rohrmaskierungen geht ein kurzer Versuch zur Findung einer optimalen Kantenkontur voraus. Hierbei werden unterschiedliche Geometrien miteinander verglichen. Ebenfalls anhand einer Rohrmaskierung werden Randkonturen mit einer 45° und 30°-Fase, sowie ein Überhang und eine im 90°-Winkel abschließende Kontur getestet. An der äußeren Kontur der Maskierung wird die Kante aufgrund der Temperatur und Kräfte beim Strahlen und Beschichten zunehmend zu einer Rundung geformt, weshalb hier bei der Konstruktion der Rohrmaskierungen direkt eine Rundung vorgesehen wird. Die finale Rohrmaskierung ist in Abbildung 10 dargestellt.

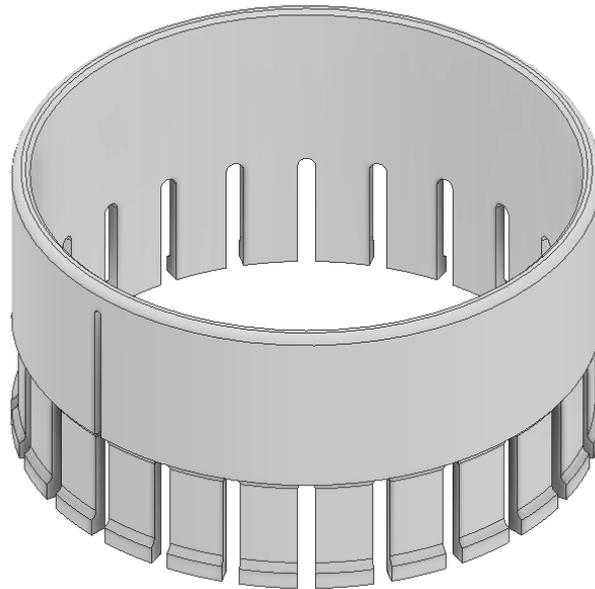


Abbildung 10: Rohrmaskierung Konstruktion [eigene Darstellung]

Für die Wandung der Maskierung wurde sich im Expertenteam auf eine höhere Dicke als beim Versuch mit den Kartenproben geeinigt. Die Wandung der Rohrmaskierungen beträgt aus fertigungstechnischen Gründen 2 mm.

Die Rohrmaskierungen wurden auf einem Stahlrohr mittels Rohrschelle fixiert wird. Sieh hierzu schematische Abbildung 11. Dabei stellt die Beschichtung des Rohres einen praxisnahen Einsatz dar, da ähnliche hülsenartige Bauteile bei der rhv-Technik beschichtet werden.

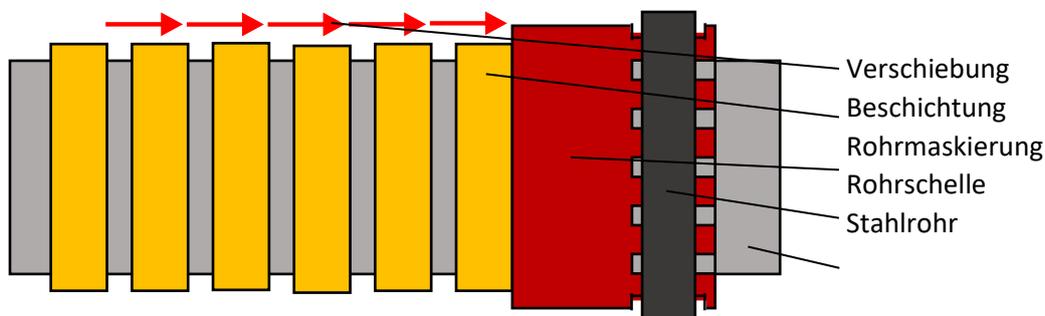


Abbildung 11: Standzeitversuch der Rohrmaskierungen, schematische Darstellung [eigene Darstellung]

Das Rohr und die Maskierungen wurden gestrahlt und beschichtet. Danach konnte die Kantenkontur beurteilt werden. Die Beurteilung erfolgt durch ein Punktesystem und Nutzwertanalyse aus AP1. Die Punkte ergeben sich wie folgt:

- **0 Punkte:** Die Kantenkontur ist sehr schlecht, das Werkstück wäre Ausschuss.
- **1 Punkt:** Die Kantenkontur ist schlecht, allerdings wäre das Werkstück kein Ausschuss.
- **2 Punkte:** Die Kantenkontur ist in Ordnung, jedoch sind einige Ungenauigkeiten erkennbar.
- **3 Punkte:** Die Kantenkontur ist gut, nur leichte Ungenauigkeiten sind erkennbar.
- **4 Punkte:** Die Kantenkontur ist sehr gut, keine Ungenauigkeit ist erkennbar.

Nach Beendigung des ersten Durchgangs, wurden die Maskierungen auf dem Rohr versetzt und der Vorgang erneut durchgeführt. Dadurch wurde bei jedem Beschichten eine neue Kantenkontur

gebildet und die mehrfache Verwendung der Maskierung simuliert. Der Materialauftrag spielt somit keine Rolle und beeinflusst den jeweils nächsten Durchlauf nicht. Der Versuch wurde so oft wiederholt, bis die Maskierung als untauglich bewertet wurde. Einziges Merkmal war hierbei die Kantenkontur, da davon ausgegangen werden kann, dass falls eine Maskierung bricht, oder sich die Geometrie drastisch verändert, die Kontur an der Strahlungsstelle nicht mehr tauglich ist.

Des Weiteren wurden die Rohrmaskierungen im Zuge dieser Versuchsreihe weiteren thermischen Beschichtungsverfahren zugeführt. Insbesondere das Lichtbogenspritzen und Plasmaspritzen stellten hier eine große Herausforderung dar, da die Temperaturen deutlich höher sind als beim Flamm-spritzverfahren (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Beschichtung der Rohrmaskierungen mit verschiedenen Beschichtungsverfahren

#### 4.5 AP 5: Recycling der Maskierungen

Beim Recycling bzw. bei der Müllverwertung werden Abfallprodukte wiederverwertet bzw. deren Ausgangsmaterialien werden zu Sekundärrohstoffen. Die so produzierten Stoffe werden als Recyc-lat/Rezyklat oder Regenerat bezeichnet.

##### 4.5.1 Kompostiersversuch zur Ermittlung der biologischen Abbaubarkeit verschiedener additiver Materialien

Es wurde ein Kompostiersversuch zur Ermittlung der biologischen Abbaubarkeit verschiedener additiver Materialien durchgeführt. Einige der Materialien werden als umweltfreundlich eingestuft, da diese biologisch abbaubar sind. Die biologische Abbaubarkeit ist unter anderem bei einem Material nach der DIN EN ISO 14855-1 beschrieben. Problem ist außerdem, dass die Materialien nur im Rohzustand, also nicht die gedruckten Bauteile, als biologisch abbaubar gekennzeichnet sind. Einige Harze für den LCD-Prozess werden laut Hersteller lediglich als „biologisch abbaubar“ [ANY22] gekennzeichnet, genauer spezifiziert wird dies allerdings nicht. Um Materialien nun praxisnah einer Kompostierung zuzuführen, sprich die biologische Abbaubarkeit bei einem kleinen und mittleren Unternehmen sinnvoll umsetzen zu können, wird ein Versuch durchgeführt, welcher alle Materialien im gedruckten Zustand berücksichtigt. Dem Versuch wurden alle bisher getesteten Materialien zugeführt, um eventuelle Abbaubarkeiten von Materialien, welche nicht explizit als solche gekennzeichnet sind ebenfalls zu betrachten. Die Materialien wurden in Form von Stäbchen additiv gefertigt und im Anschluss zur Ermittlung des Ausgangsgewichts gewogen. Neben dem Gewicht wird die optische Veränderung der Stäbchen ebenfalls in Form von Bildern festgehalten. Für einen besseren Vergleich zur Ausgangssituation wurden die Stäbchen doppelt hergestellt und aufbewahrt. Nach dem Wiegen der Stäbchen werden diese in ein Gefäß mit Kompost gesteckt. Siehe Versuchsaufbau Abbildung 13 und 14.



Abbildung 13: Gefäß für den Kompostierversuch und Kompostierstäbchen [eigene Darstellung]



Abbildung 14: Kompletter Kompostierversuchsaufbau [eigene Darstellung]

Durch die Folie wurde ein schnelles Austrocknen des Komposts verhindert. Der Versuchsaufbau wurde regelmäßig gegossen und die Kompostierstäbchen in einem Monatsintervall gewogen und fotografiert. Um Feuchtigkeitseinflüsse der Stäbchen durch die Wasserzufuhr zu verhindern, wurden die Stäbchen nach der Entnahme und Reinigung in einem Ofen unter 50 °C zwei Stunden lang getrocknet. Anschließend wurden diese gewogen. Da die DIN EN ISO 14855-1 im Versuchsablauf einen Zeitraum von sechs Monaten beschreibt, allerdings in einem Laborumfeld unter konstanter Wärmezufuhr, wurde für diesen Versuch ein Zeitraum von 12 Monaten veranschlagt.

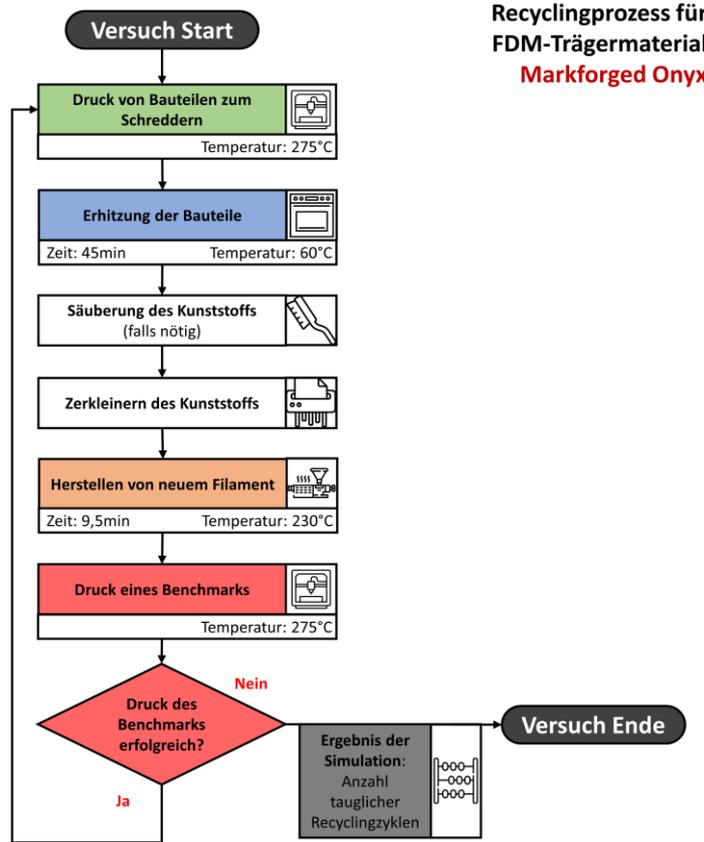
Eine biologische Abbaubarkeit konnte nach Beendigung des Versuchs, siehe hierzu Tabelle 7, nicht nachgewiesen werden.

Hersteller	Material	Anfangsgewicht in g	Gewichtsverlauf der Kompostierproben in g							Endgewicht in g	Veränderung in g
		12. Mai	13. Jun	12. Jul	12. Aug	12. Sep	12. Okt	12. Nov	12. Dez	12. Jan	12. Feb
PrimaCreator	Value UV Flex (flexibel)	<b>3,14</b>	3,25	3,19	3,18	3,18	3,19	3,18	3,17	<b>3,16</b>	<b>0,03</b>
Licreate	Flexible-X (schwarz, flexibel)	<b>2,94</b>	3,05	2,97	3,04	3,02	3,02	3,02	3,00	<b>2,98</b>	<b>0,03</b>
Anycubic	Plant based tough (schwarz)	<b>3,1</b>	3,15	3,14	3,15	3,14	3,15	3,14	3,15	<b>3,15</b>	<b>0,04</b>
Markforged	Onyx (schwarz)	<b>2,38</b>	2,44	2,37	2,38	2,39	2,38	2,37	2,38	<b>2,37</b>	<b>-0,01</b>
Extrudr	GreenTecPro (weiss)	<b>3,98</b>	4,00	3,99	3,99	3,98	4,01	4,00	3,99	<b>4,01</b>	<b>0,00</b>
Anycubic	Eco UV (durchsichtig)	<b>3,73</b>	3,78	3,77	3,79	3,78	3,80	3,81	3,80	<b>3,72</b>	<b>0,04</b>
Anycubic	Craftsman (weiss)	<b>3,28</b>	3,33	3,32	3,34	3,33	3,34	3,33	3,33	<b>3,35</b>	<b>0,04</b>
Stratasys	ABS P430 (orange)	<b>3,07</b>	3,05	3,05	3,08	3,06	3,07	3,07	3,08	<b>3,08</b>	<b>-0,02</b>
Anycubic	Craftsman (Aprikose)	<b>1,98</b>	2,01	2,00	2,00	2,01	1,99	2,02	2,00	<b>1,98</b>	<b>0,01</b>
Extrudr	GreenTecPro carbon (grau)	<b>3,97</b>	3,95	3,95	3,95	3,94	3,95	3,94	3,95	<b>3,96</b>	<b>-0,03</b>
Extrudr	DuraPro ASA (weiss)	<b>3,2</b>	3,20	3,18	3,17	3,17	3,17	3,16	3,15	<b>3,18</b>	<b>-0,05</b>
Extrudr	Extrudr Pearl (weiss)	<b>3,48</b>	3,48	3,49	3,50	3,49	3,50	3,48	3,40	<b>3,52</b>	<b>-0,08</b>
Material4Print	PETG transparent (gelb)	<b>3,63</b>	3,63	3,63	3,64	3,62	3,63	3,61	3,60	<b>3,64</b>	<b>-0,03</b>
Igus	Iglidur J260 (gelblich)	<b>3,02</b>	3,02	3,01	3,01	3,00	3,01	3,00	3,01	<b>3,02</b>	<b>-0,02</b>
Phrozen	TR300 (grau)	<b>3,32</b>	3,41	3,34	3,40	3,41	3,35	3,33	3,37	<b>3,34</b>	<b>0,01</b>
Extrudr	Extrudr Wood (braun)	<b>3,44</b>	3,51	3,51	3,55	3,53	3,60	3,58	3,59	<b>3,60</b>	<b>0,07</b>
Material4Print	PLA (gelb)	<b>3,51</b>	3,54	3,51	3,52	3,52	3,51	3,53	3,51	<b>3,51</b>	<b>0,00</b>
Elegoo	Standard (grau)	<b>3,68</b>	3,75	3,75	3,75	3,74	3,73	3,75	3,76	<b>3,75</b>	<b>0,05</b>

Tabelle 7: Erfassung des biologischen Abbaus

#### 4.5.2 Recyclingversuch additiver Materialien unter Simulation des thermischen Beschichtungsprozesses

Hier wird ein Recyclingversuch der additiven Materialien dargestellt. Nach intensiver Literaturrecherche gibt es für die Harze bzw. gedruckten Duroplastischen Materialien derzeit keine Möglichkeit, diese werkstofflich zu Recyceln. Der Versuch zielt auf das werkstoffliche Recycling von FDM-Materialien ab. Insbesondere hätte dies einen sehr positiven Einfluss auf die Umweltfreundlichkeit von Filamenten. Da im Standzeitversuch die im FDM-Verfahren gedruckten Maskierungen wesentlich schlechter abgeschnitten haben als die Harze, gab es keinen Sinn die Filamente als Primärmaterial auf ihre Recyclingfähigkeit zu testen. Allerdings wurde der Ansatz verfolgt, recycelbares, umweltfreundliches Material als Trägermaterial und die technisch besser geeigneten Harze als Oberflächenmaterial zu verwenden. Hierfür war es notwendig die Recyclingfähigkeit der Materialien zu erforschen. Der Versuchsablauf stellte sich wie in Abbildung 15 beschreiben dar. Zunächst wurden mit den neuen Rohmaterialien Bauteile gedruckt, welche sich zum Schreddern eignen. Hierbei wurde eine simple Quadergeometrie verwendet und die Bauteile mit 100% Füllung gedruckt. Nach dem Druck der Bauteile wurden diese 45min auf 60°C erhitzt. Dies diente zur Simulation der Erhitzung des Werkstücks an der Auflagefläche. Durch den Versuch der Rohrmaskierung wurde festgestellt, dass PLA als Werkstoff mit der niedrigsten Glasübergangstemperatur von ca. 60°C noch Verformungen aufweist. Deshalb muss die Temperatur am zu beschichtenden Bauteil, wenn dieses nicht der direkten Hitze der Flamme ausgesetzt ist unter 60°C liegen. Die Zeit, in der diese Temperatur veranschlagt wurde, ergibt sich ebenfalls aus dem Standzeitversuch. Der aktuelle Worstcase belief sich im Plasma-Spritzverfahren auf 45min. Im Anschluss folgte eine optionale Säuberung der Bauteile und die Zerkleinerung in einem Schredder. Es handelt sich hierbei um den Schredder Shr3dit von 3Devo, welcher über zwei Stufen die Bauteile zu sehr feinem Mahlgut verarbeitet. Im Anschluss wurde mit dem Filament Extruder, ebenfalls von dem Hersteller 3Devo, das Mahlgut zu Filament extrudiert. Hierzu wurden verschiedene Temperaturzonen eingestellt. Die Durchlaufzeit betrug bei einer typischen Extrusion 9,5min. Die Temperaturen sind am höchsten Punkt bei beiden Materialien 230°C. Es wurden Voreinstellungen für die Temperaturen verwendet, allerdings wurden diese, je nach Fließverhalten, angepasst. Ebenfalls hat sich herausgestellt, dass das Material bei mehrfachem Recyceln niedrigere Temperaturen benötigt, da sich sonst kein konstanter Filament Durchmesser einstellt Nach Herstellung des Filaments wurde ein Benchmark gedruckt.



- Simulation Fertigungsprozess
- Simulation Beschichtungsprozess (Temperatur am Trägermaterial)
- Herstellen neues Filaments
- Kontrollprozess

Abbildung 15: Versuchsablauf Recyclingprozess

Hierbei kam der sehr bekannte 3DBenchy (Abbildung 16) zum Einsatz. Dieser ist insbesondere bei vielen FDM-Hobbyanwendern sehr beliebt, da sehr viele Aspekte eines qualitativ hochwertigen Drucks getestet werden. Es werden unter Anderem Löcher, Überhänge und Flächen bereitgestellt, welche einem Ideal entsprechen sollen.

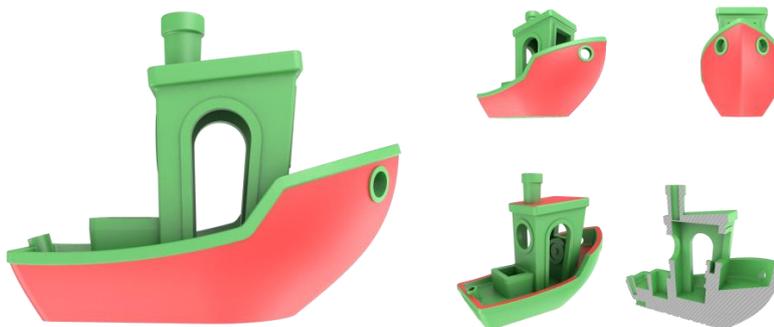


Abbildung 16: 3DBenchy [#3D15]

Anhand dieses Benchmarks wurde analysiert, ob der Druck erfolgreich ist. Dabei spielt es keine Rolle wie die einzelnen Eigenschaften gedruckt wurden, lediglich ob ein Druck möglich war und vollendet werden konnte. Die Details des 3DBenchy geben im Nachgang Aufschluss über die Änderung des Materials nach diversen Recyclingzyklen. Falls der 3DBenchy erfolgreich gedruckt wurde, wurde der gesamte Vorgang wiederholt. Sollte der Druck des Benchmarks fehlgeschlagen sein, wurde der Versuch beendet und die Anzahl tauglicher Recyclingzyklen gezählt.

Markforged Onyx konnte nur 1-mal recycelt werden, siehe Abbildung 17 und 18.



Abbildung 17: 3DBenchy Onyx original [eigene Darstellung]



Abbildung 18: 3DBenchy Onyx einmal recycelt [eigene Darstellung]

Der Benchmark, welcher nach dem ersten Mal recyceln, gedruckt wurde, hatte erhöhte Fadenbildung. Der Druck von Überhängen und Brücken funktionierte allerdings gut. Ebenfalls sind die gedruckten Flächen gleich dem Originalmaterial. Beim Versuch das Material dem zweiten Recyclingzyklus zuzuführen, brach das Material beim Extrudieren kurz nach der Extruder Düse aufgrund von Werkstoffversprödung ab.

Beim GreenTEC Pro von Extruder ließ sich der Recyclingprozess zweimal wiederholen, siehe Abbildung 19, 20 und 21.



Abbildung 19: 3DBenchy GreenTEC Pro original [eigene Darstellung]



Abbildung 20: 3DBenchy GreenTEC Pro einmal recycelt [eigene Darstellung]



Abbildung 21: 3DBenchy GreenTEC Pro zweimal recycelt [eigene Darstellung]

Die Qualität des 3DBenchy nahm leicht ab, jedoch wurden Überhänge und Brücken gut gedruckt, lediglich die Flächen unsauberer dargestellt. Eine größere Fadenbildung wie beim Onyx-Material fand nicht statt. Es waren Verunreinigungen im Material vorhanden, die auf Rückstände in der Extrudereinheit zurückzuführen waren. Beim Versuch das GreenTEC Pro ein drittes Mal zu recyceln, brach das Filament nach der Extrudierprozess.

Zur Erfassung der Maßhaltigkeit dem mit Recyclat gedruckten Benchys wurden die Bauteile gescannt und vermessen. Siehe hierzu Anhang 3. Abbildung 22 zeigt die Maßabweichung der übereinander gelegten Testbauteile.

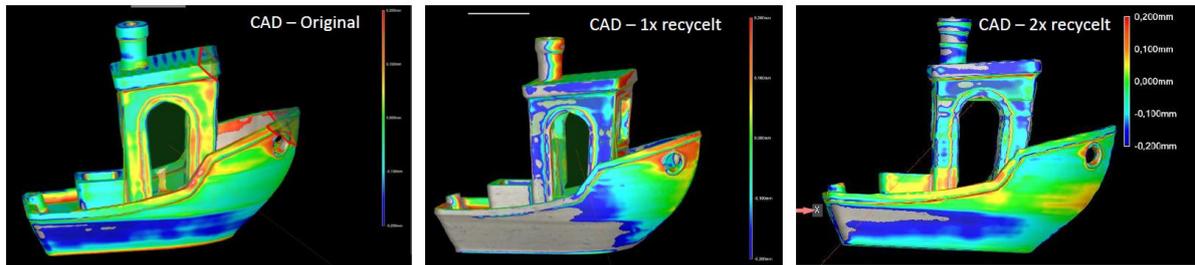


Abbildung 22: Maßabweichung des mit Recyclat gedruckten Modells.

Vergleicht man die beiden Materialien hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit ist das GreenTEC Pro deutlich der Sieger. Betrachtet man die hohen Kosten für eine Rolle Onyx und die Tatsache, dass sich GreenTEC Pro einmal mehr recyceln lässt, ist für den Zweck des Trägermaterials GreenTEC Pro zu bevorzugen. Dennoch gilt es hier auch die Kosten der Maschinen zu berücksichtigen. Schredder und Extruder sind sehr teuer und es lassen sich etliche Rollen Filament für diesen Preis erwerben. Ein ökonomischer Vorteil und somit Ansporn für eine kleines oder mittelständisches Unternehmen bestehen also zum aktuellen Zeitpunkt nicht.

#### 4.6 AP 6: Konstruktion eines optimierten Modells aus verschiedenen Materialien und materialeffizientem Aufbau & AP 7: Drucken serientauglicher Prototypen

In diesem Abschnitt wird das Ergebnis des Entwicklungsprozesses dargestellt, bzw. erläutert wie der neu erforschte Entwicklungsprozess für die Maskierungen aussieht. Dabei wird der Prozess der Entwicklung dargestellt, welcher zunächst einen Prototyp einer Maskierung vorsieht. Es wurde sich im Expertenteam auf zwei besonders komplexe Bauteile verständigt, welche beide Besonderheiten aufweisen, siehe hierzu Abbildung 23 und 24.

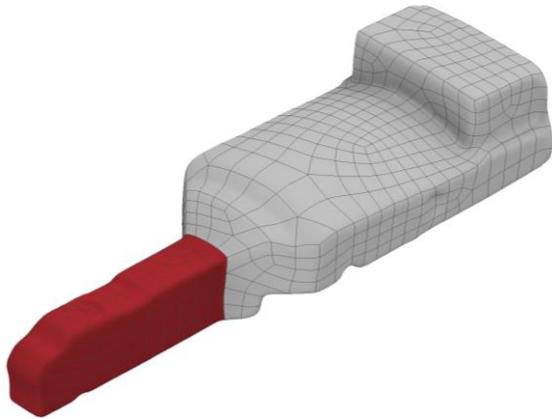


Abbildung 23: side core small CAD-Modell [eigene Darstellung]

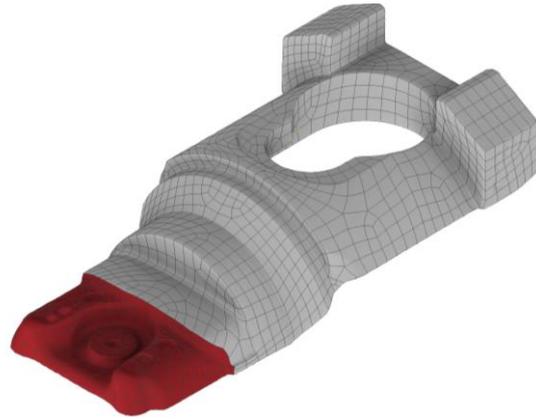


Abbildung 24: side core big CAD-Modell [eigene Darstellung]

Beide Beschichtungswerkstücke sind Gusswerkzeuge, welche größere Freiformflächen besitzen. Die Beschichtungsbereiche sind in roter Farbe markiert. Links ist der *side core big* dargestellt. Dieser hat entlang einer Kante die Trennung zwischen Beschichtungsbereich und nicht zu beschichtendem Bereich. Eine große Herausforderung birgt allerdings die Freiformfläche entlang der Kante. Bei dem *side core small* ist die Trennung der Bereiche eher fließend. Deshalb ist es wichtig, die Kante im CAD-Programm genau zu definieren. Die erste Konstruktion des *side core small* sieht eine Maskierungshülle aus *Resione F80* vor, welche in einem Stück, das komplette Bauteil maskiert. Sieh hierzu Abbildung 25.

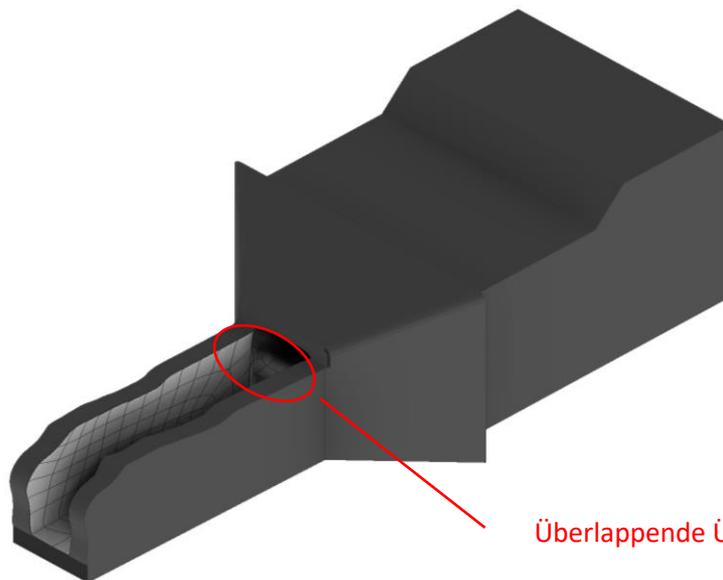


Abbildung 25: Konstruierte Maskierungshülle [eigene Darstellung]

Die Maskierung wurde erstellt, indem der 3D-Scan um 4mm aufgedickt wurde. Im Anschluss wurde der Beschichtungsbereich durch Subtraktion des Volumenkörpers über diesem, freigelegt. An der Beschichtungsfläche besteht zum Großteil eine stirnseitige Anlage der Maskierung. Außerdem wurde eine größere Überlappung konstruiert, um die Partikel entlang der Maskierung an der Hartschale vorbeizuführen. Die Hartschalen, zu sehen in Abbildung 26 (Verbund der Maskierung aus weichem und hartem Material), welche die Schnittstelle zur maschinellen Aufnahme sind, wurden zunächst angepasst an die Hülle konstruiert.

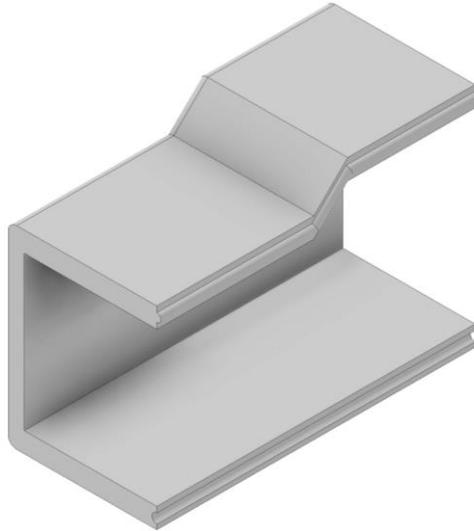


Abbildung 26: Konstruierte Hartschale [eigene Darstellung]

Eine Parametrisierung bei der Konstruktion fand zunächst nicht statt. Auch die Formschlüsse, welche nötig sind, damit die Hartschalen passgenau aufeinandersitzen und etwaige Partikel am Eindringen hindern, wurden manuell konstruiert. Die vollständige Maskierung, dargestellt in Abbildung 27 besteht aus der Maskierungshülle, zwei Hartschalen und einer Stabilisierungsklammer.

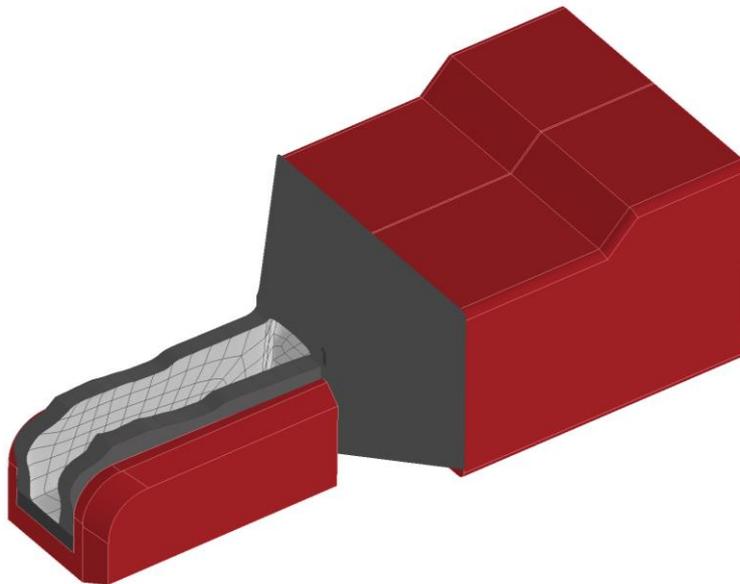


Abbildung 27: Erster Konstruktionsentwurf der vollständigen Maskierung [eigene Darstellung]

Die Maskierungshülle aus dem gummiartigen *Resione F80* kann in dieser Länge kaum gefertigt werden. Die Orientierung auf der Druckplattform ist sehr schwierig und die Höhe übersteigt 100mm Höhe, bei denen das Material sich noch in der gewünschten Qualität fertigen lässt. Folglich ist die hier dargestellte Hülle zwar machbar, aber nicht prozesssicher. Des Weiteren ist die Maskierung nicht parametrisiert erstellt, weshalb die Konstruktion unverhältnismäßig lange dauert. Für die Konstruktion der gesamten Maskierung können ca. 2 Stunden bei einem geübten Anwender veranschlagt werden. Die erste Konstruktion der Maskierungen ist wichtig, um den Prozess zu verstehen. Anhand dieser wurde dann die parametrisierte Konstruktion durchgeführt und der Prozess insgesamt strukturiert.

#### 4.6.1 Finaler Konstruktionsprozess

Hiermit wird eine Standardisierung für den erforschten Prozess gegeben, anhand der die Konstruktion und Durchführung des neuen Beschichtungsprozesses vorgegeben und vereinfacht wird. Die Darstellung erfolgt dabei in Flussdiagrammen. Parallelogramme stellen CAD-Dateien im Eingang oder Ausgang dar, Rechtecke die Arbeitsschritte und Rauten Bedingungen. Schritt eins ist die Nachkonstruktion des Volumenkörpers anhand des 3D-Scans. Dieser wird mit einem 4 mm Aufmaß versehen und einer Wandung von mindestens 5 mm. Im zweiten Schritt werden die Bauteile ineinander ausgerichtet und subtrahiert. Es entsteht eine volle Maskierung und eine hohle Maskierung, jeweils als IPT-Datei. Im Anschluss wird in Schritt drei die Kantengeometrie der Trennkante in eine 2D-Skizze projiziert und der Beschichtungsbereich abgezogen. Sind nicht alle Beschichtungsbereiche sauber getrennt, wird eine 3D-Skizze erstellt und der Beschichtungsbereich freigelegt. Ansonsten werden nun die Maskierungsbauteile aufgeteilt in drei Teile. Ein kantennahes Bauteil und zwei Schutzteile für die Hartschalen. Den Output stellen diese drei Dateien dar. Zunächst liegen diese im IPT-Format vor, müssen jedoch für die Fertigung als STL-Datei exportiert werden.

Die Hartschalen werden abhängig von der Schnittstelle, bspw. zur Spritzbank, konstruiert. Wird die Maskierung im Schraubstock aufgenommen, so wird zunächst anhand einer vorgefertigten, parametrisierten CAD-Konstruktion die Änderung des vorgefertigten Schraubstock Bauteils mittels einer Excel Tabelle vorgenommen. Der volle Maskierungsgrundkörper wird anschließend von den beiden erstellten parametrisierten Volumenkörper abgezogen. Als Output erhält man beide Hartschalen für die Aufnahme im Schraubstock. Wird die Maskierung hingegen in einem Dreibackenfutter aufgenommen, muss der Prozess mit der vorgefertigten, parametrisierten Datei für Hartschalen als Aufnahme im Dreibackenfutter ablaufen. Abgesehen davon sind die Schritte gleich. Der Output hierbei sind die zwei Hartschalen für eine Aufnahme im Dreibackenfutter. Falls Das Bauteil weder im Schraubstock, einer anderen parallel spannenden Vorrichtung oder einem Dreibackenfutter aufgenommen wird, so sind keine Hartschalen nötig. Dies kann der Fall sein, wenn z.B. Teile nur auf einen Tisch abgelegt und auf diesem beschichtet werden. Problematisch ist hierbei allerdings, dass die Hartschalen zusätzlich vor eindringenden Partikeln schützen, was bei einer Nutzung von lediglich der gummiartigen Maskierungshülle nicht gänzlich gegeben sein muss.

Ein Ablaufdiagramm zum Konstruktionsprozess, sowie des Zeitbedarfs sind in Anhang 4 dargestellt.

In Abbildung 28 ist die finale Konstruktion der Maskierung für den *side core small* dargestellt. Die Besonderheiten hierbei ist der lange, freistehende Steg. Diese muss wie bereits beschrieben durch eine Klammer gestützt werden.

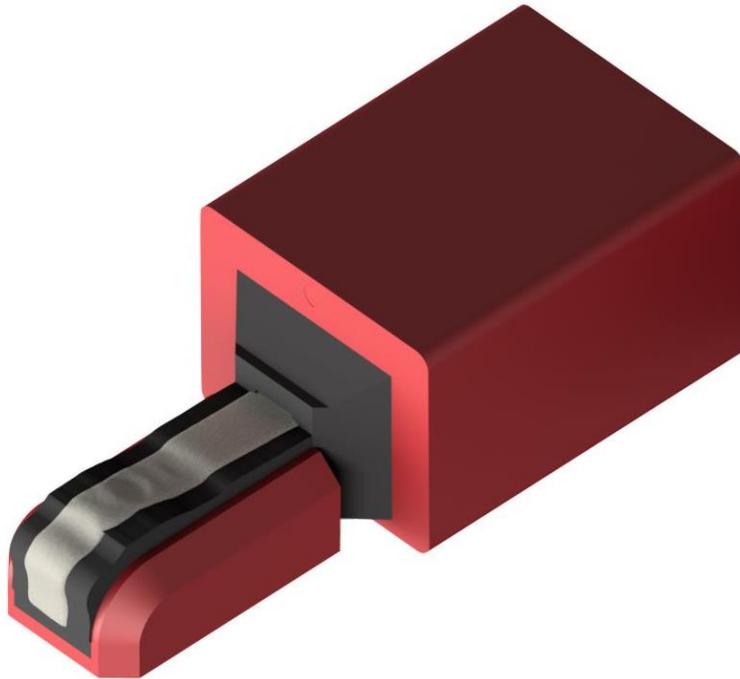


Abbildung 28: Rendering der finalen Maskierung für den side core small [eigene Darstellung]

Beim *side core big* (Abbildung 29) sind die Hartschalen, aufgrund der Größe des Beschichtungswerkstücks recht groß. Die Spannmöglichkeiten dieses Quaders haben sich allerdings als äußerst nützlich erwiesen. Außerdem liegt unter dem Beschichtungsbereich eine recht große Fläche der gummiartigen Maskierungshülle nur an. Diese kann bei Beschichtung wegklappen. Dadurch ist die Maskierung an den unteren Flächen plan und kann somit z.B. auf einen Tisch aufgelegt und dort gespannt werden.

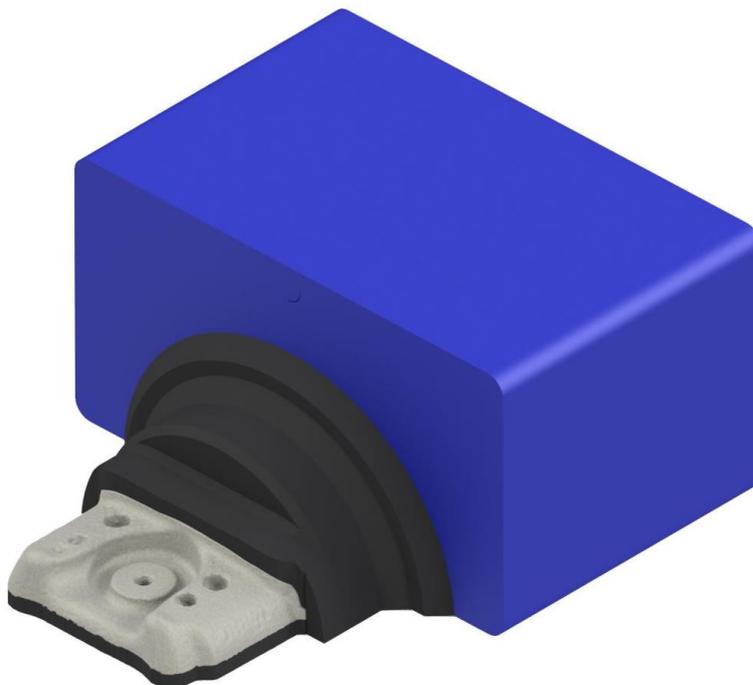


Abbildung 29: Rendering der finalen Maskierung für den side core big [eigene Darstellung]

In Abbildung 30 wird der *side core small* mit den Hartschalen für eine Aufnahme im Dreibackenfutter dargestellt. In der Realität wird dieser im Schraubstock gespannt, allerdings besteht bei allen Bauteilen durch die entwickelte standardisierte Konstruktion die Möglichkeit, Aufnahmen für ein Dreibackenfutter zu erstellen.

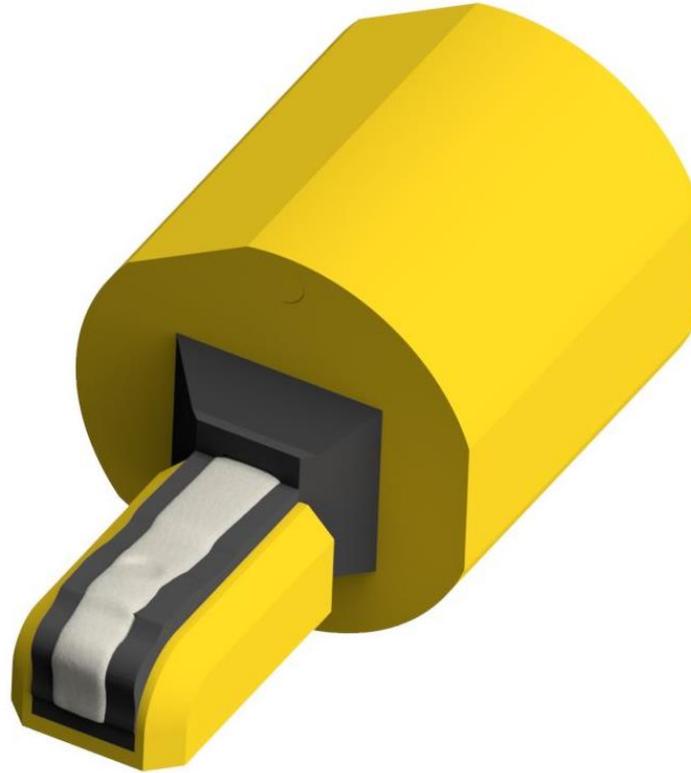


Abbildung 30: Rendering der finalen Maskierung für den *side core small* [eigene Darstellung]

#### 4.7 AP 8: Tests zum Verhalten der Maskierungen beim Spritz-/ Beschichtungsprozess im Fertigungsbetrieb & AP 9: Redesign

In AP 8 wurden die Forschungsergebnisse zusammengeführt und im realen Fertigungsprozess weiter erprobt. In Abbildung 31 lässt sich die bewusst nicht korrekte Fixierung der maskierten Beschichtungsbauteile erkennen. Diese werden seitlich durch das Spannmittel auf einer Zylinderförmigen Fläche gespannt. Unten liegen beide Bauteile nur zum Teil auf der Plattform auf. Beide Beschichtungsbauteile werden im HVOF-Verfahren beschichtet. Dadurch ergibt sich eine hohe Scherspannung, insbesondere bei der roten Maskierung. Diese wird nun näher betrachtet und im Folgenden wird durch eine Simulation dargestellt, wie sich die Maskierung unter Last verhält.



Abbildung 31: Einspannung im Versuch zur mechanischen Belastbarkeit [eigene Darstellung]

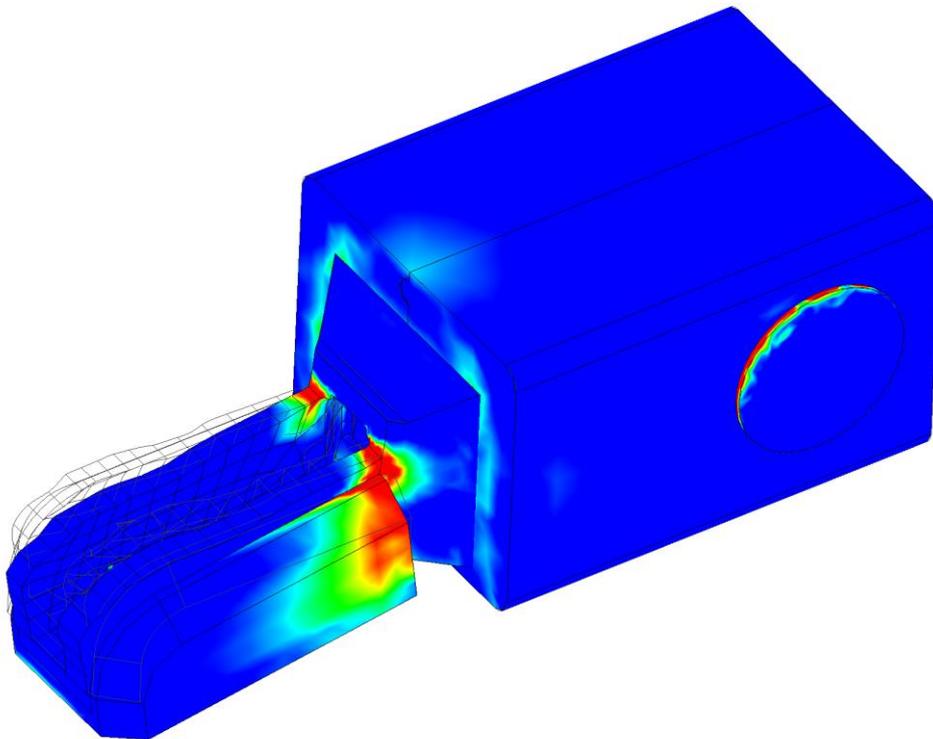


Abbildung 32: Simulation der mechanischen Belastung bei side core small [eigene Darstellung]

Entscheiden in der Simulation der mechanischen strömungstechnischen Belastbarkeit (Abbildung 32) ist es zu erkennen, wo die Maskierung reißen kann. Konkrete Spannungen sind hierbei nicht relevant. Der praktische Versuch (Abbildung 33) bestätigt den Bruch der Maskierung.



Abbildung 33: Maskierungsbauteile nach dem Versuch zur mechanischen Belastung [eigene Darstellung]

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Maskierungsbauteile, insbesondere die gummiartige Maskierungshülle im beschichtungsnahen Bereich exakt an dem in der Simulation dargestellten Punkt versagt hat. Die zusätzlichen Risse, bilden sich nach dem Haupttriss und sind somit eine Folge dessen. Ebenfalls gilt es zu beachten, dass die Maskierungshüllen unterhalb der Hartschalen unbeschädigt sind. Die Hartschalen sind unter der thermischen Belastung etwas angeschmolzen, können allerdings wiederverwendet werden. Wie bereits vermutet, kann man sagen, dass Scherspannungen für die Maskierungen aus *Resione F80* zu vermeiden sind. Bei der Maskierung für den *side core big*, zeigt sich ein ähnliches Muster.

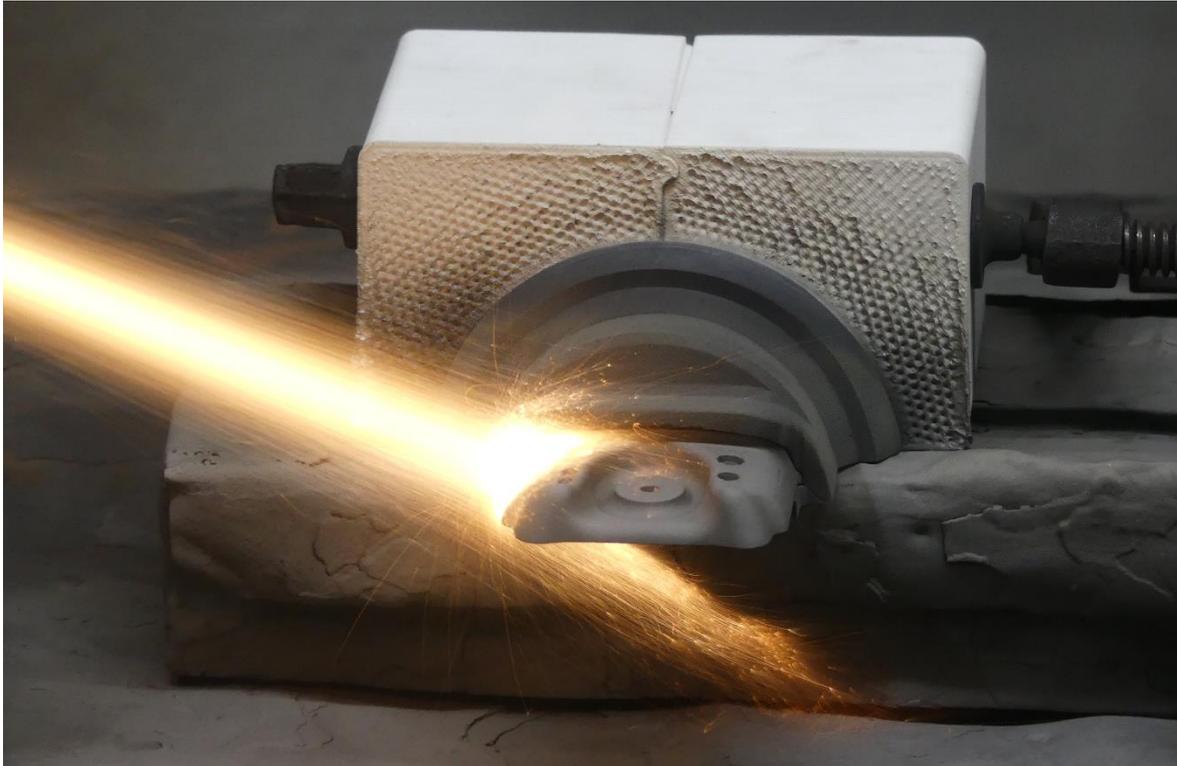


Abbildung 34: Side core big beim finalen Beschichtungsversuch [eigene Darstellung]

Wie man in Abbildung 34 erkennen kann, wird auch hier ein Teil der gummiartigen Maskierungshülle bereits nach den ersten Durchläufen abgeschert. Die Belastung für diesen Bereich ist gerade bei der Strahlrichtung, wie sie in der Abbildung dargestellt ist sehr hoch. Die Parameter des Beschichtungsprozesses sind bei beiden Bauteilen gleich.



Abbildung 35: Side core big mit Maskierung nach dem Beschichtungsprozess [eigene Darstellung]

Wie in Abbildung 3535 deutlich zu erkennen ist, fehlt der untere Teil der Maskierungshülle. Auch im beschichtungsnahen Bereich hat sich ein Teil der Maskierung herausgelöst. Das fehlende Teil der Maskierungshülle im beschichtungsnahen Bereich, erklärt sich durch die Handhabung. Das Material

versprödet etwas, weshalb beim Montieren Vorsicht geboten ist. Bei der Demontage ist dieses halbrunde Teil herausgebrochen. Während des Beschichtungsprozesses wird die Maskierung an dieser Stelle nicht beschädigt. Die Hartschalen sind gleich wie beim *side core small* etwas angeschmolzen, können jedoch wiederverwendet werden. Die innere Seite und die restlichen Maskierungen sind unbeschadet. Das Hauptverschleißteil ist also, wie vorgesehen, die beschichtungsnahe gummiartige Maskierungshülle. Die Maskierungshüllen halten dem HVOF-Verfahren beim *side core small* zweimal und beim *side core big* einmal stand. Dabei lag das Problem beim *side core big* bei dem in der Montage ausgerissenen Teil der Maskierung.

#### 4.8 Zusammenfassung

Anhand des Versuchs zur mechanischen Belastbarkeit, haben sich final wichtige Erkenntnisse für die Konstruktion, aber auch den Gebrauch der Maskierungen ergeben. Unter hoher mechanischer Belastung neigen die mit dem *Resione F80* gefertigten Maskierungen zu reißen. Dies führt dazu, dass im Konstruktionsprozess besonders auf eine Entschärfung von harten Kanten geachtet werden sollte. Die Kräfte, sollten durch Konstruktion von Fasen und Radien besser verteilt werden. Problem hierbei ist, dass gerade bei der Trennkante zwischen Beschichtungsbereich und nicht zu beschichtendem Bereich, die Kontur bereits durch das Beschichtungsbauteil vorgegeben ist. Dadurch können harte Kanten in diesem Bereich trotzdem zum Riss führen. Liegt ein solches Bauteil vor, kann es sein, dass die Maskierung weniger Beschichtungsdurchgängen standhält, weshalb im Vorfeld mehr gefertigt werden müssen. Trotzdem ist die Kantenkontur bei Verwendung der gummiartigen Maskierungshüllen sehr gut und kann als gleichwertig oder besser als das Abkleben mit Klebeband eingestuft werden. Die Probleme des Einreißen bei harten Kanten, besteht auch beim Klebeband, weshalb es im Vergleich kein Nachteil für die additiv gefertigten Maskierungen darstellt. Im Gegenteil bieten additiv gefertigte Maskierungen eine höhere Präzision und sind maßlich passend. In Abbildung 36736 sieht man einen abgeklebten *side core big*, wie er im aktuellen Prozess für das Strahlen und Beschichten vorbereitet wird. Man erkennt hier deutlich die Grenzen des Abklebens mit Klebeband. Die Konturen müssen mittels eines Messers nachgeschnitten werden und sind dementsprechend ungenau und einer hohen Schwankung unterliegend.



Abbildung 367: Maskierter *side core big* mit Klebeband [eigene Darstellung]

Expliziert die Qualität der Kantenkontur, siehe Abbildung 37 ist mit 3D gedruckter Maskierung deutlich höher.



Abbildung 37: Hohe Qualität der Beschichtung

Durch aller bisher geleisteten Forschungen, kann der neue Maskierungsprozess für das Lichtbogen- und das Plasma-Verfahren eingesetzt werden. Die Grenze bilden hier noch energieintensivere Verfahren wie das Hochgeschwindigkeitsspritz-Verfahren, welches jedoch im Versuch zur mechanischen Belastbarkeit untersucht wird. Für alle Verfahren, die bei einer geringeren Temperatur in Verbindung mit einer geringeren Geschwindigkeit der Partikel ablaufen, ist davon auszugehen, dass der neue Maskierungsprozess für diese ohne Einschränkung einsetzbar ist. Durch den Vorversuch kann der Prozess als validiert angesehen werden, da dieser den Beschichtungsprozess durchlaufen hat.

Die finale Bewertung der Maskierung, wie sie in Abbildung 38 im Materialverbund dargestellt ist, anhand der zu Beginn des Projektes erarbeiteten Nutzwertanalyse zeigt Tabelle 8.



Abbildung 38: Finale Maskierung als Materialverbund aus weichem Material innen und Hartschale außen

Nutzwertanalyse zur Ermittlung der technisch geeignetsten Materialien für den thermischen Beschichtungsprozess				
Kriterium/ Zielvariable	Erläuterung Nutzen	Gewicht	Material 1	
			F80	
			Nutzen M1	Wirkung M1
<b>Abschätzung Standzeit [mm]</b>	über 0,2mm; 0,16mm; 0,12mm; 0,08mm; unter 0,04mm = 0; 1; 2; 3; 4 Punkte	30%	4	1,2
<b>Kantenkontur [starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen]</b>	[starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen] = 0 ... 4 Punkte	35%	4	1,4
<b>Formstabilität [starke Verformung ... keine Verformung]</b>	[starke Verformung ... keine Verformung] = 0 ... 4 Punkte	15%	4	0,6
<b>Geometrie der Oberfläche [starke Änderung ... keine Änderung]</b>	[starke Änderung ... keine Änderung] = 0 ... 4 Punkte	10%	4	0,4
<b>Temperaturbeständigkeit [starke Verbrennungen ... starke Verbrennungen]</b>	[starke Verbrennungen ... starke Verbrennungen] = 0 ... 4 Punkte	10%	3	0,3
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>3,9</b>	

Tabelle 8: Nutzwertanalyse der finalen Maskierung

#### 4.8.1 Ökologische Betrachtung

Die Ergebnisse der ökologischen Betrachtung sprechen nicht für den Einsatz der Maskierungen in der aktuellen Form. Hierbei muss betrachtet werden, dass zu Beginn des Forschungsprojekts von einer wesentlich höheren Wiederverwendung der Maskierungen ausgegangen wurde. Der Vorversuch hat jedoch gezeigt, dass im Mittel 12 Wiederverwendungen bei den beschichtungsnahe Maskierungshüllen realistisch sind. Transportemissionen können hierbei vernachlässigt werden, da die Herstellung der Maskierungen den Großteil an Emissionen darstellt. Außerdem wird bei der Betrachtung vom aktuellen Strommix in Deutschland ausgegangen. Hierbei gibt es Unterschiede bei den jeweiligen Unternehmen. Stellt ein Unternehmen eigenen Strom her, z.B. durch eine Photovoltaikanlage und deckt somit den Verbrauch komplett ab, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Herstellung minimiert werden. Ausgehend von einer einmaligen Herstellung der Hartschalen, Klammer und gummiartigen Maskierungshüllen, die die Hartschalen schützen, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie Abbildung 39 zeigt, dargestellt werden.

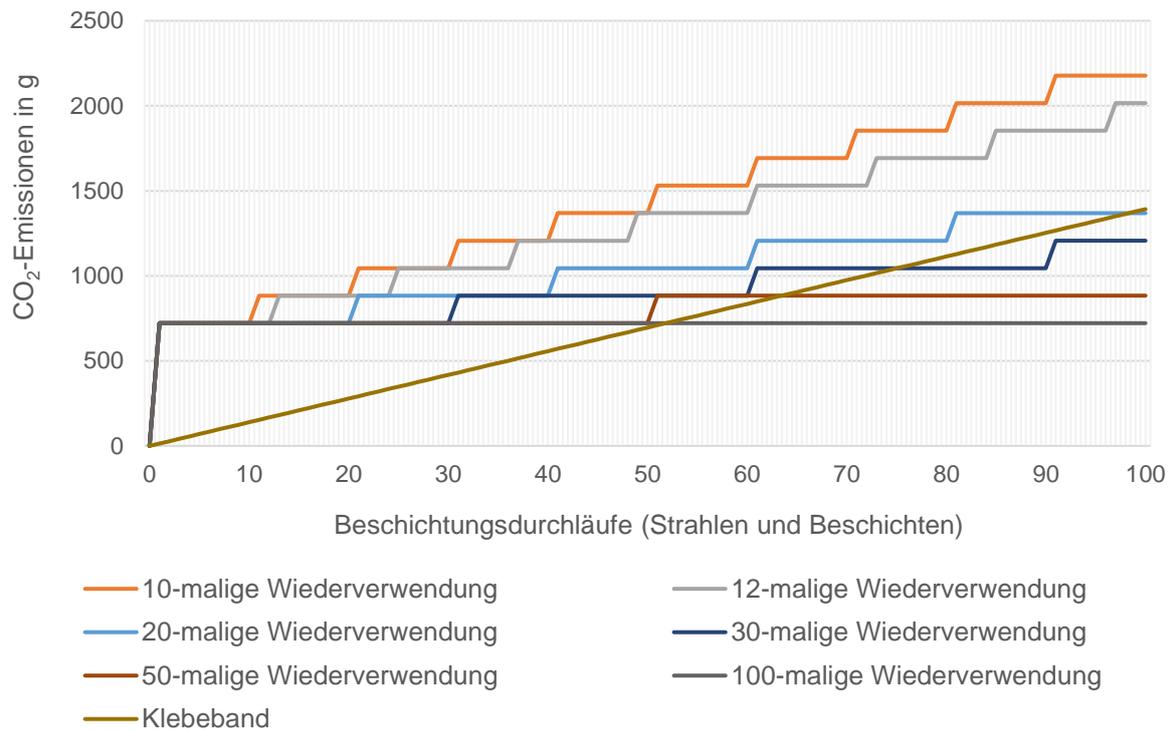
CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Beschichtungsdurchläufe beim side core small

Abbildung 89: Diagramm CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Beschichtungsdurchläufe beim side core small [eigene Darstellung]

Der Break-even-Point, an der die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Klebebands die der additiv gefertigten Maskierungen gleich sind, liegt mit den aktuellen Verfahren mit 12-maliger Wiederverwendung außerhalb des Bereichs von 100 Beschichtungsdurchläufe. Dies gilt zunächst für den *side core small*, kann jedoch im groben verallgemeinert werden, da das Verhältnis zwischen Klebeband und Harzen bzw. Filamenten sehr ähnlich ist. Bei 20-maliger Wiederverwendung liegt der Punkt, an dem die additiv gefertigte Maskierung weniger CO<sub>2</sub> emittiert, bei 99 Beschichtungsdurchläufen. Als ökologisch sinnvoll könnte man den Prozess betrachten, wenn die Maskierungen mindestens eine 50-malige Wiederverwendung erreichen. Dies ist mit den aktuellen Materialien allerdings nicht möglich. Die Entwicklung neuer Materialien, insbesondere Harze, schreitet allerdings mit großen Schritten voran. Neue Materialien, die eine ähnliche Hitzeresistenz besitzen, allerdings weniger leicht reißen, könnten hier die Lösung sein. Der Hauptfaktor für die CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Stromverbrauch der 3D-Drucker. Gerade bei den FDM-Druckern ist das beheizte Druckbett Hauptstromverbraucher. Falls hier ein Material oder ein Prozess gefunden wird, der bei gleichen oder ähnlichen Materialien ohne beheiztes Druckbett auskommt, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich vermindert werden. Im Bereich der MSLA-Drucker ist der Stromverbrauch abhängig von der Größe des Druckbereichs. Da dieser ständig komplett belichtet wird und lediglich Teile verdunkelt, kann durch einen kleineren Druckbereich der Stromverbrauch minimiert werden. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass so viele Bauteile wie möglich auf eine Plattform passen. Im hier dargestellten Prozess wurde der Druckbereich des MSLA-Druckers komplett ausgenutzt. Außerdem muss man bei der Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bedenken, dass die komplette Herstellung der Rohstoffe nicht dargestellt werden kann. Hierbei können sich diese allerdings deutlich unterscheiden. Auch die zur Herstellung benötigten Maschinen, Betriebsmittel und Hilfsmittel sind nicht beachtet. Die Hersteller sind nicht verpflichtet diese Werte zu ermitteln. Eine ganzheitliche Betrachtung wäre folglich besser, ist allerdings nicht möglich. Die Entsorgung der Materialien spielt bei der Ökologischen Betrachtung auch eine Rolle. Im Vergleich zu Klebebändern müssen die gummiartigen Maskierungshüllen auch entsorgt und höchstwahrscheinlich

einer Müllverbrennung zugeführt werden, allerdings sind diese nicht verunreinigt. Die Hartschalen können allerdings zweimalig recycelt werden. Dies bedeutet wieder einen Energieaufwand, allerdings verringert sich das Müllaufkommen dadurch enorm. Sprich der Maskierungsprozess mittels additiv gefertigter Maskierungen ist in der Entsorgung deutlich Umweltfreundlicher. Umweltfreundliche Alternativen für des *Resione F80* gibt es zum aktuellen Zeitpunkt ebenfalls nicht. Viele Harze basieren auf nachwachsenden Rohstoffen, allerdings haben alle Maskierungen aus nachhaltigen Materialien dem Beschichtungsprozess nicht standgehalten. *GreenTec Pro*, aus welchem die Hartschalen gefertigt sind, besteht aus nachwachsenden Rohstoffen, was ebenfalls wieder positiv zu verbuchen ist.

Der Ökologische Vorteil ist folglich nicht gänzlich zu ermitteln. Dennoch kann gesagt werden, dass im direkten Vergleich, bei den dargestellten additiv hergestellten Maskierungen, das Klebeband besser abschneidet.

#### 4.8.2 Ökonomische Betrachtung

Die Ökonomische Betrachtung spricht eindeutig für den Prozess. Trotz höherer Personalkosten pro Stunde bei den Konstruierenden, ist der Prozess durch die Wiederverwendbarkeit, den einmaligen Scan- und Konstruktionsaufwand deutlich wirtschaftlicher. Wichtig ist es allerdings, die Beschichtungsbauteile direkt bei Wareneingang zu scannen. Dadurch werden die Durchlaufzeiten der Beschichtungsbauteile nicht unnötig erhöht und die Prozesse in der Werkstatt sind ohne Wartezeit notwendig. Trotz des errechneten Vorteils ist es allerdings wichtig, dass die Mitarbeitenden, welche die Prozesse durchführen im neuen Prozess gut ausgelastet sind. Fällt das Abkleben weg, können die Mitarbeitenden direkt mit der nächsten Beschichtung beginnen. Der Break-even-point für diese Betrachtung kann ebenfalls in Diagrammen dargestellt werden.

##### Kostenentwicklung beim Maskieren des side core small

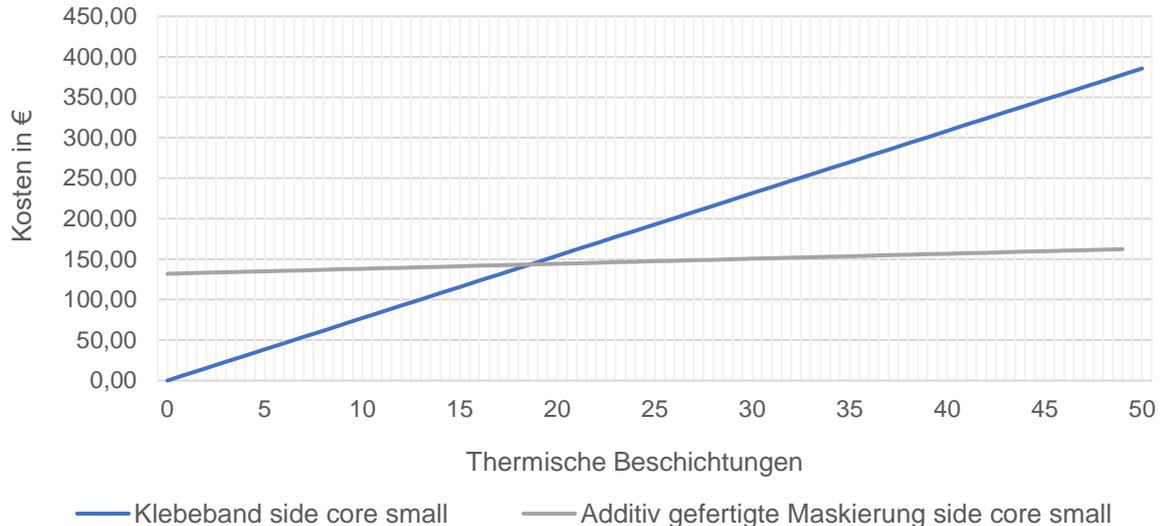


Abbildung 40: Diagramm Break-even-Point beim side core small [eigene Darstellung]

In Abbildung 40 ist dargestellt, wie sich die Kosten beim Maskieren mit Klebeband im Vergleich zu den Kosten beim Maskieren mit additiv gefertigten Maskierungen entwickelt. Durch die hohen Fixkosten des 3D-Scannens, der Konstruktion und der Fertigung der Maskierungen, lohnen sich diese für den *side core small* ab 19 thermischen Beschichtungen. Für den *Side core big* siehe Abbildung 41.

### Kostenentwicklung beim Maskieren des side core big



Abbildung 41: Diagramm Break-even-Point beim side core big [eigene Darstellung]

An dieser Stelle kann man den Break-even-Point bei 15 thermischen Beschichtungen erkennen. Je nach Klebebandverbrauch der Anwendenden und Komplexität der Bauteile schwankt der Break-even-Point dementsprechend. Die beiden dargestellten Bauteile sind jedoch reale Beschichtungsbauteile und können als Referenz herangezogen werden, wohlwissend, dass der Wert schwanken kann. Man muss berücksichtigen, dass bei wiederkehrenden Bauteilen die Fixkosten nicht erneut anfallen. Dadurch ergibt sich bei wiederkehrenden Beschichtungsbauteilen ein enormes wirtschaftliches Potential. Lediglich bei Losgrößen unter 19, bei nicht wiederkehrenden Bauteilen, ist das Abkleben mit Klebebändern wirtschaftlich sinnvoller. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass der Scan- und Konstruktionsaufwand mit größeren oder komplexeren Bauteilen nicht zwangsweise steigt.

#### 4.8.3 Verbreitung der Ergebnisse

- Präsentation der aktuellen Ergebnisse durch Masterrand am 20.07. 2022 zum Themenbereich Advanced Materials and Manufacturing an der Hochschule Aalen
- Gewinn der deutschen 3D-Druck Challenge 2022 mit dem Projekt „3D-Beschichtung“ (Vorstellung der Maskierungen und bei der rhv-Technik entwickeltes Schichtsystem für gedruckte Kunststoffbauteile). Anhang 5
- Präsentation der aktuellen Ergebnisse durch Masterrand am 09.11. 2023 zum Themenbereich Advanced Manufacturing an der Hochschule Aalen
- Wiederverwendbare Abdeckungen aus dem ökologischen 3D Druck im „Limes“ Das Magazin der Hochschule Aalen 01/2022 Anhang 6

- Entwicklung additiv gefertigter Maskierungen für einen umweltfreundlichen Beschichtungsprozess in Schweißen und Schneiden 6/2023 Anhang 7
- Entwicklung additiv gefertigten Maskierungen im Journal für Oberflächentechnik (Springer Nature) Ausgabe November 2023

## 5 Fazit und Ausblick

Die Entwicklung der Maskierungen wird durch etliche Versuche und Tests gestützt. Gerade der Vorversuch anhand der Hülsenmaskierung liefert wichtige Erkenntnisse für die Konstruktion der Maskierungen. Durch einen standardisierten Konstruktionsprozess, der die Vorteile zweier additiver Fertigungsverfahren verbindet, wird die optimale Maskierung realisiert. Durch die gummiartigen Maskierungshüllen sind sehr präzise Trennkanten möglich und die Maskierungen können durch die Flexibilität des Materials einfach aufgesteckt und am Beschichtungsbauteil eingehakt werden. Die Aufteilung der Maskierungshüllen in mehrere Teile erleichtert die additive Fertigung dieser und erhöht die Wirtschaftlichkeit. Lediglich Komponenten, die direkt vom Beschichtungsstrahl getroffen werden, müssen öfter gewechselt werden. Die restlichen Maskierungskomponenten können bis zu 50-Mal wiederverwendet werden. Der neue Maskierungsvorgang benötigt in der Montage nur wenige Sekunden. Dem gegenüber steht in der ökonomischen Betrachtung die händische Maskierung mit Klebeband, das Kantenfeilen und die Reinigung der Beschichtungsbauteile. Die Maskierungen sind nach 19 bzw. 15 thermischen Beschichtungen wirtschaftlicher als die Maskierung mit Klebeband. Darüber hinaus fallen Fixkosten in Form von 3D-Scan und Konstruktion nur einmalig pro Beschichtungsbauteil an. Bei wiederkehrenden Bauteilen ist dies ein großer Vorteil. Des Weiteren ist der Maskierungsprozess ein technologischer Vorteil beim HVOF-Verfahren. Hier ist die Wiederverwendbarkeit der Maskierungen zwar nicht gegeben, dennoch können komplexe Bauteile präzise beschichtet werden. Dies ist mit Klebeband beim HVOF-Verfahren nicht möglich.

Die ökologische Betrachtung stellt die Grenzen des Prozesses dar. Bei allen der getesteten Materialien hat sich lediglich das *Resione F80* als tauglich herausgestellt. Die Wandung von 4 mm muss ebenfalls eingehalten werden, um eine vernünftige Standzeit zu erzielen. Dies verkleinert den Spielraum für eine ökologische Verbesserung durch den neuen Prozess. Vergleicht man die Maskierungsprozesse direkt, emittieren die additiv gefertigten Maskierungen mehr CO<sub>2</sub> als die Maskierung mit Klebeband. Dennoch ist das Müllaufkommen mit den additiv gefertigten Maskierungen aufgrund der Wiederverwertung deutlich geringer. Die Hartschalen können sogar bis zu zweimal recycelt und zu neuem Filament verarbeitet werden. Weitere Grenzen des Prozesses können sehr große Bauteile darstellen. Aktuelle 3D-Drucker sind begrenzt in ihrem Bauraum. Insbesondere die MSLA-Drucker, sind meist nur in begrenztem Bauraum verfügbar. Bei größeren Bauteilen muss die Maskierung folglich in mehrere Teile geteilt werden. Dies ist prinzipiell möglich, jedoch birgt dies einen erhöhten Konstruktionsaufwand. Der Druck im MSLA-Verfahren, sollte eine Maximalgröße nicht überschreiten, da sonst unvorhersehbare Fehler in der gefertigten Maskierungshülle auftreten können. Im Forschungsprojekt wurde mit einem recht simplen und preiswerten MSLA-Drucker geforscht. Robustere Geräte könnten den Prozess stabiler gestalten. Auch ist eine gewisse Vorkenntnis oder Schulung bei den Anwendenden sinnvoll.

Die Benutzung additiv gefertigter Maskierungen bietet zusammenfassend große Chancen, die auch weit über den Anwendungsfall des thermischen Beschichtens hinausragen. Die Anwendung in Strahl- oder Lackierbetrieben ist durch den Entfall des Hitzeeinflusses uneingeschränkt denkbar. Größter Vorteil des Verfahrens ist allerdings die äußerst präzise Kante nach dem Beschichten. Trennungen von Beschichtungsbereichen und nicht zu beschichtenden Bereichen auf einer Fläche ohne direkte Kante, können ohne Messen und Markieren schnell und präzise maskiert werden.

Die Ergebnisse des Entwicklungsprozesses bzw. der Konstruktion müssen nach dem Versuch zur mechanischen Belastung, validiert werden. Dies hat mit der externen Validität zu tun. Die Übertragung

auf eine andere Situation kann durch den Vorversuch als gegeben gesehen werden, allerdings sollten die Maskierungen wiederholt geprüft werden. Hierbei werden die zwei komplexen Bauteile verwendet, diese allerdings nun korrekt gestützt, um das Verhalten zu überprüfen. Dies sollte im Lichtbogen- und Plasma-Verfahren stattfinden. Die 10- bzw. 14-malige Wiederverwendbarkeit, dargestellt im Vorversuch, sollen dadurch bestätigt werden. Die standardisierte Konstruktion ist abgeschlossen, kann allerdings durch Erweiterungen oder Verbesserungen von CAD-Software in Zukunft erleichtert werden. Insbesondere das 3D-Scannen und damit einhergehend die Bearbeitung der Scandateien wird aktuell immer beliebter und somit einfacher. Es ist also sehr wahrscheinlich, dass in naher Zukunft eine simplere Möglichkeit besteht, die 3D-Scans auf den Maskierungen abzubilden. Unter Anderem wäre ein automatisierter 3D-Scan im Wareneingang denkbar. Neuere Entwicklungen in diesem Bereich könnten den Prozess enorm erleichtern und entsprechende Ausbildung bzw. Vorkenntnisse obsolet machen.

In der additiven Fertigung gibt es ständig neue Entwicklungen. So können z.B. Bauteile nach der Fertigung in Zukunft automatisiert entnommen werden. Dies wäre wiederum eine Entlastung der Mitarbeitenden. Neue Druckmaterialien werden ständig vorgestellt. Allerdings haben diese, je nach Anwendungsgebiet spezifische Vor- und Nachteile. Vor allem bei den Harzen ist der Markt stark in Bewegung, da das MSLA-Verfahren aktuell einen sehr großen Aufschwung erlebt. Interessant wäre hier eine gezielte Entwicklung eines Harzes für das thermische Beschichten. Eine gesteigerte Wiederverwendbarkeit kann den Prozess noch wirtschaftlicher gestalten und die Ökologie des Prozesses verbessern. Weitere Forschungsvorhaben könnten sich auch mit der gezielten Beschichtung von additiv gefertigten Bauteilen beschäftigen. Die Verschleißfesten Beschichtungen in Verbindung mit den gestalterischen Möglichkeiten der additiven Fertigung können für viele Bereiche interessant sein. Ebenfalls kann der Einsatz des hier dargestellten Prozesses in Strahlbetrieben getestet werden. Hier kann man von einer deutlich höheren Standzeit der Maskierungen ausgehen, da das thermische Beschichten entfällt. Maskierungen werden nicht in gleichem Ausmaß thermisch belastet. Für Lackierbetriebe kann der Maskierungsprozess einen großen Vorteil bedeuten. Gerade durch die Flexibilität des gummiartigen Materials, können überschüssige Lackierungen lediglich durch Verbiegen der Maskierung abgetragen werden. Außerdem können hier wieder Biopolymere eingesetzt werden, da der Prozess deutlich weniger energieintensiv ist als das Strahlen oder thermische Beschichten.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz im Fokus [online]. *JOT Journal für Oberflächentechnik*, 2022, **62**(S2), 18-19. ISSN 2192-869X [Zugriff am: 11. Juli 2023]. Verfügbar unter: doi:10.1007/s35144-022-1606-2
2. FAUCHAIS, P.L., J.V. HEBERLEIN und M.I. BOULOS. *Thermal Spray Fundamentals. From Powder to Part*. Boston, MA: Springer US, 2014. ISBN 978-0-387-68991-3.
3. SANTIN, M. *Forschungsbericht 1 - Entwicklung additiv gefertigter Maskierungen für einen nachhaltigen Beschichtungsprozess. Forschungsbericht 1*. Aalen, 4. Juli 2022.
4. SANTIN, M. *Forschungsbericht 2 - Entwicklung additiv gefertigter Maskierungen für einen umweltfreundlichen Beschichtungsprozess*. Aalen, 30. Januar 2023.
5. PAWŁOWSKI, L. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2. ed. Chichester: Wiley, 2008. ISBN 978-0-471-49049-4.
6. RYBAK + HOFMANN RHV TECHNIK. *Thermische Beschichtung | Rybak + Hofmann RHV Technik* [online]. 15 Juni 2022 [Zugriff am: 15. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.rhv-technik.com/thermisches-spritzen/verfahren.html>
7. RYBAK + HOFMANN RHV TECHNIK. *Thermische Beschichtung | Rybak + Hofmann RHV Technik* [online]. 14 Juni 2022 [Zugriff am: 14. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.rhv-technik.com/unternehmen/was-wir-machen.html>
8. DBU. *DBU - Umweltentlastung - Innovation - Modellcharakter | Projektförderung* [online]. 14 Juni 2022 [Zugriff am: 14. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/antragstellung>
9. HERTTER, MANUEL; JAKIMOV, ANDREAS; MTU AERO ENGINES GMBH; SCHNEIDERBANGER, STEFAN. VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM MASKIEREN EINER BAUTEILZONE. Erfinder: M. HERTTER, A. JAKIMOV UND S. SCHNEIDERBANGER. Anmeldung: 11. August 2009. DE. WO 2010/031370 A1.
10. OERLIKON METCO AG WOHLLEN, CH. VERFAHREN ZUR MASKIERUNG EINES BAUTEILS WELCHES MIT EINER THERMISCHEN SPRITZSCHICHT BESCHICHTET WERDEN SOLL. Erfinder: P. GASTEL, A. MICHLA, A. SOLLBERGER UND M. STÖCKLI. Anmeldung: 9. November 2016. EP. WO 2017/081098 A1.
11. PALLAS GMBH & CO. KG und NEAPCO EUROPE. Die perfekte Welle [online]. *JOT Journal für Oberflächentechnik*, 2019, **59**(3), 36-37. ISSN 2192-869X [Zugriff am: 18. Juli 2023]. Verfügbar unter: doi:10.1007/s35144-019-0023-7
12. DYMAX EUROPE GMBH. Maskieren geht auch anders [online]. *JOT Journal für Oberflächentechnik*, 2022, **62**(10), 78-79. ISSN 2192-869X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s35144-022-2261-3
13. DIN EN ISO 8504-2:2020-03, Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen\_- Verfahren für die Oberflächenvorbereitung\_- Teil\_2: Strahlen

- (ISO\_8504-2:2019); Deutsche Fassung EN\_ISO\_8504-2:2019 [online], 2020. Verfügbar unter: doi:10.31030/3083914
14. PIETSCHMANN, J. *Industrielle Pulverbeschichtung. Grundlagen Verfahren Praxiseinsatz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-25800-9.
  15. *DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03, Additive Fertigung\_- Grundlagen\_- Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN\_ISO/ASTM 52900:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
  16. ZHENG, S. *What are SLA, DLP, and LCD resin 3d printers? What are their molding principles and differences?* [online]. 11 Mai 2020 [Zugriff am: 17. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.creality3dofficial.com/blogs/news/what-are-sla-dlp-and-lcd-resin-3d-printers-what-are-their-molding-principles-and-differences>
  17. FORMLABS GMBH. *Was versteht man im 3D-Druck unter Auflösung?* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://formlabs.com/de/blog/3d-druck-aufloesung/>
  18. LIQCREATE. *Erklärt & getestet: Anti-Aliasing (AA) und Blur im Resin-3D-Druck* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.liqcreate.com/de/supportarticles/explained-tested-anti-aliasing-aa-and-blur-in-resin-3d-printing/>
  19. ELEGOO, I.N. *Saturn 3 12K* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.elegoo.com/products/elegoo-saturn-3-resin-3d-printer-12k>
  20. BIANCA Z. *Wie unterscheiden sich der SLA- und MSLA-3D-Druck voneinander?* [online], 2022. 28 Juli 2022 [Zugriff am: 15. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.3dnatives.com/de/wie-unterscheiden-sich-der-sla-und-msla-3d-druck-voneinander/>
  21. DAVE, H.K. und J.P. DAVIM. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Cham: Springer International Publishing, 2021. ISBN 978-3-030-68023-7.
  22. SCULPTEO INC. *Die Schichtdicke im 3D-Druck: ein wesentliches Element der additiven Fertigung* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.sculpteo.com/de/glossar/schichtstaerke-genauigkeit-der-3d-druck/>
  23. FORMLABS GMBH. *Leitfaden zu Toleranzen, Genauigkeit und Präzision im 3D-Druck* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://formlabs.com/de/blog/genauigkeit-praezision-toleranz/>
  24. SAN DRAW INC. *SILICONE 3D PRINTER* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.sandraw.com/>
  25. LIQCREATE. *Flexible-X* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.liqcreate.com/de/product/flexible-x/>
  26. LACHMAYER, R., T. EHLERS und R.B. LIPPERT. *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISBN 978-3-662-65923-6.

27. KONSTRUKTIONSBUDE. *Konstruktionsrichtlinien für den 3D-Druck (FDM)* [online], 2021 [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: [https://konstruktionsbude.de/konstruktionsrichtlinien-3d-druck/#1\\_Toleranzen\\_beachten](https://konstruktionsbude.de/konstruktionsrichtlinien-3d-druck/#1_Toleranzen_beachten)
28. SERCAN KAHRAMAN. *Konstruieren für die Stereolithographie (SLA) – Richtlinien für gutes Design* [online] [Zugriff am: 27. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://threedom.de/3d-druck-ratgeber/design-konstruktion/konstruktion-stereolithographie-sla>
29. DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen\_ - Teil\_0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe [online], 2003. Verfügbar unter: doi:10.31030/9500684
30. DIN 8593-1:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen\_ - Teil\_1: Zusammensetzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe [online], 2003. Verfügbar unter: doi:10.31030/9500685
31. HIRSCH-WEBER, A. und S. SCHERER. *Wissenschaftliches Schreiben und Abschlussarbeit in Natur- und Ingenieurwissenschaften. Grundlagen - Praxisbeispiele - Übungen : 42 Abbildungen, 13 Tabellen*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 2016. UTB Schlüsselkompetenzen, Natur- und Ingenieurwissenschaften. 4450. ISBN 3825244504.
32. ALBERS, S. *Methodik der Empirischen Forschung*. 2nd ed. Wiesbaden: Springer Gabler. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2007. ISBN 9783834991218.
33. LEA GENAU. *Die 5 Arten von Validität mit Formulierungshilfen mit Beispielen* [online]. 1 Mai 2023 [Zugriff am: 30. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.scribbr.de/methodik/validitaet/>
34. JAKOBY, W. *Projektmanagement für Ingenieure. Ein praxisnahes Lehrbuch für den systematischen Projekterfolg*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. ISBN 978-3-658-23332-7.
35. KEVIN HOFER. *3D-Druck: Wie viel Infill braucht's?* [online]. 12 August 2020 [Zugriff am: 8. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.galaxus.de/de/page/3d-druck-wie-viel-infill-brauchts-17244>
36. PRUSA RESEARCH A.S. *Infill-Typen und ihre Eigenschaften* [online]. 8 Februar 2023 [Zugriff am: 8. August 2023]. Verfügbar unter: [https://help.prusa3d.com/de/article/infill-muster\\_177130](https://help.prusa3d.com/de/article/infill-muster_177130)
37. STEFAN SCHMIDT. *Abschlussbericht zum Vorhaben: Produktionsanlage für doppelseitige Acrylatklebebänder mittels innovativer Technologie Kennzeichen MBE1 - 001595*, Mai 2012.
38. UMWELTBUNDESAMT. *Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen* [online], 2023. 31 Juli 2023 [Zugriff am: 13. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>

39. CARBONCARE. *Ergebnisse von CarbonCare* [online] [Zugriff am: 17. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.carboncare.org/co2-emissions-rechner/co2-emissions-werte.html>
40. ERIC BERGHOLZ. *Übersicht von CAD-Datenformaten* [online], 2022. 17 Februar 2022 [Zugriff am: 15. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.laserscanning-europe.com/de/news/uebersicht-von-cad-datenformaten>
41. BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. *BDEW-Strompreisanalyse Februar 2023* [online]. *Haushalte und Industrie*. 15 Februar 2023 [Zugriff am: 18. August 2023]. Verfügbar unter: [https://www.bdew.de/media/documents/230215\\_BDEW-Strompreisanalyse\\_Februar\\_2023\\_15.02.2023.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/230215_BDEW-Strompreisanalyse_Februar_2023_15.02.2023.pdf)
42. TORSTEN MONTAG. *Personalkosten berechnen: Erstellen Sie eine Personalkostenplanung!* [online] [Zugriff am: 19. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.gruenderlexikon.de/checkliste/informieren/personalkosten-kalkulieren/#:~:text=Bruttojahresentgelt%20x%201%2C7%20%3D%20Tats%3%A4chliche,Personalkostenrechnung%20Personalkosten%20von%2059.500%20Euro.>

## 7 Anhänge

### 7.1 Anhang 1 Evaluation der zu beschichtenden Bauteile und der Verfahren

		Bewertung der exemplarischen Beschichtungsverfahren					
		Geometrien		Beschichtungsverfahren			
		Kriterium	Punkte	Kriterium	Bemerkung	Punkte	
Bild (Bereich der Herausforderung)		Zur Darstellung der Konstruktion einer Maskierung mit Hinterschnitt	Komplexität zum Scannen	5	höchste Temperatur	HVOF - Top Gun (Ethen)	9
			Komplexität der Konstruktion der Maskierung	8	aggressivstes Beschichtungsmaterial	Keramik (Cr2O3)	9
Bild (Maskierung + Beschichtungsrichtung)		Widerstandsfähigkeit der 3D-Druckmaterialien gegenüber dem Beschichtungsverfahren	Komplexität der Befestigung von Maskierung	8	hohe kinetische Energie	HVOF - Top Gun (Cr2O3)	7
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	3	niedrige Vorschübe	Beschichtung mit Roboter	3
Bild (Bereich der Herausforderung)		Hülse (Demonstrator)	Komplexität zum Scannen	1	hohe Zeit der Hitzeeinwirkung	mit Kühlung	3
			Komplexität der Konstruktion der Maskierung	10	höchste Temperatur	Plasmaspritzen (APS)	10
Bild (Bereich der Herausforderung)		Side Core small (Gießwerkzeug)	Komplexität der Konstruktion der Maskierung	8	aggressivstes Beschichtungsmaterial	scharfkantige Keramik	10
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	2	hohe kinetische Energie	HVOF - K2 (Kerosin)	10
Bild (Bereich der Herausforderung)		Side Core big (Gießwerkzeug)	Komplexität der Befestigung von Maskierung	10	niedrige Vorschübe	Lichtbogenstrahlen (AS)	10
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	5	hohe Zeit der Hitzeeinwirkung	mit und ohne Kühlung	10
Bild (Bereich der Herausforderung)		Side Core big (Gießwerkzeug)	Komplexität zum Scannen	8	höchste Temperatur	HVOF (Ethen)	5
			Komplexität der Konstruktion der Maskierung	9	aggressivstes Beschichtungsmaterial	Hartmetall (Cermet)	6
Bild (Bereich der Herausforderung)		Middle Core (Gießwerkzeug)	Komplexität der Befestigung von Maskierung	5	hohe kinetische Energie	HVOF - DJ (Cr3C2-NiCr)	9
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	1	niedrige Vorschübe	schnelle Handbewegung	1
Bild (Bereich der Herausforderung)		Middle Core (Gießwerkzeug)	Komplexität zum Scannen	9	hohe Zeit der Hitzeeinwirkung	keine Kühlung	5
			Komplexität der Konstruktion der Maskierung	7	höchste Temperatur	HVOF (Ethen)	7
Bild (Bereich der Herausforderung)		Middle Core (Gießwerkzeug)	Komplexität der Konstruktion der Maskierung	10	aggressivstes Beschichtungsmaterial	Hartmetall (Cermet)	6
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	7	hohe kinetische Energie	HVOF - DJ (Cr3C2-NiCr)	9
Bild (Bereich der Herausforderung)		Window insert (Gießwerkzeug)	Komplexität zum Scannen	3	hohe Zeit der Hitzeeinwirkung	keine Kühlung	5
			Komplexität der Konstruktion der Maskierung	5	höchste Temperatur	HVOF (Ethen)	5
Bild (Bereich der Herausforderung)		Window insert (Gießwerkzeug)	Komplexität der Konstruktion der Maskierung	4	aggressivstes Beschichtungsmaterial	Hartmetall (Cermet)	6
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	4	hohe kinetische Energie	HVOF - DJ (Cr3C2-NiCr)	9
Bild (Bereich der Herausforderung)		Window insert (Gießwerkzeug)	Komplexität der Befestigung von Maskierung	4	hohe kinetische Energie	schnelle Handbewegung	1
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	5	niedrige Vorschübe	keine Kühlung	5
Bild (Bereich der Herausforderung)		Window insert (Gießwerkzeug)	Komplexität zum Scannen	10	höchste Temperatur	HVOF (Ethen)	8
			Komplexität der Konstruktion der Maskierung	10	aggressivstes Beschichtungsmaterial	Hartmetall (Cermet)	6
Bild (Bereich der Herausforderung)		Window insert (Gießwerkzeug)	Komplexität der Befestigung von Maskierung	10	hohe kinetische Energie	HVOF - DJ (Cr3C2-NiCr)	9
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	1	niedrige Vorschübe	schnelle Handbewegung	1
Bild (Bereich der Herausforderung)		Window insert (Gießwerkzeug)	Komplexität der Befestigung von Maskierung	5	hohe Zeit der Hitzeeinwirkung	keine Kühlung	5
			Komplexität der Befestigung von Maskierung	5	hohe Zeit der Hitzeeinwirkung	keine Kühlung	5

## 7.2 Anhang 2 Nutzwertanalyse

Standzeitversuch Lichtbogen-Spritzen Beschichtungswerkstoff: Chromstahl Temperatur: 3000°C																				
Kriterium/ Zielvariable	Nutzen	Gewicht	Material 1		Material 2		Material 3		Material 4		Material 5		Material 6		Material 7		Material 8		Material 9	
			PrimaCreator	Value UV Flex; durchsichtig; flexibel	Liqcreate	Flexible-X; schwarz; flexibel	MarkForged	Onyx + HSHT; schwarz;	Elegoo	Plant based tough; schwarz	MarkForged	Onyx + Fiberglass; schwarz	MarkForged	Onyx + Kevlar; schwarz	MarkForged	Onyx 2mm Wandung; schwarz	MarkForged	Onyx 4mm Wandung; schwarz	MarkForged	extrudr
Materialanhaftung Stirnseite [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,67	1,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Materialanhaftung Mantelfläche [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,33	2,00	0,67	0,00	0,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,00
Kantenkontur am Rohr [starke Risse und Ablplatzungen ... keine Risse oder Ablplatzungen]	0...4 Punkte	1,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>3,33</b>		<b>0,00</b>		<b>0,33</b>		<b>2,33</b>		<b>1,33</b>		<b>1,33</b>		<b>1,33</b>		<b>0,33</b>		<b>1,00</b>	

ersetzt durch F80

Standzeitversuch Lichtbogen-Spritzen Beschichtungswerkstoff: Chromstahl Temperatur: 3000°C																					
Kriterium/Zielvariable	Material 10		Material 11		Material 12		Material 13		Material 14		Material 15		Material 16		Material 17		Material 18		Material 19		
	Nutzen M9	Wirkung M9	Nutzen M10	Wirkung M10	Nutzen M11	Wirkung M11	Nutzen M12	Wirkung M12	Nutzen M13	Wirkung M13	Nutzen M14	Wirkung M14	Nutzen M15	Wirkung M15	Nutzen M16	Wirkung M16	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M15	Wirkung M15	Primacreator
Materialanhaftung Stirnseite [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	1,00	0,67	1,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,67	0,00	0,00	1,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Materialanhaftung Mantelfläche [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	1,00	0,33	1,00	0,33	0,00	0,00	1,00	0,33	0,00	0,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,00	0,00	1,00	0,33	0,33
Kantenkontur am Rohr [starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,00	0,00	3,00	3,00	3,00
<b>Gesamtnutzen</b>	<b>2,00</b>		<b>2,00</b>		<b>1,00</b>		<b>2,33</b>		<b>0,00</b>		<b>3,00</b>		<b>2,33</b>		<b>2,00</b>		<b>0,00</b>		<b>3,33</b>		
																	zerstört beim Strahlen				
																	nicht weiter verfolgt/sehr ähnlich dem Green TECPro carbon				

Standzeitversuch Lichtbogen-Spritzen														
Beschichtungswerkstoff: Chromstahl														
Temperatur: 3000°C														
Kriterium/ Zielvariable	Nutzen	Gewicht	Material 20		Material 21		Material 22		Material 23		Material 24		Material 25	
			Liqcreate	Premium Flex; türkis	Pxmation	TPU; schwarz	ABS-like Resin	UV-tough	F80	Markforged				
	Nutzen M16	Wirkung M16	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17
Materialanhaftung Stirnseite [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,67	0,00	0,00	1,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,33	0,00	0,00
Materialanhaftung Mantelfläche [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,33	0,00	0,00	3,00	1,00	2,00	0,67	2,00	0,67	4,00	1,33	2,00	0,67
Kantenkontur am Rohr [starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen]	0...4 Punkte	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	0,00	0,00
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2,67</b>	<b>1,67</b>	<b>1,67</b>	<b>1,67</b>	<b>1,67</b>	<b>1,67</b>	<b>5,67</b>	<b>5,67</b>	<b>0,67</b>	<b>0,67</b>

zerstört beim Strahlen

Standzeitversuch Plasma-Spritzen																					
Spritzverfahren: Plasma																					
Temperatur der Partikel: 6500 °C																					
Kriterium/ Zielvariable	Nutzen	Gewicht	Material 1		Material 2		Material 3		Material 4		Material 5		Material 6		Material 7		Material 8		Material 9		
			PrimaCreator	Ligcreate	Markforged	Elegoo	Markforged	Markforged	Markforged	Onyx + Kevlar; schwarz	Markforged	Onyx 2mm Wandung; schwarz	Markforged	Onyx + Fiberglass; schwarz	Markforged	Onyx + Kevlar; schwarz	Markforged	Onyx 2mm Wandung; schwarz	Markforged	Onyx 4mm Wandung; schwarz	extrudr
Materialanhaftung Stirnseite [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	1,00	0,67	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Materialanhaftung Mantelfläche [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kantenkontur am Rohr [starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen]	0...4 Punkte	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,67</b>	<b>1,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

ersetzt durch F80

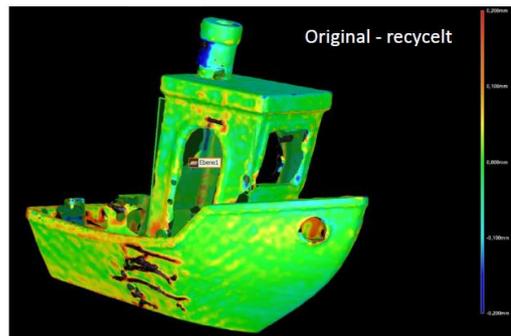
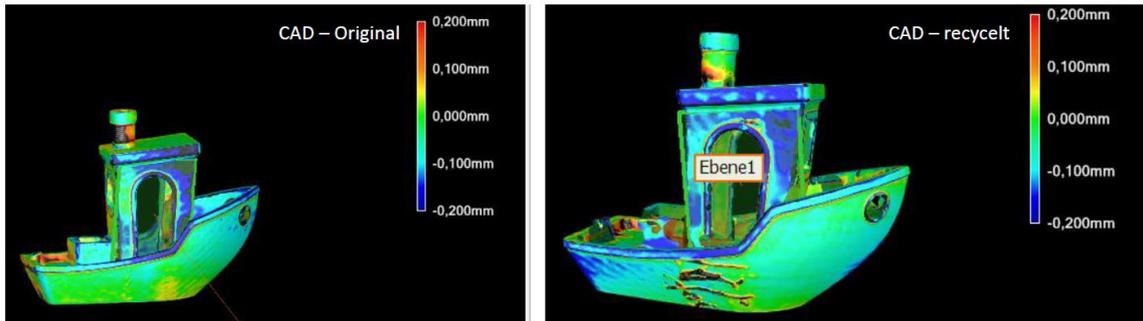


Standzeitversuch Plasma-Spritzen															
Spritzverfahren: Plasma															
Temperatur der Partikel: 6500°C															
Kriterium/ Zielvariable	Nutzen	Gewicht	Material 20		Material 21		Material 22		Material 23		Material 24		Material 25		
			Liqcreate	Pxmation	Anycubic	TPU; schwarz	ABS-Like Resin+ schwarz	Anycubic	UV Tough Resin grau	Resione	Markforged				
			Premium Flex; türkis												
				Nutzen M16	Wirkung M16	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	Wirkung M17	Nutzen M17	
Materialanhaftung Stirnseite [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,67	2,00	1,33	0,00	0,00	1,00	0,67
Materialanhaftung Mantelfläche [starke Materialanhaftung ... keine Materialanhaftung]	0...4 Punkte	0,33	0,00	0,00	1,00	0,33	1,00	3,00	1,00	4,00	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Kantenkontur am Rohr [starke Risse und Abplatzungen ... keine Risse oder Abplatzungen]	0...4 Punkte	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>0,00</b>	<b>0,33</b>	<b>2,67</b>	<b>3,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,67</b>	<b>3,67</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,67</b>	<b>0,67</b>

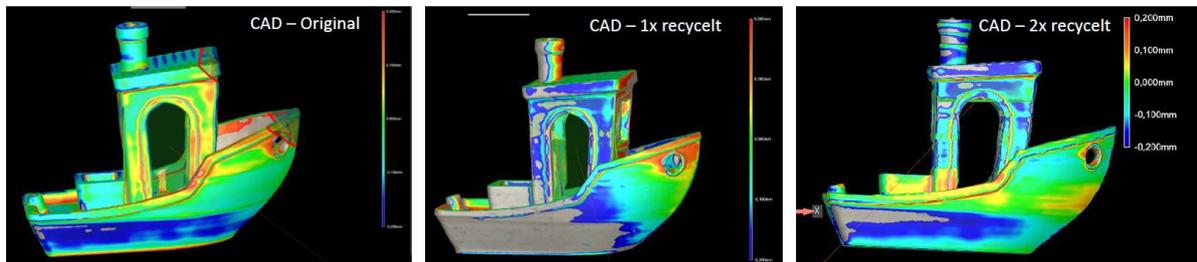
zerstört beim Strahlen

7.3 Anhang 3 Einfluss der Maßhaltigkeit durch Recycling

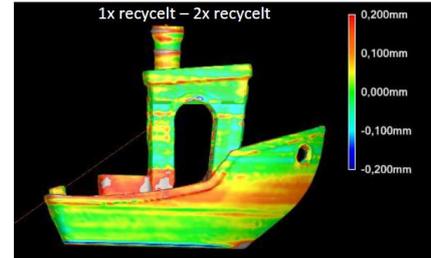
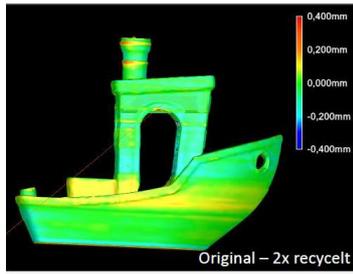
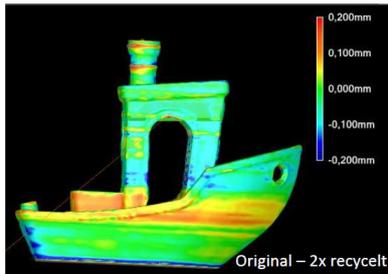
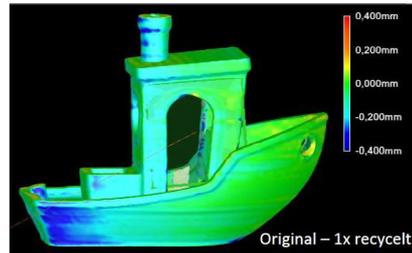
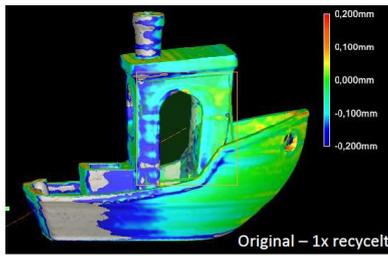
Markforged Onyx<sup>®</sup>



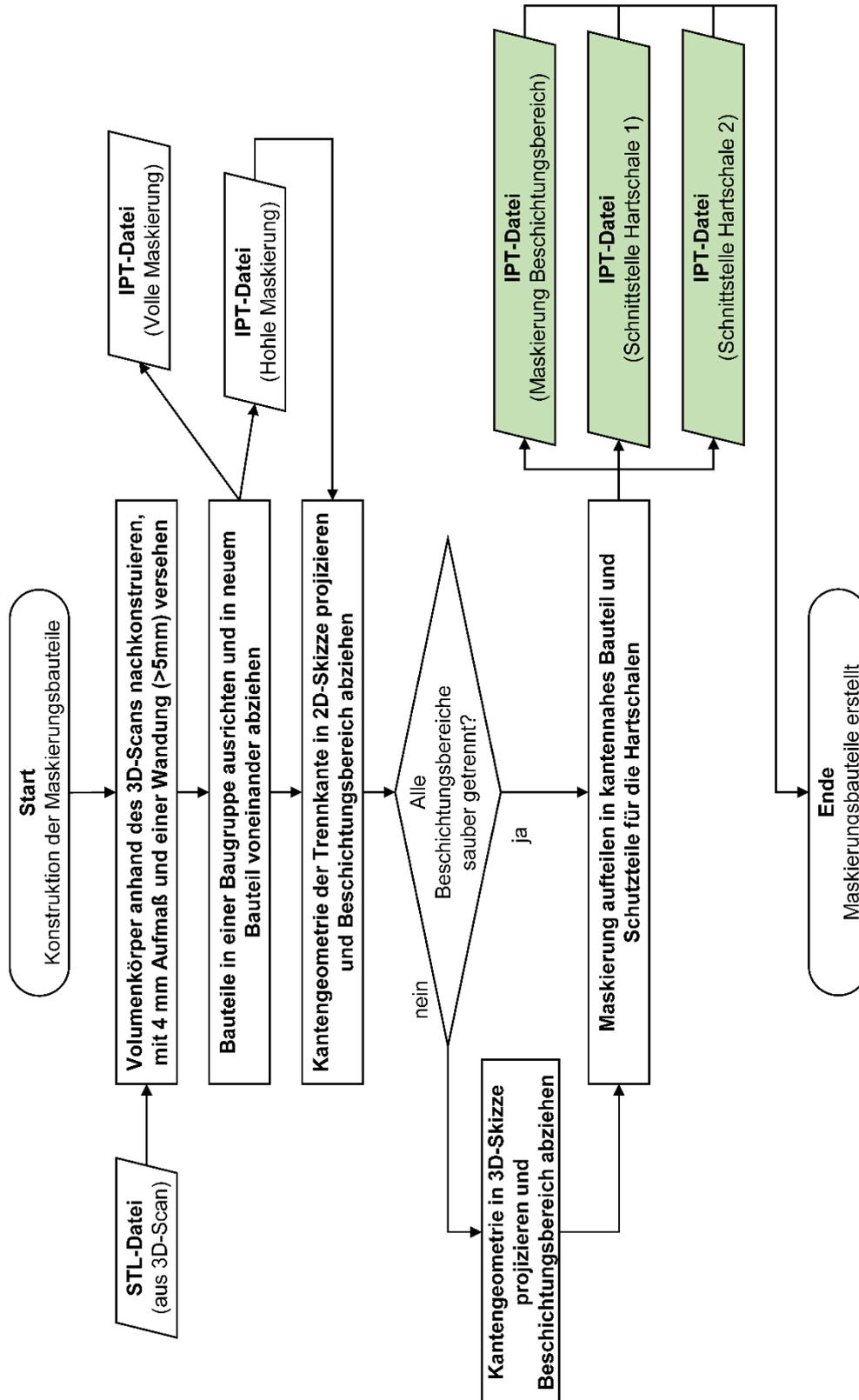
Extruder Green Tec Pro<sup>®</sup>

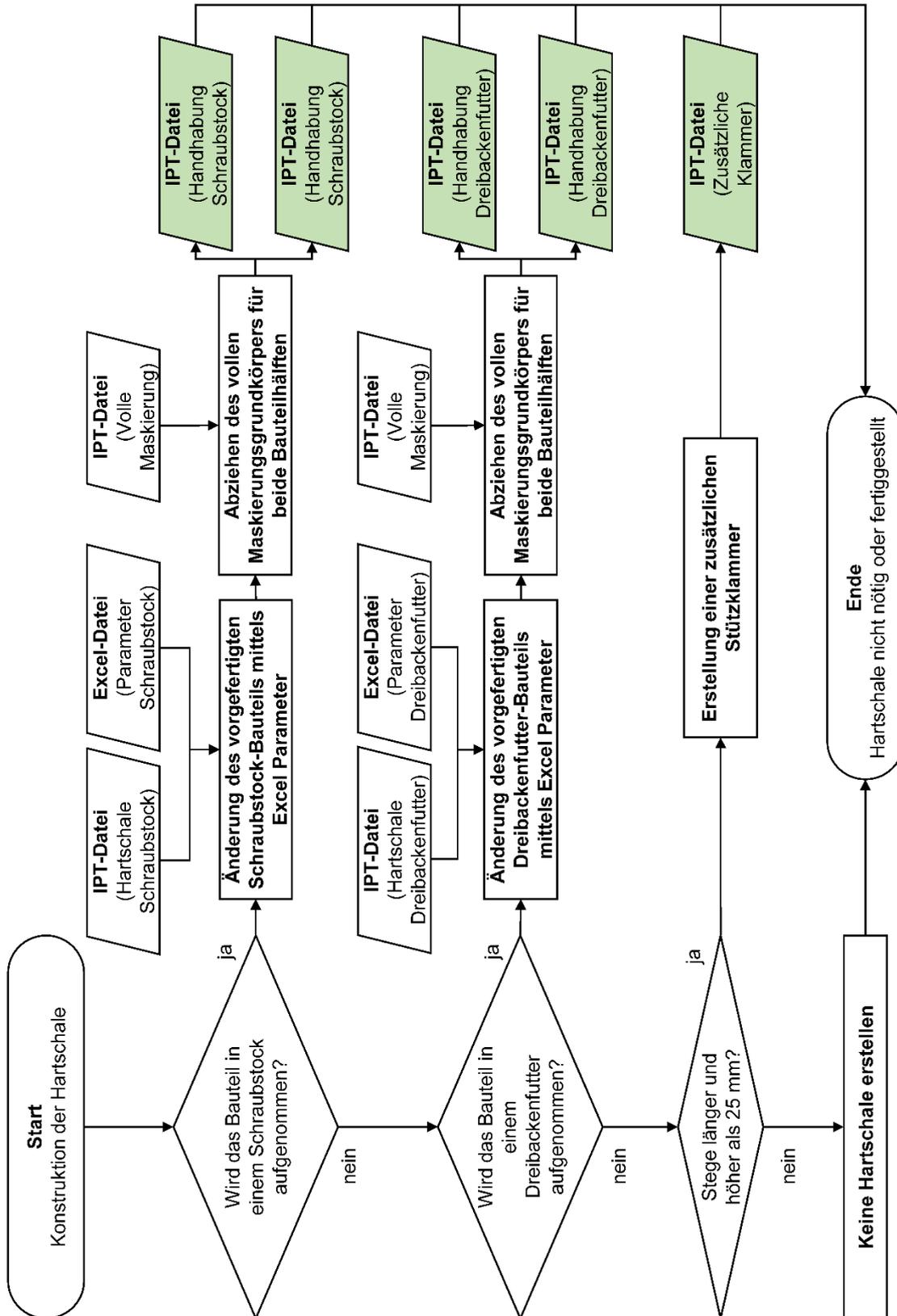


### Extruder Green Tec Pro<sup>®</sup>



7.4 Anhang 4 Ablauf des Konstruktionsprozesses der Maskierungen





Schritt	Beschreibung	Bauteil/Baugruppe	Zeit in min
1	Hilfsebenen einziehen zur Positionierung des Beschichtungsbauteils	3D-Scan des Beschichtungsbauteils	3
2	Umrisse in Beschichtungskantennähe mittels Hilfskörper (Kreis, Quadrat, etc. ) skizzieren	3D-Scan des Beschichtungsbauteils	9
3	Neue Skizze erzeugen und Skizzen auslesen oder kopieren	3D-Scan des Beschichtungsbauteils /	2
4	Skizzen mit Aufmaß (4mm) übernehmen und eine dem 3D-Scan nahe Geometrie bilden und kritische Kanten entschärfen (Fasen oder Radien)	Volumenkörper für den Abzug	14
6	Wandung des Volumenkörpers (>5mm) zur Verhinderung von nicht überwindbaren Störkonturen, erzeugen und Bauteil <b>mit</b> und <b>ohne</b> Wandung speichern	Volumenkörper für den Abzug	5
7	Neue Baugruppe erzeugen und 3D-Scan des realen Bauteils und Volumenkörper für den Abzug öffnen	Baugruppe für den Abzug	3
8	Bauteile ineinander Ausrichten anhand erstellter Ebenen mit Mindestabstand zum 3D-Scan von 4mm	Baugruppe für den Abzug	5
9	Neues Bauteil erzeugen, Baugruppe öffnen und von einander abziehen	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	2
10	Kantengeometrie der Trennkante zum Beschichtungsbereich in einer Skizze projizieren	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	9
11	Den zu beschichtenden Trennbereich abziehen	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	2
12	Schritt 10 und 11 nach Bedarf wiederholen	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	nach Bedarf
13	Erstellte Maskierung aufteilen in formschlüssige (Flexibilität des <i>Resione F80</i> ) Maskierungsteile (z.B. vorne, hinten links, hinten rechts)	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	7
14	STL-Dateien exportieren	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	2
15	Hartschalenbauteil auswählen (Dreibackenfutter oder Schraubstock)	Hartschale (oben/unten oder links/rechts)	2
16	Änderung der Maße in der Excel-Tabelle anhand der Maße des Beschichtungsbauteils (4mm Mindestwandstärke)	Hartschale (oben/unten oder links/rechts)	4
17	Neue Baugruppe für den Abzug erstellen, Volumenkörper für den Abzug ohne Wandung und Hartschalenbauteil einfügen und ineinander ausrichten	Baugruppe für den Abzug der Hartschale	5
18	Neues Bauteil erzeugen, Baugruppe öffnen und von einander abziehen	Hartschale mit Abzug (oben/unten oder	2
19	Wiederholen für zweite Hälfte des Hartschalenbauteil	Hartschale mit Abzug (oben/unten oder	2
20	STL-Dateien exportieren	Abgezogenes Bauteil (Maskierungshülle)	2
21	Optional: Stützklammer konstruieren und von der Maskierung subtrahieren (4mm Aufmaß zum Maskierungsteil, Fasen und Radien je nach Strahlrichtung)	Stützklammerbauteil und Maskierung mit Abzug	[5]
<b>Summe</b>			<b>80</b>

7.5 Anhang 5 Gewinn der 3D-Druck Challenge 2022



Bildrechte: Bayerischer Rundfunk / Karl Spannenberger



DEUTSCHE  
**3D-DRUCK**  
CHALLENGE 2022



3D-Beschichtung / Ressourcenschonende gedruckte Maskierungen





## Team 3D-Beschichtung



### Martin Dauner

Leiter F+E und Qualität  
Rybak + Hofmannrhv-Technik GmbH + Co. KG



### Florian Klimmer

Bachelorarbeit: Beschichtung 3D gedruckter Polymere mit Funktionswerkstoffen durch thermische Spritzverfahren Hochschule Esslingen



### Joel Izquierdo

Werkstudent  
B.Sc. Technologiemanagement  
Universität Stuttgart

## Unsere Produktideen



~ 40 km Klebeband pro Jahr



~ 45.000€ für Klebebänder pro Jahr



~75 m³ Müll pro Jahr

- **Beschichtung von 3D gedruckten Kunststoffbauteilen**

(Steigerung der abrasiven, erosiven und thermischen Eigenschaften von Kundenbauteilen)

- **Gedruckte Maskierungen (Ersatz für teure Gewebeklebebänder)**

Förderung durch Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Kooperationspartner: Hochschule Aalen (Labor für Robotik und virtuelle Systeme)



- **Beschichtung von gedruckten Maskierungen**

(Einsatz bei hohen Temperaturen und hoher kinetischer Energie)

## Kunststoff- 3D-Druck Beschichtung



### Vorgehen:



### 3D-Druck Materialien:

- Sämtliche thermoplastische 3D-Druck Verfahren
- PLA, PA 12, PVA, PEKK, PEI, PACF...

### Beschichtungsmaterialien:

- Metalllegierungen (z.B. Edelstahl)
- Hartmetalle (z.B. Wolframcarbid Cobalt)
- Keramiken (z.B. Zirkonoxid)





## Mögliche Produkte

Aktuelles Projekt:



SLS-Flügelrad



SLS-Flügelrad

Potenzielle Produkte:



Quelle:Zirkotec



Quelle:Zirkotec

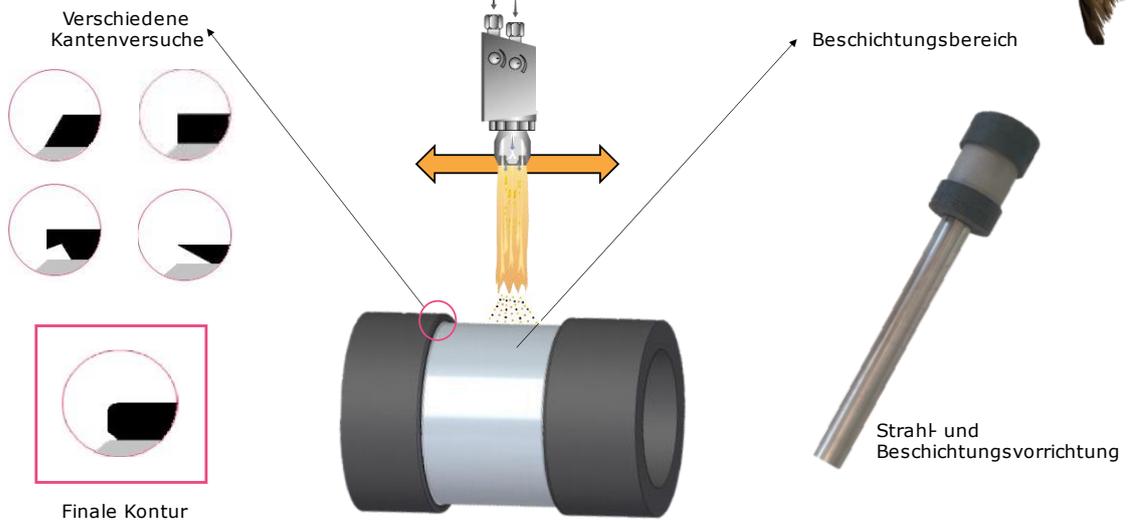


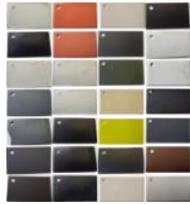
Quelle:parrotclub



Quelle:Superstrata

## Gedruckte Maskierungen





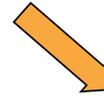
Untersuchte Werkstoffe



Maskierungsversuche



CAD 3D-Teil



3D-geschnittes Bauteil für Generierung der Maskierung



### COSTUMER RELATIONS

#### • 3D-Druck-Beschichtung:

- Langfristige Bindung von rhv-Bestandskunden
- Projektorientierte Beschichtung (kurz- und langfristige Bindung von Neukunden)

#### • Maskierungen

- rhv-Technik (langfristige Bindung)

Erwarteter Gewinn im 3. Jahr → ~30.000 €



### INVESTMENTS/ AUFWENDUNGEN

1. Jahr: ~57.000€

- Filamente, Marketing

2. Jahr: ~56.000€

- Filamente, Marketing, eigene CAD-Lizenz für 3D-Druck

3. Jahr: ~56.000€

- Filamente, Marketing, weiterer 3D-Drucker (andere Drucktechnologie), Jahreslizenz CAD-Programm

7.6 Anhang 6 Veröffentlichung Limes



# limes

01 / 22

Das Magazin der Hochschule Aalen

/ thema

## Die Zukunft nachhaltig gestalten

An der Hochschule Aalen wird der Grundgedanke einer ressourcenschonenden Entwicklung gelebt

HOCHSCHULE AALEN  
FORSCHUNG

**»WIR MÜSSEN HEUTE SCHON AN ÜBERMORGEN DENKEN«**

Rektor Prof. Dr. Harald Riegel im Interview über die Nachhaltigkeitsverantwortung der Hochschule

**NACHHALTIG ANZIEHEND**

Magnetforschung für eine bessere Ökobilanz



## WIEDERVERWENDBARE ABDECKUNGEN AUS DEM ÖKOLOGISCHEN 3D-DRUCK

SCHWER  
PUNKT

*Prof. Dr. Matthias Haag und Johannes Wanner forschen an biologisch abbaubaren bzw. recyclebaren 3D-gedruckten Kunststoff-Abdeckungen. Sie wollen Klebebänder, die bisher als Maskierung bei der Beschichtung von Bauteilen eingesetzt werden, durch die mehrfach verwendbaren Abdeckungen ersetzen. Finanziert wird das Forschungsprojekt durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.*

NACHHALTIGER 3D-DRUCK  
Johannes Wanner (links) und Prof. Dr. Matthias Haag  
mit den ersten Prototypen der Maskierungen.

Die meisten kennen es: Die Wohnung muss gestrichen werden. Vor allem das Abkleben der Wand ist zeitaufwendig. Wird die Malerrolle noch so konzentriert geführt – ganz exakt wird es ohne die Verwendung des Kreppbands nie. So ist es auch bei Beschichtungsprozessen in der Industrie. In einem speziellen Verfahren können technisch stark beanspruchte Oberflächen von Bauteilen erneuert werden. Dieses thermische Beschichtungsverfahren erlaubt es, alten, gebrauchten Maschinenteilen nur durch Wiederherstellen der Funktionsflächen ein zweites Leben zu ermöglichen.

Die Schwierigkeit liegt hier in dem positionsgenauen Auftrag der Beschichtung. Die Bereiche, die beschichtet werden sollen, müssen sicher begrenzt werden. Seither wird das, ähnlich wie beim Wandstreichen, mit einem speziellen Klebeband gemacht. Dieses ist nach dem Beschichten unbrauchbar und muss von den Mitarbeitenden in der Produktion entfernt und bereits nach einmaligem Gebrauch als Restmüll entsorgt werden. Außerdem müssen Kleberückstän-

de auf dem Bauteil mit Chemikalien entfernt werden. Dieses Abkleben der Bauteile ist nicht nur sehr aufwendig, sondern langfristig auch umweltschädlich. Hier sehen Prof. Dr. Matthias Haag, Leiter des Labors für Robotik und virtuelle Systeme, und Johannes Wanner, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Handlungsbedarf. In ihrem Forschungsprojekt, finanziert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, wollen sie mit dem Beschichtungsbetrieb rhv-Technik GmbH aus Waiblingen das Klebeband ersetzen. »Mittels 3D-Scan sollen Abdeckungen aus dem 3D-Drucker passgenau für Sonderbauteile entstehen. Diese sollen möglichst oft verwendbar und sogar recycelbar sein«, erklärt Haag und zeigt die ersten beiden Prototypen: Ein Druckgusswerkzeug und Schweißaufsatz stecken jeweils in einem Mantel aus Kunststoff. Die 3D-gedruckten Kunststoff-Mäntel passen haargenau auf das jeweilige Bauteil und lassen nur den Teil der Oberfläche frei, der beschichtet werden soll. Nach dem Beschichtungsprozess lässt sich der Schutzmantel rückstandslos abnehmen

und sofort auf das nächste Bauteil klippen. »Die Besonderheit ist, dass für die Maskierungen ausschließlich pflanzenbasierte Materialien, die sogar ökologisch abbaubar sind, zum Einsatz kommen«, so Wanner. Die Herausforderung liegt in dem Finden der perfekten Werkstoffkombinationen und aerodynamischen Oberflächen, um die hohen physikalischen Belastungen des Beschichtungsprozesses zu kompensieren. Die Abdeckungen müssen dabei der Bewegungsenergie des Beschichtungsmaterials und den hohen Temperaturen von über 1.000 °C mehrfach standhalten.

TEXT UND BILD GABY KEIL

### short summary

Prof. Dr. Matthias Haag and Johannes Wanner are researching the thermal resilience of 3D-printed recyclable plastic covers. Their goal is to replace adhesive tapes that are conventionally used as masking when coating components with reusable 3D-printed "covers". In addition, the maskings should be biodegradable or recyclable.

## 7.7 Anhang 7 Veröffentlichung Schweißen und Schneiden

Lizenziert für DVS Media GmbH (200535) - 14.07.2023

## BERICHTE

## Entwicklung additiv gefertigter Maskierungen für einen umweltfreundlichen Beschichtungsprozess

Beim thermischen Spritzen werden Maskierungen eingesetzt, um Bereiche von Bauteilen abzudecken, die nicht beschichtet werden dürfen (Maskieren). Aktuell werden diese Bereiche mit speziellem Klebeband händisch abgeklebt. Das Klebeband ist nach einmaliger Benutzung als Sondermüll zu entsorgen. Ziel ist es, individuelle Maskierungen additiv herzustellen, die mehrfach verwendet werden können. Stehen keine CAD-Daten der Bauteile zur Verfügung, werden die entsprechend abzudeckenden Bereiche durch einen 3D-Scanner digitalisiert. Anschließend werden die Maskierungen für Kleinserien mittels additiver Fertigung (3D-Druck) hergestellt. Innerhalb eines Kooperationsprojekts der Hochschule Aalen mit der Bybak + Hofmann rhv-Technik GmbH + Co. KG, wurden verschiedene Werkstoffe und „3D-Druck“-Verfahren auf ihre Tauglichkeit zum Herstellen wiederverwendbarer und recyclebarer Maskierungen für einen umweltfreundlichen thermischen Spritzprozess untersucht.

### 1 Einleitung

Bei vielen industriellen Prozessen wird eine hohe Anforderung an den Schutz der Bauteile gestellt. Beschichtungen können beispielsweise zum Erzeugen eines hohen Verschleißschutzes, zum Wiederaufbereiten oder zum Schützen der Oberfläche vor diversen Medien eingesetzt werden. Ein sehr flexibles und besonders für Kleinserien geeignetes Beschichtungsverfahren ist das thermische Spritzen. Hierbei wird der Beschichtungswerkstoff – beispielsweise Metalle, deren Oxide oder Carbide – in eine Flamme oder einen Lichtbogen eingebracht, dort erwärmt und auf das zu beschichtende Bauteil geschleudert. Abhängig vom Verfahren sind Temperaturen zwischen 1.000 und 14.000 K sowie Geschwindigkeiten der Beschichtungswerkstoffpartikel von 100 bis 2.000 m/s möglich.

Um die Haftung der Spritzschichten zu gewährleisten, muss die Oberfläche der zu beschichtenden Flächen vor dem Beschichten entfettet und durch einen Korund-Strahlprozess aufgeraut werden. Limitierungen des Beschichtungswerkstoffs bezüglich der Eignung für die

jeweiligen Bauteilwerkstoffe ergeben sich selten. Prinzipiell können Schichten auf Kunststoffe ebenso wie auf metallische Grundwerkstoffe aufgebracht werden. Dabei kann die Beschichtung nicht nur dem Grundwerkstoff angepasst werden, sondern auch Eigenschaften übertreffen. Die Temperaturbeständigkeit des Grundwerkstoffs kann dabei geringer sein. Dank der hohen Beschichtungsgeschwindigkeit und Kühlvorrichtungen wird das Bauteil selbst deutlich weniger als der Beschichtungswerkstoff erwärmt. Deshalb findet hier keine Änderung des metallischen Gefüges des Bauteils statt.

Das Projekt ist in mehrere Leistungspakete untergliedert, die jeweils Ergebnisse im „3D-Druck“ oder 3D-Scan hervorbringen. Im weiteren Verlauf des Beitrags werden Anforderungen und Ergebnisse erläutert, die für den Erfolg des Gesamtvorhabens notwendig sind.

### 2 Problemstellung

Da nur die Funktionsflächen eines Bauteils beschichtet werden dürfen, müssen nicht zu beschichtende Flächen händisch mit verschiedenen Lagen Spezialklebeband abgedeckt werden. Dabei werden unzählige Meter spezielles hitzebeständiges Klebeband allein beim Kooperationspartner verbraucht.

Speziell für Kleinserien (maximal zehn Teile), Reparaturen oder Prototypen ist das Maskieren mittels Klebeband Stand der Technik. Die Methodik ist ein ungenügender Kompromiss. Zunächst muss die Information der abzulebenden Grenzen an Mitarbeiter exakt übermittelt werden. Die Kanten der manuell angebrachten Klebebänder sind nur bedingt exakt positionierbar. Zudem sind die Klebebänder technologisch nicht verlässlich. Vielmehr kommt es durch die hohe Belastung beim Strahlen und Beschichten zu Ablöseprozessen oder dem örtlichen Durchdringen des Klebebands. Mehrschichtiges Abkleben ist daher unerlässlich.

Nach dem Beschichtungsprozess muss das verbrauchte Klebeband vom Bauteil gelöst werden. Hier entsteht eine große Menge an Abfall. Aufgrund der Anhaftung des Beschichtungswerkstoffs gilt dieser als Sondermüll. Zudem bleiben meist Kleb-

stoffreste am Bauteil haften. Diese müssen mittels Lösungsmittels von Hand entfernt werden. Hierfür sind Absauganlagen, Gefahrstoffschränke und Sicherheitssysteme, sowie weitere umfassende Schutzrichtungen für die Mitarbeiter notwendig.

Für einfache, beispielsweise rotations-symmetrische Bauteile werden bedingt mehrfach verwendbare Abdeckungen spanend hergestellt. Für komplexere Bauteile, die zum Beispiel Freiformflächen aufweisen, ist diese Fertigung sehr aufwändig, teuer und energieintensiv. Besonders bei metallischen, abrasionsfesten Maskierungen entstehen beim Beschichten Anhaftungen des Beschichtungswerkstoffs. Diese führen bei deren Demontage vom Bauteil zu Abplatzungen der Beschichtung im Grenzbereich zwischen Maskierung und Bauteil.

### 3 Zielsetzung

Ziel des Kooperationsprojekts ist die Erforschung und prototypische Entwicklung von Maskierungen. Die Maskierungen müssen mehrfach verwendbar und zuverlässig anzubringen sein. Hauptsächlich sollen die Umweltbelastung und die Müllmenge reduziert werden. Daher werden die Maskierungen aus umweltfreundlichen bzw. wiederverwertbaren (recyclebaren) oder sogar biologisch abbaubaren Materialien gefertigt. Die wirtschaftliche Darstellbarkeit alternativer Prozesse muss weiterhin gegeben sein. **Bild 1** zeigt ein Bauteil (schwarz), dessen Vorderseite (weiß kariert) beschichtet werden muss.



Bild 1 • Nicht zu beschichtende Bereiche werden mittels additiv gefertigter Maskierung abgedeckt.

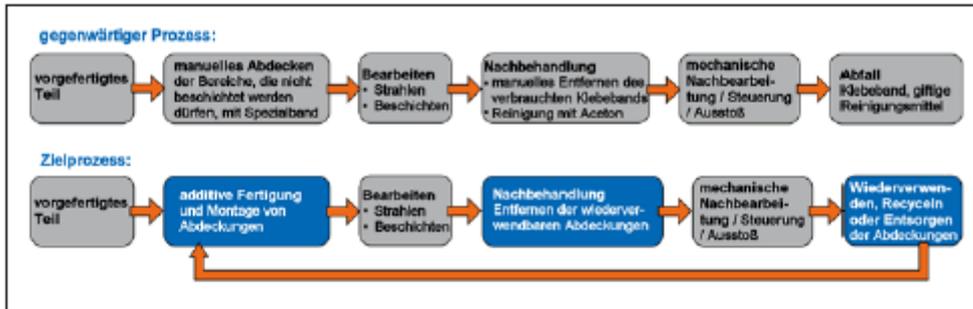


Bild 2 • Ist-Prozess gegenüber Soll-Prozess.

Tabelle 1 • Ergebnisse zum Vergleich verschiedener additiver Fertigungsverfahren (FDM – fused deposition modeling; SLA – Stereolithografie; DLP – „digital light processing“; LCD-Projektion; SLS – selektives Laserstrahlbitten).

Gewichtung / Kriterium	FDM	SLA	DLP	LCD	SLS
11,8% / Anschaffungskosten	sehr niedrig	mittel	niedrig	niedrig	sehr hoch
16,5% / Energiebedarf	600W	220W	12W	96W	1725W
3,5% / Vorbereitungsaufwand	gering	gering	gering	gering	mittel
3,5% / Nachbearbeitungsaufwand	mittel	hoch	hoch	hoch	mittel
18,8% / Verfügbarkeit verschiedener Materialien	ja	ja	ja	ja	begrenzt
12,9% / Genauigkeit bzw. Qualität	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
11,8% / Materialkosten	gering	mittel	mittel	mittel	mittel
7,1% / Druckgeschwindigkeit	mittel	mittel	hoch	hoch	gering
14,1% / Recyclingfähigkeit	ja	nein	nein	nein	begrenzt
Gesamtnote	9,08	6,8	8,83	8,83	4,4

Ein Teil der additiv gefertigten Maskierung (rot) ist montiert und deckt nicht zu beschichtende Bereiche ab. Klebeband wird somit nur noch in Ausnahmefällen benötigt. Allein durch die nicht mehr benötigte Produktion und Entsorgung des Klebebands erfolgt eine Umweltentlastung. Ergänzend kann auf Lösemittel zum Entfernen der Klebstoffreste verzichtet werden. Die Maßnahmen zum Schutz der Mitarbeiter vor Chemikalien sind ebenfalls nicht mehr erforderlich. Mit rund 40 Betrieben allein in Deutschland und Österreich [1] ergibt sich eine Einsparung von geschätzten 80.000 m<sup>2</sup> Klebeband [2], welches als Sondermüll entsorgt werden müsste und pro Jahr bei der Herstellung [3] rund 30.000 kWh Energie benötigt. Zudem können bis zu 28.000 l Lösemittel eingespart werden.

Da es sich oft um wenige gleiche Bauteile handelt, werden Maskierungen nach Beendigung des Auftrags meist nicht mehr benötigt. Werden die Maskierungen dann – ähnlich wie das Klebeband – als Sondermüll entsorgt, wird bereits durch die mehrfache Verwendbarkeit der Maskierung die Müllmenge reduziert. Um die Umweltverträglichkeit weiter zu erhöhen, werden die Maskierungen wiederverwertet, also zu Filament extrudiert und daraus erneut individuelle Maskierungen hergestellt. Nach mehreren Zyklen, wenn aufgrund der Werkstoffeigenschaften kein Recycling mehr möglich ist, soll das Material biologisch abgebaut werden. Dies ist bereits bei der Herstellung der Maskierungen zu berücksichtigen.

Ein Vergleich des aktuellen Prozesses mit dem geplanten Zielprozess zeigt das Ablaufdiagramm in Bild 2.

### 3.1 Anforderungen

Bei der Herstellung geeigneter Maskierungen sind mehrere Anforderungen zu beachten:

- geringe Fertigungszeiten der Maskierung,
- ökonomische und ökologische Herstellung,
- für den Beschichtungsbetrieb taugliche Handhabung des Fertigungsprozesses,
- für unterschiedliche Bauteile sind individuelle Maskierungen nötig,
- die Maskierung muss die Kontur des Bauteils exakt abdecken,
- die Maskierung muss der Belastung beim Strahlen und Beschichten mehrfach standhalten,
- recycelfähiges und biologisch abbaubares Material ist zu bevorzugen.

Diese zur tauglichen Herstellung von Maskierungen nötigen Anforderungen sind durch die additive Fertigung erfüllbar. Eine praxistaugliche Lösung versprechen einfach anwendbare und wirtschaftliche „3D-Drucker“. Vor allem Desktop-Lösungen basierend auf „fused deposition modeling“ (FDM) und photopolymerisierenden Verfahren (DLP – „digital light processing“, SLA – Stereolithografie oder LCD-Projektion) scheinen durch ihren niedrigen Energiebedarf, Tabelle 1, und einer Großzahl zur Verfügung stehender Materialien geeignet.

Basis für die additive Fertigung (3D-Druck) ist ein digitales Modell des zu beschichtenden Bauteils, woraus die Maskierungsgeometrie abgeleitet wird. Nicht immer wird dies vom Auftraggeber bereitgestellt, oftmals sind gar keine CAD-Daten vorhanden. Diese können im Fall einfacher Bauteilgeometrien mit geeigneten Messwerkzeugen treffsicher nachkonstruiert werden. Für komplexere Bauteile ist

## BERICHTE



Bild 3 • Erfolgreiche Abdeckung des Bauteils durch die alternative Maskierung.

eine digitale Erfassung nötig. 3D-Scanner können durch verschieden Verfahren, beispielsweise mittels Laser, Streifenlicht oder Fotogrammetrie, die Topologie von Bauteilen erfassen und in ein digitales Modell umwandeln. Zusätzlich kann das digitale Modell zur Qualitätssicherung und durch Scannen des zu beschichtenden Modells zur Schichtdickenmessung verwendet werden.

#### 4 Methodik

Die individuellen Vorgehensweisen innerhalb der Leistungspakete werden im Folgenden beschrieben.

##### 4.1 Scan-Prozess

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Bauteile werden besonders komplexe Geometrien, die einen aufwändigen Scan-Prozess fordern durch das Forschungsteam ausgewählt. Somit geht eine Evaluation verschiedener Scan-Verfahren und möglicher standardisierter Scan-Abläufe voraus. Durch eine gezielte Überführung der Scan-Daten – mittels bildbearbeitender Programme – in konstruktiv anpassbare 3D-Datensätze können erste Maskierungen gedruckt werden.

##### 4.2 Additive Herstellung von Maskierungen

Es wurden thermische Beschichtungsverfahren hinsichtlich der auf die Maskierungen einwirkenden Belastung durch Temperatur, kinetische Energie usw. durch das Expertenteam eines Beschichtungsbetriebs bewertet. Typische Werkstoffdaten wie Zugfestigkeit oder Langzeit-Temperaturbeständigkeit sind für eine erfolgreiche Abdeckung von Bauteilen nur bedingt notwendig. Es wird vielmehr Wissen benötigt, um Verformung, Abrasion, Anhaftungen von Beschichtungsmaterial, Beschädigungen und Standzeit zu bewerten. Primär werden umweltfreundliche Werkstoffe für die additive Fertigung untersucht. Diese

3D-Scanner	maximale Abweichung	Prozesszeit
Artec Eva	0,878 mm	1 h 20 min
Minolta VIVID VI-9i	0,987 mm	2 h 25 min

Tabelle 2 • Ausschnitt der Ergebnisse zur Untersuchung der Scanverfahren.

sind durch ihre Herstellung, Recyclingfähigkeit oder sogar dem biologischen Abbau besonders für die Zielsetzung tauglich. Im Vorversuch wurden Materialproben in Form einer Scheckkarte „gedruckt“, gestrahlt und beschichtet. Die Ergebnisse wurden durch eine Nutzwertanalyse dokumentiert und taugliche Materialien einem erneuten Test unterzogen. Hier wurde nun schrittweise die physikalische Belastung durch die Beschichtungsverfahren auf die Maskierungen erhöht. Zusätzlich wurde die Qualität der scharfen Kante im Grenzbereich zwischen Maskierung und Bauteil mit dem Grenzbereich zwischen Klebeband und Bauteil verglichen und objektiv bewertet. Die hieraus hervorgehenden tauglichen Materialien wurden in einem weiteren Versuch auf ihre Standzeit untersucht.

##### 4.3 Recyclingfähigkeit

Das Vorgehen zum Untersuchen der Recyclingfähigkeit bzw. der biologischen Abbaubarkeit ist abhängig von den als tauglich bewerteten Materialien und vom zu erwartenden Verschmutzungsgrad. Es ist möglich, dass der Beschichtungswerkstoff bedingt an den Maskierungen haftet. Daher ist das Entfernen von Beschichtungsrückständen von der Maskierungsoberfläche ein notwendiger Schritt. Erprobt wurden hierzu das Korund-Strahlen, das Drahtbürsten oder nötigenfalls das spanende Abtragen.

Recycling im Sinne einer vollständigen Rückführung der Maskierung in „Druckmaterial“ ist nur bei thermoplastischen Kunststoffen möglich. Durch die Degradation ist davon auszugehen, dass sich die Werkstoffeigenschaften aufgrund der Temperaturbelastung im Beschichtungsprozess ungünstig auf die Recyclingfähigkeit auswirken [4]. Daher kann hier nur bedingt auf bekannte Literatur zurückgegriffen werden. Die Erforschung der Recyclingfähigkeit von hitzebelastetem Material ist daher nötig. Dazu wurde eine Maskierung additiv gefertigt, die Hitzeeinwirkung des Beschichtungsprozesses simuliert, das Bauteil zu Granulat geschreddert und zu neuem Filament extrudiert. Durch erneutes Verwenden des aufbereiteten Filaments wurde dessen Eignung für die additive Fer-

tigung überprüft und durch anschließendes Verwenden der so gefertigten Maskierung deren Tauglichkeit getestet. Waren die Anforderungen erfüllt, wurde diese Maskierung erneut recycelt, bis sich unzureichende Eigenschaften einstellten.

Duroplastische Kunststoffe, hergestellt durch Photopolymerisation, können nicht ohne weiteres in flüssige Harze zurückgewandelt werden. Daher ist zusätzlich die biologische Abbaubarkeit des Materials nachzuweisen. Viele dieser Materialien sind lediglich als „eco friendly“ oder „plant based“ deklariert. Einige Harze und thermoplastische Kunststoffe sind nach DIN 14855-1 unter Laborbedingung als biologisch abbaubar zertifiziert. Nicht bekannt ist allerdings, ob eine Verrottung unter praxistauglicher Bedingung – beispielsweise auf dem Kompost – möglich ist. Hierzu wurden einheitliche Materialproben „gedruckt“, deren Gewicht dokumentiert und diese einem Gartenkompost zugeführt. Die Veränderungen wurden in regelmäßigen Abständen kontrolliert, um so einen optisch und physikalisch nachweisbaren Verrottungseffekt zu dokumentieren.

##### 4.4 Gesamtergebnis

Waren alle nötigen Eigenschaften bekannt, wurde eine allumfassende Nutzwertanalyse durchgeführt. Dadurch wurden die geeignetsten Werkstoffe hinsichtlich der vorgestellten Anforderungen bewertet. Erst durch das Wissen, welcher Scan-Prozess, welcher Werkstoff und welches Verfahren in Summe geeignet sind, um das Klebeband vollständig zu ersetzen, können erste prototypische Maskierungen für Kundenbauteile hergestellt werden. Die Erforschung des Gesamtprozesses wurde somit unter realen Bedingungen im Beschichtungsbetrieb fortgesetzt.

## 5 Aktuelle Forschung und Ergebnisse

In den folgenden Punkten werden Forschungsergebnisse zum aktuellen Projektstand vorgestellt.

### 5.1 Scan Prozess

Es ist ein möglichst genauer und schneller 3D-Scan der Bauteile nötig. Dies ist

**Tabelle 3** • Ausschnitt der Ergebnisse zur Untersuchung zur Tauglichkeit der Maskierungen, abhängig vom Beschichtungsprozess.

Rang Lichtbogen	Bezeichnung	Druckverfahren	Eigenschaft	Punkte
1.	Resion F80	LCD	flexibel	5,67
2.	Prime Creator Value UV Flex	LCD	flexibel	3,33
6.	Elegoo Plant based tough	LCD	umweltfreundlich	2,33
Rang Plasma				
1.	Anycubic ECO UV	LCD	umweltfreundlich	5,33
2.	Prime Creator Value UV Flex	LCD	flexibel	4,33

durch die Maßhaltigkeit der Scan-Daten und der Prozesszeit zu bewerten. Hierzu wurden ein Gussbauteil zuvor händisch vermessen und im Anschluss gescannt, die Daten aufgearbeitet und in für die Konstruktion taugliche Dateiformate gewandelt. Die Maßabweichung der CAD-Modelle wurden erfasst. Vorbereitungen wie das Besprühen der Oberfläche oder das Ankleben von Tracking-Punkten sowie das Nachbearbeiten, beispielsweise das Reinigen, und das Erstellen der finalen CAD-Datei wurden separat dokumentiert. **Tabelle 2** zeigt einen Auszug aus den Forschungsergebnissen.

### 5.2 Additive Herstellung von Maskierungen

Um einen Vergleich verschiedener auf Kunststoff basierender additiver Verfahren durchzuführen, wurden im Expertenteam die nachfolgenden Kriterien, mit entsprechender Gewichtung durch den Paarvergleich, definiert. Hierzu wurden typische „Drucker“ anhand eines Probeteils untersucht, **Tabelle 1**.

Es wurden im Vorversuch Materialproben in Form von Scheckkarten gestrahlt und beschichtet. Die Karten wurden im Expertenteam nach den Kriterien Abschätzung der Standzeit, Kantenkontur, Formstabilität, Geometrie der Oberfläche und Temperaturbeständigkeit begutachtet und nach Punkten (0 - nicht tauglich, 4 - keine Abrasion, keine Beschädigung usw. erkennbar) bewertet. Die hier als tauglich bewerteten Materialien wurde erneut untersucht. Erste dünnwandige (2 mm) Maskierungen wurden hergestellt und als Abdeckung beim Lichtbogen- und Plasmaspritzen eingesetzt. Ergänzend wurde hier der Grenzbereich zwischen Maskierung und Bauteil sowie die Materialanhaftung an der Maskierung bewertet. Hieraus ergaben sich als prozesstechnisch tauglich

anzunehmende Materialien und Verfahren, wie in **Tabelle 3** aufgeführt.

Unvorhersehbarerweise konnten hochtemperaturbeständige Materialien für den LCD-Druck den Belastungen nicht standhalten. Die flexiblen Materialien wiesen nahezu keine Anhaftung des Beschichtungsmaterials auf. Dies ist für die Prozesssicherheit entscheidend, da sich so keine ungewollten Partikel von der Maskierung lösen und die Beschichtung negativ beeinflussen können. Eine Maskierung allein aus flexiblem Material kann aber auf dem Bauteil nicht sicher fixiert werden. Eine Hüllen-Träger-Konstruktion mit dünnwandigen, aber stark belastbaren Außenhüllen und einem Träger aus umweltfreundlichem Material ist notwendig.

### 5.3 Recyclingfähigkeit

Im Versuch wurde ermittelt, ob es technologisch sinnvoll und möglich ist, bereits mehrfach hitzebelastetes Material erneut zu Filament zu verarbeiten und damit eine neue Maskierung herzustellen. Hierzu wurde die Wärmebelastung, die auf die Maskierung während des Beschichtungsprozesses einwirkt, im Labor simuliert. Die Temperatur, auf die sich das zu beschichtende Bauteil erwärmt, sowie die Dauer sind aus Versuchen bereits bekannt und betragen für das Testbauteil etwa 60°C und 45 min. Bereits beim Herstellen der Maskierung unterlag das Material beim FDM der ersten Hitzeinwirkung durch den Extruder des „3D-Druckers“. Danach wurde der Hitzeeintrag des Beschichtungsprozesses durch einen Ofen simuliert. Nach Abkühlen des Bauteils auf Raumtemperatur wurde dieses zu Granulat verarbeitet. Beim anschließenden Extrudieren erfolgt der nächste Hitzeeintrag. Ob das Filament weiterhin tauglich ist, wurde durch Probedrucke der Maskierungen überprüft. Bereits nach einmaligem Recyceln sind Veränderungen an der

Maskierung in Form von anhaftenden Filamentfäden (Stringing) und rauere Oberfläche erkennbar. Die additive Fertigung war jedoch prinzipiell möglich. Ein mehrfaches Recycling gelang aber nur bedingt. Die Tauglichkeit des Materials muss beim Strahl- und Beschichtungsprozess erneut untersucht werden.

Der Test zu den biologisch abbaubaren Materialien (Filamente und Harze) wurde über die Dauer von neun Monaten durchgeführt. Teststäbe wurden in Komposterde eingebettet und monatlich auf Veränderungen des Gewichts und der Optik überprüft. Eine praxistaugliche Kompostierbarkeit bzw. ein biologischer Abbau konnte trotz Positionierung des Versuchsaufbaus unter vegetationsfördernden Bedingungen am Fenster bei mindestens 21°C und dauerfeuchter Erde nicht festgestellt werden.

### 5.4 Gesamtergebnis

Ergebnisse zum Material und zur Umweltfreundlichkeit wurden in einer Nutzwertanalyse zusammengefasst und die geeignetsten Materialien wurden ermittelt. Die Ergebnisse sind unterteilt in die Bereiche:

#### technische Eignung (Gewichtung 50,3%)

- geringe Anhaftung des Beschichtungsmaterials;
- hohe Qualität der Grenze zwischen Bauteil und Maskierung;
- Formstabilität;
- vorläufige Abschätzung des Verschleißes;
- Temperaturbeständigkeit;
- Vorbereitung/Nacharbeit;

#### ökologische Eignung (Gewichtung 20,7%)

- Recyclingfähigkeit;
- biologisch abbaubar;
- pflanzenbasiertes „Druckmaterial“;
- Energieverbrauch bei der Materialherstellung;
- Energieverbrauch bei der additiven Fertigung;

#### ökonomische Eignung (Gewichtung 21%)

- Materialkosten;
- Fertigungszeit;
- Anschaffungskosten 3D Drucker.

**Tabelle 4** gibt einen Ausschnitt der Nutzwertanalyse auf Basis der Forschungsergebnisse wieder.

Tabelle 4 • Ergebnisse der Nutzwertanalyse zum Ermitteln der tauglichsten additiven Verfahren und Werkstoffe.

Rang Gesamtergebnis	Bezeichnung	Druckverfahren	Eigenschaft	Punkte (0 bis 9)
1.	Anycubic Eco UV	LCD	umweltfreundlich	5,4
2.	Prime Creator Value UV Flex	LCD	flexibel	4,5
3.	Elegoo Plant based tough	LCD	umweltfreundlich	4,14
4.	Anycubic UV Tough Resin	LCD	leicht flexibel	4,06
5.	Resion F80	LCD	hoch flexibel	3,89
6.	Extruder GreenTecPro	FDM	umweltfreundlich	3,85
7.	Material4Print PLA	FDM	umweltfreundlich	3,83
8.	Anycubic ABS-Like	LCD	Standardmaterial	3,74
9.	Extruder GreenTecProCarbon	FDM	umweltfreundlich	3,65
10.	Anycubic Craftsman	LCD	Standardmaterial	3,53

### 6 Fazit

Durch die Forschungsarbeit sind Materialien mit entsprechenden additiven Fertigungsverfahren bekannt, die technologisch, ökologisch und ökonomisch als Maskierung im Prozess des thermischen Beschichtens eingesetzt werden können. **Bild 3** zeigt die bereits demontierte, aus schwarzem, gummiartigem Harz hergestellte Maskierung. Eine hohe Qualität

der Abdeckung vom zu beschichtenden Bereich (unten im Bild) zum nicht zu beschichtenden Bereich (Bildmitte) ist gegeben. Ein Verschleiß der Maskierung ist bei einmaliger Nutzung noch nicht erkennbar. Eine mehrfache Verwendbarkeit ist daher plausibel. Dennoch wird ein finales Fazit zur Umweltentlastung durch Verzicht auf spezielle Klebebänder erst nach Erforschung der tatsächlichen

Standzeit der alternativen Maskierungen möglich.

M Haag, J. Wanner und M. Santin,  
Labor für Robotik und virtuelle  
Systeme, Fakultät Maschinenbau  
und Werkstofftechnik der  
Hochschule Aalen

### Literatur

- [1] N. N.: GTS-Mitgliederverzeichnis ([https://www.gts-ev.de/index.html?html\\_d/mitglied.htm](https://www.gts-ev.de/index.html?html_d/mitglied.htm)). Gemeinschaft Thermisches Spritzen e. V. - GTS, Unterschleißheim 2023.
- [2] N. N.: Eigene Angaben der Rybak + Hofmann rfv-Technik GmbH & Co. KG, Waiblingen 2023.
- [3] N. N. Wird eigentlich jede kleine Tesarolle gewickelt? Die Wissenschaft vom Kleben – Klebebänder und ihre Komponenten. Firmenschrift tesa 2022. Internet: <https://www.tesa.com/de-de/wikitapia/klebeband-herstellung-und-produktion.html>, zuletzt aktualisiert und geprüft am 29. Juni 2022.
- [4] Littek, S., u. a.: Messung zum Materialabbau von Polypropylen. Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology, 8 (2012), H. 4.

### DANKSAGUNG

Dank gilt dem Projektträger Deutsche Bundesstiftung Umwelt, der durch seine Förderung das Forschungsvorhaben (Aktenzeichen 36028/01) ermöglicht.