

Maskierungen aus widerstandsfähigen Materialien beim thermischen Beschichten

# Additive Fertigung optimiert Beschichtungsprozesse

M. Haag, M. Santin

**ZUSAMMENFASSUNG** An der Hochschule Aalen wurde an einem neuen Maskierungsverfahren für thermische Beschichtungsprozesse geforscht. Eine präzise thermische Beschichtung ist für viele hochbeanspruchte Bauteile entscheidend. Dabei ist es wichtig eine möglichst exakte Kantenkontur des Beschichtungsbereichs zu erreichen. Es wurde ein Verfahren erforscht, dass durch mehrschichtige und flexible Maskierungen äußerst präzise Kanten ermöglicht. Der Prozess wurde industriell erprobt und implementiert.

## STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Thermisches Beschichten, Maskierung

## Additive manufacturing optimizes coating processes

**ABSTRACT** Aalen University has been researching a new masking process for thermal coating. Precise thermal coating is crucial for many highly stressed components. It is important to achieve the most exact edge contour possible in the coating area. A process was researched that enables extremely precise edges through multi-layer and flexible masking. The process has been industrially tested and implemented.

## 1 Einleitung

Das Maskieren von Bauteilen bei der thermischen Beschichtung läuft bei Einzel- und Kleinserien überwiegend händisch ab. Damit einhergehend treten Herausforderungen bei der Präzision der Kantenkonturen auf. Beim Maskieren und Demaskieren, sowie anschließendem Reinigen der Bauteile bedarf es umfangreicher Vorkehrungen, auch um den Arbeitsschutz zu gewährleisten. Der erforschte Prozess, mithilfe von additiv gefertigten Maskierungen bietet eine hohe Präzision, sowie Verbesserungen der Ökologie und Ökonomie gegenüber der bestehenden Vorgehensweise.

Es gibt einige Methoden Bauteilbereiche abzudecken, um ungewolltes Beschichten zu verhindern. Neben dem bekanntesten Verfahren, dem Abkleben mit Klebebändern oder Folien, kommen auch Maskierungen aus Stahlblech zum Einsatz. Größter Nachteil hierbei ist, dass das Beschichtungsmaterial auf den Maskierungen haftet und diese nur dann wiederverwendet werden können, wenn sie vom Beschichtungsmaterial befreit wurden. Aus der Praxis sind Prozesse bekannt, bei denen die Maskierung lediglich einmal verwendet werden kann. Auch das Aufbringen von Lacken als Schutzschicht ist nach aktuellem Stand der Technik möglich. Duroplastische Maskierungen haben den Vorteil, dass die Beschichtungspartikel sehr schlecht auf ihnen haften. In [1] ist beschrieben, dass sich hier eine Qualitätsminderung der Beschichtungsbereiche ergibt, was auf das Abprallverhalten der Partikel zurückgeführt wird. Elastisch verformbare Maskierungen, die im Beschichtungsprozess aushärten, sind nach aktuellem Stand ebenfalls möglich und bieten deutliche Vorteile. Diese werden allerdings mithilfe einer Positivform gegossen und sind somit

für Einzel- und Kleinserien nicht kostengünstig und nicht rasch herstellbar. [1] Automatisierte Verfahren sind ebenfalls Stand der Technik. Mit ihnen können beispielsweise lichtaushärtende Materialien aufgetragen und durch UV-Licht ausgehärtet werden. Dieser Maskierungsprozess hat enorme Vorteile bei hochautomatisierten Anlagen. Gegenüber dem händischen Abkleben kann die Fehlerquote auf nahezu null reduziert werden. [2] Alle bis zum Zeitpunkt des Forschungsprojekts gängigen Verfahren zum Maskieren von Bauteilen weisen Schwachstellen auf, die mit passgenauen, wiederverwendbaren, additiv gefertigten Maskierungen behoben werden. Eine ökonomische und ökologische Verbesserung tritt insbesondere ein, wenn man die Vorteile aller bisher gängigen Verfahren kombiniert.

Im Forschungsprojekt wird insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Umweltfreundlichkeit geforscht. Dieser Aspekt ist vor allem durch die Wiederverwendbarkeit und den Ersatz von Gefahrenstoffen durch umweltfreundliche Materialien gegeben. Des Weiteren bieten die additiv gefertigten Maskierungen auch technologische Vorteile. Gerade beim High-Velocity-Oxygen-Fuel-Spritzen (HVOF) kann so eine sehr präzise Kantenkontur erreicht werden, die keiner Nachbearbeitung bedarf. Im Folgenden wird anhand von Versuchen der neu erforschte Maskierungsprozess erklärt und der Nutzen dargestellt.

## 2 Der Maskierungsprozess

Der neu eingeführte Maskierungsprozess, wurde um einen 3D-Scan der Beschichtungsbauteile erweitert. Gerade bei kleinen und mittleren Unternehmen ist nicht immer eine CAD-Datei vorhanden, die den Konstruktionsprozess der Maskierung deutlich

vereinfacht. Viele Bauteile besitzen Freiformflächen, wodurch eine Zeichnung nicht immer ausreichend ist. Ein 3D-Scan bietet hier die Möglichkeit, Bauteile im CAD direkt voneinander abzuziehen. Nach erfolgtem 3D-Scan, wird eine Datei (A) erstellt, die das zu beschichtende Bauteil virtuell abbildet. (A) kann in CAD-Programmen eingebunden werden. Die Außenkontur der Maskierung (B) hingegen wird durch das Werkzeug „Aufdicken“ und/oder durch zu skalierende Standardkörper erstellt. Die 3D-Druckdatei für die Maskierung kann nun mithilfe des Werkzeugs „Abziehen“, nämlich (B) minus (A) rasch erstellt werden.

Der neu erforschte thermische Beschichtungsprozess mit additiv gefertigten Maskierungen stellt sich wie folgt dar:

- Input: Vorgefertigtes Beschichtungswerkstück
- 3D-Scan des Beschichtungswerkstücks
- Konstruktion und additive Fertigung der Maskierungen
- Anbringen der Maskierungen (einfach aufstecken)
- Vorbehandlung (Strahlen) und anschließend thermisches Beschichten
- Abnehmen der erneut nutzbaren Maskierungen
- Optional: erneuter 3D-Scan zur Schichtdickenermittlung
- Optional: weiterer spanender Bearbeitungsschritt der Werkstücke
- Qualitätskontrolle
- Output: beschichtetes Werkstück
- Wiederverwendung, Recycling oder Entsorgung der Maskierungen

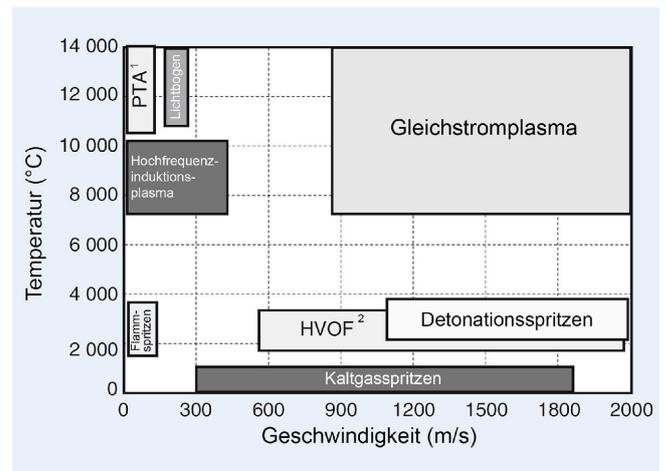
### 3 Additive Fertigung der Maskierungen im MSLA- und FLM-Verfahren

Die Additive Fertigung ermöglicht es inzwischen Maskierungen mit komplexen Strukturen aus widerstandsfähigen Werkstoffen herzustellen, die durch konventionelle Fertigungsverfahren in kleiner Serie keinesfalls wirtschaftlich darstellbar sind.

Die Fokussierung auf die Machbarkeit bei kleinen und mittleren Unternehmen, führte dazu die Maskierungen mit handelsüblichen 3D-Druckern herzustellen. Fused Layer Modeling (FLM)- und Masked Stereolithography Apparatus (MSLA)-Verfahren bieten hier eine breite Auswahl an verschiedensten Materialien. Potenziell geeignete Materialien wurden im Versuch getestet.

Für die erforschte zweiteilige Maskierung, werden beide Verfahren verwendet. MSLA für die Herstellung einer flexiblen Hülle, die präzise an die Beschichtungsgrenze heranreicht und FLM für eine aus geometrischen Primitiven erstellte, recycelbare Tragschale.

Die Herstellung der direkt vom Beschichtungsstrahl betroffenen Maskierungen findet mittels Photopolymerisation von Kunstharzen statt. Hierbei gibt es verschiedene Verfahren. Das bekannteste Verfahren stellt die Stereolithografie (SLA) dar. Hierbei werden die Kunstharze durch einen Laser ausgehärtet. Eine Druckplattform fixiert die erste Schicht und verfährt um den Aufbau weiterer Schichten zu ermöglichen. Das hier eingesetzte Verfahren maskierte Stereolithografie (MSLA) hingegen besitzt eine UV-Lichtquelle, welche durch einen LCD-Bildschirm maskiert wird. Somit werden komplette Schichten in kurzer Zeit ausgehärtet. Der Vorteil dieser Technologie liegt dementsprechend hauptsächlich in der Druckgeschwindigkeit. Charakteristisch für Drucker im MSLA-Verfahren ist die Pixeldichte. Je höher die Pixeldichte, desto genauer kann ein Volumenkörper hergestellt werden. Verglichen mit dem FLM-Verfahren, ist die Auf-



**Bild 1.** Gastemperaturen und -geschwindigkeiten, erzielt mit verschiedenen thermischen Spritzsystemen [4]

<sup>1</sup> PTA: Plasma-Transferred-Arc dt. Plasma-Pulver-Auftragschweißen

<sup>2</sup> HVOF: High-Velocity-Oxygen-Fuel dt. Hochgeschwindigkeitsflammspritzen [Übers. d. Verf., original Englisch]. Grafik: HS Aalen

lösung und Oberflächenqualität bei photopolymerisierenden, additiven Verfahren deutlich höher. [3]

Ein großes Problem bei der Herstellung flexibler Maskierungen aus Harzen ist, dass eine unerwünschte Verformung der flexiblen Materialien während des Druckprozesses stattfinden kann. Nach einigen von den Autoren durchgeführten Drucktests hat sich herausgestellt, dass Maskierungen mit einer Wandung von 4 mm eine Bauhöhe von 100 mm in Z-Richtung nicht überschreiten dürfen, um die Formgenauigkeit zu gewährleisten. Außerdem wurde bei Hohlräumen, selbst mit Auslauföffnungen, eine Verformung des Bauteils festgestellt. Um den Abfluss des hochviskosen (zähflüssigen) Harzes zu gewährleisten, wurde eine verlängerte Wartezeit nach dem Senken der Bauplattform in das Harzbad eingestellt. Um die Passgenauigkeit der 4 mm dicken Wandungen zu erreichen, stellten sich 5 s Wartezeit als tauglich heraus.

Während der Herstellung der flexiblen Maskierungen, werden die Hartschalen im FLM-Verfahren gedruckt. Hierbei wurde der Biopolymer aus den Vorversuchen gewählt, da dieser auch durch seine biologische Abbaubarkeit und Recyclingfähigkeit überzeugt.

### 4 Vorversuche zu potenziell geeigneten Materialien

Für die durchgeführten Versuche wurden gemeinsam mit dem Industriepartner drei gängige thermische Beschichtungsverfahren ausgewählt. Diese unterscheiden sich in ihren Geschwindigkeiten und Flammentemperaturen. Einen Überblick über verschiedene Verfahren und deren Flammentemperaturen, sowie Partikelgeschwindigkeiten bietet **Bild 1**.

Die für den Versuch gewählten Verfahren sind:

- **Lichtbogenspritzen**  
(Partikelgeschwindigkeit: circa 150 m/s, Flammentemperatur: circa 11 000 K)
- **Plasmaspritzen (Gleichstromplasma)**  
(Partikelgeschwindigkeit: circa 900 m/s, Flammentemperatur: circa 10 000 K)



**Bild 2.** Testmaskierung oben gestrahlt und im Lichtbogenverfahren beschichtet. Grafik: HS Aalen

#### • Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF)

(Partikelgeschwindigkeit: circa 2000 m/s, Flammentemperatur: circa 3000 K)

Flammentemperaturen und Partikelgeschwindigkeiten sind jedoch von vielen Faktoren abhängig und können hier nur als Richtwert verwendet werden. Gerade das manuelle Beschichten in kleinen und mittleren Unternehmen erfolgt oft anhand langjähriger Erfahrungen der Mitarbeitenden. Abstände zwischen Sprühbrenner und Beschichtungswerkstück können folglich variieren, was diese Werte deutlich verändert. Trotzdem spiegeln die hier durchgeführten Versuche die Realität wider und sind somit repräsentativ.

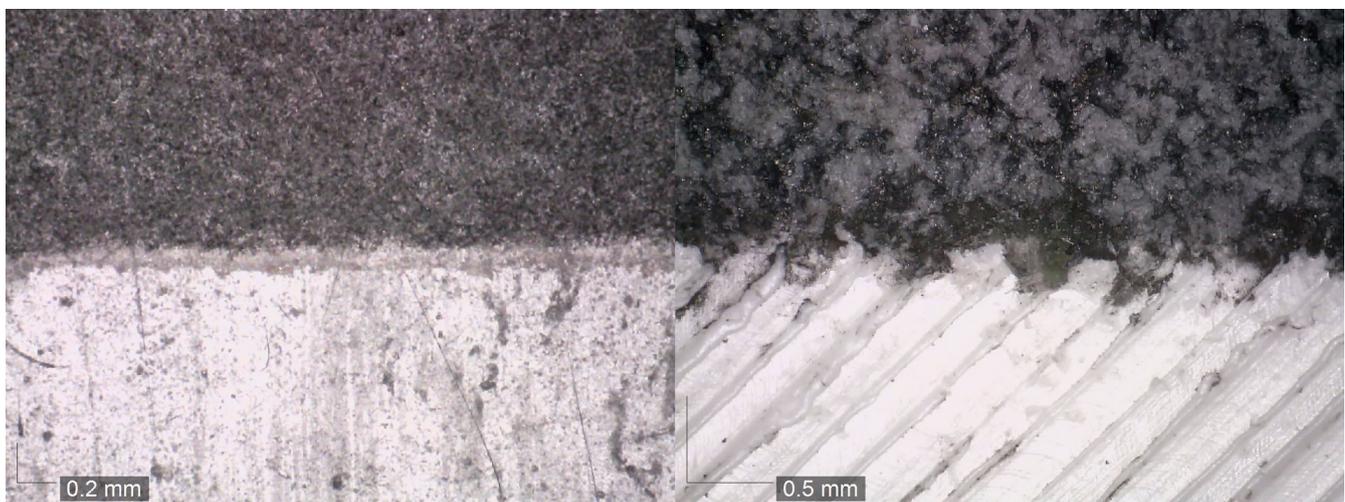
Die Versuche sollen aufzeigen inwiefern Kunststoffe als Ausgangsmaterialien für den Maskierungsprozess tauglich sind. Dabei gelang es nachzuweisen, dass durch die verfahrensbedingt kurze Einwirkung der Beschichtungspartikel sogar einige thermoplastische Maskierungen, hergestellt im FLM-Verfahren, standhalten.

In **Bild 2** erkennt man einen Teststreifen, hergestellt aus einem auf PLA basierenden Werkstoff mit einer Dicke von 1 mm.

Der Streifen wurde zur Hälfte mit Korund gestrahlt und anschließend im Lichtbogenspritzverfahren mit Chrom-Stahl beschichtet. Das Strahlen mit Korund stellt die Vorbehandlung der thermischen Beschichtung dar. Hierbei versagen vor allem harte, spröde Maskierungen, welche im MSLA-Verfahren hergestellt wurden. Laut Herstellerangaben liegt die Schmelztemperatur des in Bild 2 verwendeten Filaments bei 180 °C bis 200 °C. [5]. Die auf der Maskierung aufprallenden Partikel übersteigen diesen Wert bei Weitem, wenn man davon ausgeht, dass die gemessene Flammentemperatur bei diesem Versuch bei circa 3000 °C lag. Durch die kurzzeitige Hitzeeinwirkung, sowie das anschließende prozessbedingte Kühlen der Beschichtungsstelle, gelingt es jedoch auch Materialien, die auf dem Datenblatt eine wesentlich geringere Hitzeresistenz besitzen als Maskierungen zu verwenden.

Bei den in **Bild 3** dargestellten Materialien handelt es sich links um den Elastomer, hergestellt im MSLA-Verfahren. Jeweils der obere Teil der Proben wurde gestrahlt und thermisch beschichtet. Das Material wurde aufgeraut. Dies geschieht insbesondere durch den Strahlprozess. Trotz der gesteigerten Oberflächenrauheit haftet kein Material an. Die Anhaftung am Material ist entscheidend, da sich dann größere Materialanhäufungen an der Kantenkontur bilden. Dieser Schichtaufbau haftet nun an der Maskierung und am Beschichtungsbauteil, wodurch beim Entfernen der Maskierung die Kante undefiniert abbricht. Aufgrund dessen ergibt sich eine mangelhafte Kantenkontur beziehungsweise ein Übergang zum unbeschichteten Bereich, der aufwendiger Nacharbeit bedarf. Die Reinigung und somit die Wiederverwendbarkeit ist ein weiterer wichtiger Faktor. Eine Maskierung ohne Beschichtungsmaterialanhaftung kann wiederverwendet werden, passt erneut exakt auf das Bauteil und lässt sich anschließend sortenrein recyceln beziehungsweise entsorgen.

Rechts in Bild 3 handelt es sich um Biopolymer. Durch das FLM-Verfahren besitzt diese Probe eine deutlich höhere Oberflächenrauheit in nicht beschichtetem Zustand. Folglich werden aus dem Median herausragende Teile der Oberflächenstruktur beim thermischen Beschichten besonders belastet. Diese Bereiche schmelzen an und verbrennen. Des Weiteren besitzt der Thermoplast eine deutlich niedrigere Temperaturresistenz im Vergleich



**Bild 3.** Links: Probe aus Elastomer, hergestellt im MSLA-Verfahren, rechts: Probe aus Biopolymer, hergestellt im FLM-Verfahren. Grafik: HS Aalen

zum Harz. Materialanhaftungen sind hierbei sehr gering, können jedoch aufgrund von mechanischen Verklammerungen nicht ausgeschlossen werden. Die Autoren schließen daraus, dass flexible Maskierungen, hergestellt im MSLA-Verfahren einen deutlichen technischen Vorteil aufweisen. Für nicht beschichtungsnahe Bereiche lässt sich auch ein Biopolymer verwenden. Die Weiterentwicklung von Materialien in der additiven Fertigung schreitet rasch voran. Für das Forschungsprojekt und die sofortige Umsetzbarkeit in Betrieben wurden jedoch marktgängige Materialien verwendet.

Die verschiedenen Harze und Filamente, die als Ausgangsstoffe zur Herstellung der Maskierungen dienen, wurden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für den Prozess bewertet. Unter folgenden Gesichtspunkten wurde die Bewertung durchgeführt:

- Technische Tauglichkeit
- Kantengüte
- Mögliche Wiederverwendungen
- Ökologische Tauglichkeit
- Energieverbrauch
- Recyclingfähigkeit
- Biologische Abbaubarkeit
- Ökonomische Tauglichkeit
- Prozesskosten (Arbeit, Raum, Energie, Material...)
- Anschaffungskosten für 3D-Drucker

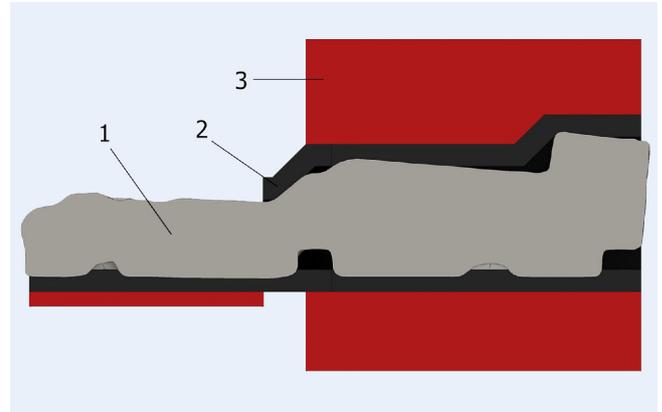
Die ökologische und ökonomische Betrachtung fließt zur Bewertung mit ein, da die Umsetzung eines technisch überlegenen Maskierungsprozesses für kleine und mittlere Unternehmen auch hiervon abhängt. Sind besonders kostenintensive 3D-Drucker oder Materialien nötig, wird der Prozess eher nicht umgesetzt. Hierbei wird der Vergleich zum aktuell noch üblichen Maskieren mit Klebeband gezogen. Am Ende der Bewertung wurden zwei Materialien in einem Hüllen-Träger-System als tauglich ermittelt. Ein im MSLA-Verfahren verarbeitetes Harz von der Firma Resione, welches flexible Maskierungen mit einer Shorehärte von 50 A bis 60 A ermöglicht, bildet die direkte Schutzschicht an der Trennkante. [6]

Ein Biopolymer Filament namens „GreenTec Pro“ vom Hersteller Extruder, dient als Hartschale zur Fixierung und Einspannung. Dieses Biopolymer besteht aus nachwachsenden Rohstoffen und ist biologisch abbaubar, was die Ökologie des gesamten Prozesses deutlich verbessert. Im Vergleich zu PLA ist es mechanisch belastbarer und hält höheren Temperaturen stand. [5]

## 5 Konstruktionsprozess

Sind keine CAD-Daten verfügbar, so können auf Basis eines vorausgehenden 3D-Scans Volumenkörper erstellt werden, die passgenau zum Beschichtungsbauteil sind. In **Bild 4** ist ein maskiertes Bauteil dargestellt, anhand dessen sich die einzelnen Konstruktionsschritte und Maskierungskomponenten erkennen lassen.

Die Konstruktion der flexiblen Maskierungshülle wurde hier anhand des 3D-Scans durchgeführt und anschließend mit einem Aufmaß von 4 mm versehen. Der so entstandene vergrößerte Volumenkörper muss mit einer Wandung beziehungsweise Hülle versehen werden, um Störkonturen zu beseitigen und Haltefunktionen durch Hinterschnitte zu ermöglichen. Hier hat sich bei den praktischen Beschichtungsversuchen ein Aufmaß von 1 mm bewährt. Dieses muss jedoch je nach Beschichtungsbauteil angepasst werden. Das Scanbauteil wird nun vom entstandenen Hüll-



**Bild 4.** Beschichtungsbauteil mit Maskierung  
[<sup>1</sup>Beschichtungsbauteil, <sup>2</sup>dreiteilige, flexible Maskierungshülle, <sup>3</sup>Hartschale]. Grafik: HS Aalen

körper abgezogen und man erhält somit eine passgenaue Negativform des Beschichtungsbauteils mit Haltefunktionen. An der Beschichtungskante muss der zu beschichtende Bereich mittels Projektion der Außenkante freigelegt werden. Die entstandene flexible Maskierungshülle muss nun bei Dimensionen über 100 mm geteilt werden. Je nach Bauteil ergeben sich somit mehrere Schalen. Im Anschluss werden die Hartschalen parametrisiert, auf die Dimensionen des Beschichtungsbauteils angepasst und je nach Einspannsituation in der Beschichtungslage (Parallelaufnahme, Dreilinienaufnahme) ausgewählt. Hierbei ist ebenfalls auf Haltefunktionen beziehungsweise einen Formschluss zu achten. Falls es dünne Bereiche gibt, bei denen die flexible Maskierungshülle ungestützt höher als 25 mm herausragt, müssen diese durch eine Klammer beziehungsweise Stützkonstruktion fixiert werden. Damit wird verhindert, dass sich das Material unter Einwirkung des Beschichtungsstrahls vom Bauteil weg biegt und somit die Kante verfälscht. Klammern und Stützen können ebenfalls vom bestehenden Bauteil abgezogen werden und sitzen somit passgenau. Falls diese stärker dem Beschichtungsstrahl ausgesetzt sind, sollten Fasen und Radien zur Ableitung des Strahls vorgesehen werden.

## 6 Beschichtungsversuche am realen Bauteil

Vor den Beschichtungsversuchen wurde bereits eine Reihe an Vorversuchen durchgeführt. Hierbei kamen simple Geometrien zum Einsatz, wie zum Beispiel das Maskieren eines Rohrs. Unter anderem wurde hierbei die Wandung von 4 mm getestet und validiert. Ab einer Wandstärke der flexiblen Maskierungshülle von 4 mm gibt es keine Standzeitverbesserungen mehr. Bei den durchgeführten Beschichtungsversuchen, wird mit den gleichen Parametern beschichtet, wie zuvor mit Klebeband, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Mit dem dargestellten Verfahren wurden zwei Bauteile maskiert, gestrahlt und beschichtet. Diese Bauteile besitzen dabei einen Kantenverlauf, der eine Freiformfläche abschließt. Diese anspruchsvolle Beschichtungs Aufgabe wird mit dem erforschten Verfahren getestet. Dabei wurde die Maskierung so lange wieder verwendet, bis die Kantenqualität aufgrund von Beschädigungen nicht mehr akzeptabel war. Als Referenz dienen hier Bildvergleichstabellen beim Industriepartner, mit denen im Rahmen der Qualitätssicherung abgeglichen wird, ob Beschichtungen in Ordnung sind. Bei spontaner Zerstörung einer



**Bild 5.** HVOF-Beschichtungsversuch mit additiv gefertigten Maskierungen.  
Foto: HS Aalen



**Bild 6.** Beschichtetes Werkstück mit hoher Kantenqualität. Foto: HS Aalen

Maskierung wurde der Prozess sofort abgebrochen und die Verwendungen bis zum Bruch gewertet.

Im HVOF-Verfahren hat die Klammer nur einen Versuch standgehalten. In **Bild 5** erkennt man, dass für den zweiten Durchgang eine Klemme verwendet wurde, die allerdings denselben Effekt hat. Im HVOF-Verfahren kann die Maskierung zweimal wiederverwendet werden. Im Plasma-Beschichtungsverfahren ist es gelungen die Maskierung 10-mal wieder zu verwenden und im Lichtbogen-Beschichtungsverfahren 14-mal.

Außerdem lässt sich in Bild 5 ein Abprallverhalten der Partikel erkennen. Dies führt dazu, dass die Partikel nicht an der Oberfläche der Maskierung haften und somit ein Aufbau verhindert wird. Dadurch, dass an der Maskierung keine Materialansammlung besteht, platzt beim Abnehmen der Maskierung kein Material ab und die Beschichtung bleibt unbeschädigt. Die Qualität der Beschichtungskante war bei allen Verfahren sehr gut. Gerade beim HVOF-Verfahren besteht ein deutlicher Vorteil gegenüber dem Klebeband. Beschichtungskanten, maskiert mit Klebebändern, sind eher ausgefranst. Durch das manuelle Aufbringen der Klebebänder und das Ausschneiden des Beschichtungsbereiches mit einer Klinge, sind die Ränder oft unförmig. Durch additiv gefertigte Maskierungen sind die Ränder sehr akkurat und ohne

Fehlstellen wiederholgenau herstellbar. **Bild 6** zeigt ein beschichtetes Bauteil nach dem Abnehmen der additiv gefertigten Maskierungen, ohne Nachbearbeitung.

Die Kantenkontur ist von hoher Qualität und es befindet sich lediglich Beschichtungsmaterial an der dafür vorgesehenen Fläche. Es besteht eine deutliche Qualitätsverbesserung gegenüber dem Maskieren mit Klebeband.

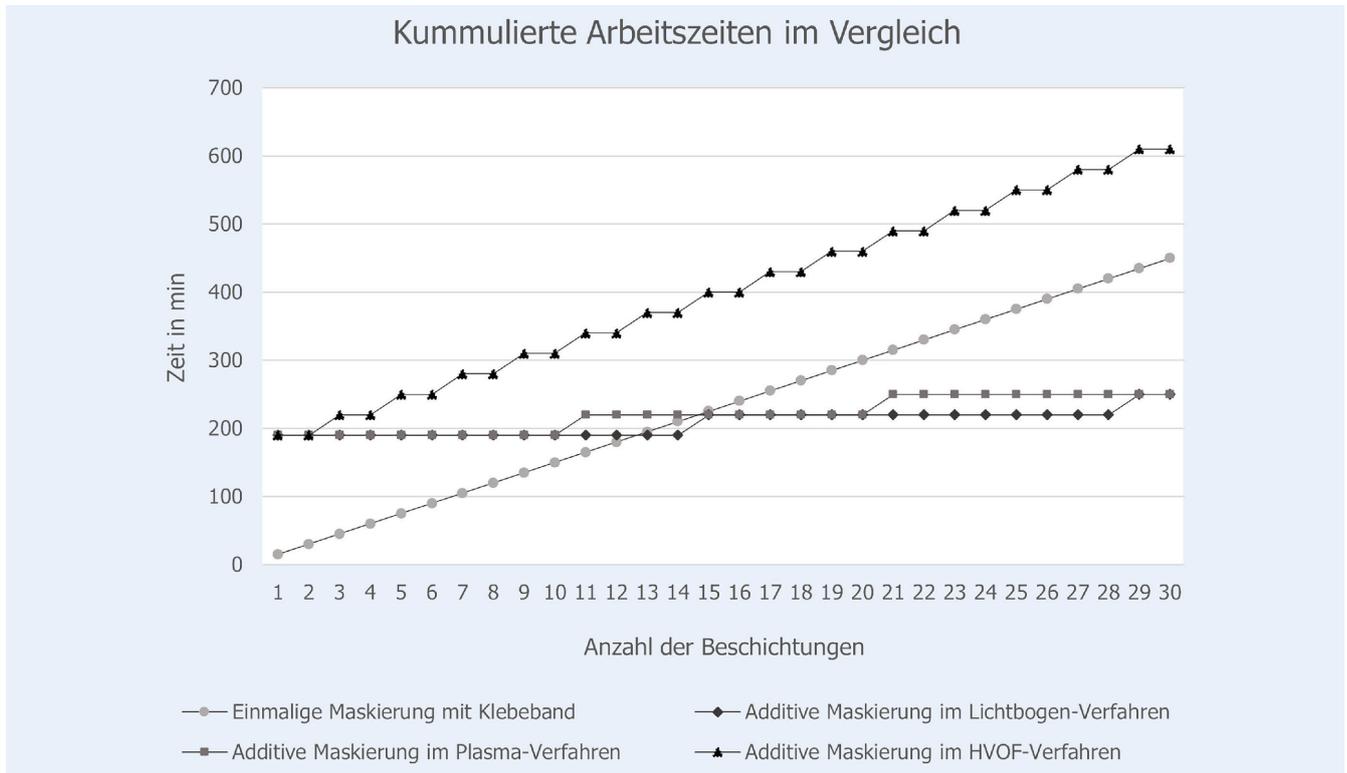
Neben offensichtlicher Qualitätsverbesserungen und ökologischer Vorteile, gilt es den Prozess ökonomisch zu betrachten. Das hier gewählte Praxisbeispiel ist Teil einer für thermische Beschichtungsprozesse typischen Kleinserie, die sich halbjährlich oder jährlich wiederholt. Hier besteht ein wirtschaftlicher Vorteil. Die Werte für diese Betrachtung wurden jeweils bei geschulten und eingearbeiteten Probandinnen und Probanden erhoben. Der zeitliche Aufwand für das Scannen eines Beschichtungsbauteils beläuft sich auf circa 80 min und wurde hier berücksichtigt. Bei vorliegendem CAD-Modell entfällt dieser Schritt. Die Konstruktion der Maskierungen nimmt einmalig in etwa 80 min in Anspruch. Für die additive Fertigung können pro Maskierung circa 30 min für Slicen, Start, Entnahme und Reinigung veranschlagt werden. Die Druckzeit selbst wird bei der Kostenkalkulation als nicht relevant betrachtet, da in dieser Zeit andere Tätigkeiten ausgeführt werden. Das Maskieren des in Bild 4 dargestellten Beschichtungsbauteils dauert bei geübten Mitarbeitenden circa 15 min. Hierbei ist das Abkleben, Kantenfeilen, sowie das anschließende aufwendige Reinigen mit inbegriffen, welches bei additiv gefertigten Maskierungen entfällt. Das Montieren und Demontieren der additiv gefertigten Maskierungen dauert lediglich einige Sekunden, weshalb es vernachlässigt werden kann. Natürlich wird für die Konstruktion der Maskierungen eine dafür ausgebildete Person benötigt. Gemessen an den verschiedenen Verfahren, ist der zeitliche Aufwand im Verlauf wie in **Bild 7** veranschaulicht.

Folglich gibt es eine positive Entwicklung der zeitlichen Vorteile für das Lichtbogenspritzen ab 13, und für das Plasmaspritzen ab 15 Beschichtungsbauteilen. Das HVOF-Verfahren hat keinen zeitlichen, und somit auch keinen ökonomischen Vorteil.

## 7 Fazit

Die gewählten thermischen Beschichtungsverfahren stellen gängige Prozesse bei kleinen und mittleren Unternehmen dar. Das HVOF-Verfahren stellte sich als problematischstes Beschichten für die additiv gefertigten Maskierungen heraus. Aufgrund der Prozessparameter kann davon ausgegangen werden, dass hohe Partikelgeschwindigkeiten eher zum Versagen einer Maskierung führen, als hohe Flammentemperaturen. Dies wurde in den Versuchsreihen zur Beschichtung beobachtet. Die Partikel haften nicht auf der flexiblen Maskierungshülle an, vielmehr prallen diese ab. Dabei ändern die Partikel ihre Richtung. Es wird vermutet, dass diese neben der Richtungsänderung auch in Ihrer Geschwindigkeit reduziert, also gedämpft werden und daher nach Abprall keine Anhaftung mehr erfolgt. An der Kante stellt sich kein Materialaufbau ein und es kommt zur beobachteten hohen Kantenqualität. Ein großer Vorteil sollte sich auch für das präzise Maskieren auf Freiformflächen ergeben. Mit Klebeband ist dies schwer möglich.

Durch die ausgewählten Verfahren konnten sowohl hohe Partikelgeschwindigkeiten mit niedrigeren Temperaturen, als auch hohe Temperaturen mit niedrigen Partikelgeschwindigkeiten



**Bild 7.** Kumulierte Arbeitszeiten der verschiedenen Beschichtungsverfahren im Vergleich. Grafik: HS Aalen

getestet werden. Das additive Maskieren beim HVOF-Verfahren hat in diesem Anwendungsfall leider keine ökonomischen Vorteile, da die Maskierungen nur zweimal Stand halten. Allerdings ist eine Kantenqualität erreicht worden, die mit Klebebändern nicht möglich ist. Folglich besteht der Vorteil gegenüber Klebebändern auch beim HVOF-Beschichten.

Der Scan- und Konstruktionsprozess ist aktuell zeitintensiv, kann allerdings optimiert werden. Im Zuge der Digitalisierungsbestrebungen im Sinne von Industrie 4.0 ist es wichtig, dass zu jedem Bauteil CAD-Daten beiliegen. Die hier dargestellte Zwischenlösung des 3D-Scans kann folglich in Zukunft entfallen. Trotzdem besteht auch mit der aktuellen Betrachtung ein ökonomischer Vorteil beim Lichtbogen- und Plasmaspritzen. Dieser würde sich dementsprechend bei vorliegenden CAD-Daten erhöhen.

Die Auswahl der Filamente und Harze für die additive Fertigung stellt den aktuellen Stand der Technik dar. In den letzten Jahren gab es im Bereich der additiven Fertigung viele Innovationen und Neuerungen, was das Verfahren rasch verbessert und neue Materialien hervorbringt. Folglich kann es auch in Zukunft neue, nachhaltige Materialien geben, die für den dargestellten Prozess in Frage kommen und ihn verbessern.

Durch die additive Fertigung ergibt sich ein äußerst präzises Maskierungsverfahren, welches deutliche Vorteile in der Produktion bei kleinen und mittleren Unternehmen bietet. Gerade bei

wiederkehrenden Kleinserien überwiegen die Vorteile des erforschten Prozesses. Selbst für Großserien und simple Beschichtungswerkstücke, kann das Verfahren Vorteile hinsichtlich der Kantenometrie liefern.

#### FÖRDERHINWEIS

Die beschriebenen Forschungsergebnisse wurden im von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt „Ressourcenschonender Beschichtungsprozess unter Entwicklung geeigneter Maskierungen und Rückführung des Materialauftrags“ (Projekt 36028/01) erzielt.

#### DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt dem Praxispartner, der Rybak + Hofmann rhv-Technik GmbH & Co. KG für die Durchführung und Auswertung der Beschichtungsversuche und die gute Zusammenarbeit im Projekt.

## Literatur

- [1] Jakimov, A.; Herter, M.; Schneiderbanger, S.: Vorrichtung und Verfahren zum Maskieren einer Bauteilzone. Patentschrift. 11.08.2009. Internet: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=WO002010031370A1>. Zugriff am 14.06.2024
- [2] Dymax Europe GmbH: Maskieren geht auch anders. JOT Journal für Oberflächentechnik 62 (2022) 10, S. 78–79
- [3] Formlabs GmbH: Leitfaden zum Kunstharz-3D-Druck: SLA, DLP, MSLA und LCD. Internet: <https://formlabs.com/de/blog/vergleich-3d-druck-sla-dlp/>. Zugriff am 14.06.2024
- [4] Fauchais, P. L.; Heberlein, J. V.; Boulos, M. I.: Thermal Spray Fundamentals. Boston, MA: Springer US 2014
- [5] Extrudr | FD3D GmbH: Technisches Datenblatt. GreenTec Pro. Internet: <https://s3-extrudr.mgh3.mynet.at/extrudr-media/datasheets/tds/tds-de/greentec-pro-TDS-de.pdf?response-content-disposition=attachment%3B+filename%3D%22greentec-pro-TDS-de.pdf%22>. Zugriff am 14.06.2024
- [6] Resione: F Series Flexible Resin Instruction. Stand: 14.06.2024. Internet: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0464/1033/4360/files/F\\_series\\_flexible\\_elastic\\_resin\\_instruction\\_44f8dc85-043b-46a6-898d-3b5f41e636f9.pdf?v=1714962646](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0464/1033/4360/files/F_series_flexible_elastic_resin_instruction_44f8dc85-043b-46a6-898d-3b5f41e636f9.pdf?v=1714962646)



**Prof. Dr. Matthias Haag**  
 matthias.haag@hs-aalen.de  
 Foto: HS Aalen



**Marco Santin, M. Sc.**  
 marco.santin@hs-aalen.de  
 Foto: HS Aalen  
 Hochschule Aalen  
 Labor für Robotik und virtuelle Systeme  
 Fakultät Maschinenbau und Werkstofftechnik  
 Beethovenstr. 1, 73430 Aalen  
 www.hs-aalen.de

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)