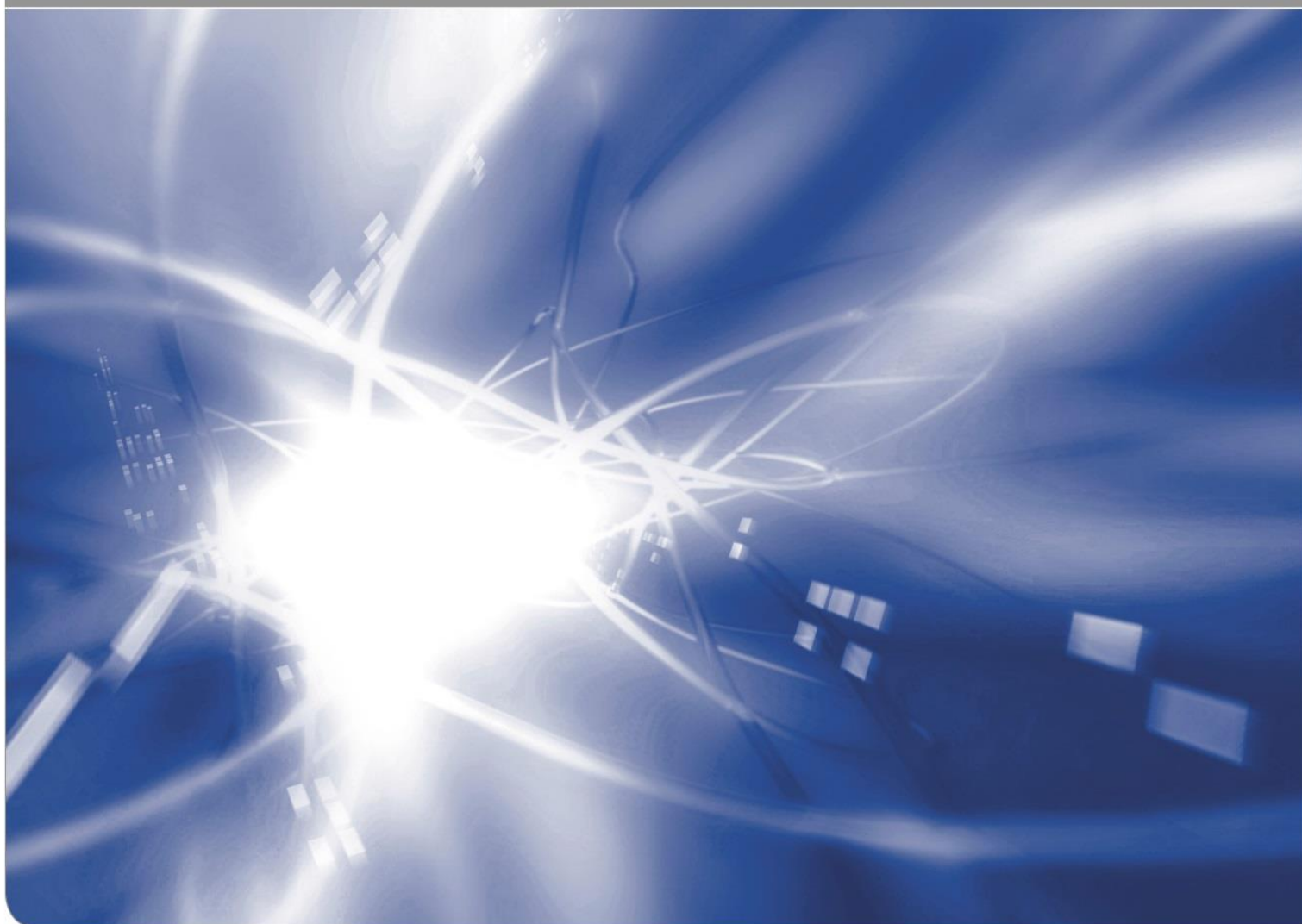


Industrielle Ertüchtigung des ARBURG Freiformens zur Herstellung metallischer Bauteile

Abschlussbericht DFG Transfer FL 197/78-1

von Nikolai Krischke¹, Jürgen Fleischer¹

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 241



¹ wbk Institut für Produktionstechnik

DFG-Geschäftszeichen: FL 197/78-1

Projektnummer: 443103294

Kooperationspartner: Dr. Eberhard Duffner, ARBURG GmbH
Heribert Wille, Heidelberger Druckmaschinen AG

Berichtszeitraum: 01.06.2020 – 31.05.2022
(mit kostenneutraler Verlängerung bis 30.11.2022)

wbk Institut für Produktionstechnik

Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2024

ISSN: 2194-1629

1. Zusammenfassung / Summary

In diesem Projekt konnte die industrielle Ertüchtigung des ARBURG Freeformers für die Herstellung von metallischen Bauteilen erzielt werden. Der Schwerpunkt lag auf der Verringerung des Anlagenverschleißes und des gleichmäßigen Volumenausstrags durch ein optimiertes Regelungssystem. In der ersten Phase wurde eine umfassende Bedarfsanalyse durchgeführt, die zur Qualifizierung eines geeigneten Feedstocks aus 316L führte. Anschließend wurden Konzepte zur Modifikation des Austragssystems entwickelt, um die Standzeit durch verschiedene Oberflächenbeschichtungen zu steigern. Ein System- und Prozessmodell unter Berücksichtigung der Materialviskosität wurde erstellt. Dazu wurden verschiedene Zonen innerhalb der Einheit modelliert und eine Beziehung zwischen Massedruck und Volumenstrom hergestellt. Basierend auf der Modellierung wurden Fluidsimulationen durchgeführt, um das Verhalten der Schmelze in der Austrageinheit zu analysieren. Ein weiterer Baustein stellt der Entwurf des optimierten Regelungssystems in MATLAB Simulink dar, wobei der Schwerpunkt auf der dynamischen Regelung der Massendruckerzeugung in der Austrageinheit für einen robusteren Volumenaustrag lag. Die hochfrequente Düseninnendruckmessung wurde durch den Einsatz optischer Drucksensoren ermöglicht und in das Regelungssystem integriert. Abschließend wurden Lebensdauertests mit den verbesserten Prototypen der Austrageinheit durchgeführt und komplexe Demonstratoren unter Verwendung optimierter Fertigungsparameter hergestellt.

In this project, the industrial improvement of the ARBURG Freeformer for the production of metal parts was achieved. The focus was on reducing wear and tear on the system and achieving a consistent volume output by means of an optimized control system. In the first phase, a comprehensive requirement analysis was carried out, which led to the qualification of a compatible feedstock made of 316L. Subsequently, concepts for the modification of the discharge unit were developed in order to increase the service life through different surface coatings. A system and process model considering the material viscosity was created. For this purpose, several zones in the unit were modeled and a relationship between mass pressure and volume flow was established. Based on the model, fluid simulations were carried out to analyze the behavior of the melt in the discharge unit. Another element was the design of an optimized control system in MATLAB Simulink, focusing on the dynamic control of the mass pressure generation in the discharge unit for a more robust volume flow. High-frequency pressure measurement in the nozzle was made possible by the use of optical pressure sensors, which were integrated into the control system. Finally, life cycle tests were carried out on improved prototypes of the discharge unit and complex demonstrators were manufactured using optimized manufacturing parameters.

2. Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

2.1 Ausgangsfragen

Aufbauend auf dem DFG-geförderten Projekt „Prozessmodell für die werkzeugfreie Herstellung metallischer Bauteile mit dem ARBUG-Freiform-Verfahren“ (FL197/52-1) sollen der damals festgestellte hohe Werkzeugverschleiß am Austragssystem des ARBURG Freeformers genauer betrachtet und minimiert werden, um einen Transfer ins reale Industrieumfeld zu ermöglichen. Möglichkeiten der Standzeitverlängerung des Austragssystems in Form von Material- und Geometrie Anpassungen an der Austragsdüse und Verschlussnadel können durch den experimentellen Einsatz entsprechender Prototypen intensiver untersucht und gemeinsam mit dem Projektpartner Arbura evaluiert werden. Zusätzlich fördern anzuwendende Simulationsmethoden zur Untersuchung des Strömungsverhaltens im Austragssystem, sowie die Simulation der verschleißverursachenden Metallpartikel ein tiefgreifenderes Verständnis des Materialverschleißes. Einhergehend mit der Simulation des Austragssystems erfolgt eine entsprechende Systemmodellierung mit passenden physikalischen Modellen und einer Validierung über zusätzliche Drucksensorik. Das Prozessmodell und die Sensorik dienen als Grundlage für den Aufbau eines neuen Regelungssystems der Anlage, welches den robusten Betrieb trotz der Störungen durch inhomogenes Ausgangsmaterial oder Agglomerationen von Metallpartikeln in der Düsenöffnung ermöglicht. Als letzten Baustein zur industriellen Ertüchtigung des Verfahrens muss darüber hinaus ein neues Materialsystem gefunden und für den ARBURG Freeformer qualifiziert werden. Der Industrietransfer durch den Projektpartner Heidelberger Druckmaschinen erfordert den Einsatz von rostfreien Edelstählen, welche nach der werkzeugfreien Formgebung durch konventionelle Bearbeitungsprozesse an den Funktionsflächen auf Endmaß gebracht werden können.

2.2 Zielsetzung

Die Projektinhalte verfolgen das Ziel der industriellen Ertüchtigung des ARBURG Freiformers zur Herstellung metallischer Bauteile. Dabei steht die Reduktion von Materialverschleiß und der reproduzierbare Volumenausstrag des Austragssystems des ARBURG Freeformers im Fokus. Durch die konstruktive Überarbeitung der Verschlusseinheit soll zum einen die Standzeit verlängert und zum anderen der Volumenausstrag gesteigert werden. Für die Robustheit und Reproduzierbarkeit des Volumenausstrags bilden die angewandten Simulationsmethoden und der Aufbau eines Regelungssystems basierend auf neu verbauter Drucksensorik das Schlüsselement für den Industrietransfer des Verfahrens. Schließlich sollen die untersuchten Anpassungen in realen Anwendungsszenarien getestet werden, um eine Vergleichbarkeit zu anderen additiven Fertigungsverfahren zu schaffen.

2.3 AP1: Anforderungsanalyse zur Herstellung metallischer Bauteile

Ziel des AP1 war die Erstellung eines Lastenhefts, welches sowohl die Anwendersicht als auch die Anlagen- und Prozessperspektive der Projektpartner beinhaltet. Ebenso wurde ein an diese

Anforderungen angepasster Feedstock entwickelt und für den ARBURG Freeformer qualifiziert. Die initialen Versuche aus dem Altmaterial des Vorprojekts und den dort entwickelten Prozessparametern lieferten nicht zufriedenstellende Ergebnisse. Somit wurde ein neuer Feedstock aus rostfreiem Edelstahl 316L entwickelt, welcher allerdings zur Vergleichbarkeit auf das vorherige Bindersystem setzt. 316L ist ein Standardwerkstoff für metallische 3D-Druckverfahren und weist die für die industrielle Anwendung notwendigen Materialparameter auf. Um mit dem maximalen Partikeldurchmesser nicht den konstruktiv im Freeformer vorhandenen Ringspalt zu verschließen, wurden Metallpulver mit $D_{99} < 12 \mu\text{m}$ beschafft.

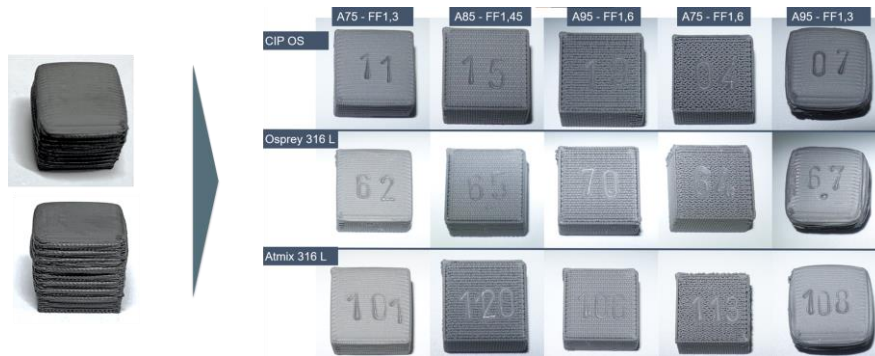


Abbildung 1: Standardwürfel mit Parametern aus Vorarbeiten (links) und Ergebnisse der Parameterstudie für den neuen Feedstock (rechts)

Mittels einer Materialqualifizierung zur Festlegung geeigneter Prozessparameter für die Formgebung konnte eine geeignete Komposition des Feedstocks ausgewählt werden. Hierbei wurde die Formulierung des Bindersystems an die Metallpulver und deren spezifische Oberfläche und Dichte angepasst. Nun ist es möglich mit dem Freeformer Grünlinge aus 316L mit einer Standardschichtdicke von 0,2 mm herzustellen. Als weiteres Ergebnis der Untersuchung werden im weiteren Verlauf zur Bauteilherstellung die Austragszahl von 85% bei einem Formfaktor von 1,45, die Bauraumtemperatur von 40°C und die Düsentemperatur von 160°C verwendet.

2.4 AP2: Modifikation des Verschlusssystems zur Steigerung der Standzeit

In AP2 wurde als Ziel die Optimierung der Austrageinheit des ARBURG Freeformers verfolgt, um die Standzeit und Robustheit des Prozesses bei der Verarbeitung metallgefüllter Granulate zu erhöhen. Durch die Auswahl und Qualifizierung von Feedstock mit Metallpulver geringer Partikelgröße in AP1, konnte in AP2 der Fokus auf die Verschleißbeständigkeit des Austrags gelegt werden ohne die initiale Dichtungsfunktion des Ringspaltes konstruktiv verändern zu müssen. Für die initiale Verschleißanalyse und Problembeschreibung wird die VDI-Richtlinie 3822 angewendet. Beginnend mit der Schadensbeschreibung werden die wichtigsten Informationen zum Bauteil und den Umständen gesammelt und eine Schadenshypothese formuliert. Diese Hypothese wird anschließend durch zerstörende und nicht zerstörende Messmethoden überprüft, um letztendlich die Schadensursache zu klären und Präventionsmechanismen zu beschreiben.

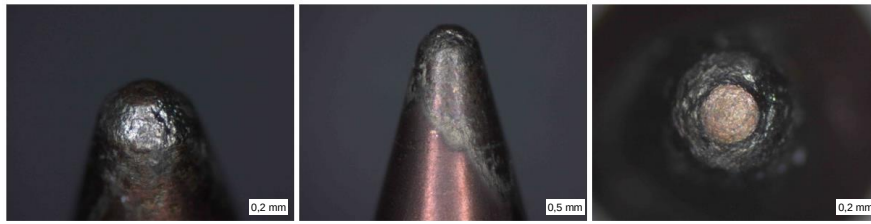


Abbildung 2: Verschlissene Seriennadel nach Nutzung mit Metallfeedstock

Zur Bestimmung des Grundmaterials der Nadel wurde bei der Firma CeWOTeC eine Glimmentladungsspektroskopie durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Austragseinheit des Freeformers mit dem entwickelten 316L-Feedstock und der serienmäßigen verbauten Austragseinheit bei einer Frequenz von 150 Hz für 4,5 Millionen Öffnungs- und Schließzyklen bis zum Versagen betrieben. Nach der Nutzung wies die Nadelspitze deutliche Schäden auf, welche zu Problemen bei der Dichtigkeit der Düse führte. Die Schadenshypothese aus den anschließenden metallografischen Untersuchungen sieht die Abrasion und Adhäsion zwischen der Nadel und dem Dichtungssitz der Düse als Verschleißmechanismus. Mikroskopisch sichtbare Adhäsionspunkte und Kaltverschweißung an der Nadeloberfläche und dem Düsenkörper sorgen für kontinuierlich stärkeren Verschleiß. Der Feedstock wirkt dabei wie ein abrasives Medium und beschädigte sowohl die Nadelspitze als auch die Düse. Diese primäre Beschädigung führte zu einer allmählichen Freilegung und Abtragung des wenig verschleißfesten Grundmaterials der Nadel. Die Düsenöffnung verstopft letztendlich während des Betriebs auf Grund des abgelösten Materials.

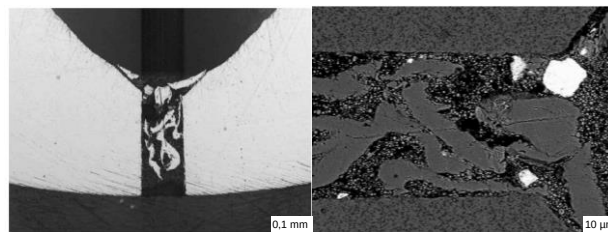


Abbildung 3: Verschlusene Düsenöffnung durch Metallpartikel und abgelöstes Nadelmaterial

Der Wechsel von Carbonyleisenpulver zu 316L mit höherer Materialhärte führt zu einem stärkeren Verschleiß des Systems. Das Schichtsystem der serienmäßig verbauten Nadel neigt in Kombination mit 316L im Feedstock zu starken Adhäsionsphänomenen. Als Präventionsmaßnahmen, die das Auftreten von Adhäsionserscheinungen vermindern, wurden Oberflächenbehandlungen der Nadeln mit unterschiedlichen dünnen Schichten, einschließlich Chromnitrid- und diamantähnlicher Kohlenstoff (DLC)-Beschichtungen untersucht. Um der Oberflächenzerrüttung entgegenzuwirken und die mechanischen Eigenschaften in Bezug auf Härte, Elastizität und Verschleißfestigkeit zu verbessern, wurde versuchsweise das Grundmaterial an der Nadelspitze ersetzt. In Bearbeitungsprozessen, bei denen metallische Werkstücke verarbeitet werden, werden Schneidwerkzeuge, die Stößen und hochfrequenten Belastungen standhalten sollen, aus Materialien gefertigt, die sich durch Eigenschaften wie hohe Härte, Zähigkeit, Druck-, Biege- und Abriebfestigkeit auszeichnen. Diese vielfältige Kategorie umfasst Werkzeugstähle, Schnellarbeitsstähle, Hartmetalle, Schneidkeramik,

Diamant und kubisches Bornitrid. Zur Validierung in Lebensdauerversuchen wurden 3 Prototypen gemeinsam mit dem Projektpartner ARBURG definiert und angefertigt: Eine vakuumgelötete Nadelspitze aus kubischem Bornitrid, eine Nadelspitze mit Chromnitrid-Beschichtung und eine Nadelspitze mit mehrlagiger, harter DLC-Beschichtung.

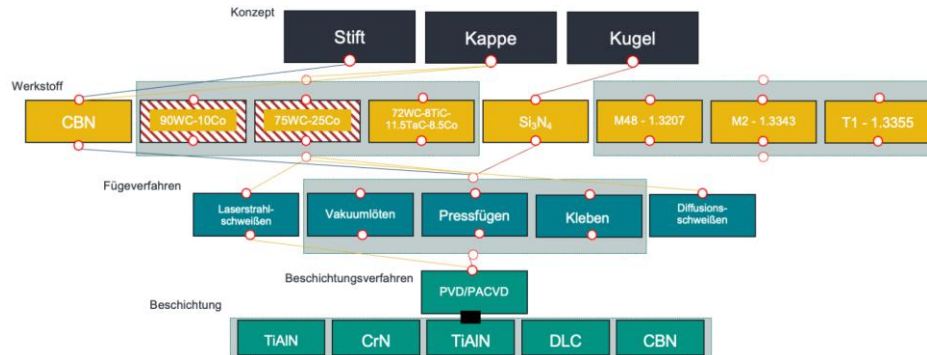


Abbildung 4: Übersicht möglicher verschleißmindernder Konzepte für die Austrageinheit

2.5 AP3: Modellbildung und Prozesssimulation des Volumenausstrags

Ein wesentlicher Aspekt für den konstanten diskontinuierlichen Volumenaustrag im ARBURG Free-former ist die präzise Erzeugung des Massedrucks in der Austrageinheit. Um die Dynamik dieses Prozesses zu modellieren, wird die Austrageinheit in drei verschiedene Zonen unterteilt, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Geometrien und Eigenschaften jeweils einen definierten Druckverlust beitragen. Über diesen Druckverlust kann das ausgetragene Tröpfchenvolumen berechnet werden. Die erste Zone umfasst die Extruderschnecke und wird als hydromechanischer Zylinder dargestellt. Der Ringspalt, der durch den anliegenden Piezoaktor an der Nadelmembran geöffnet und geschlossen werden kann, führt zu erheblichen Druckschwankungen im System. Im Anschluss an den Ringspalt geht die Strömung in die zylindrische Auslasskapillare über, die einen größeren und konstanten Querschnitt von 200 µm aufweist. Um eine druckabhängige Regelung des Tröpfchenvolumens zu ermöglichen, ist es erforderlich, einen Zusammenhang zwischen Druck und Volumenstrom im Ringspalt und der Auslasskapillare herzustellen. Für die kritischen Zonen werden die oben genannten Ersatzgeometrien eingeführt. Der Volumenfluss wird mittels vereinfachter geometrischer Faktoren berechnet. Die Korrektur durch einen Reibungsfaktor gewährleistet die Übereinstimmung zwischen dem modellierten Druckgradienten und den experimentellen Daten.

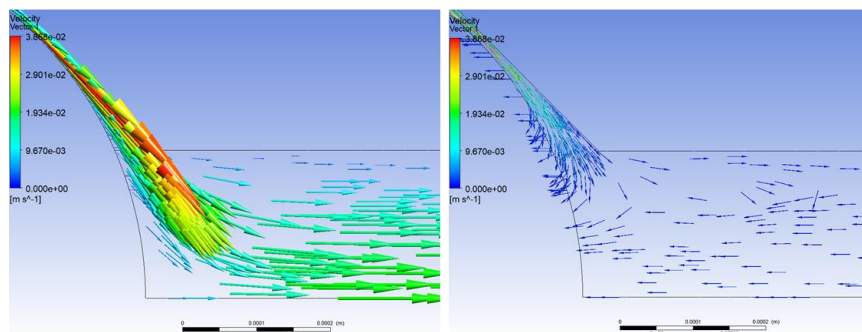


Abbildung 5: CFD-Simulation der Düsenöffnung bei schließender Nadelmembran (links) und öffnender Nadelmembran mit der Standardgeometrie (rechts)

Ziel der Fluidsimulation mit der Software *ANSYS Fluent* ist, das Strömungsverhalten des geschmolzenen Feedstocks in der Austragseinheit zu untersuchen. Die Standardgeometrie wird mit weiteren Geometrievarianten verglichen und auf der Grundlage der Ergebnisse mögliche Optimierungslösungen vorgeschlagen. Durch lineare Randschichten, eine Verfeinerung des Meshes im Bereich des Ringspaltes und die dynamische Generierung neuer Meshbereiche während der Nadelbewegung wurde eine ausreichende Meshqualität erreicht. Sobald die Lösungen des Solvers unter den gegebenen Randbedingungen konvergieren, werden die Ergebnisse nach dem Konzept von Roache verifiziert. Bei der Standardgeometrie und einer Austragsfrequenz von 200 Hz weist der Druck in der Ausgangsposition der Nadel einen größeren Wert oberhalb des Ringspaltes auf und nimmt dann bis zum Umgebungsdruck am Auslass ab. Während der Abwärtsbewegung der Nadel nehmen Druck und Volumenstrom zu. Nach dem Prinzip der Kontinuität steigt die Fließgeschwindigkeit nach dem Ringspalt weiter an. Die Materialviskosität wurde für die dynamische Simulation als konstant angenommen. Die Vorversuche haben jedoch gezeigt, dass in der Realität ein scherverdünnendes Verhalten auftritt. Durch die Abwärtsbewegung der Nadel wird der Spalt zwischen der Nadel und den inneren Düsenoberflächen kleiner und die Schmelze wird ausgestoßen. Wenn sich die Nadel nach oben bewegt, entsteht an der engsten Stelle ein Unterdruck, der die Schmelze zurückfließen lässt. Die langsameren Flüssigkeitselemente in Nähe der Wände werden durch Reibung stärker abgebremst. Wenn die Verzögerung groß genug ist, entsteht dort ein Rückströmungsbereich. Bei den Simulationsergebnissen der verschiedenen Geometrievarianten gilt: Je größer der Winkel der Düsenwand, desto geringer sind die Geschwindigkeit der Schmelze und der Volumenaustrag. Dies hängt mit dem breiteren Ringspalt durch den flacheren Winkel zusammen. Bei gleichem Massendurchfluss am Einlass ist die Strömungsgeschwindigkeit am Auslass geringer. Der höchste Masse- und die maximale Wandschubspannung liegen bei der Geometrievariante mit einem Spitzenwinkel von 120 Grad vor. Der Entwurf des Regelungssystems für die Erreichung eines konstanten

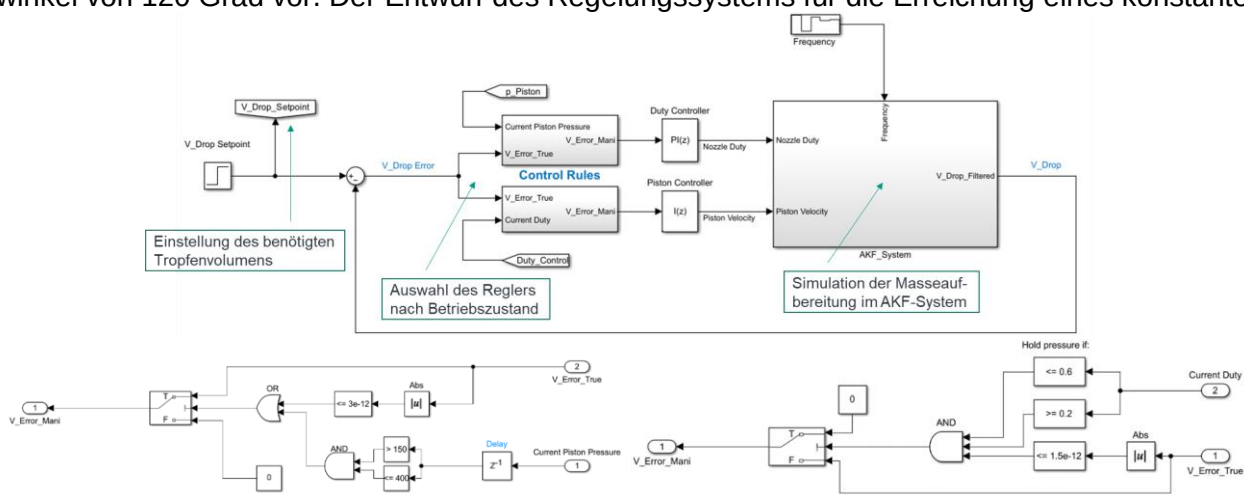


Abbildung 6: Abbildung der Systemmodellierung mit Reglerentwurf in Matlab Simulink (oben) und getunte Reglerentwürfe für den Massedruck (u. links) und die Düsenöffnungsdauer (u. rechts)

diskontinuierlichen Volumenausstrags wurde in der *Matlab Simulink*-Umgebung mit der Simscape Fluid Physical Modeling Toolbox umgesetzt. Das modellierte System besteht aus einem Motorblock, der die Kraft für die Extrusion erzeugt, und einem vereinfachten Extruderschneckenmodell. Eine weitere grundlegende Komponente ist das implementierte Viskositätsmodell basierend auf experimentellen Daten. Die Viskositätsparameter wurden nach der Materialcompounding am Institut für Angewandte Materialien (IAM-WK) des KIT mittels Kapillarrheometrie bestimmt. Die dynamische Druckregelung beinhaltet die Linearisierung des Systemmodells um den Betriebspunkt bei 250 bar. Für die Bestimmung der Übertragungsfunktion des linearisierten Systemverhaltens wurde die Matlab Plant Identification App genutzt. Mit dieser Übertragungsfunktion, die durch ein PT_1 -Element beschrieben wird, können optimale Reglerparameter für den Betriebspunkt ermittelt werden. Dabei hat sich ein PI-Regler als die optimale Wahl für eine effektive Druckregelung herausgestellt. Die spezifischen Parameter der Proportionalverstärkung (K_P) und der Integralverstärkung (K_I) werden mit Hilfe des Matlab PID-Tuners bestimmt. In ähnlicher Weise wird für die Düsenöffnungszeit vorgegangen. Die Linearisierung erfolgt um den Betriebspunkt bei einer Frequenz des Piezoaktors von 200 Hz. Die Übertragungsfunktion aus der Sprungantwort wird wie bei der Druckregelung durch ein PT_1 -Element beschrieben und unterstreicht damit die Bedeutung einer präzisen Regelung der Düsenöffnungszeit. Als optimaler Regler wird ein I-Regler mit entsprechend eingestellten Parametern identifiziert. Mit den optimalen Regelungsparametern konnte eine Einregelzeit von unter 1,2 s bei Störungen durch eine Verengung der Auslasskapillare oder den Frequenzschwankungen zwischen langsamen Außenkonturen des Bauteils und der maximalen Füllgeschwindigkeit erreicht werden. Des Weiteren wird die Materialviskosität für eine tropfengenaue Reaktion berücksichtigt.

2.6 AP4: Validierung von Austragsystem und Regler

Der kritische Validierungsprozess des Modells zur Berechnung des Tröpfchenvolumens hängt vom Abgleich der Modellvorhersagen mit realen Daten ab. Zusätzlich zum kraftbasierten Druckmessverfahren auf Grundlage der linearen Extruderschneckenbewegung wurde zusätzlich ein Drucksensor in unmittelbarer Nähe des Ringspaltes eingesetzt, um die Genauigkeit der Druckdatenerfassung zu verbessern. Ebenso wurde sich gemeinsam mit den Projektpartnern gegen den Einsatz eines piezobasierten Sensors entschieden. Dieses Messprinzip ist anfällig für Verunreinigungen durch die feinen Metallpartikel und zu träge, um die Druckschwankungen durch die Nadelbewegung aufzulösen. Daher wurde das optische Druckmesssystem *DDS-Mini-2000* der Firma *FOS Messtechnik GmbH* verbaut. Durch dieses ist es möglich frequenzabhängige Druckverläufe und Unterschiede in den Düsenöffnungszeiten sichtbar zu machen. Im Anschluss an dieses Projekt wurden weitere Sensoren des Typs wegen der direkteren und hochauflösenden Messung bei ARBURG verbaut. Die Validierung der Prozessmodellierung und des Reglers beinhaltet den Austrag von einzelnen Tropfensträngen mit jeweils 980 Tropfen bei einer Austragsfrequenz von 70 Hz und einer Austragszahl

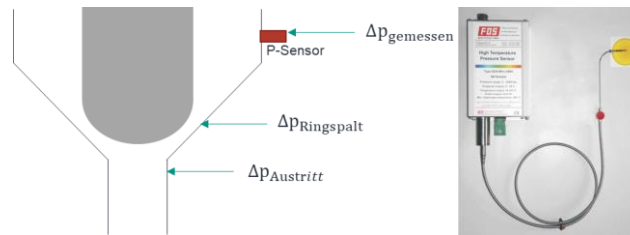


Abbildung 7: Schematische Darstellung des eingebrauchten Drucksensors und Foto des realen Drucksensors

von 85%. Aufgrund der Nähe des optischen Drucksensors zum unteren Teil der Austragseinheit des Freeformers kann davon ausgegangen werden, dass der gemessene Druck überwiegend die Druckverluste im Ringspalt der Kapillare widerspiegelt. Der Massedruck bei geschlossener Düse schwankt während der Versuche im Bereich von 385 bis 390 bar. Um den modellierten Druckgradienten mit den experimentellen Daten abzugleichen, wird der Reibungsfaktor im Ringspalt auf 2,6 eingestellt und das simulierte Druckniveau auf 385 bar festgelegt. Der reale Düseninnendruck wird mit einem Messverstärker *QuantumX 440B* der Firma *HBM Messtechnik* aufgezeichnet und die ausgetragenen Tropfenstränge mit einer Präzisionswaage *EG-220-3NM* der Firma *KERN* gewogen. Aus Gesamtvolumen und -tropfenzahl wird ein gemittelttes Einzeltropfenvolumen berechnet. Dies liefert ein Einzeltröpfchenvolumen von $1,391 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$, was etwa 96,5 % des gemessenen Volumens entspricht. Für die Lebensdauertests wurde die maximale Tropfenfrequenz von 333 Hz eingesetzt. Tests zur Dichtigkeit der Prototypen wurden dabei alle 500.000 Zyklen durchgeführt. Zuerst wurde das aktuelle Massedruckniveau unter Prozessbedingungen festgehalten (blau). Anschließend wurde die Düse manuell verschlossen und manuell Druck aufgebaut. Dabei wird der Druck in 50 bar-Schritten erhöht bis es zu ersten Undichtigkeiten (gelb) kommt und anschließend in 25 bar-Schritten bis zur kontinuierlichen Leckage (rot). Sobald unterhalb des Massedruckniveaus der Prozessbedingungen Leckage auftritt, kann die Massedruckregelung den Volumenausstrag nicht mehr einregeln und das Druckbild verschlechtert sich. Der Prototyp mit einer Chromnitrid-PVD-Beschichtung erzielte die

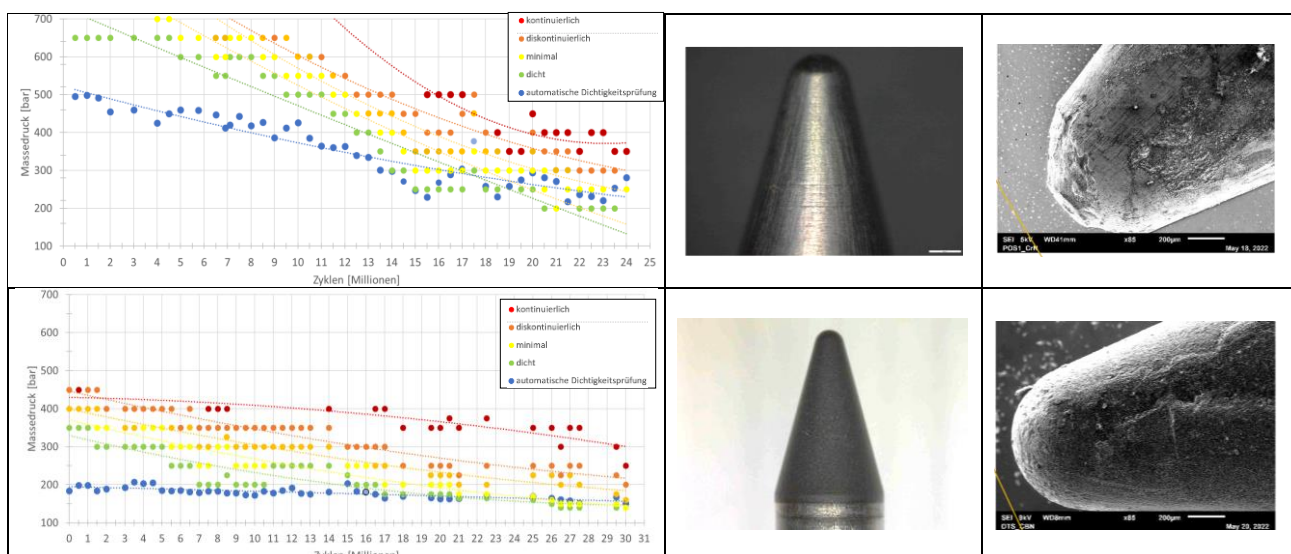


Abbildung 8: Verlauf der Dichtigkeit der Austragseinheit mit Chromnitrid-Beschichtung (l.o.) und mit Bornitrid-Spitze (l.u.), Düsenspitzen vor dem Einbau (Mitte) und nach den Lebensdauerversuchen (links)

zweitlängste Standzeit, zeigte eine vergleichbare Oberflächenabtrag an der Nadelspitze wie die serienmäßig verbaute Nadel. Eine alleinige Beschichtung des Grundmaterials hat sich als unzureichend herausgestellt. Die Nadelspitze des Prototypen mit einer aufgelöteten Nadelspitze aus kubischem Bornitrid weist nach der Nutzung für insgesamt 30 Millionen Zyklen keinerlei Verschleißerscheinungen auf. Mit diesem Prototypen konnte die Standzeit um 300% auf über 80 Betriebsstunden gesteigert werden. Durch optimierte Formgebungsparameter ist es nun möglich komplexe Bauteile herzustellen. Die unten abgebildete Halterung des Projektpartners Heidelberger Druckmaschinen umfasst verschiedene integrierte Bauteilfunktionen, Übergänge zwischen dünnwandigen und massiven Bereichen, Überhänge und Wände, sowie Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis. Durch die Verwendung von wasserlöslichem Supportmaterial der Firma ARBURG ist die Herstellung des Grünlings ohne konstruktive Anpassungen möglich (Abbildung links). Allerdings kommt es während des Sintervorgangs zu massivem Verzug mit der Folge des Defekts des Bauteils (Abbildung Mitte). Durch die Fertigungsexperten des 3D-Drucks von Heidelberger Druckmaschinen wurden daraufhin Optimierungen bei der Konstruktion des Bauteils vorgenommen, um Überhangswinkel zu reduzieren, Wandquerschnitte zu schließen und Übergänge zwischen massiven und dünnen Wänden anzugleichen. Mit diesen Anpassungen konnte letztendlich ein gesintertes Bauteil mit den gewünschten Endmaßen gefertigt werden.

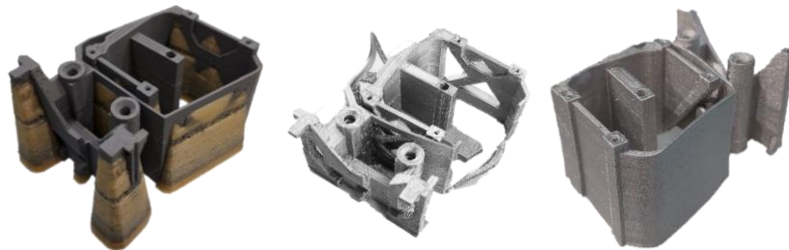


Abbildung 9: Hergestellter Demonstrator mit wasserlöslicher Supportstruktur (links), gesintert (Mitte) und nach den konstruktiven Anpassungen (rechts)

3. Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

Krischke, N.; Friedmann, M.; Fleischer, J. (2022) "Investigations for the Optimization of Metal Freeforming using the ARBURG freeformer", Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Austin, Texas, USA. DOI: 10.26153/tsw/44580

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

Kupzik, D.; Spiller, Q.; Coutandin, S.; Fleischer, J. (2021) „Additive Manufacturing of Metal Components using the Arburg Plastic Freeforming Process“, NSERC Network for Holistic Innovation in Additive Manufacturing 2021 (HI-AM 2021). Online Presentation.

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

- keine -

KIT Scientific Working Papers
ISSN 2194-1629

www.kit.edu