

Schlussbericht vom 23.04.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21859 BG

Thema

Metal Binder Jetting für die Serienfertigung - Simulation und Verzugkompensation

Berichtszeitraum

01.06.2021 - 31.12.2023

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.
Wallstraße 58/59
10179 Berlin

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1:
Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Wiener Straße 12
28359 Bremen

Forschungseinrichtung 2:
Universität Bremen
Bremer Center für Computational Materials Science
Airbus Stiftungsprofessur für Integrative Simulation und Engineering von Materialien und Prozessen
Am Fallturm 1
28359 Bremen

Bremen, den 23.04.2024

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	2
1 Einleitung.....	3
1.1 Arbeitshypothese und Zielsetzung	4
1.2 Projektplan und –verlauf.....	5
1.3 Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses	10
2 Stand der Forschung und Technik	12
2.1 Verfahrensbeschreibung Metal Binder Jetting	12
2.2 Parameter-Eigenschafts-Beziehungen von Pulverauftrag und Grünteildichte	13
2.3 Auswirkungen von Spurenelementen auf die Eigenschaften von Titanlegierungen	14
2.4 Simulation von Sinterprozessen.....	15
3 Ergebnisdokumentation	17
3.1 Identifizierung und Optimierung relevanter Prozessparameter (AP1)	17
3.2 Kennwertermittlung für das Materialmodell (AP4)	25
3.3 Entwicklung des Materialmodells (AP2)	28
3.4 Implementierung und Kalibrierung des Prozessmodells (AP3)	31
3.5 Validierung des Simulationsmodells, Verzugsvorhersage und simulationsbasierte Kompensation (AP5+AP6)	35
4 Bewertung und Ausblick	43
4.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielen aus dem Antrag	43
4.2 Ausblick	47
5 Verwendung der Zuwendung	48
6 Notwendigkeit sowie Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	48
7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU	49
8 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	50
I Literaturverzeichnis	52
II Abbildungsverzeichnis	55
III Tabellenverzeichnis	57

Kurzzusammenfassung

Das IGF-Vorhaben 21859 BG „Metal Binder Jetting für die Serienfertigung - Simulation und Verzugskompensation“ hatte das Ziel, die Serienfertigung von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels Metal Binder Jetting, wofür einerseits ein reproduzierbarer Druck- und Sinterprozess und andererseits eine Schwindungs- und Verzugskompensation nötig sind, zu ermöglichen. Darauf basierend wurden folgende wissenschaftlich-technologische Fragestellungen abgeleitet:

- Identifikation der relevanten Pulver- und Prozessparameter mit anschließender Optimierung des Druck- und Sinterprozesses hinsichtlich Reproduzierbarkeit
- Untersuchung des Kohlen- und Sauerstoffeintrags in Abhängigkeit von Ausgangspulver und Druck-, Entbinderungs- und Sinterparametern
- Entwicklung des Materialmodells anhand von Literaturwerten und Messdaten
- Entwicklung eines Simulationsmodells zur Verzugsberechnung für das Sintern, mit anschließender Kalibrierung durch ermittelte Prozessdaten
- Implementierung einer simulationsbasierten Verzugskompensation aufbauend auf einer präzisen Schwindungs- und Verzugsvorhersage.

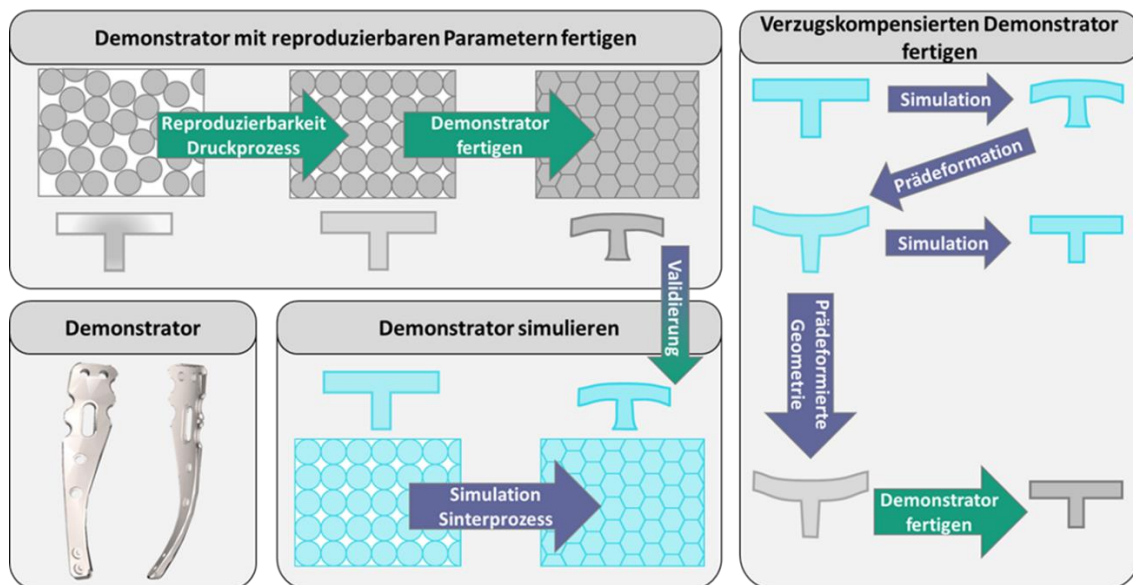


Abbildung 1: graphische Kurzvorstellung des Projektvorhabens

Im regelmäßigen Austausch mit dem projektbegleitenden Ausschuss konnte das Projekt flexibel an anstehende und aufkommende Forschungsfragen ausgerichtet werden und somit sehr erkenntnisreich und hochzufriedenstellend für die beteiligten Firmen bearbeitet werden. Offene Fragestellungen sollen in einem Anschlussprojekt weiter thematisiert werden. Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

1 Einleitung

Der binderbasierte 3D-Druck von Metallen (Metal Binder Jetting, MBJ) stößt auf großes Interesse in der Industrie. Wie bei vielen additiven Verfahren, liegt sein Anwendungsvorteil in der Möglichkeit zur werkzeuglosen Herstellung komplex geformter metallischer Bauteile direkt aus CAD Daten. Innerhalb der additiven Fertigungstechnologien (Additive Manufacturing, AM) zeigt das MBJ aufgrund seiner hohen Baurate [1] ein sehr großes Potenzial für eine wirtschaftliche Kleinserienfertigung. Somit kann das MBJ die Lücke zwischen bisherigen Additiven Verfahren, die vor allem für individuelle Bauteile mit kleinen Stückzahlen eingesetzt wurden, und der werkzeuggebundenen Fertigung für große Stückzahlen schließen. Es stellt somit auch eine geeignete Ergänzung der klassischen (pulvermetallurgischen) Fertigung dar.

Beim MBJ erfolgt, wie beim Laser-Powder Bed Fusion-Metal (L-PBF-M), ein schichtweiser Auftrag von Metallpulver; dieses Pulver wird beim MBJ allerdings nicht aufgeschmolzen, sondern lokal mit einem organischen Binder verbunden. Ähnlich wie bei anderen binderbasierten Fertigungstechnologien wie z. B. dem Metallpulverspritzguss (MIM), schließt sich beim MBJ an den eigentlichen Druckprozess zur Formgebung ein Entbinderungsprozess an, bevor die Sinterung des Bauteils erfolgt. Erst beim abschließenden Sintern findet eine Verdichtung statt, und die endgültige Form, Gefügestruktur und Festigkeit wird erreicht. Im Gegensatz zu strahlbasierten, aufschmelzenden additiven Fertigungsverfahren ergeben sich aus der MBJ-Prozessführung geringere Eigenspannungen, was beispielsweise die Verarbeitung von spröden, verschleißbeständigen Werkstoffen ermöglicht [2]. Auch können Anlagentechnik und Know-How zum Sintern verschiedenster Werkstoffe für MBJ übertragen werden, was eine sehr breite Materialauswahl ermöglicht.

Bedingt durch den notwendigen Entbinderungs- und Sinterschritt besteht, aufgrund der mit der Verdichtung einhergehenden Schwindung, beim MBJ die Möglichkeit des Bauteilverzugs. Dabei wirkt sich die Art des Pulverauftrags und des Ausgangspulvers (Partikelgrößenverteilung, Partikelform, etc.) auf die Schwindung und den Verzug während des Sinterns aus [3 bis 5], wobei die Wirkzusammenhänge bisher nur unzureichend untersucht wurden. Neben der Schwindung können durch die hohen Temperaturen Kriechdehnungen entstehen, wie sie auch bei Simulationsmodellen zum Heißisostatischem Pressen (HIP) berücksichtigt werden [6]. Zusammen mit den Reibungseffekten des Bauteils auf der Sinterunterlage entsteht ein komplexes Verzugsverhalten.

Im Rahmen des vorgeschlagenen Projekts soll anhand einer korrosionsbeständigen und hochfesten Titan-Legierung Ti-6Al-4V (Ti64 – Werkstoffnr. 3.7164 bzw. 3.7165 gem. DIN

17851), evaluiert werden, inwieweit mit dem MBJ-Verfahren hergestellte Bauteile maßhaltig, reproduzierbar und, trotz der hohen Sauerstoffaffinität von Titan, innerhalb der chemischen Grenzwerte gefertigt werden können. Die Legierung Ti64 findet in vielen Branchen Verwendung. Aus ihr werden sowohl Verdichterschaufeln, Gehäuse und Schrauben für Turbinen-Triebwerke hergestellt, als auch Ventile oder Pleuel für die Automobilindustrie. In der Medizintechnik werden Behälter oder Implantate aus dieser Legierung aufgrund ihrer sehr guten Biokompatibilität eingesetzt [7]. Vor allem im letztgenannten Anwendungsgebiet ist die Verarbeitung mittels AM-Verfahren interessant, um eine individuelle Anpassung der Medizintechnikprodukte an den Patienten zu ermöglichen.

1.1 Arbeitshypothese und Zielsetzung

Ziel des angestrebten Projektes ist die wirtschaftliche Fertigung von individualisierten Bauteilen und Kleinserien aus der Titan-Legierung Ti-6Al-4V (Ti64) mittels MBJ. Hierfür müssen die Bauteile reproduzierbar, maßhaltig und unter Einhaltung der für Ti64 kritischen Kohlen- und Sauerstoffgrenzwerte mit möglichst wenigen Iterationen aus Geometrie- und Parameteranpassungen hergestellt werden.

Im Rahmen des vorgeschlagenen Projekts sollen die relevanten Pulvereigenschaften und Prozessparameter des Druck-, Entbinder- und Sinterprozesses identifiziert und anschließend hinsichtlich Reproduzierbarkeit und minimalem Kohlen- und Sauerstoffeintrag optimiert werden. Das gewonnene Wissen über den Prozess ermöglicht die Entwicklung eines Simulationsmodells für das Sintern mit anschließender Kalibrierung und Validierung durch ermittelte Prozessdaten. Mit dem Simulationsmodell werden Schwindungs- und Verzugsvorhersagen ermöglicht, die für eine Kompensation der auftretenden Verformungen genutzt werden, indem berechnete Verzüge invertiert und in das CAD-Modell eingefügt werden. Dadurch verringert sich der hohe Aufwand der experimentellen Geometrieanpassung für die maßhaltige Produktion von MBJ-Bauteilen deutlich. Die vorgeschlagenen Arbeiten münden in der reproduzierbaren und maßhaltigen Fertigung eines verzugskompensierten Demonstrators.

Arbeitshypothese: Das hier beantragte Forschungsprojekt geht von der Arbeitshypothese aus, dass mit dem Verfahren MBJ komplexe Bauteile aus Ti-6Al-4V hergestellt werden können, deren Eigenschaften für den Einsatz beispielsweise in der Kleinserienfertigung oder für die Herstellung von Funktionsmustern und individualisierten Bauteilen geeignet sind. Die Erfahrungen aus dem Metallpulverspritzguss zur Erreichung hoher Sinterdichten und chemischen Grenzwerten für Ti-6Al-4V sollen dazu auf den MBJ-Prozess übertragen werden, und die Möglichkeit einer reproduzierbar maßhaltigen Bauteilherstellung anhand eines Demonstrators nachgewiesen werden. Wie in Abbildung 1 gezeigt, wird dazu zunächst ein reproduzierbarer Druckprozess entwickelt

und dieser wird genutzt, um eine nicht-verzugskompensierte Demonstratorgeometrie zu fertigen. Mittels Simulation wird der Verzug berechnet und mit dem des gefertigten Bauteils verglichen. Als letzter Schritt wird dann eine entsprechende Verzugskompensation über die Simulation vorgenommen, um einen verzugsfreien Demonstrator zu fertigen.

Forschungsziel: Ziel des Projektes ist die Serienfertigung von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels Metal Binder Jetting, wofür einerseits ein reproduzierbarer Druck- und Sinterprozess und andererseits eine Schwindungs- und Verzugskompensation nötig sind. Darauf basierend wurden folgende wissenschaftlich-technologische Fragestellungen abgeleitet:

- Identifikation der relevanten Pulver- und Prozessparameter mit anschließender Optimierung des Druck- und Sinterprozesses hinsichtlich Reproduzierbarkeit
- Untersuchung des Kohlen- und Sauerstoffeintrags in Abhängigkeit von Ausgangspulver und Druck-, Entbinderungs- und Sinterparametern
- Entwicklung des Materialmodells anhand von Literaturwerten und Messdaten
- Entwicklung eines Simulationsmodells zur Verzugsberechnung für das Sintern, mit anschließender Kalibrierung durch ermittelte Prozessdaten
- Implementierung einer simulationsbasierten Verzugskompensation aufbauend auf einer präzisen Schwindungs- und Verzugsvorhersage.

1.2 Projektplan und –verlauf

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in sieben Arbeitspakete, deren Zusammenwirken in Abbildung 2 dargestellt ist. Der intensive Austausch zwischen den Forschungseinrichtungen ist sowohl durch die räumliche Nähe der, beide auf dem Campus der Universität Bremen befindlichen, Institute als auch die bereits etablierte Zusammenarbeit in weiteren Projekten und Fachausschüssen gegeben.

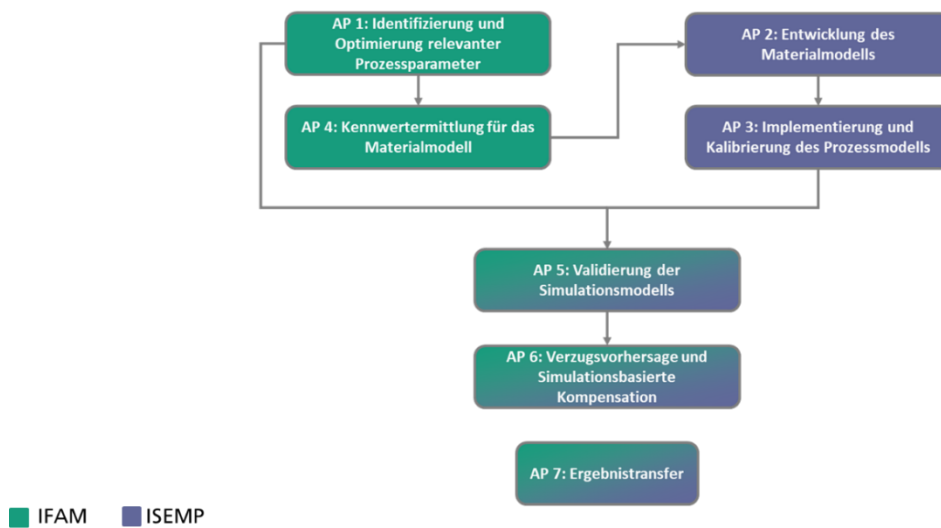


Abbildung 2: Arbeitspakete des geplanten Projektvorhabens

AP1: Identifizierung und Optimierung relevanter Prozessparameter

Output: Prozessparameter für reproduzierbare Bauteileigenschaften.

Diese dienen als wichtige Grundlage für alle weiteren Arbeitspakete. Zudem werden die Parameter-Eigenschafts-Beziehungen im Ergebnistransfer (AP 7) veröffentlicht.

Ziel des Druckprozesses beim Metal Binder Jetting ist es, stabile Grünkörper mit einer homogene Pulverpackung und hoher Grünteildichte herzustellen. Dies wird angestrebt, um im anschließenden Sinterprozess Sinterkörper mit gleichmäßiger Schwindung und hoher Dichte bei minimalem Verzug zu erzeugen. Zur Identifikation und Optimierung der relevanten Prozessparameter und ihrem Einfluss auf die Qualität und Reproduzierbarkeit des Druckprozesses, wird für den Werkstoff Ti-6Al-4V eine Parameterstudie auf Basis einer statistischen Versuchsplanung durchgeführt.

Bei der Parameterstudie wird einerseits das Ausgangspulver in einer ausführlichen Pulvereingangskontrolle charakterisiert werden, insbesondere hinsichtlich Kohlen- und Sauerstoffgehalt. Andererseits werden Parameter des Druckprozesses untersucht.

Das in der Parameterstudie verwendete Drucklayout enthält offene Cups, Würfel und Biegebalken. Der Pulverauftragsprozess und die Wechselwirkungen zwischen Pulver und Auftragsparametern können über die Ermittlung der Pulverbettdichte in den offenen Pulvercups analysiert werden. Die Bewertung des Bindereintrags (Wechselwirkung zwischen Pulverbett und Binder) erfolgt durch das Vermessen und Wiegen der Würfel, sowie das Prüfen der Biegebalken (4-Punkt-Biegung) im Grünteilzustand.

Die relevanten Pulver- und Prozessparameter sollen identifiziert und anschließend optimiert werden, um die Dichte der Grünteile zu verbessern. Diese Optimierungen dienen auch zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit des Druckprozesses.

Die experimentellen Arbeiten zur Bestimmung geeigneter Entbinderungsparameter umfassen Untersuchungen mittels Massenspektrometrie. Die Sinterparameter werden mittels Sinterdilatometrie untersucht. Die erzeugten Proben werden sowohl hinsichtlich Schwindung,

Dichte (archimedisches Prinzip) und Mikrostruktur, als auch Kohlen- und Sauerstoffgehalte mittels Spurenanalyse nach DIN ISO 4491-1 untersucht.

AP2: Entwicklung des Materialmodells

Input: Nach Auswahl des geeigneten Materialmodells sollen die gemessenen Materialeigenschaften (AP 4) der Probenkörper integriert werden.

Output: Der Output dieses Arbeitspaketes ist ein Materialmodell, was das Materialverhalten vom Grün- bis zum Sinterteil beschreibt.

Zur Vorbereitung der Prozesssimulation wird in diesem Arbeitspaket das Materialverhalten während der Sinterphase modelliert, d.h. die zugehörigen konstitutiven Gleichungen aufgestellt und Methoden zu deren Nutzung implementiert:

Zunächst wird eine umfassende Literaturrecherche bereits bestehender Materialmodelle durchgeführt. Die Modelle werden bezüglich ihrer Eignung bewertet, ggf. angepasst und kombiniert, sodass hieraus die Grundlage für das zu verwendende Materialmodell entsteht. Dieses wird erweitert, um das tatsächliche Materialverhalten im Sinterprozess abzubilden. Insbesondere wird die Entstehung plastischer Dehnungen sowie Krieeffekte berücksichtigt. Als Grundlagen dienen dazu die experimentellen Ergebnisse, die vom IFAM im Rahmen von AP4 erzielt werden. Die im Prozess entstehenden Schwindungsdehnungen werden phänomenologisch auf Basis der am IFAM durchgeführten Dilatometer-Messungen beschrieben.

Das erstellte Modell wird in den am ISEMP bestehenden FEM Softwarecode integriert, d.h. es werden Methoden implementiert, mit deren Hilfe die Materialmodelle in der Prozesssimulation effizient und flexibel genutzt werden können. Hierzu zählen u.a. Methoden zum Aufstellen der zugehörigen Steifigkeitsmatrix, der Lastvektoren, der Adaption der Gleichungssysteme an unterschiedliche Randbedingungen und geeignete numerische Verfahren zur Lösung der (nicht linearen) FEM Gleichungen.

AP3: Erstellung, Implementierung und Kalibrierung des Prozessmodells

Input: Das erarbeitete Materialmodell (AP 2) mit den Ergebnissen aus AP 4 angepasst.

Output: Am Ende entsteht ein Simulationsmodell, das die Randbedingungen des Prozesses berücksichtigt und den Verzug inklusive der Schwindung berechnet.

Basierend auf dem zuvor erarbeiteten Materialmodell wird eine Methode entwickelt, welche den entstehenden Bauteilverzug während der Sinterphase vorhersagt. Die Input Parameter für die Simulationsmethode bestehen aus den Prozessparametern (Prozesszeit, Temperaturzyklus), den Randbedingungen zur Anlage (Abmessungen, Wärmeübergangparameter), dem Material (Parameter für das Materialmodell) und der Bauteilgeometrie inklusive Orientierung/Platzierung im Sinterofen.

Im ersten Schritt wird eine thermische Prozesssimulation durchgeführt, welche die Temperaturhistorie während des gesamten (Sinter-)Prozesses in jedem Punkt des Bauteils vorhersagt. Hierzu stehen beim derzeitigen Stand der Technik bereits hinreichend genaue Modelle zur Verfügung, welche an die Randbedingungen des Ofens angepasst werden. Die Firma Magma aus dem projektbegleitenden Ausschuss stellt dem Projekt zu diesem Zweck die Software *Magmasoft* als geldwerte Leistung zur Verfügung. Die zugehörigen Parameter (Strahlungs- und Wärmeübergangskoeffizienten der Randbedingungen, temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) werden zu Testzwecken zunächst anhand

von Literaturwerten geschätzt und, sobald diese im weiteren Projektverlauf zur Verfügung stehen, auf Basis von experimentellen Daten des Fraunhofer IFAM (vgl. AP4 zur Messung Wärmeleitfähigkeit und –Kapazität und AP5 zur Anpassung der Randbedingungen) kalibriert.

Im Anschluss erfolgt die Entwicklung der mechanischen Simulationsmethode, bei der zu einer gegebenen Zeitdiskretisierung iterativ in jedem Zeitschritt bei gegebener Temperatur das mechanische Kräftegleichgewicht berechnet wird. Die Berechnung erfolgt numerisch mit Hilfe einer Finite Elemente Approximation. Das in AP 2 entwickelte Materialmodell wird hier genutzt, um die Materialantwort auf Belastung zu beschreiben und die entstehenden Schwindungsdehnungen einzufügen. Zusätzlich werden geeignete mathematische Randbedingungen definiert, um den Prozess realitätsnah abzubilden. Dabei werden insbesondere die durch Gravitation verursachte Gewichtskraft sowie die Reibung des Bauteils an der Sinterunterlage berücksichtigt. Die entwickelten Simulationsmethoden werden implementiert und der Programmcode mit Hilfe numerischer Tests verifiziert. Alle Parameter, die für die Nutzung des entwickelten Materialmodells nötig sind, werden anhand von Messdaten kalibriert, die aus den am IFAM durchgeführten Experimenten stammen.

AP4: Kennwertermittlung für das Materialmodell

Input: Reproduzierbare Druck-, Entbinderungs- und Sinterprozessparameter (AP 1)

Output: Die Materialeigenschaften vom Grün- und Sinterteil, sowie das Sinterverhalten der Ti64 Legierung.

Eine wichtige Vorarbeit, damit die Simulationen den Verzug beim Sintern der Grünteile wiedergeben, ist das Ermitteln der Materialeigenschaften. Hierfür erfolgt die Annahme, dass bei langsamen Heizraten eine Folge von Gleichgewichtszuständen gegeben sind. Daraus resultiert, dass sich bei gleichen Temperaturen die gleichen relativen Dichten ausbilden: $\rho = \rho(T)$. Dadurch können die Materialeigenschaften als nur dichteabhängig oder nur temperaturabhängig betrachtet werden. Diese Annahme soll frühzeitig im Arbeitspaket experimentell bestätigt werden.

Im Fokus der Kennwertermittlung stehen die Schwindungsdehnungen ε_{Schw} , welche über Sinterdilatometermessungen erfolgen. Hierbei sind die Schwindungsdehnungen ε_{Schw} nicht nur temperaturabhängig, sondern für verschiedene Partikelgrößen auch abhängig von der Heizrate \dot{T} [8] sowie der verschiedenen Raumrichtungen r_i : $\varepsilon_{Schw} = \varepsilon_{Schw}(T, \dot{T}, r_i)$ [9]. Die Messungen der Schwindungsdehnung werden für eine Heizrate und die drei Raumrichtungen durchgeführt. Weitere Messungen werden mit verschiedenen Lasten durchgeführt, wodurch sich Kriechdehnung und Schwindungsdehnung überlagern. Die Kriechraten $\dot{\varepsilon}_{kr}(T, \sigma)$ werden dann anhand der Kurven von Sinterdilatometermessungen ohne und mit Kriechen ermittelt. Erst mit den Kriechraten kann das Verhalten größerer und komplexerer Körper simuliert werden.

Ein weiterer Punkt ist die Modellierung des Materialverhaltens, wofür folgende mechanischen Materialeigenschaften bestimmt werden: Elastizitätsmodul E , Streckgrenze σ_y , Poisson-Zahl ν_{ij} . Durch die richtungsabhängigen Schwindungsdehnungen ist auch anzunehmen, dass die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig sind: $E_i = E_i(T, \rho(T))$, $\sigma_{yi} =$

$\sigma_{yi}(T, \rho(T))$. Daher werden Zugversuche durchgeführt. Der Eigenschaftsverlauf des Vollmaterials bei unterschiedlichen Temperaturen, entnommen aus der Literatur, wird mit einem Korrekturfaktor angepasst.

Die Simulation des Temperaturfelds im Bauteil während des Sinterns benötigt die thermischen Materialeigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit λ und die Wärmekapazität c sollen in diesem Arbeitspaket ebenfalls untersucht werden: $\lambda = \lambda(T, \rho(T))$, $c = c(T, \rho(T))$.

AP5: Validierung des Simulationsmodells

Input: In diesem Arbeitspaket soll das Simulationsmodell (AP 3) und die thermische Simulation (MAGMASOFT) durch Bauteile, die unter den optimierten Prozessparametern (AP 1) gefertigt wurden, validiert werden.

Output: Durch Feinanpassungen einiger Randbedingungen entsteht ein präzises Simulationsmodell zur Schwindungs- und Verzugsvorhersage im Sinterprozesses.

Mit Hilfe der entwickelten Simulationen werden zunächst Geometrien zur Eignung als Laborproben analysiert, d.h. Geometrien mit gut messbarem Verzugsverhalten identifiziert (ISEMP). Diese Proben werden dann gefertigt, wobei in-situ Messungen der Ofentemperaturen beim Sintern durch Thermoelemente an den Bauteilen vorgenommen werden (IFAM). Das simulierte Temperaturfeld wird anhand der gemessenen Temperaturdaten validiert und die Randbedingungen zu Strahlung und Konvektion des Ofens ggf. angepasst. Die Proben werden vermessen (PBA, IFAM, ISEMP) und der entstandene Verzug mit den aus den Simulationen vorhergesagten Verzug zur Validierung verglichen (ISEMP). Neben der Validierung des Simulationsmodells wird auch die Reproduzierbarkeit des Prozesses überprüft, indem die Drucke wiederholt durchgeführt werden und die Varianz des Verzugs bestimmt wird (IFAM).

Um die praktische Nutzbarkeit im industriellen Umfeld sicherzustellen, wird nach der erfolgreichen Validierung im Labormaßstab das Demonstrator-Bauteil gefertigt (IFAM) und ebenfalls gemessener und vorhergesagter Verzug verglichen (ISEMP).

AP6: Verzugsvorhersage und simulationsbasierte Kompensation

Input: Die präzise Simulation aus AP 5 soll genutzt werden, um den Verzug des reproduzierbar gefertigten (AP 1) Demonstrators zu kompensieren.

Output: Herstellung eines verzugsfreien Demonstrators und Bestätigung des reduzierten Arbeitsaufwandes für die geometrische Anpassung von Bauteilen durch Simulation.

Es wird eine Methode zur Verzugskompensation durch Prädeformation entwickelt, d.h. die Bauteilgeometrie wird vor Beginn der Fertigung derart angepasst, dass die prozessbedingt entstehenden Deformationen das Bauteil zur Sollgeometrie verformen. Hierzu wird der Verzug u vorhergesagt und die Bauteilgeometrie um das invertierte Verzugsfeld $-u$ (prä-)deformiert. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis das deformierte Bauteil der Sollgeometrie entspricht. Ein analoges Verfahren wurde bereits erfolgreich für LPBF-M angewandt [10].

Zusätzlich zur Verzugskompensation soll auch die Skalierung des Bauteils automatisiert angepasst werden. Der Verzug, der in der Simulation beschrieben wird, enthält sowohl die Schwindung als auch der Verzug aus den anderen im Modell berücksichtigten Effekte. Daher kann eine Invertierung des Verzugsfelds ebenso zu einer Skalierung der Bauteile führen, um die Schwindung zu berücksichtigen.

Die entstehende Methode wird implementiert und es wird eine Schnittstelle geschaffen, mit deren Hilfe die prädeformierten Geometrien in ein kompatibles Dateiformat exportiert werden, um für die MBJ Fertigung direkt einsetzbar zu sein. Als finaler Abschluss dieses Arbeitspaketes wird der prädeformierte Demonstrator gefertigt und der Verzug gemessen.

AP7: Ergebnistransfer

Input: In diesem Arbeitspaket werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete aufbereitet und dokumentiert.

Output: Methodiken zu Reduzierung von Kohlen- und Sauerstoffeintrag, Reproduzierbarkeit beim MBJ, Simulation des Sinterprozesses und Verzugkompensation

Im Ergebnistransfer sollen die gewonnen Erkenntnisse und Methoden aus den Arbeitspaketen dokumentiert und verständlich aufbereitet werden. Der Transfer der Informationen, sowohl an Unternehmen als auch in die Wissenschaft, erfolgt über verschiedene Wege. Bestandteil des Informationsaustauschs innerhalb des Projektes sind die PA-Sitzungen sowie die Erstellung des Zwischen- und des Abschlussberichtes. Weiterhin erfolgt die Verbreitung der Erkenntnisse auch in spezifischen Workshops, in den Unternehmen bei der Umsetzung der folgenden Methodiken unterstützt werden.

Inhalt der Transfermaßnahmen sind Methodiken zu Reduzierung von Kohlen- und Sauerstoffeintrag sowie zur reproduzierbaren Fertigung von Bauteilen mittels MBJ, die aus AP 1, AP 2 & AP 5 herausgearbeitet werden, als auch die Methodik von der Simulation bis zur Verzugkompensation (AP 2, AP 3, AP 5, AP 6).

1.3 Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Folgende Unternehmen unterstützten das Projekt durch Mitwirkung im projektbegleitenden Ausschuss:

- GE Additive Advanced Powders and Coatings Inc.
- AMPOWER GmbH & Co. KG
- AMSIS GmbH
- DIGITAL METAL AB
- Element 22 GmbH
- ExOne Deutschland GmbH
- GKN Sinter Metals Engineering GmbH
- Hanseatische Waren Handelsgesellschaft MbH & Co. Kg

- Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH
- MAGMA Gießereitechnologie GmbH
- Materialise GmbH
- MIMplus Technologies GmbH & Co. KG
- Präwest Dr.-Ing. H.-R. Jung GmbH & Co. KG
- Simufact Engineering GmbH
- Volkswagen AG

2 Stand der Forschung und Technik

Additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM) sind Technologien, bei denen im Gegensatz zu konventionellen Fertigungstechniken Material schichtweise aufgebracht statt abgetragen wird. Der Entwicklungsfokus liegt dabei auf der Herstellung komplex geformter metallischer Bauteile, die mit konventionellen Methoden kaum oder mit hohem Aufwand erzeugt werden können. Während die AM-Verfahren anfangs hauptsächlich zur Herstellung von Modellen und Prototypen genutzt wurden, wurden sie in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt und gelten heute als eine der aussichtsreichsten und sich am schnellsten verbleibenden Formgebungstechnologien.

2.1 Verfahrensbeschreibung Metal Binder Jetting

In pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren wie MBJ werden CAD-erzeugte 3D-Geometrien virtuell in Schichten geschnitten. Im anschließenden Druckprozess wird das Pulver Schicht für Schicht aufgetragen und das Bauteil hergestellt. Die Pulverpartikel können über verschiedene Verfahren verdichtet werden. Beim wird durch einen Druckkopf gezielt Binder in die Pulverschicht eingebracht. Nach dem Eindringen des Binders wird die Oberfläche des Pulverbetts durch eine Wärmequelle erhitzt, um das Lösungsmittel des Binders zu trocknen. Diese Prozessschritte werden wiederholt, bis das Bauteil aufgebaut ist. Das gesamte Pulverbett wird anschließend erwärmt, um den Binder auszuhärten. Dann werden die Grünteile aus dem Pulverbett entnommen, das Restpulver entfernt und in einem Ofenprozess durch thermische Zersetzung des Binders entbindert sowie abschließend gesintert. Hierbei verdichtet das Metallpulver und es tritt eine entsprechende Schwindung auf [11, 12].

Aufgrund der Verwendung von Binder für die Formgebung und dem anschließenden Sintern hat MBJ gegenüber anderen AM-Verfahren mehrere Vorteile. Es ermöglicht die Verarbeitung einer Vielzahl von Werkstoffen [13]. Beispielsweise können Werkstoffe, die beim Laser-Pulverbett-schmelzen zu hohen Eigenspannungen neigen [2, 14], aufgrund der homogenen Temperaturverteilung beim Sintern eigenspannungsfrei hergestellt werden. Das Fehlen von Temperaturgradienten während des Druckens macht Stützstrukturen überflüssig, was die zeitaufwändige und kostspielige Nachbearbeitung reduziert.

Das Dichtsintern von Grünkörpern aus dem MBJ wird in verschiedenen Arbeiten beschrieben. Sehr gute Ergebnisse werden am Fraunhofer IFAM für Werkzeugstähle erreicht, bei denen durch Flüssigphasensintern eine hohe Verdichtung erzielt werden konnte [2]. In [5] und [15] wurde für den häufig beim MIM eingesetzten Stahl 316L sowie für die Nickelsuperlegierung Inconel 718 gezeigt, dass mit Hilfe geeigneter Sinterbedingungen Bauteildichten über 98% erzielt

werden können. Allerdings wurden dafür ungewöhnlich hohe Sintertemperaturen bzw. lange Sinterzeiten eingesetzt, da für einen homogenen Pulverauftrag vergleichsweise grobe Pulver mit geringer Sinteraktivität gewählt wurden. Auch beim MBJ von Titanlegierungen wurden, aufgrund des groben Ausgangspulvers [4, 16] oder des Ziels zellulare, poröse Strukturen herzustellen [17, 18], bisher keine hohen Dichten erreicht.

Während des Sinterns erfolgt die Verdichtung unterhalb der Schmelztemperatur über Diffusionsprozesse durch die Kontaktpunkte zwischen den Partikeln. Mit zunehmender Packungsdichte der Partikel steigt die Anzahl dieser Kontaktpunkte, welche den Verdichtungsprozess fördern [19] und das Porenvolumen, das zum Erreichen vollständiger Verdichtung durch Schwindungsvorgänge aufgefüllt werden muss, sinkt. Die treibende Kraft für die Verdichtung ist die Änderung der freien Energie durch Verringerung der Oberfläche und Senkung der freien Oberflächenenergie. Daher werden zum Sintern feine Pulver mit großer spezifischer Oberfläche und entsprechend hoher Sinteraktivität benötigt, ähnlich wie sie bereits beim MIM verwendet werden (bei diesem Verfahren werden die Grünteile durch Spritzgießen eines Polymer-Metall-Gemisches geformt). Die große spezifische Oberfläche von feinen Pulvern führt allerdings auch zu starken elektrostatischen Adhäsionskräften zwischen den Partikeln [20] und beispielsweise zur Bildung von Agglomeraten, wodurch die Pulverpackungsdichte bzw. die Dichte der Grünteile insgesamt reduziert wird [5, 21]. Damit ist zum Erreichen einer hohen Verdichtung eine größere Schwindung nötig, die bei unregelmäßiger Anordnung der Partikel zudem inhomogen verläuft, wodurch die Maßhaltigkeit beeinträchtigt wird. Im Vergleich zu den bereits etablierten strahlbasierten AM Verfahren ergeben sich aus dieser Signifikanz des Pulverauftrags und der Pulverpackungsdichte beim MBJ neue Herausforderungen [22].

2.2 Parameter-Eigenschafts-Beziehungen von Pulverauftrag und Grünteildichte

Bei aktuellen MBJ-Anlagen wird das Pulver mit einem gegenläufigen Roller aufgetragen. Beim Auftragsprozesses bewegt sich der Roller über das Pulverbett, während er sich in entgegengesetzter Richtung dreht. Diese Rotation stimuliert die Fließfähigkeit des Pulvers vor dem Roller, während das Pulver unter dem Roller durch die Verfahrbewegung verdichtet wird. Daher sind die Schichtstärke, der Rollerdurchmesser, die Rollerdrehzahl, Verfahrgeschwindigkeit und die Menge des Pulvers vor dem Roller die Hauptparameter des Pulverauftrags. Als kritische Parameter für die Pulverbett- und Grünteildichte wurden bisher die Schichtstärke, der Rollerdurchmesser und die Pulvereigenschaften identifiziert [3, 5, 23]. Jedoch wurden die Auftragsparameter bisher weitestgehend isoliert untersucht und ihre Kombination bzw. die Wechselwirkungen untereinander kaum betrachtet.

Zusätzlich zum Pulverauftrag haben auch das Eindringen des Binders, sowie die Wechselwirkungen zwischen Pulver und Binder einen erheblichen Einfluss auf die Grünteildichte [24]. Maßgeblich ist hier die Menge des eingedruckten Binders (Bindersättigung) zu nennen [25].

Neben der parameterabhängigen Grünteildichte konnte in früheren Arbeiten ebenso eine Richtungsabhängigkeit der Schwindung festgestellt werden. Die Schwindung in z-Richtung, also senkrecht zu den Schichten, war dabei signifikant höher als in x- und y-Richtung (innerhalb der Schichtebene) [26]. Zusätzlich wurde im, u. A. vom Fraunhofer IFAM durchgeführten, IGF Vorhaben Nr.: 19733 N festgestellt, dass sich die Auftragsparameter und die Binderapplikation auch auf die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften auswirken.

Es gibt verschiedene Ansätze, diese Problemstellungen zu beheben, beispielsweise Anpassung der Schichtstärke, Vorverdichtung der Pulverschichten oder Optimierung der Bindersättigung [23, 27 bis 29]. Auch eine Variation der Ausgangspartikelgrößenverteilung, z.B. durch Mischen verschiedener Pulver, kann sich in Verbindung mit entsprechend angepassten Sinterbedingungen positiv auswirken [3]. Diese Ansätze werden systematisch und in Kombination im bewilligten Folgeprojekt (IGF Vorhaben Nr.: 21421 N) für Stahlwerkstoffe verfolgt, um genauere Parameter-Eigenschafts-Beziehungen aufzustellen. Eine direkte Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse ist durch die deutlich geringere spezifische Dichte von Ti64 (4,43 zu 7,8 g/cm³) nicht direkt möglich, da die höhere spezifische Oberfläche zu Pulveragglomeration und somit Reduktion der Grünteildichte führt [5]. Darüber hinaus trifft die kinetische Energie der Bindertröpfchen auf leichtere Pulverpartikel, die beim Aufprall verdrängt werden können [24]. Die daraus resultierenden Mikro-Defekte im Grünteil können zu höherer Porosität im gesinterten Bauteil führen [30].

2.3 Auswirkungen von Spurenelementen auf die Eigenschaften von Titanlegierungen

Die mechanischen Eigenschaften von Titan-Legierungen können durch interstitielle Spurenelemente erheblich verändert werden. Der Sauerstoffgehalt ist aufgrund seiner Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften von besonderer Bedeutung [31]. Mit zunehmendem Sauerstoffgehalt werden die Streckgrenze und Härte erhöht, jedoch mit einer entsprechenden Abnahme der Duktilität [32]. Auch weitere interstitielle Elemente (C, N, O), zu denen Titan allgemein eine hohe Affinität besitzt, vermindern die Duktilität [33].

Neben den angesprochenen Auswirkungen auf die Packungsdichte und das Sinterverhalten, beeinflusst die Partikelgröße auch die Aufnahme von Spurenelementen. Sauerstoff ist in einer passivierten Schicht an der Oberfläche des Titanpulvers gebunden, wodurch eine größere spezifische Oberfläche auch den Sauerstoffgehalt erhöht [7]. Weiterhin haben feine Pulver eine größere Kontaktfläche mit dem organischen Binder, welcher bei nicht rückstandsfreier Zersetzung zu Kohlenstoffeintrag führen kann [34].

2.4 Simulation von Sinterprozessen

Die numerischen Methoden zur Simulation von Sinterprozessen können in phänomenologische und physikalische Methoden unterschieden werden. Phänomenologische Modelle beruhen auf rheologischen Parametern, die an Versuchsreihen gesinterter Proben bestimmt werden können. Eines der am meisten verwendeten phänomenologischen Modelle zur Simulation des Festphasensinterns ist das Modell von Olevsky [35]. Da die Möglichkeiten der phänomenologischen Modelle beschränkt und von den rheologischen Parametern abhängig sind, sind physikalische Modelle, wie das Riedel-Modell [36, 37] entwickelt worden. Diese berücksichtigen physikalische Effekte wie unter anderem die Korngrenzen-, Oberflächen- und Volumendiffusion, sowie das plastische Fließen.

Zur Simulation des Materialverhaltens und der Verzugsentstehung bei der Verdichtung von Metallpulver existieren bereits einige Ansätze, welche zur Beschreibung des heißisostatischen Pressens (HIP) entwickelt wurden. Im HIP Prozess wird ein Bauteil/Grünteil bei hohen Temperaturen einem hohen isostatischen Druck ausgesetzt, um das Material zu verdichten. Eine häufig genutzte Anwendung ist, Metallpulver in einem Behälter zu einem Feststoff zu verdichten. Viele der dabei ablaufenden physikalischen Phänomene sind ähnlich (teils identisch) zu den Phänomenen im Sinterschritt nach dem Druckprozess beim MBJ, sodass die Ansätze zur Simulation des HIP Prozesses als Grundlage für die geplanten Modellierungen und Simulationen genutzt werden können. Zu nennende Arbeiten sind insbesondere die Vorstellung einer Simulationsmethode zur Berechnung des Verzugs während des HIP von Metallpulver in einem Behälter von Jinka und Lewis, bei welcher der Einfluss des umliegenden Behälters auf das Metallpulver studiert wurde [6]. Li et al. beschreiben ebenfalls ein HIP Simulationsmodell, bei welchem die Formänderung der Probe auf Basis der simulierten Wanderung einer Verdichtungsfront von der Bauteiloberfläche in Richtung des -zentrums berechnet wird [38]. Olevsky und Dyck haben die anisotrope Schwindung während des HIP Prozesses von Metallpulver in einem Behälter modelliert und insbesondere die Einflüsse des Temperaturgradienten, des Dichtegradienten und der Beschaffenheit des Behälters untersucht [39]. Ein Vergleich verschiedener Materialmodelle für die Simulation der Pulververdichtung findet sich in [40].

Im Vergleich zum Simulationsmodell des IPM der RWTH Aachen im IGF Vorhaben Nr.: 19733 N sollen in diesem Projekt Vereinfachungen des Material- und Simulationsmodells auf Basis der Ergebnisse der Untersuchung der Parameter-Eigenschafts-Beziehungen genutzt werden. In der Simulation im hier vorgeschlagenen Projekt sollen ebenfalls Kriecheffekte, aber zusätzlich der Einfluss der Schwerkraft und der Reibung mit der Sinterunterlage berücksichtigt werden. Zudem unterscheidet sich der Ansatz zur Verzugskompensation, da keine Optimierung wie im genannten Vorhaben durchgeführt werden soll, sondern die Prädeformation über Invertierung des simulierten Verzugs berechnet wird. Bei Geometrien mit einem komplexen Verzugsverhalten muss dieser Vorgang wiederholt werden, damit Endgeometrie und Sollgeometrie übereinstimmen.

3 Ergebnisdokumentation

3.1 Identifizierung und Optimierung relevanter Prozessparameter (AP1)

In dem Projekt MBJ für die Serienfertigung soll ein Simulationsmodell entwickelt werden, das Schwindungs- und Verzugsvorhersagen zur Kompensation der auftretenden Verformungen ermöglicht. Für eine exakte Vorhersage wird ein möglichst gleicher Ausgangszustand der Probenkörper vor dem Sintern benötigt. Zu diesem Zweck werden in diesem Arbeitspaket die relevanten Pulvereigenschaften und Prozessparameter des Druck-, Entbinde- und Sinterprozesses für den Werkstoff Ti-6Al-4V identifiziert und anschließend hinsichtlich Reproduzierbarkeit und minimalem Kohlen- und Sauerstoffeintrag optimiert.

Pulveranalytik

Die Pulvereigenschaften werden zu Beginn des Arbeitspakets bestimmt, um eine Vorhersage über die Fließfähigkeit und das weitere Pulververhalten machen zu können. Hierzu wurde in einer ausführlichen Eingangskontrolle die Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung überprüft, Rasterelektronenmikroskopaufnahmen angefertigt sowie die Dichte per Pycnometrie ermittelt. Es wurde zudem die spezifische Oberfläche mittels BET bestimmt und das Fließverhalten des Pulvers durch die Ermittlung von Schütt- und Klopfdichte nach DIN ISO 3923-2 und DIN ISO 3953 sowie mittels Revolution Powder Analyzer charakterisiert.

Bei der Eingangskontrolle des Pulvers ergab sich folgende Partikelgrößenverteilung (Abbildung 3) mit einem d_{10} von 8,99 μm , d_{50} von 33,30 μm und einem d_{90} von 48,81 μm .

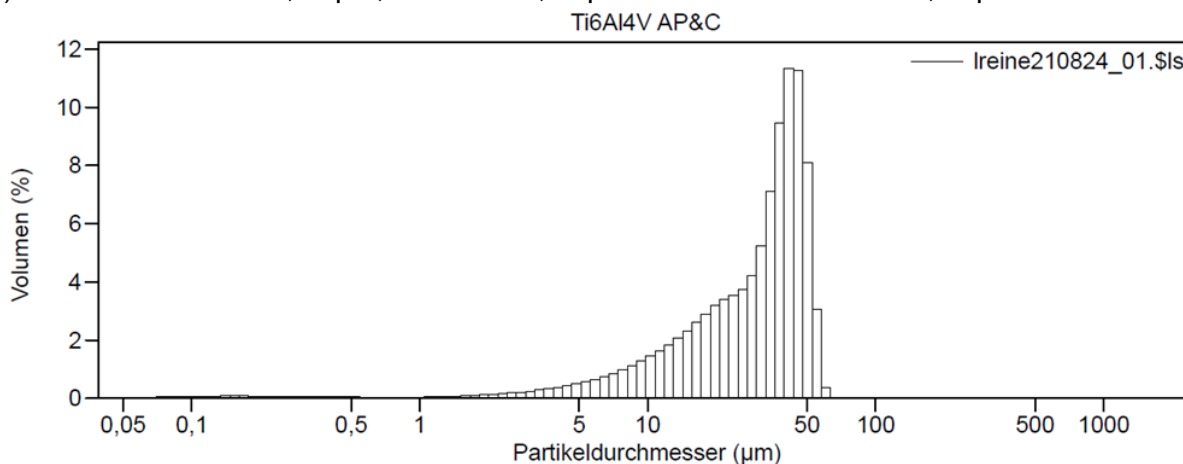


Abbildung 3: Partikelgrößenverteilung des verwendeten Pulvers

Die Pulverpartikel sind sphärisch, mit geringer Oberflächenporosität und einer geringen Anzahl von Satelliten, was für die Verarbeitung mittels Metal Binder Jetting von Vorteil ist (Abbildung 4).

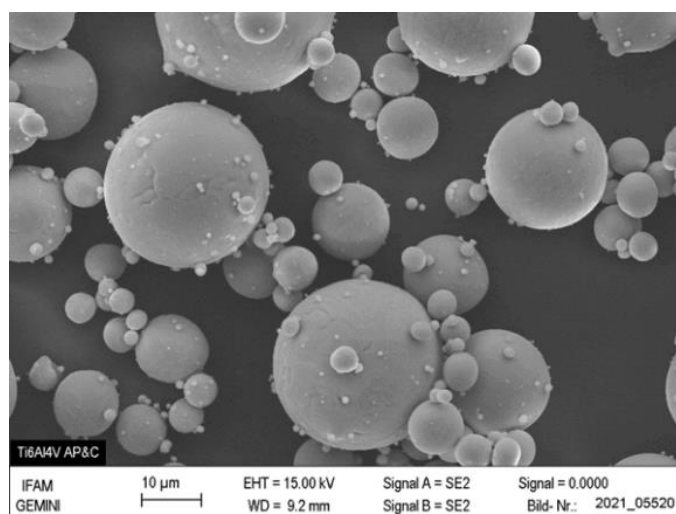


Abbildung 4: REM-Aufnahme des verwendeten Pulvers

Die spezifische Oberfläche (BET) lag bei $0,138 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ und die pyknometrische Dichte bei $4,42 \text{ g cm}^{-3}$. Das Pulver wies eine Schüttdichte (Scott) von $2,64 \text{ g cm}^{-3}$ und eine Klopf-dichte von $3,12 \text{ g cm}^{-3}$ auf. Das Fließverhalten im RPA zeigte einen Lawinenwinkel von $39,30^\circ$. Zusammenfassend handelt es sich um ein sehr fließfähiges Pulver, das für das Binder Jetting gut geeignet ist.

Optimierung der Druckparameter

Das in der Parameterstudie verwendete Drucklayout (Abbildung 5) enthält offene Cups, Würfel und Biegebalken. Der Pulverauftragsprozess (Wechselwirkungen zwischen Pulver und Auftragsparametern) kann über die Ermittlung der Pulverbettdichte in den offenen Pulvercups analysiert werden. Die Bewertung des Bindereintrags (Wechselwirkung zwischen Pulverbett und Binder) erfolgt durch das Vermessen und Wiegen der Würfel, sowie das Prüfen der Biegebalken mittels 4-Punkt-Biegeprüfung im Grünteilzustand.

Die relevanten Pulver- und Prozessparameter sollen identifiziert und anschließend optimiert werden, um die Grünteil- sowie Enddichte zu verbessern. Die Optimierung des Pulverauftrags erfolgte randomisiert und mittels einer vollfaktoriellen 2×2 -Versuchsmatrix, in der zwei Schichtstärken sowie zwei Auftragsgeschwindigkeiten variiert wurden. Die Optimierung der Bindereintrags fand randomisiert statt. Mithilfe spezieller Bauteile konnte die Penetrationstiefe des Binders zur Bestimmung der optimalen Bindersättigung ermittelt werden (Abbildung 6). Anschließend wurde die Reproduzierbarkeit optimierten Parameter durch eine dreimalige Wiederholung verifiziert.

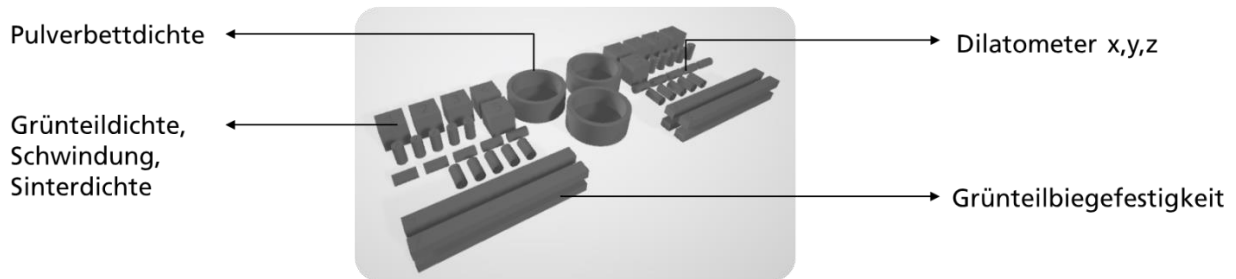


Abbildung 5: Drucklayout der Parameterstudie

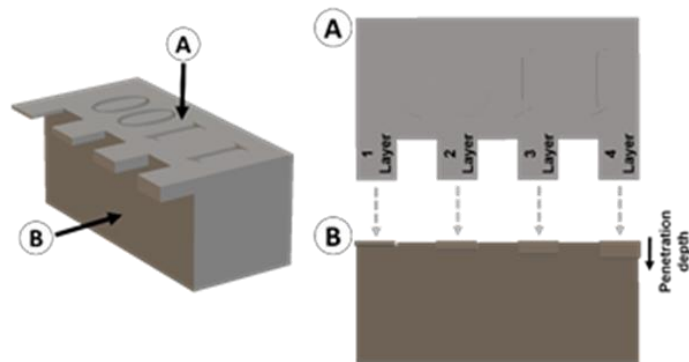


Abbildung 6: Bauteil für die Penetrationstiefenbestimmung

Für die Bestimmung geeigneter Entbinderungs- und Sinterparameter wurden Ausgangswerte als Grundlage für folgende Optimierungen ermittelt. Für Proben in unterschiedlichen Stadien der Prozesskette wurden Kohlen- und Sauerstoffgehalte mittels Spurenanalyse nach DIN ISO 4491-1 bestimmt.

Optimierung des Pulverauftrags

Mithilfe einer festgesetzten Bindersättigung wurde zuerst der Pulverauftrag optimiert. Die größere Schichtdicke führte hierbei tendenziell zu einer Verringerung der Grünteildichte und somit zu einer signifikant geringeren Sinterdichte (Abbildung 7; a, c, e). Die Grünteilbiegefestigkeit wies keine signifikanten Unterschiede auf (Abbildung 7; b). Die Erhöhung der Auftragsgeschwindigkeit führte zwar zu einer zusätzlichen Verdichtung, jedoch ging damit Schichtverschiebung einher (Abbildung 7; e). Somit ergeben sich für das weitere Projekt 50 μm und 5 mm/s als optimierte Pulverauftragsparameter.

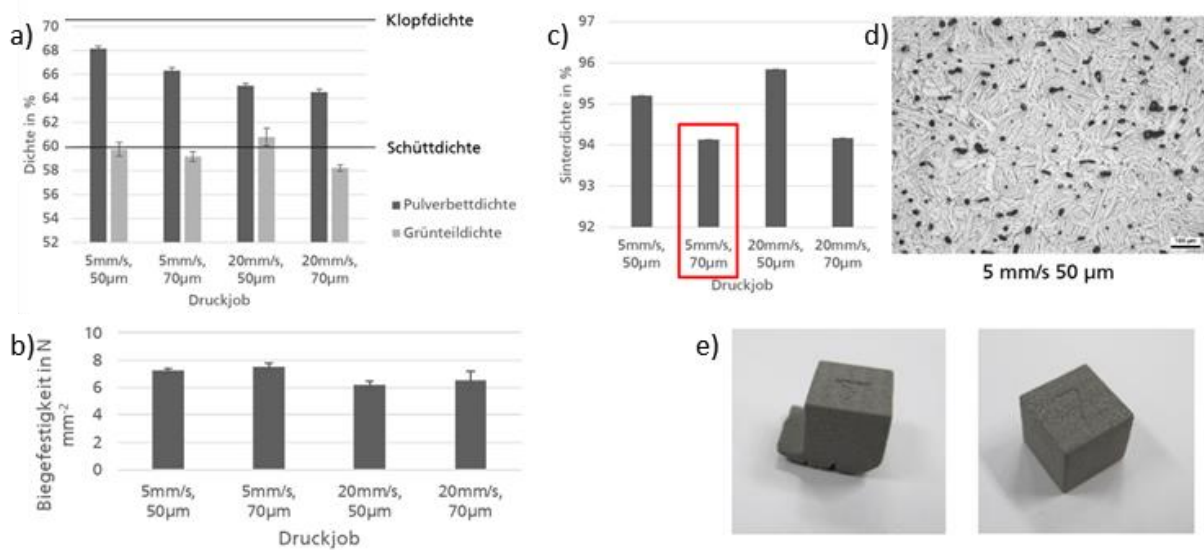


Abbildung 7: Pulver- und Grünteildichte (a), Biegefestigkeit von Grünteilen (b), Sinterdichte (c), Mikrostruktur (d) und Proben mit Schichtverschiebung (e) für die unterschiedlichen Auftragsparameter

Optimierung der Bindersättigung

Bei den Untersuchungen zum Pulverauftrag zeigte sich durchgehend eine erhebliche Differenz zwischen Pulverbett- und Grünteildichte von bis zu 10 % (Abbildung 8).

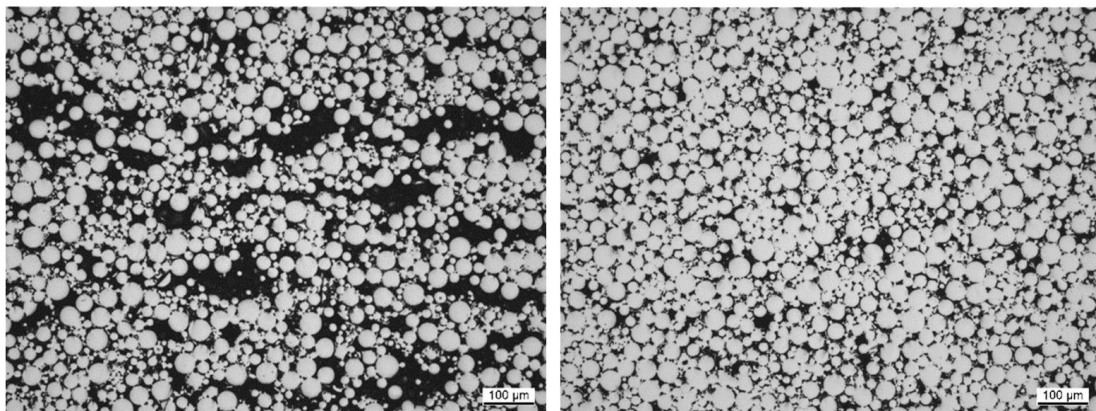


Abbildung 8: Mikroskopische Aufnahme des angesinterten Ti64-Pulvers (links: mit Binder, rechts: ohne Binder)

Ziel der weiteren Untersuchungen war es, die Verringerung der Grünteildichte durch den Bindereintrag zu minimieren. Dieser kann in zwei Phasen gegliedert werden. Einerseits in den Tropfenaufprall, der von der kinetischen Energie der Tropfen und dem Zusammenhalt des Pulverbettes abhängt. Andererseits in die Binderausbreitung, die vom Vernetzungsverhalten der Partikel, der Bindersättigung und den Kapillarkräften des Pulverbettes abhängt. Es wurden Versuchsreihen zum Einfluss der Bindersättigung, zur Schichtdicke sowie zum Tropfenvolumen durchgeführt.

Abbildung 9 zeigt die gemessene Eindringtiefe bei verschiedenen Bindemittelsättigungen und der Anzahl der Schichten. Teilestärken unter 250 μm waren nicht druckbar. Die Messungen wurden mit der theoretischen Soll-Teiledicke verglichen, die sich aus der Anzahl der Schichten und der Schichtdicke ergibt. Die gemessenen Werte verliefen parallel zur theoretischen Linie. Die Bindersättigungen 45% und 55% lagen über dem Zielwert, während die Bindemittelsättigung 15% eine geringere Eindringtiefe aufwies. Die durch Druckversuche ermittelte ideale Gleichgewichtssättigung betrug somit 35 %.

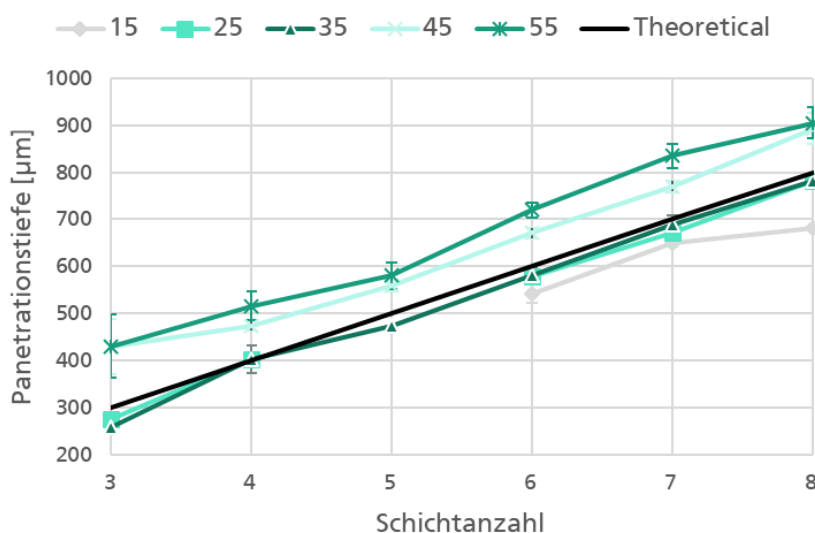
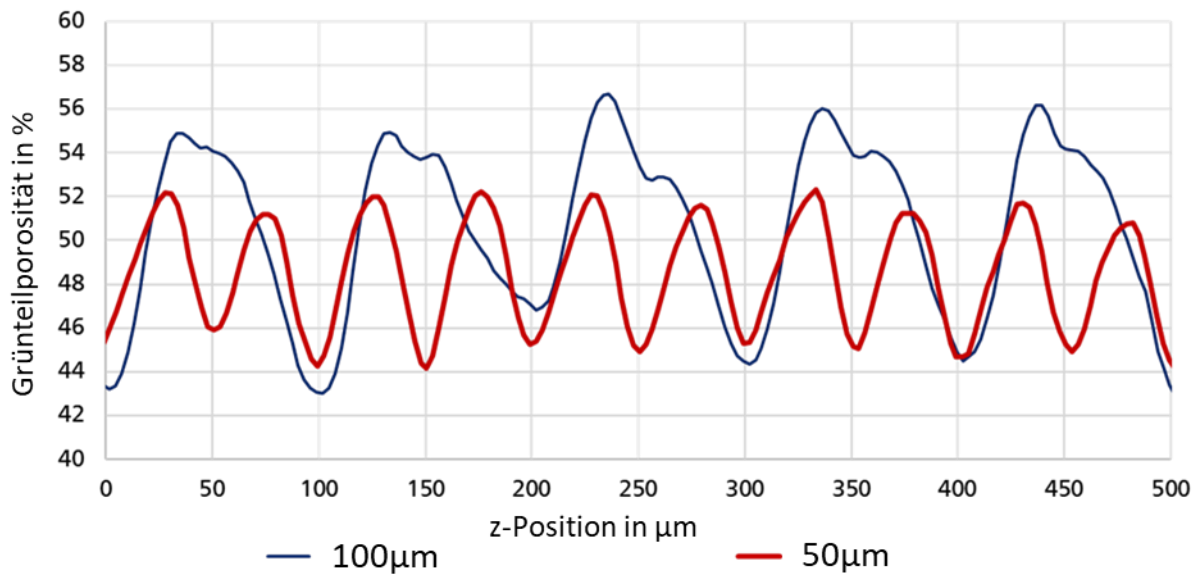


Abbildung 9: Messung der Penetrationstiefe

Der Vergleich der Pulverbett- und Grünteildichte zeigte, dass der Binderauftrag zu Porosität führt, aber es ist auch zu beobachten, dass mit zunehmender Bindersättigung einen geringeren Dichteverlust aufweist. Dies kann auf die Kapillarkräfte oder auf eine Verringerung der Reibung zwischen den Partikeln durch den Flüssigkeitsfilm zurückzuführen sein. Ein weiterer Grund könnte der Abstand zwischen den Binderlinien und den Bindertröpfchen sein. Je höher die Bindersättigung war, desto enger lagen die Binderlinien und die Bindertröpfchen innerhalb der Binderlinie beieinander, was zu einem größeren Druck auf die gesamte Pulveroberfläche und zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Flüssigkeitsbrückenkräfte führte. Dadurch entstehen weniger Pulver-Binder-Agglomerate mit Poren zwischen diesen Agglomeraten wodurch eine dichtere und homogenere Grünteilstruktur erzeugt wird, die den Verdichtungsprozess fördert. Mit steigender Bindersättigung, erhöht sich ebenfalls die Grünteilbiegefestigkeit, was sich auf die Entpulverung und die Abbildegenauigkeit auswirkt.

Mikrocomputertomographieaufnahmen zeigten zudem, dass die Schichtstärke den Bindeeintrag beeinflusst. Je höher die Schichtstärke ist, desto größer ist die eingebrachte Porosität (Abbildung 10).

Abbildung 10: Grünteilporosität ermittelt mittels μ -CT

Dies kann damit begründet werden, dass der gesamte Binder für eine größere Schichtdicke an derselben Stelle der Pulverbettsoberfläche appliziert wird (Abbildung 11).

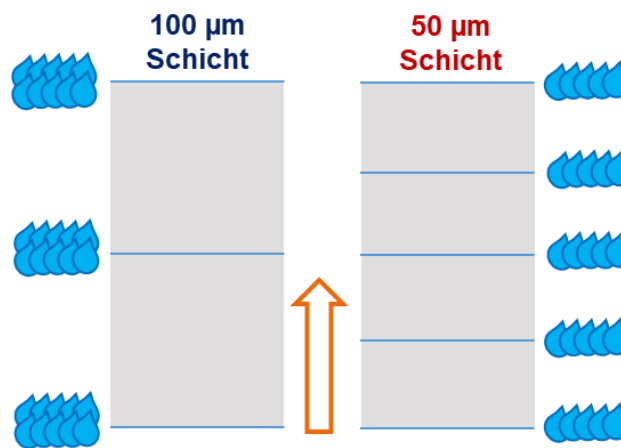


Abbildung 11: schematische Darstellung der Binderapplikation bei unterschiedlichen Schichtdicken

Um den Einfluss der kinetischen Energie des Tropfenaufpralls zu untersuchen, wurden Versuchsreihen sowohl mit 10 pL als auch mit 30 pL Tropfenvolumen und unterschiedlichen Bindersättigungen durchgeführt (Abbildung 12). Sowohl eine Reduktion der Aufschlaggeschwindigkeit als auch ein geringeres Tropfenvolumen reduzieren die Aufschlagsenergie und somit das Risiko des Porositätseintrags durch den Bindereintrag. Bei gleichbleibender Geschwindigkeit hat eine Veränderung des Tropfenvolumens eine lineare Veränderung der

kinetischen Energie zur Folge. Aus einer weiteren Untersuchung geht hervor, dass kleinere Tropfen dazu führen, dass die Bindersättigung innerhalb einer gedruckten Linie im Pulverbett homogener ist, als bei größeren Tropfen. Die Homogenität ist ebenfalls davon abhängig, wie lang die Zeit zwischen dem Auftreffen von aufeinander folgenden Tropfen in der Linie ist.

Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen, dass die Differenz zwischen der Pulverbett- und Grünteildichte keinen Unterschied zwischen den beiden Tropfenvolumina aufweist. Jedoch zeigte sich hier ebenfalls der erhebliche Einfluss der Bindersättigung. Mit zunehmender Bindersättigung nahm die Differenz zwischen Pulverbett- und Grünteildichte ab. Diese Ergebnisse lassen sich anhand von Dropwatcher-Ergebnissen zu denselben Druckköpfen, die im Nachhinein angefertigt wurden, erklären. In den Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass Flugrichtung, Geschwindigkeit und Tropfenvolumen bei geringen Frequenzen zwischen 1 kHz und 3 kHz beim 10 pL Druckkopf stark variieren. Dies lässt darauf schließen, dass bei Verwendung des 10 pL Druckkopfs die Tropfen ungleichmäßig auf das Pulverbett aufgetragen wurden, was zu einer geringeren und inhomogenen Grünteildichte führte. Daher wurde in allen folgenden Druckversuchen der 30 pL Druckkopf verwendet.

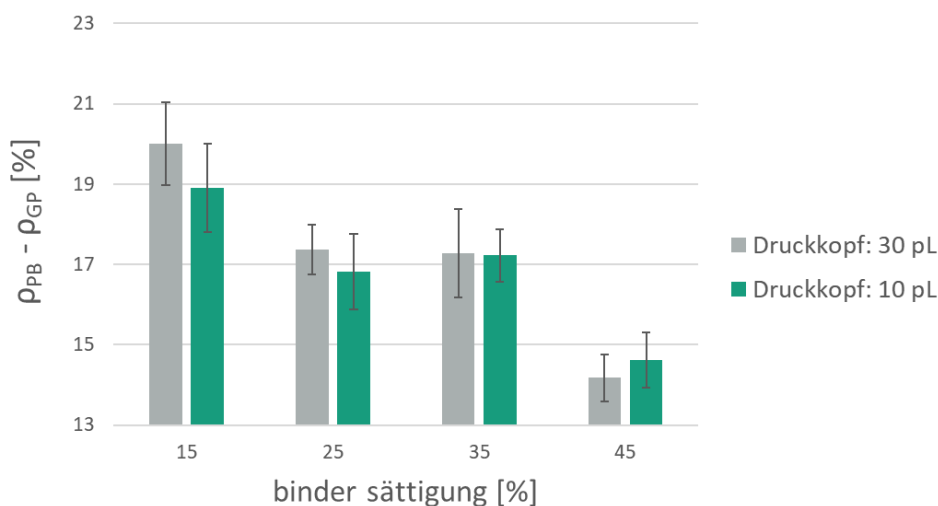


Abbildung 12: Vergleich des 10 und 30 pL Druckkopfes

Schlussendlich konnte mithilfe der Optimierung des Bindereintrags eine 5% höhere Grünteildichte erzielt werden.

Optimierung der Entbinderungsbedingungen

Zur Optimierung der Entbinderungsbedingungen wurden Messungen im Massenspektrometer durchgeführt (Abbildung 13). Die Messungen zeigen, dass die Entbinderung bis 550 °C vollständig abgeschlossen ist und nicht weiter optimiert werden muss.

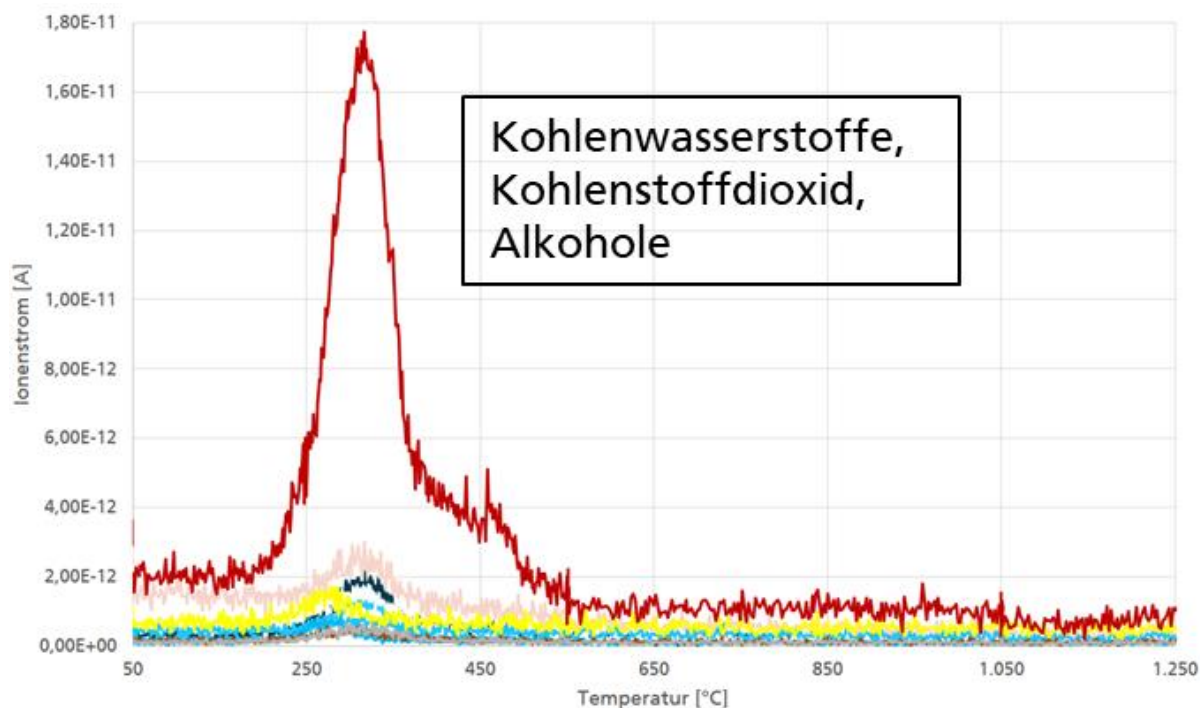


Abbildung 13: Massenspektrometrie des Abgasstroms der Entbinderung

Prozessbedingter Sauerstoff- und Kohlenstoffeintrag

Laut ISO 22068 liegt der MIM-Standard für den Kohlenstoffgehalt für Ti64 bei <0,2 Gew.% und der Sauerstoffgehalt bei <0,4 Gew.%. Der Grade 5 Standard (ASTM F1472), der häufig in der Medizintechnik und Luft- und Raumfahrtbranche Anwendung findet, liegt für den Kohlenstoffgehalt von Ti64 bei <0,08 Gew.% und der Sauerstoffgehalt bei <0,2 Gew.%. Erste Versuche zeigten, dass der Sauerstoffgehalt durch den Druckprozess und das anschließende Curing, Entbindern und Sintern nur leicht anstieg (Abbildung 14). Die Werte liegen deutlich unter den MIM-Standards. Der Kohlenstoffgehalt steigt durch den Eintrag von Binder in das Pulver liegt aber ebenfalls bereits unter dem MIM-Standard.

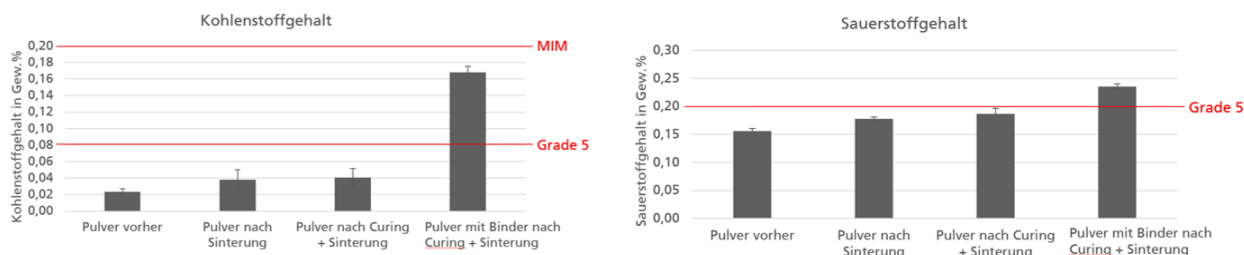


Abbildung 14: Kohlen- und Sauerstoffgehalte der Proben in unterschiedlichen Stadien der Prozesskette

Reproduzierbarkeit

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen wurde der Druckversuch mit optimierter Bindersättigung und Pulverauftrag zusätzlich zweifach wiederholt und die drei Druckversuche miteinander verglichen. Die Abweichung der unabhängig durchgeführten Versuche liegt innerhalb der prozessbedingten Schwankungen.

3.2 Kennwertermittlung für das Materialmodell (AP4)

Eine wichtige Vorarbeit, damit die Simulationen den Verzug beim Sintern der Grünteile wiedergeben, ist das Ermitteln der Materialeigenschaften. Da die Materialeigenschaften sowohl dichte-, als auch temperaturabhängig sind, wird zuerst der Dichteverlauf anhand des ausgewählten Zeit-Temperatur-Profiles ermittelt. Hierfür werden sowohl Sinterdilatometermessungen als auch Abbruchsinterungen durchgeführt. Bei den Abbruchsinterungen wurden Sinterungen gemäß Zeit-Temperatur-Profil durchgeführt und an unterschiedlichen Stellen abgebrochen und heruntergekühlt.

Als weitere Kennwertermittlung werden für die Kalibrierung des Reibungsmodells C-Proben in unterschiedlichen Variationen gedruckt und gesintert. Es handelt sich hierbei um Proben anhand derer der Reibungseffekt durch die freien Enden und maximaler Auflagefläche auf der Sinterunterlage gemessen werden kann.

Abbruchsinterungen

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Verdichtung mittels Abbruchsinterungen. Der Übergang von offener zu geschlossener Porosität findet zwischen C und D statt (Abbildung 16). Dieser Materialkennwert kann für das Materialmodell verwendet werden.

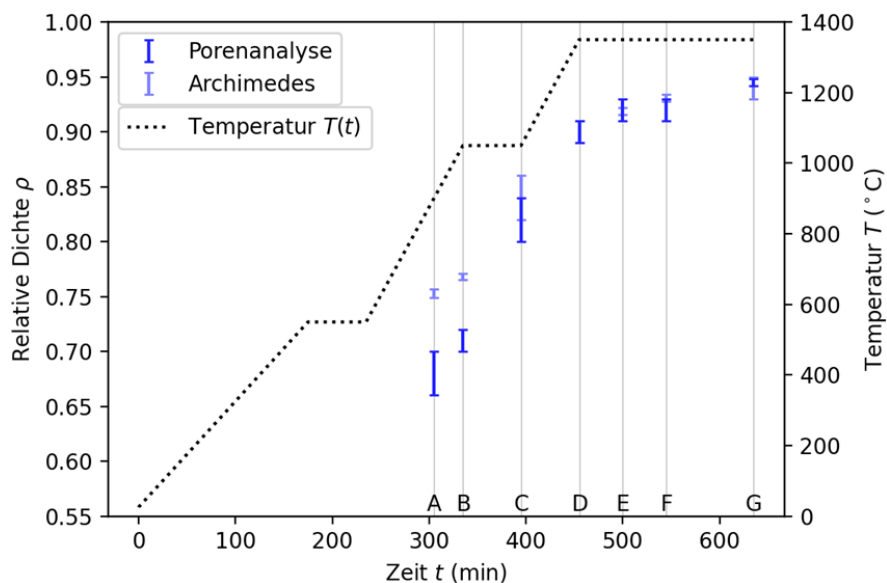


Abbildung 15: Verlauf der Verdichtung mittels Abbruchsinterungen

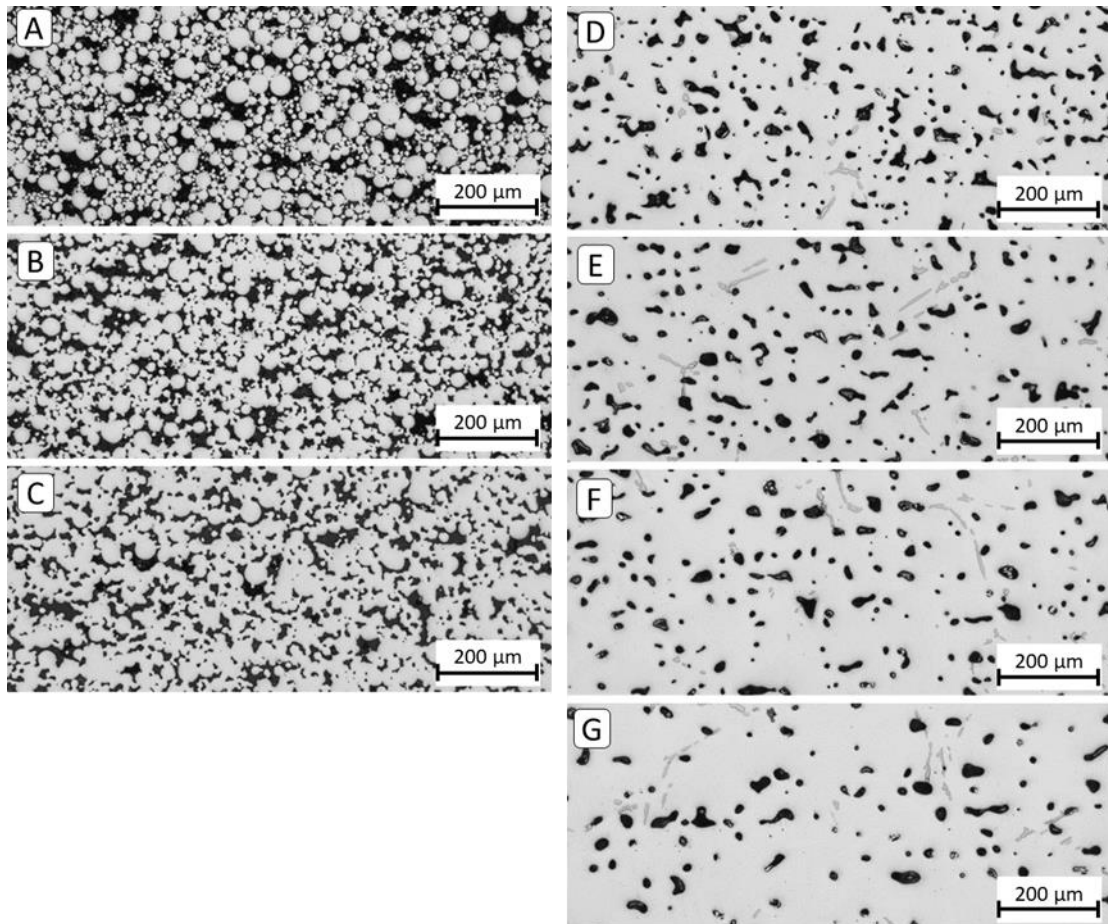


Abbildung 16: Schlibbilder für Porenanalyse der Abbruchsinterungen

Sinterdilatometrie

Mithilfe von Dilatometermessungen in unterschiedliche Raumrichtungen sowie mit verschiedenen Auflasten konnten weitere Kennwerte für das Materialmodell ermittelt werden. Der Vergleich der Schwindung der drei Druckausrichtungen zeigt, dass die Schwindung ein anisotropes Verhalten in x,y und z aufweist (Abbildung 17).

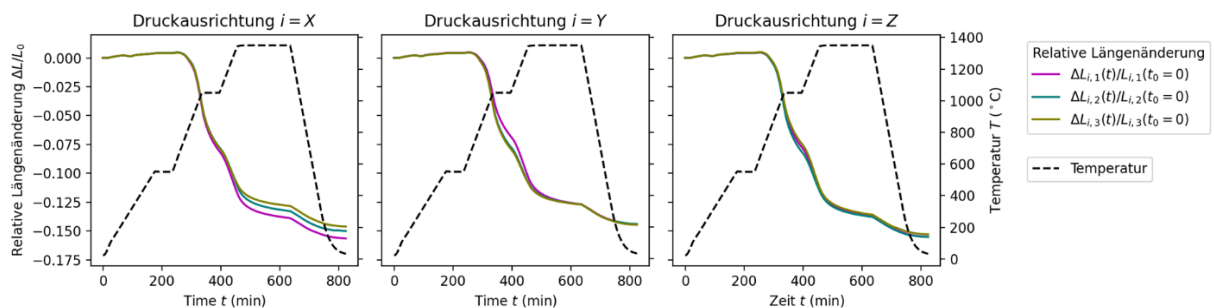


Abbildung 17: Sinterdilatometrie zur Auswirkung der Druckausrichtung (X: Beschichter; Y: Druckkopf; Z: Aufbaurichtung)

Die thermische Ausdehnung kann über Abkühlphase im Dilatometer ermittelt werden (Abbildung 18). Sie verhält sich gemittelt über alle Messreihen isotrop in x,y und z.

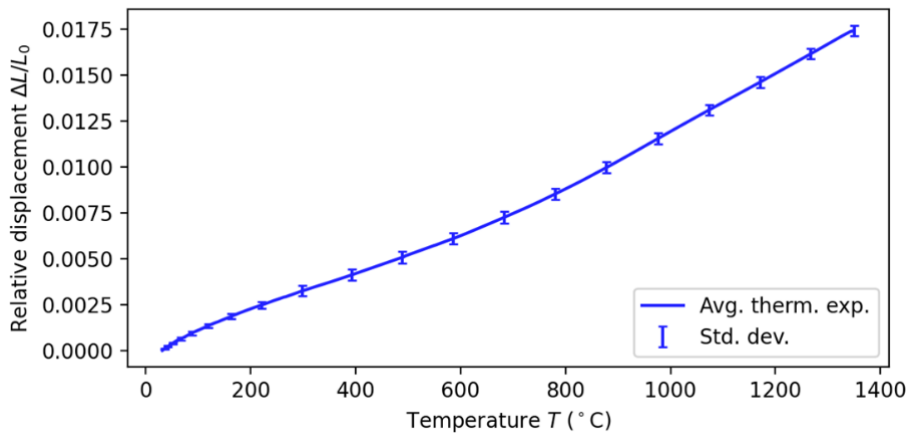


Abbildung 18: Thermische Ausdehnung – Ermittlung über Abkühlphase im Dilatometer

Wenn nun diese thermische Ausdehnung rausgerechnet wird, kann man erkennen, dass zwar zu Beginn des zeitlichen Verlaufs der Anisotropie große Schwankungen durch die geringe Gesamtschwindigkeit aufweist, am Ende aber konstante Anisotropiekoeffizienten für alle drei Raumrichtungen vorliegen (Abbildung 19).

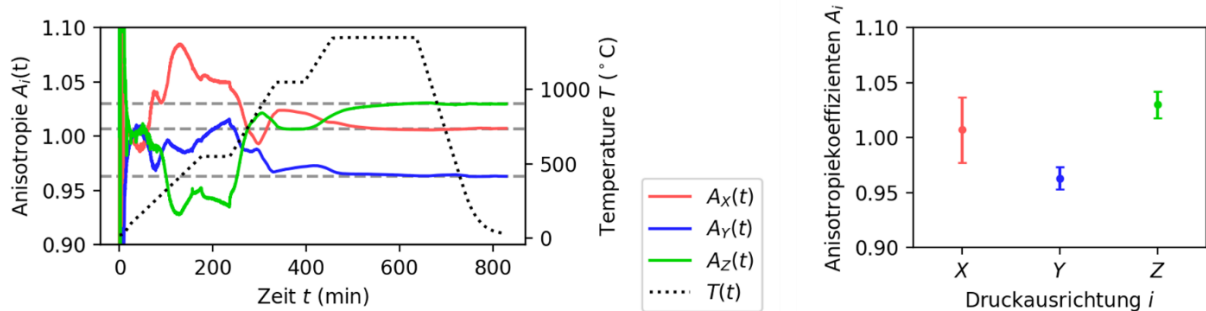


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der Anisotropie

Bei den Dilatometermessungen in Aufbaurichtung mit verschiedenen Auflasten bis 500mN ist zu sehen, dass höhere Auflast zu erhöhten Kriechverhalten führen. Allerdings liegt keine höhere Dichte durch die Erhöhung der Last im untersuchten Bereich vor und es ist ebenfalls kein Einfluss auf die thermische Ausdehnung durch die Erhöhung der Last zu erkennen.

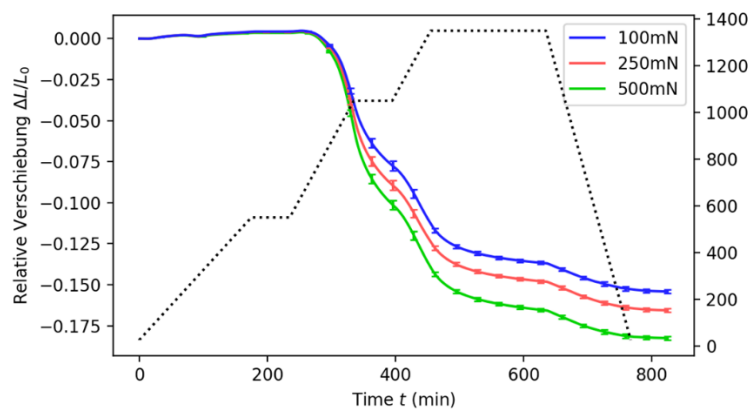


Abbildung 20: Dilatometermessungen in Aufbaurichtung mit verschiedenen Auflasten bis 500mN

Überhanggeometrien

Für Bestimmung der Schubviskosität wurden Überhanggeometrien in unterschiedliche Raumrichtungen sowie mit verschieden langen Stegen gedruckt.

Es konnte beobachtet werden, dass Bauteile senkrecht zur Aufbaurichtung z anfälliger für Verzug sind, da ein anisotropes Scherverhalten vorliegt.

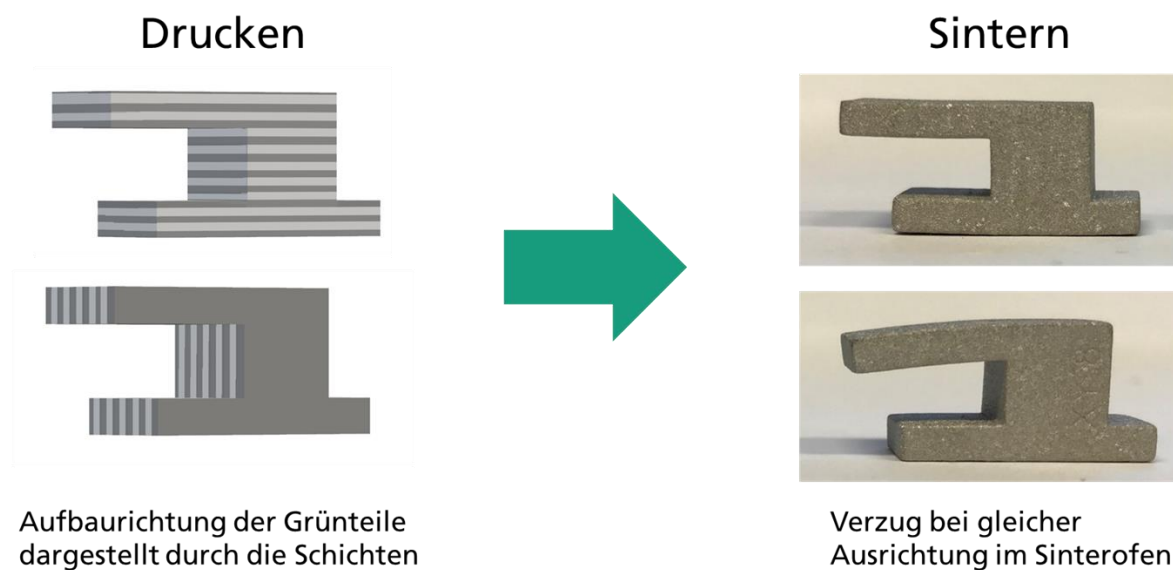


Abbildung 21: Überhanggeometrien für Bestimmung der Schubviskosität

3.3 Entwicklung des Materialmodells (AP2)

Das für die Sintersimulationsmethode verwendete Materialmodell wurde auf Grundlage von Modellen für die Verdichtung während des Sintervorgangs entwickelt. Für diese Vorgehensweise wurde sich entschieden, da verlässliche und reproduzierbare Daten würde den Verlauf der Verdichtung erzeugt werden konnten.

Verdichtung

Grundsätzlich lässt sich die Verdichtung beim Sintern in 3 Stufen unterteilen: Anfangsphase (Halsbildung), Zwischenstufe (offene Porosität) und Endphase (geschlossene Porosität) [41]. Das Verdichtungsverhalten verändert sich während dieser Phase, sowohl durch die Änderung der Porositätsstruktur als auch durch das Kornwachstums während des Sintervorgangs.

Beim verwendeten Material Ti64 konnten folgende Vereinfachungen vorgenommen werden, um den Kalibrierungsaufwand zu minimieren:

1. Nur Berücksichtigung der beta-phase von Ti64 bei der Simulation: Bei Ti64 handelt es sich um eine alpha-beta-legierung, entsprechend der unterschiedlichen Kristallstrukturen von der alpha- und beta-phase, müssen Materialkennwerte für Diffusion entsprechend des jeweiligen Anteils angepasst werden. Jedoch ist der Sinterzyklus während der Verdichtung, die meiste Zeit über 1000°C. Bei dieser Temperatur kommt es bei Ti64 zur einer Phasenumwandlung zu einer reinen beta-Legierung [42]. Zur Vereinfachung wird für die Simulation durchgehend von einer reinen beta-Struktur ausgegangen.
2. Vernachlässigung der Anfangsphase: Im Vergleich zur Zwischenstufe und zur Endphase hängt die Anfangsphase von mehreren Faktoren ab. Zudem sind diese deutlich schwerer zu kalibrieren, da die Anfangsphase nur die ersten 2-3% der Verdichtung relevant ist [41]. Deshalb wurde für die Simulation nur die Zwischenstufe und die Endphase berücksichtigt.
3. Nur Volumendiffusion bei Ti64 relevant: Im Allgemeinen ist für die Verdichtung während der Zwischenstufe sowohl die Korngrenzendiffusion als auch die Volumendiffusion ausschlaggebend. Bei Ti64 muss bei hohe Temperaturen jedoch nur die Volumendiffusion berücksichtigt werden.

Die resultierenden Gleichungen für die Verdichtungsrate sind

$$\dot{\rho}_i = \frac{C_i}{RTG^3} e^{-\frac{Q_i}{RT}}$$

für die Zwischenstufe und

$$\dot{\rho}_f = \frac{C_f(1-\rho)^{\frac{1}{3}}}{RTG^3} e^{-\frac{Q_i}{RT}}$$

für die Endphase. Dabei sind C_i und C_f konstante Materialparameter für Zwischenstufe und Endphase, R die Gaskonstante, T die Temperatur, G der Korndurchmesser, ρ die relative Dichte und Q_i Aktivierungsenergie für Volumendiffusion.

Für das Kornwachstum wurde ein phänomenologisches Modell basierend auf dem Modell von Brook verwendet mit

$$\dot{G} = \frac{C_G(1-\rho)^{-\frac{4}{3}}}{RTG^4} e^{-\frac{Q_s}{RT}}$$

Mit C_G ein Materialparameter und Q_s die Aktivierungsenergie für Oberflächendiffusion

Kalibrierung

Für die Kalibrierung wurde eine ausgiebige Parameterstudie durchgeführt, um den Verlauf der Verdichtung an die gemessenen Werte aus der Abbruchsinterung anzupassen.

Dabei wurde die Abkühlung in jedem Zeitschritt berücksichtigt, siehe Abbildung A (links)...

Abbildung A (rechts) zeigt den resultierenden Verlauf der Verdichtung über den gesamten Sinterzyklus mit dem Übergang von offener zur geschlossenen Porosität (Zwischenstufe zur Endphase).

Tabelle A zeigt die bestimmten Materialkennwerte. Da für das Kornwachstum, keine Werte ermittelt werden konnten, wurde diese auch einzig über den Verlauf der Verdichtung bestimmt.

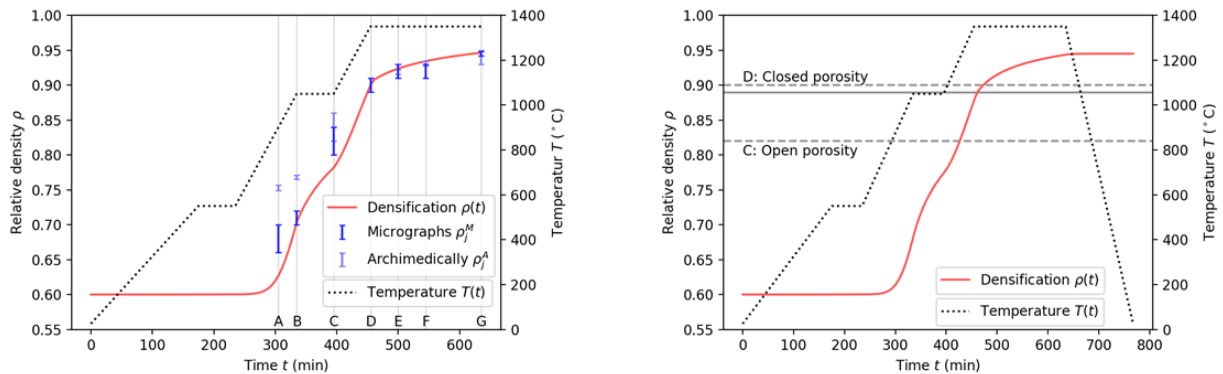


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Verdichtung $\rho(t)$ mit Temperaturprofil des Sinterprogramms $T(t)$, rechts: Mit Abkühlung in jedem Zeitschritt im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen, links: Verlauf über kompletten Sinterzyklus mit horizontalen Linien für offene und geschlossene Porosität (gestrichelte Linien) sowie für den Übergangsp parameter ρ_{trans} (horizontale Linie)

Tabelle 1: Für die Simulation verwendete Materialkennwerte, die sich aus der Parameterstudie ergeben haben

Materialkennwerte	Werte
Materialparameter Zwischenstufe C_i	$6,18 \cdot 10^{-8} \text{ Jm}^3/\text{s}$
Materialparameter Endphase C_f	$8,11 \cdot 10^{-8} \text{ Jm}^3/\text{s}$
Aktivierungsenergie Volumendiffusion Q_l	153.000 J
Übergangsp parameter ρ_{trans}	0,8895
Materialparameter Kornwachstum Q_s	$2,585 \cdot 10^{-12} \text{ Jm}^4/\text{s}$
Aktivierungsenergie Oberflächendiffusion Q_s	153.000 J

Sinterspannung und Viskosität

Die Verzüge im Simulationsmodell werden über die viskoplastische Dehrrate $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ bestimmt mit

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{\sigma'_{ij}}{2\eta_s} + \frac{\sigma_h - \sigma_s}{3\eta_b} \delta_{ij}.$$

Dabei ist σ'_{ij} der deviatorische Spannungstensor, σ_h die Volumenspannung, σ_s die Sinterspannung, η_s die Schubviskosität und η_b die Volumenviskosität.

Der rechte Teil der Gleichung kann auch als Sinterdehrrate bezeichnet werden und direkt über die Verdichtungsrate bestimmt werden.

$$\dot{\varepsilon}^s = -\frac{\sigma_s}{3\eta_b} = -\frac{\dot{\rho}}{\rho}$$

Für die Sinterspannung wurde das Skorohod-Modell verwendet [35]

$$\sigma_s = \frac{3\gamma_s \rho^2}{G}$$

Für die Volumenviskosität ergibt somit

$$\eta_b = \frac{\gamma_s \rho^3}{G\rho}$$

Dabei γ_s die Oberflächenenergie.

3.4 Implementierung und Kalibrierung des Prozessmodells (AP3)

Konstantes Temperaturfeld

Mithilfe der Software MAGMASOFT, die von der MAGMA Gießereitechnologie GmbH kostenlos zur Verfügung gestellt wurde, wurde das Temperaturverhalten im Ofen simuliert. Dabei zeigte sich, dass die Temperatur durch das langsame aufheizen als konstant und homogen angenommen werden kann, siehe Abbildung 23. Vor allem bei kleineren Bauteilen, wie es derzeit beim MBJ der Fall kann entsprechend weiterhin von einer konstanten Temperatur ausgegangen werden.

Weitere Untersuchungen empfehlen sich für oberen und unteren Bereich des Ofens, da in diesen Bereichen höhere Temperaturen als im Zentrum des Ofens zu erwarten sind.

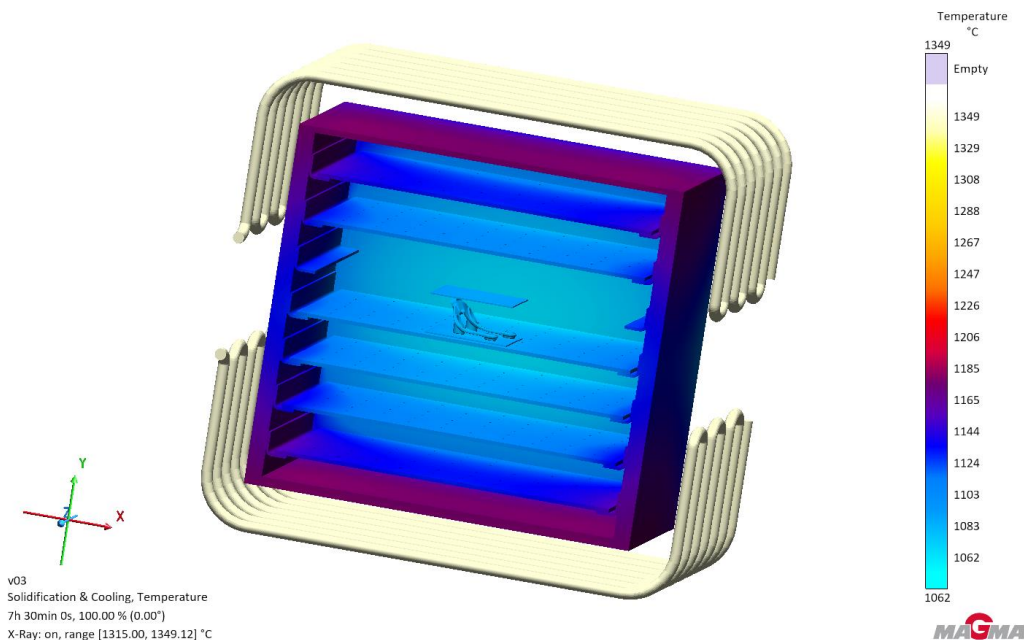


Abbildung 23: Mit MAGMASOFT berechnetes Temperaturfeld im verwendeten Ofen

Simulationsmethode

Bei der entwickelten Simulationsmethode werden über das mechanische Gleichgewicht auf der Basis der viskoplastischen Dehnrates berechnet (Navier-Stokes Gleichung) und somit die Verschiebungsrate bestimmt. Für die Berechnung des Gleichgewichts wird die viskose Spannung betrachtet. Themische Dehnrates und Sinterdehnrates fließen als Randbedingung in die Berechnung des mechanischen Gleichgewichts mit ein. Da die Auswirkung der elastische Dehnrates vergleichsweise gering sind, werden diese vernachlässigt [43].

Gravitation wird als externe Volumenkraft berücksichtigt. Die Reibungskraft wird mittels Penalty-Method basierend auf Herz-Mindlin Modell und fließt als externe Kraft ins Gleichgewicht. Effekte großer Dehnungen durch Anpassung der Geometrie in jedem Zeitschritt berücksichtigt, die ist durch die Verwendung eines dehnratesbasierten Modells möglich [44]. Zur Berücksichtigung der Anisotropie wird die Viskosität als vektorielle Größe betrachtet

$$\bar{\eta}_S = (\eta_{xx}, \eta_{yy}, \eta_{zz}, \eta_{yz}, \eta_{xz}, \eta_{xy})$$

mit

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta_{ij}} \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}.$$

Am Ende von jedem Zeitschritt wird die relative Dichte und Korngröße bestimmt. Abbildung 24 zeigt den Programmfluss der entwickelten Simulationsmethode.

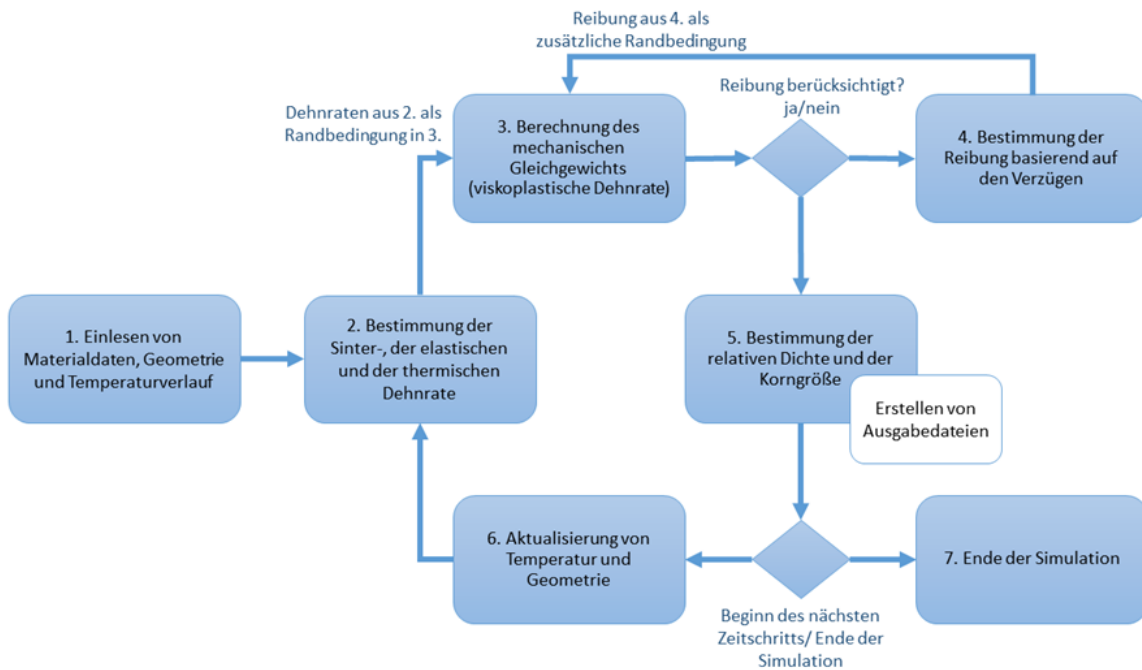


Abbildung 24: Programmfluss der entwickelten Simulationsmethode

Kalibrierung

Die thermische Ausdehnung und die Anisotropiekoeffizienten für die Hauptachsen konnten direkt aus den Dilatometermessungen bestimmt werden (Abbildung 20, Abbildung 21).

Zur Bestimmung der Schubviskosität η_s wurde die Sintersimulation zu Dilatometerversuchen in Z-Richtung mit unterschiedlichen Auflasten durchgeführt. Dabei wurden gute Übereinstimmung (Abbildung 25), wenn Schubviskosität im folgenden Verhältnis zur Volumenviskosität steht:

$$\eta_s = \frac{2}{3}\eta_b$$

Zur Prüfung der Anisotropiekoeffizienten η_x und η_y wurden zusätzlich Sintersimulation für die anderen Druckausrichtungen durchgeführt, auch hier konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden (Abbildung 26).

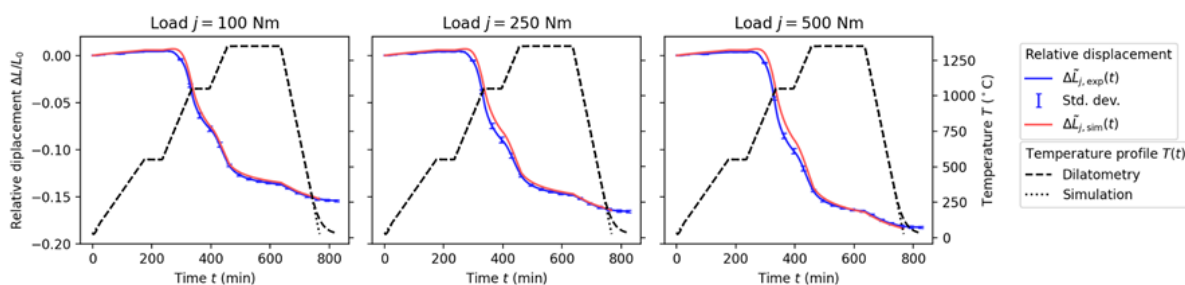


Abbildung 25: Vergleich der Ergebnisse aus der Sintersimulation mit der experimentellen Daten der Dilatometermessung, bei Z Ausrichtung der Proben bei unterschiedlichen Auflasten (100mN, 250mN und 500mN)

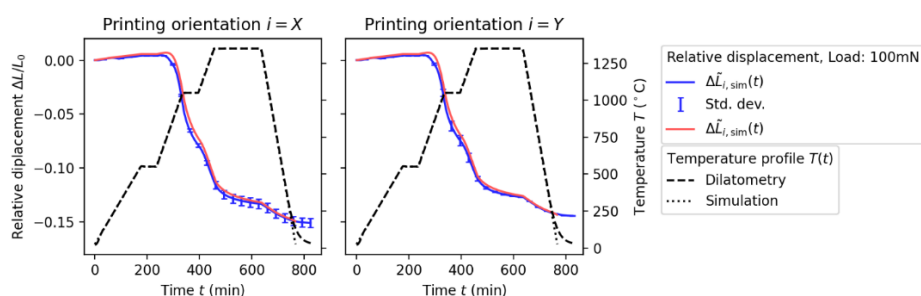


Abbildung 26: Vergleich der Ergebnisse aus der Sintersimulation mit der experimentellen Daten der Dilatometermessung, bei X und Y Ausrichtung und einer Auflast von 100mN

Mithilfe einer simulative Parameterstudie und den experimentellen Ergebnissen der Überhangsgeometrie (vgl. Abbildung 21) konnten die Scherkomponenten der Schubviskosität bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden die Überhangsgeometrien mit unterschiedlichen Überhangslängen in unterschiedlichen Ausrichtungen gedruckt und anschließend gesintert. Sinterteile wurden vermessen und anhand der Ergebnisse wurde Viskositätswerte kalibriert. Bei der Verwendung von $\eta_{xy} = 0,08$ und $\eta_{xz} = \eta_{yz} = 0,0154$ konnten gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen erzielt werden, siehe Tabelle 2. Bei Geometrien in Z-Ausrichtung und geringer Überhangslänge kam es dazu, dass sich die der Überhang entgegen der Schwerkraft nach oben bog, dies konnte nicht mit der Simulation abgebildet werden. Es wird vermutet, dass dies durch eine anfängliche inhomogen Porositätsverteilung verursacht wird. Reibungsparameter für Penaltymethode wurde mit Hilfe von C-Geometrien bestimmt, hieraus ergab sich ein Wert von 100.

Tabelle 2: Vergleich zwischen experimentellen Ergebnissen und den Simulationsergebnissen anhand des Verhältnisses zwischen Außen- und Innenmaß (vgl. Abbildung 27)

Druckausrichtung	Überhangslänge	Verhältnis Außen- zu Innenmaß, exp.	Verhältnis Außen- zu Innenmaß, sim.
Z	5 mm	$0,9 \pm 0,1$	1,01
Z	10 mm	$0,9 \pm 0,1$	1,05
Z	15 mm	$1,0 \pm 0,1$	1,18

Z	20 mm	$1,5 \pm 0,3$	1,52
Z	25 mm	$2,1 \pm 0,1$	2,07
XY	5 mm	$1,0 \pm 0,1$	1,01
XY	10 mm	$1,2 \pm 0,1$	1,10
XY	15 mm	$1,4 \pm 0,1$	1,39

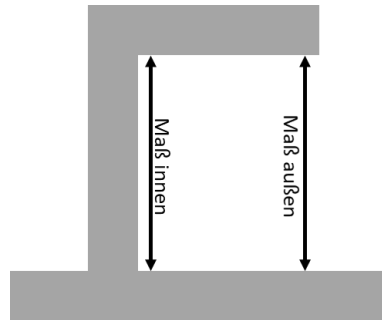

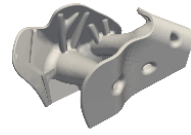

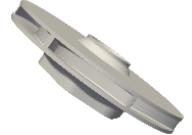




Abbildung 27: Darstellung Innen- und Außenmaß bei der Überhangsgeometrie

3.5 Validierung des Simulationsmodells, Verzugsvorhersage und simulationsbasierte Kompensation (AP5+AP6)

Für die Validierung der Simulationsmethode und für die simulative Verzugskompensation wurden von den Mitgliedern des PAs mehrere Demonstrator-Bauteile zur Verfügung gestellt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Vom projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellte Demonstratoren

Demo1	Demo2	Demo3	Demo4	Demo5	Demo6
					

Inverse Verzugssimulation

Für die Verzugskompensation wurde ein neuer Ansatz entwickelt. Anstelle einer geometrischen Invertierung des Simulationsergebnis wurde in dieser Arbeit der Sinterprozess simulativ invertiert. Dies wurde durch die Verwendung des Dehnratenbasierten Modells zur Berechnung des Gleichgewichts ermöglicht, da jeder Zeitschritt eine in sich geschlossene Verzugssimulation darstellt. Durch Invertierung der wirkenden Kräfte kann somit der Sinterprozess simulativ invertiert werden, wobei die Ursprungsgeometrie als Sollgeometrie rückwärts simuliert wird.

Zur Erprobung der Methoden wurde die simulative Verzugskompensation auf die C-Geometrie einmal mit der gängigen Methode (Invertierung des Verzugs) und mit der neu-entwickelten Methode (Invertierung des Sinterprozesses) angewendet. Abbildung 28 zeigt einen direkten Vergleich der Methoden. Bei diesem Ergebnis zeigt, dass bei der neuen Methode

bereits bei kleinen geometrischen Änderungen schon direkt bessere Ergebnisse bei der Volumenänderung erzielt werden. Dieses Ergebnis unterstützt die Annahmen das bei komplexeren verzugsanfälligen Geometrien mit diesem Verfahren weniger Iteration notwendig sein werden.

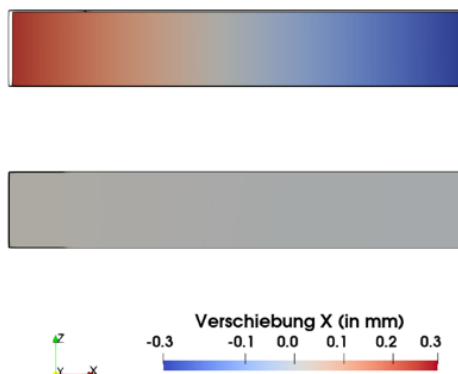


Abbildung 28: Simulationsergebnisse der Verzugskompensierter C-Geometrien, mit Verzugskompensation durch Invertierung des Verzugsvektors (oben) und mit Verzugskompensation durch Invertierung des Sinterprozesses (unten), schwarzer Rahmen zeigt Sollgeometrie

Da Experiment und Simulationsergebnis der C-Geometrie gute Übereinstimmungen zeigten, wurde die verzugskompensierte C-Geometrie gefertigt und gesintert und das Ergebnis anhand einer optischen Vermessung mittels GOM-Messsystem mit der Sollgeometrie verglichen. Der Vergleich soll Aufschluss über die erfolgreiche Implementierung und Kalibrierung des Reibungsmodells geben. Abbildung 29 zeigt gesinterte C-Geometrie ohne und mit Verzugskompensation. Die experimentellen Ergebnisse stimmen mit den Simulationsergebnissen überein. Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich, dass das Reibungsmodell und die Verzugskompensation für einfache Geometrien ausreichend ist.

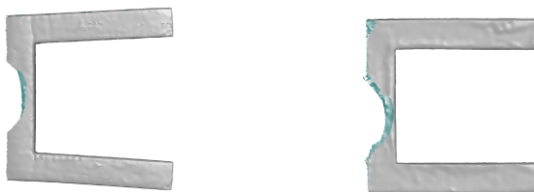


Abbildung 29: Gesinterte C-Geometrie, links ohne Verzugskompensation und rechts mit Verzugskompensation

Verzugssimulation Demonstrator-Bauteile (AP5)

Im nächsten Schritt wurden die Demonstratorbauteile gedruckt, gesintert und vermessen. Anschließend wurde mittels Oberflächenvergleich die Messung mit den Simulationsergebnissen verglichen. Anhand der Ergebnisse wurden die Werte der Simulation ggf. nachgebessert.

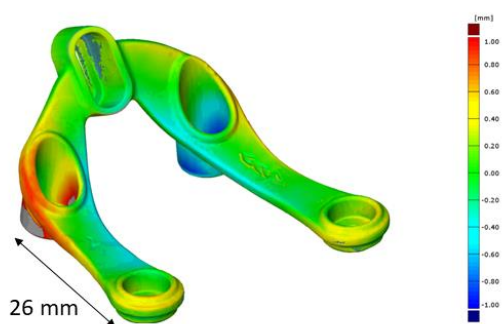


Abbildung 30: Oberflächenvergleich zwischen simulierten und gemessenen Verzug beim Demonstratorbauteil 1

Bei der Vorhersage der Sinterverzüge von Demonstratorbauteil 1 konnte mit den Materialkennwerten aus der Kalaibrierung gute Ergebnisse erzielt werden (Abbildung 30). Lediglich bei den hinteren „Füßen“ der Geometrie gibt es größere Abweichungen. Hierbei handelt es sich um Kontaktproblematik, die nicht in der Simulation berücksichtigt wird.

Bei den Demonstratorbauteilen 2 und 3 mussten die Viskositätswerte für die Scherung und der Reibungskoeffizient deutlich erhöht werden, um die auftretenden Verzüge abbilden zu können. Dies könnte daran liegen, dass es sich bei den Geometrien, um optimierte Geometrien handeln, bei denen die Anfälligkeit für die Verzüge deutlich verringert wurde. Beim ersten Bauteil wurde der Reibungskoeffizient, um den Faktor 5 und die Viskositätskoeffizienten A_{xz} , A_{yz} um den Faktor 1,15 erhöht, um den Einfluss der Reibung zu erhöhen und der Gravitation zu verringern. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 zu sehen.

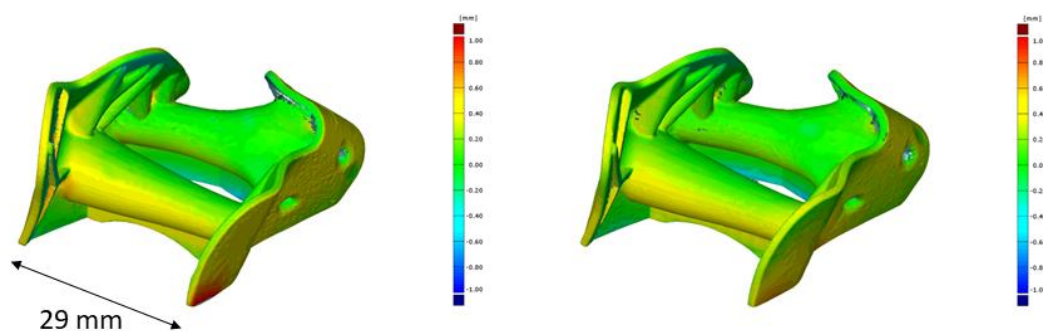


Abbildung 31: Oberflächenvergleich zwischen simulierten und gemessenen Verzug (2 Version beim ersten Demonstratorbauteil 2

Beim Demonstratorbauteil 3 wurde der Reibungskoeffizient auch um den Faktor 5 erhöht. Um den Einfluss der Gravitation bei dieser Geometrie deutlich zu erhöhen wurden die Viskositätskoeffizienten A_{xz} , A_{yz} deutlich um den Faktor 0,008 verringert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 32 zu sehen.

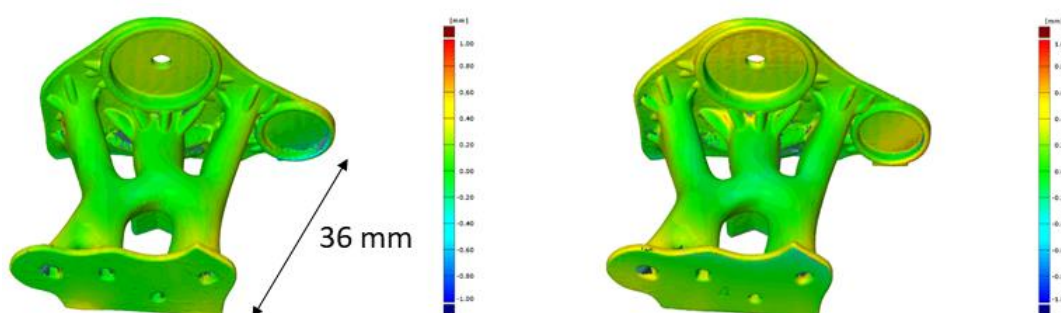


Abbildung 32: Oberflächenvergleich zwischen simulierten und gemessenen Verzug beim ersten Demonstratorbauteil 3

Verzugskompensation (AP6)

Bei der simulativen Verzugskompensation wurden 2 Durchgänge durchgeführt, bei denen die verzugskompensierten Geometrien gedruckt, gesintert, vermessen und mit der ursprünglichen Geometrie, bzw. Sollgeometrie verglichen wurde. Der erste Durchgang diente als Test, wurde die Proben wurden gleichzeitig mit den Proben für AP5 gedruckt. Beim 1. Durchgang wurde Reibung noch anisotrope Scherung berücksichtigt, dient in erste Linie, um zu prüfen inwieweit die Methode ggf. nachgebessert werden muss. Tabelle 4 zeigt den Vergleich der beiden Durchgänge.

Tabelle 4: Vergleich 1. und 2. Durchgang bei der Verzugskompensation

1. Durchgang	2. Durchgang
Werte basierend auf Kalibrierungsproben	Angepasste Werte basierend auf Verzugsimulation
Ohne Reibung	Mit Reibung
Anisotropiekoeffizienten für Hauptachse ($A_x = A_y = 0,95$; $A_z = 1,1$)	Anisotropiekoeffizienten für Hauptachse ($A_x = 1,007$; $A_y = 0,963$; $A_z = 1,03$)
Ohne anisotrope Scherung	Mit anisotroper Scherung (A_{xy} ; A_{zx} ; A_{yz})

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse für das Demonstratorbauteil 1. Das Ergebnis aus dem ersten Durchgang zeigt, dass die Sinterschrumpfung ausgeglichen wurde. Jedoch handelt es sich, um ein Bauteil, das besonders anfällig gegenüber Reibung ist. Unter Berücksichtigung der Reibung im 2. Durchgang konnten die Ergebnisse deutlich verbessert werden. Ein weiteres Problem stellt bei diesem Bauteil die Kontaktproblematik an den hinteren Füßen da.

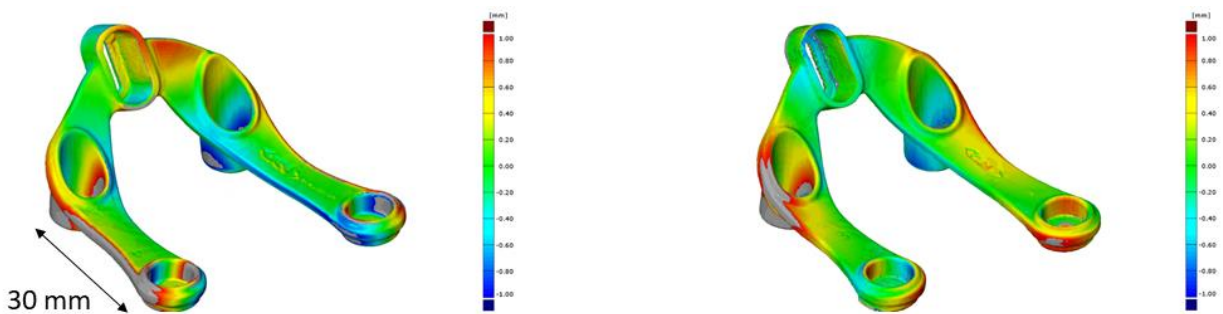


Abbildung 33: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie beim Demonstratorbauteil 1, links: 1. Durchgang, rechts: 2. Durchgang

Um dieses Problem zu lösen, wurde eine vereinfachte Methode zur Berücksichtigung der Kontaktproblematik erprobt. So wurde die unteren Knotenpunkte bei den hinteren Füßen bei der Inversen Simulation nicht komplett in Z-Richtung fixiert, sondern nur die zwei Knotenpunkte mit den höchsten Spannungswerten. Durch die Verwendung dieser Methodik konnten die Ergebnisse nochmals verbessert werden (Abbildung 34).

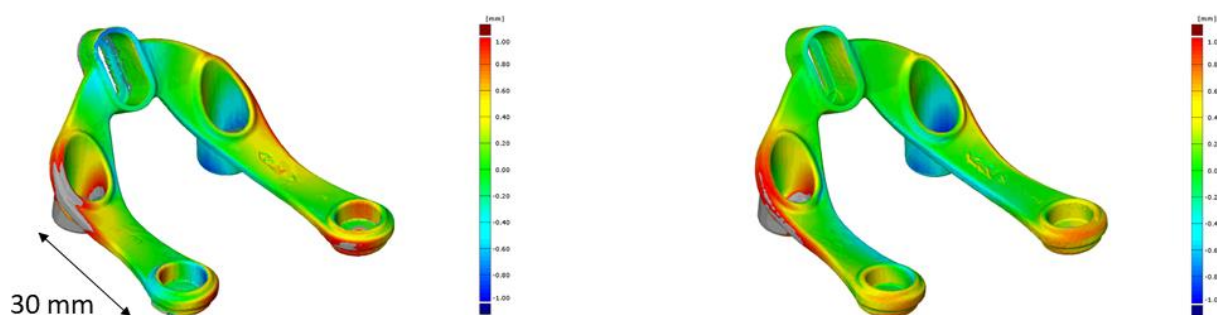


Abbildung 34: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie beim Demonstratorbauteil 1, links: 2. Durchgang ohne Kontakt, rechts: 2. Durchgang mit Kontakt

Beim Demonstratorbauteil 2 konnten im ersten Durchgang bereits sehr gute Ergebnisse erzielt werden, siehe Abbildung 35. Mit den Werten aus dem 2. Durchgang hat sich das Ergebnis verschlechtert. Durch die Erhöhung der Reibung wurden die Reibungseffekte überkompensiert. Zusätzlich deutet das Ergebnis darauf hin, dass die Schrumpfung in X-Richtung zu stark ausfällt. Dies deutet daraufhin, dass es sich bei der Messung in der Probe in X-Ausrichtung, mit hohem Verzug, um einen Messfehler handelt (s. Abbildung 17). Lediglich bei dem Verzug, der auf die Gravitation zurückzuführen ist, konnte eine Besserung des Ergebnisses erzielt werden.

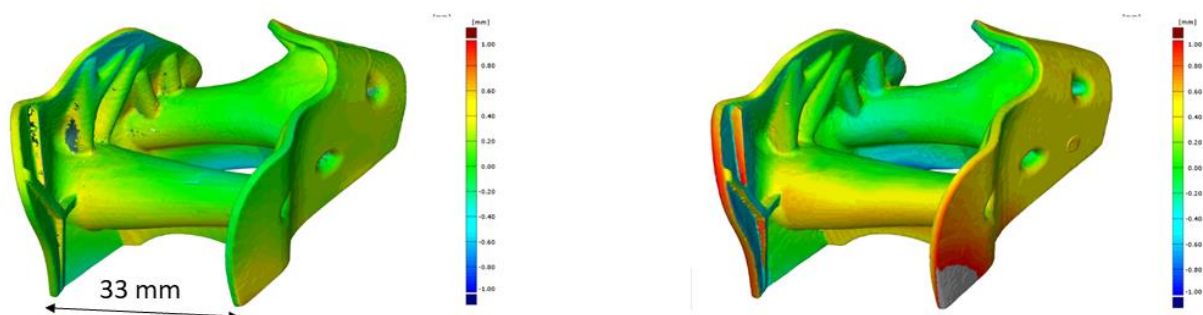


Abbildung 35: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie Demonstratorbauteil 2, links: 1. Durchgang, rechts: 2. Durchgang

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse für das Demonstratorbauteil 3. Wie beim ersten Bauteil konnte bereits im ersten Durchgang ein gutes Ergebnis erzielt werden. Im 2. Durchgang konnte sowohl der gravitations- als auch der reibungsbedingte Verzug besser ausgeglichen werden. Jedoch zeigt sich im 2. Durchgang wieder eine zu hohe Schrumpfung in X-Richtung.

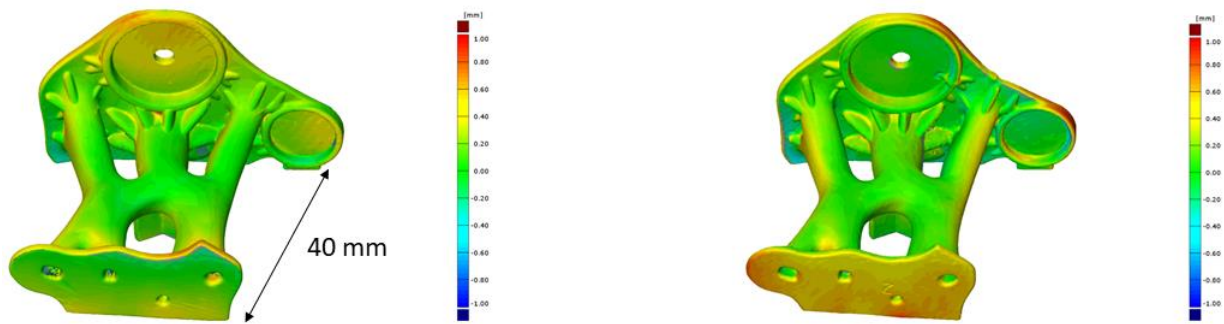


Abbildung 36: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie beim zweiten Demonstratorbauteil 3, links: 1. Durchgang, rechts: 2. Durchgang

Bei dem Demonstratorbauteil 4 (Impeller) zeigten sich im ersten Durchgang Probleme, die mit der aktuellen Methodik nicht behoben werden konnten. Zum einen kam es dazu, dass sich der Impeller an den äußeren Rändern (X-Achse), wie die Überhangsgeometrien mit geringem Überhang, nach oben bog. Zudem zeigten sich leichte Verzüge in den einzelnen Schlitzen. Beide Effekte können mit den aktuellen Methoden weder berücksichtigt noch kompensiert werden. Es wurde geprüft, wie sich die Verzüge verhalten, wenn der Impeller in invertierter Ausrichtung gedruckt (-Z) und in gleicher Ausrichtung gesintert wird. Dabei zeigte sich, dass durch die Invertierung der Druckrichtung das Bauteil deutlich höhere Verzüge aufweist.

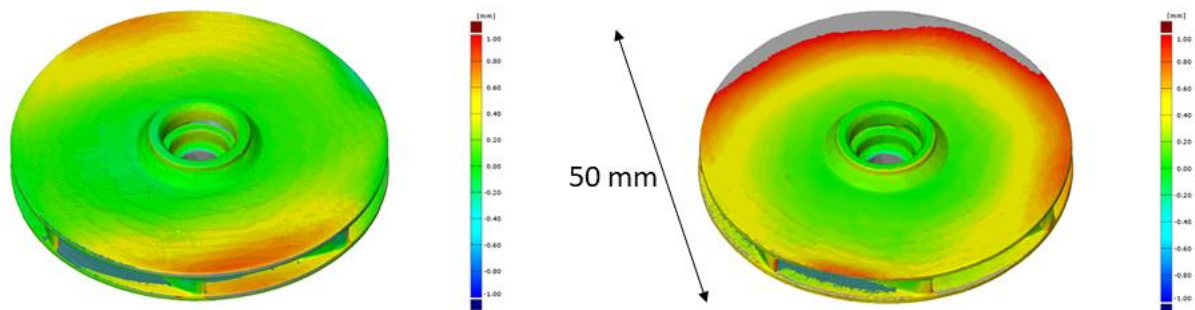


Abbildung 37: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie beim ersten Demonstratorbauteil 4, links: 1. Durchgang, rechts: 1. Durchgang mit invertierter Druckrichtung

Das Demonstratorbauteil 5 wurde nur im 2. Durchgang gedruckt. Bei der simulativen Verzugskompensation für dieses Bauteil, wurden die Materialkennwerte vom Bauteil 1 verwendet. Beim Ergebnis ist zu sehen, dass die Verzüge überkompensiert wurden, siehe Abbildung 38. Dies zeigt deutlich, dass der Reibungskoeffizient geometrieabhängig gewählt werden muss die gängigen Reibungsmodelle somit nicht für die Sinterverzugsproblematik geeignet sind.

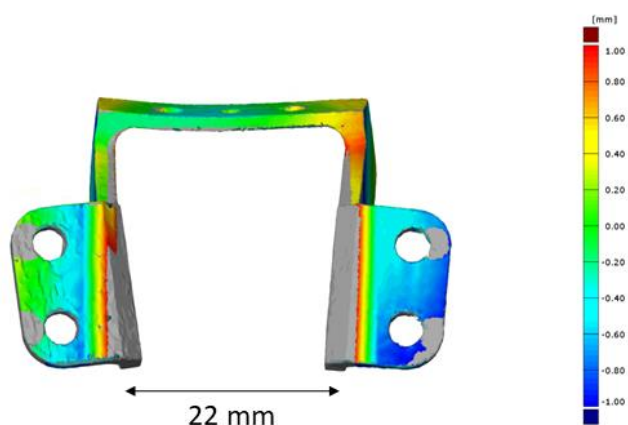


Abbildung 38: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie Demonstratorbauteil 5 (2. Durchgang, Messwerte von Bauteil 1)

Wie das Demonstratorbauteil 5 wurde auch das Bauteil 6 nur im 2. Durchgang gedruckt. Wie bei den Bauteilen 2 und 3 ist eine zu starke Schrumpfung in X-Richtung im Vergleich zur Sollgeometrie zu erkennen. Ansonsten stimmt die gesinterterte verzugskompensierte Geometrie sehr gut mit der Sollgeometrie überein, siehe Abbildung 39.

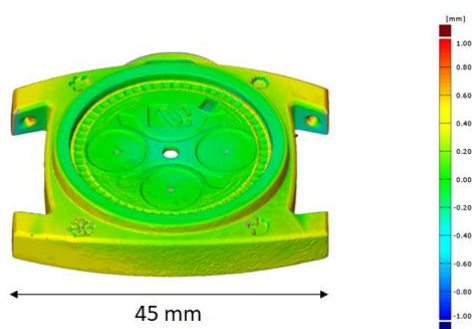


Abbildung 39: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinterter verzugskompensierter Geometrie beim Demonstratorbauteil 6 (2. Durchgang, Messwerte von Bauteil 1)

4 Bewertung und Ausblick

4.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielen aus dem Antrag

Tabelle 5: 4.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielen aus dem Antrag

Ziele aus dem Antrag	Ergebnisse
Arbeitspaket 1 <i>Identifizierung und Optimierung relevanter Prozessparameter</i>	
<p>Ziel des Arbeitspaket war die Identifizierung und Optimierung relevanter Prozessparameter des Binder Jettings von Ti64, um reproduzierbare Bauteileigenschaften zu erhalten. Geplant ist, den Druckprozess hinsichtlich homogener Packungsdichte, hohe Grünteildichte und somit anschließend gleichmäßiger Schwindung und hoher Dichte bei minimalem Verzug zu optimieren. Anschließend an eine Pulvereingangskontrolle findet eine Parameterstudie mit allen relevanten Einflussgrößen statt.</p> <p>Die experimentellen Arbeiten zur Bestimmung geeigneter Entbinderungsparameter umfassen Untersuchungen mittels Massenspektrometrie. Die Sinterparameter werden mittels Sinterdilatometrie untersucht. Die erzeugten Proben werden sowohl hinsichtlich Schwindung, Dichte (archimedisches Prinzip) und Mikrostruktur, als auch Kohlen- und Sauerstoffgehalte mittels Spurenanalyse nach DIN ISO 4491-1 untersucht.</p>	<p>Es fand eine ausführliche Pulveranalyse vor Druckbeginn statt, in der die Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung, die Morphologie mittels Rasterelektronenmikroskop, Kohlen- und Sauerstoffwerte untersucht wurden sowie die Fließfähigkeit mittels Revolution Powder Analyzer als auch durch die Ermittlung von Schütt- und Klopfdichte ermittelt wurde. Ebenfalls ermittelt wurden die spezifische Oberfläche mittels BET und die pyknometrische Dichte.</p> <p>Anschließend fanden Druckversuche statt bei denen die Schichtdicke, Bindersättigung und Pulverauftragsgeschwindigkeit untersucht wurden. Mit der Hilfe des Pas wurden ebenfalls Untersuchungen zum Einfluss der Tropfengröße durchgeführt.</p> <p>Die Entbinderung wurde mithilfe einer Massenspektrometrie des Abgasstroms des Ofens optimiert, sowie Variationen der Entbinderungstemperatur, Atmosphäre und Haltezeiten. Die Ergebnisse wurden mittels Sauerstoff- und Kohlenstoffanalyse untersucht. Eine Variation der Sintertemperaturen sowie Haltezeiten fand ebenfalls statt, um sowohl die Sinterdichte als auch die Mikrostruktur zu optimieren.</p>
Arbeitspaket 2 <i>Entwicklung des Materialmodells</i>	
<p>Ziel des Arbeitspaket war die Entwicklung eines Materialmodells, was das Materialverhalten vom Grün- bis zum Sinterteil beschreibt.</p>	<p>Zur Bestimmung des Verdichtungsverhalten von Ti64 wurde basierend auf physikalischen Modellen phänomenologische Modelle zur Verdichtung und Kornwachstum entwickelt.</p>

	<p>Die entwickelten Modelle wurden basierend auf den Materialverhalten von Ti64 während des Sintervorgangs vereinfacht.</p> <p>Die Modelle wurden anhand von Sinterversuchen mit unterbrochenen Sinterzyklen und Dilatometermessungen kalibriert.</p> <p>Für die Modellierung Dehnungsverhalten wurde sich am gängigen SOVS-Modell orientiert. Das SOVS-Modell wurde so optimiert, dass das Modell für die Verdichtung über die Sinterdehnrates einfließen kann.</p>
<p>Arbeitspaket 3 <i>Implementierung und Kalibrierung des Prozessmodells</i></p>	
<p>Ziel des Arbeitspaket war die Entwicklung und Kalibrierung eines Simulationsmodells zur Vorhersage von Sinterverzügen.</p> <p>Geplant war, dass das in AP2 entwickelte Materialmodell genutzt wird, um die Materialantwort auf Belastung zu beschreiben und die entstehenden Schwindungs- und Kriechdehnungen einzufügen. Sowie die Berücksichtigung von Schwerkraft- und Reibungseffekten. Die Berechnung der Verzüge über das Mechanische Gleichgewicht mit impliziten Zeitschritt.</p>	<p>Es stellte sich heraus, dass aufgrund der hohen Belastung durch die Schwindungs- und Kriechdehnung, der implizite Zeitschritt bei Berechnung des Gleichgewichts so gering wurde, dass die Berechnungszeit über die geplante Methode zu groß werden würde, um reale Bauteile zu simulieren. Zudem stellte sich heraus, dass die mechanischen Eigenschaften nach Elastizitätslehre einen äußerst geringen Einfluss auf das Sinterverhalten haben und vernachlässigt werden können.</p> <p>Es wurde ein neuer Ansatz entwickelt bei dem das in AP2 entwickelte Materialmodell als Grundlage zur Berechnung des mechanischen Gleichgewichts verwendet wurde. Da das resultierende FEM-Modell ein dehnratenbasiertes Modell ist, kann mit expliziten Zeitschritte gerechnet werden.</p> <p>Zudem wurde Modelle zur Berücksichtigung von Reibung und Gravitation implementiert.</p> <p>Um Effekte großer Dehnung wird der berechnete Deformationsgradient in jedem Zeitschritt angewendet, um die Änderung des Gravitationsfeldes aufgrund der Verformungen.</p> <p>Anisotrope Schrumpfung und Scherung wird über konstante Anisotropiekoeffizienten berücksichtigt. Diese wurden über Dilatometermessungen in unterschiedliche</p>

	<p>Raumrichtungen und Sintern von Überhanggeometrien bestimmt.</p> <p>Des Weiteren zeigten Simulation mit Magmasoft, dass die Ofentemperatur aufgrund der geringen Aufheizrate als konstant angenommen werden kann und aufgrund der geringen Bauteilgröße beim MBJ auch die Temperatur im Bauteil als konstant angenommen werden kann. Somit konnte die thermische Modellierung auf die thermische Ausdehnung begrenzt werden, welche als Randbedingung in die Berechnung des Gleichgewichts mit einfließt.</p>
<p>Arbeitspaket 4 <i>Kennwertermittlung für das Materialmodell</i></p>	
<p>Ziel des Arbeitspakets ist die Ermittlung der Materialeigenschaften vom Grün- und Sinterteil, sowie das Sinterverhalten der Ti64 Legierung.</p> <p>Im Fokus der Kennwertermittlung stehen die Schwindungsdehnungen, welche über Sinterdilatometermessungen erfolgen. Hierbei sind die Schwindungsdehnungen nicht nur temperaturabhängig, sondern für verschiedene Partikelgrößen auch abhängig von der Heizrate sowie der verschiedenen Raumrichtungen. Die Messungen der Schwindungsdehnung werden für eine Heizrate und die drei Raumrichtungen durchgeführt. Weitere Messungen werden mit verschiedenen Lasten durchgeführt, wodurch die Kriechdehnung ermittelt werden kann.</p> <p>Ein weiterer Punkt ist die Modellierung des Materialverhaltens, wofür folgende mechanischen Materialeigenschaften bestimmt werden: Elastizitätsmodul E, Streckgrenze und Poisson-Zahl. Es sollen Zugversuche in alle drei Raumrichtungen durchgeführt werden.</p> <p>Ebenfalls benötigt werden die thermischen Materialeigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität.</p>	<p>Anhand von Abbruchsinterungen und Schliffbildanalysen wurde der Dichteverlauf über den Sinterzyklus untersucht. Mithilfe von Dilatometerversuchen in alle drei Raumrichtungen sowie drei unterschiedlichen Lasten konnte die thermische Ausdehnung über Abkühlphase im Dilatometer sowie Anisotropiekoeffizienten ermittelt und das Kriechverhalten untersucht werden. Mithilfe von Überhanggeometrien wurde die Schubviskosität ermittelt. Zusätzlich fand eine Kalibrierung des Reibungsmodells mithilfe von C-Probengeometrien statt.</p> <p>Die Ermittlung der mechanischen und thermischen Materialeigenschaften war in diesem Arbeitspaket nicht mehr notwendig, da diese für das Simulationsmodell nicht notwendig waren und in einigen Fällen der Literatur entnommen werden konnten.</p>

Arbeitspaket 5 Validierung des Simulationsmodells	
Validierung der Simulationsmethode an einfachen Geometrien und Demonstratorbauteilen.	<p>Als erste Validierungsgeometrien für das Simulationsmodell dienten C-Geometrien und Überhangsgeometrien, die auch zur Bestimmung von dem Reibungskoeffizienten und der Anisotropiekoeffizienten verwendet wurden.</p> <p>Zusätzlich das Simulationsmodell benutzt, um die Dilatometermessung mit unterschiedlichen Auflasten nach zu simulieren.</p> <p>Bei komplexen Demonstratorbauteilen zeigte sich, dass je nach Geometrie die Simulationsparameter zu einem gewissen Grad nachgebessert werden müssen.</p> <p>Grenzen zeigten sich bei der Verzugssimulation von einem Impeller mit unterschiedlichen Wandstärken.</p>
Arbeitspaket 6 Verzugsvorhersage und simulationsbasierte Kompensation	
Ziel war die Verzugskompensation durch die iterative Invertierung des berechneten Verzugsfeldes.	<p>Die Iterative Invertierung des Verzugsfeldes führt, insbesondere bei auftreten großer Dehnung, zu mehreren simulativen Iterationsschleifen bis zum Erreichen der gewünschten Geometrie.</p> <p>Um die Berechnungszeit zu minimieren wurde ein neuer Ansatz für die simulative Kompensation entwickelt. Anstelle der Invertierung des Verzugsfeldes im Anschluss der Verzugssimulation, wird in der entwickelten Methode der Sinterprozess simulativ invertiert und somit die Verzugskompensierte Geometrie direkt bestimmt. Dies wurde durch die in AP3 entwickelte Simulationsmethode mit expliziten Zeitschritten ermöglicht.</p> <p>Die neue Methode zur Verzugskompensation wurde an einer C-Geometrie validiert und an mehreren Demonstratorbauteilen getestet.</p>

	<p>Bei Bauteilen die nur leichten Verzug aufweisen konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden.</p> <p>Bei komplexeren Bauteilen zeigte sich, dass ein Druck des Bauteils und Anpassung der Prozessparameter notwendig ist, um die gewünschte Zielgeometrie nach dem Sintern zu erhalten.</p>
--	---

4.2 Ausblick

Im abgeschlossenen Projekt konnte gezeigt werden das das Material Ti64 reproduzierbar im Binder Jetting verarbeitet werden konnte. Dadurch bieten sich in Zukunft neue Möglichkeiten, das Verfahren auch im Bereich der Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt sowie Schmuckindustrie einzusetzen.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass bisherige Simulationsansätze genutzt werden können, um die anisotrope Sinterschrumpfung und zum Teil anisotrope Kriecheffekte durch Gravitation und Reibung zu kompensieren.

Die Ergebnisse zeigten auch, dass die Verzüge beim Sintern von MBJ-Bauteilen sehr stark von Prozessparametern und der verwendeten Anlage abhängen. Somit führen bereits kleine Änderungen der Prozessparameter oder Wechsel der Anlage dazu, dass die Materialkennwerte für die Simulationsmethode neukalibriert werden müssen und entsprechend eine Vielzahl von Versuchen wiederholt werden muss. Es wird davon ausgegangen, dass dies daran liegt das die Grünteildichte als homogen und konstant angenommen wird. Um dieses Problem anzugehen ist eine Folge Projekt in Planung (Auswirkung der anlagen- und prozessspezifischen Porosität auf den Bauteilverzug bei sinterbasierten additiven Fertigungsverfahren – APROPOS-AM). Beim geplanten Folgeprojekt wird an-stelle einer homogenen und isotropen Grünteilporosität von einer anlagen- und prozessspezifischen Porosität nach dem Druckprozess ausgegangen, die so-wohl anisotrop als auch inhomogen ist. Ziel ist es durch die Berücksichtigung dieser anlagen- und prozessspezifischen Porosität die Genauigkeit der simulativen Verzugsvorhersage und -kompensation zu erhöhen und die nötigen Kalibrierungsexperimente beim Wechsel der Anlage oder Prozessparameter deutlich zu minimieren. Dabei soll auch der Übertrag auf andere sinterbasierte additive Fertigungsverfahren in Zusammenarbeit mit dem PA erprobt werden. Zudem soll ein experimentell-simulativer Kalibrierungsansatz für die anlagen- und prozess-spezifische Porosität entwickelt werden.

5 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendungen wurden für wissenschaftlich-technisches und übriges Fachpersonal entsprechend dem Einzelfinanzierungsplan verwendet. Für Geräte und Leistungen Dritter wurden keine Zuwendungen beantragt.

Die im Projektzeitraum geplante Anschaffung und Inbetriebnahme eines neuen Sinterdilatometers zur Analyse des Sinterverhaltens der Bauteile, wurde herstellerseitig ungeplant verzögert. Erhebliche technische Probleme und zeitliche Verzögerungen bei der Inbetriebnahme des Gerätes erforderte einen erheblichen Personalmehreinsatz wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFAM. Insbesondere die Kommunikation mit dem Hersteller und die Verifikation technischer Abnahmeinhalte machte Mehreinsatz des beteiligten wissenschaftlichen Personals der HPA-Gruppe A1 erforderlich.

Die Ausgaben der HPA-Gruppe A1 wurden daher deutlich überzogen, lassen sich jedoch kostenneutral innerhalb des Projektes ausgleichen. Eine notwendige, inzwischen genehmigte, kostenneutrale Verlängerung des Projektes fußt auf dem gleichen, oben erläuterten Umstand. Die Ausgaben der HPA-Gruppe A2 betragen aufgrund einer Elternzeit weniger als geplant. Aufgefangen wurden die Laborarbeiten durch einen Mehreinsatz der HPA-Gruppe A3.

Ebenfalls führte der kurzfristige Projektstart zu Beginn zu Personenmangel am ISEMP, was ebenfalls bei der kostenneutralen Verlängerung berücksichtigt wurde. Ab 01.04.2022 stand weiteres Personal zur Verfügung.

Tabelle 6: Personaleinsatz Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM	PM	Verwendung
A.1 wiss.-techn. Personal	21,33	Planung und Bearbeitung AP1, AP4, AP5 und AP6
A.2 Ang. m. staatl. Abschluss Techniker, Meister o. vglb.	2,03	Bearbeitung AP1, AP4, AP5 und AP6
A.3 studentische Hilfskräfte	761,52	Bearbeitung AP1, AP4, AP5 und AP6

Tabelle 7: Personaleinsatz ISEMP

ISEMP	PM	Verwendung
A.1 wiss.-techn. Personal	22,75	Planung und Bearbeitung AP2, AP3, AP5 und AP6
A.3 studentische Hilfskräfte	6	Bearbeitung AP2, AP3, AP5 und AP6

6 Notwendigkeit sowie Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten stellen die Grundlage für weiterführende Untersuchungen innerhalb des Projektes dar. Der dargestellte Personaleinsatz war für diese Tätigkeiten notwendig und angemessen. Er entspricht grundsätzlich der im Forschungsantrag festgelegten Planung – Abweichungen siehe Abschnitt 2. Die Zuwendungen wurden ausschließlich für den Projektfortschritt verwendet.

7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Sowohl für die Forschungsstellen als auch die beteiligten Firmen im projektbegleitenden Ausschuss lieferte das Projekt viele wertvolle Ergebnisse und Erkenntnisse.

Die Forschungsstellen konnten mit dem Projekt ihre aktuelle Forschung sehr stark voranbringen. Auf einigen wissenschaftlichen Fachkonferenzen wurde im direkten Austausch mit der wissenschaftlichen Community das Projekt rege diskutiert.

Die beteiligten Firmen wurden bei den Treffen des projektbegleitenden Ausschusses regelmäßig über den Projektfortschritt unterrichtet. Bei den Treffen konnten die Firmen in ergiebigen Diskussionen den aktuellen Stand mit den Forschungsstellen diskutieren und Impulse für den weiteren Fortschritt geben. Auch zwischen den Treffen des Ausschusses waren die Forschungsstellen mit den Firmen im regelmäßigen Kontakt.

Viele Firmen haben die gute Zusammenarbeit betont und zeigten sich zufrieden mit den Ergebnissen. Da im projektbegleitenden Ausschuss Firmen entlang der gesamten Prozesskette von der Pulverherstellung bis zum Bauteilfertiger vertreten waren, konnten alle Firmen für sich Erkenntnisse aus dem Projektverlauf und dem -ergebnis ziehen.

Um der Anwendbarkeit für die Serienfertigung näher zu kommen, wollen die Forschungsstellen an dieser Thematik weiter forschen und es wurde daher ein Folgeprojekt beantragt.

8 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Software Prototyp, der innerhalb des Projektes entstanden ist, ist öffentlich zugänglich unter BCCMS: MBJ (uni-bremen.de).

Tabelle 8: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	Diskussion der Ergebnisse und Informationsaustausch	Sitzung bei Forschungseinrichtungen oder PA-Mitgliedern	halb-jährlich: 06.07.2021 (online), 19.01.2022 (online), 20.09.2022, 14.02.2023,2 7.06.2023, 05.12.2023
Zwischenbericht	Zusammenfassung der Zwischenergebnisse	Internetseite des Stifterverbands	Jährlich: 2021, 2022
Fachausschüsse			
DGM-Fachausschuss Additive Fertigung	Berichterstattung und Diskussion von Ergebnissen	Sitzungen in Bremen bzw. online	halb-jährlich
Lehre / Fortbildung			
Vorlesung Grundlagen der 3D Drucktechnologie und Werkstoffkunde	Übernahme wichtiger Erkenntnisse in die Vorlesung für Studierende	Universität Bremen	fortlaufend
Vorlesung Makro-Modellierung und Simulation	Übernahme wichtiger Erkenntnisse in die Vorlesung für Studierende	Universität Bremen	fortlaufend
Vorlesung Endformnahe Fertigungstechnologien 2	Übernahme wichtiger Erkenntnisse in die Vorlesung für Studierende	Universität Bremen	fortlaufend
Industrieworkshop (DGM Seminar)	Metal Binder Jetting für die Serienfertigung	Online und Präsenz	05.12.2023
Konferenzen und Zeitschriften			
World PM	Vorstellung und Diskussion von Ergebnissen	Internat. Konferenz, Lyon	Ende 2022
Euro PM	Vorstellung und Diskussion von Ergebnissen	Internat. Konferenz, Lissabon	Ende 2023
Zeitschriftenartikel	Modelling Sintering Densification of Binder Jetted Ti-6Al-4V Samples	SSRN, preprint article	Ende 2023

Tabelle 9: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
DGM-Fachausschuss Additive Fertigung	Berichterstattung und Diskussion von Ergebnissen	Online	2024/2025
Abschlussbericht	Zusammenfassung der Ergebnisse	Internetseite des Stifterverband Metalle	2024
Tutorial und Vortrag im „Sinter-Based AM-Workshop“	Information der Fachöffentlichkeit; Austausch mit anderen Industriegruppen	Fraunhofer IFAM, Bremen	2024
Veröffentlichungen im Jahresbericht und auf der Homepage	Informationsverbreitung und Anregungen für neue Projekte	-	2024
AM Forum Berlin	Vorstellung und Diskussion von Ergebnissen	Jährliche internationale AM Konferenz in Berlin	21.03.2023 (stattgefunden?)
Additive 2024	Vorstellung und Diskussion von Ergebnissen	Bremen, alle 2 Jahre stattfindende AM Konferenz	2024

I Literaturverzeichnis

- [1] AMPower: Metal Additive Manufacturing Report 2020. Metal Additive Manufacturing Technology, 2020. <https://additive-manufacturing-report.com/additive-manufacturing-technology/>
- [2] Godlinski, D. u. Veltl, G.: Three Dimensional Printing of PM-Tool Steels. European Powder Metallurgy Association Euro PM2005 Congress Proceedings (Shrewsbury 2005)
- [3] Verlee, B., Dormal, T. u. Lecompte-Beckers, J.: Properties of Sintered Parts Shaped by 3D-Printing from Bimodal 316L Stainless Steel Powder Mixtures. European Powder Metallurgy Association Euro PM2011 Congress Proceedings (Shrewsbury 2011)
- [4] Wheat, E., Vlasea, M., Hinebaugh, J. u. Metcalfe, C.: Sinter structure analysis of titanium structures fabricated via binder jetting additive manufacturing. *Materials & Design* (2018) 156, S. 167–183
- [5] Barthel, B., Hein, S. B., Aumund-Kopp, C. u. Petzoldt, F.: Influence of Particle Size Distribution in Metal Binder Jetting – Effects on the Properties of Green and Sintered Parts. European Powder Metallurgy Association Euro PM2019 Congress Proceedings (Shrewsbury 2019)
- [6] Jinka, A. G. u. Lewis, R. W.: Finite element simulation of hot isostatic pressing of metal powders. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (1994) 114, S. 249–272
- [7] Peters, M. u. Leyens, C.: Titan und Titanlegierungen. Weinheim 2002
- [8] Hage, C.: Grundlegende Aspekte des 2K-Metallpulverspritzgießens (2013)
- [9] Ziaee, M., Tridas, E. M. u. Crane, N. B.: Binder-Jet Printing of Fine Stainless Steel Powder with Varied Final Density. *JOM* (2017) 69, S. 592–596
- [10] Keller, N.: Verzugsminimierung bei selektiven Laserschmelzverfahren durch Multi-Skalen-Simulation
- [11] Allen, S. M. u. Sachs, E. M.: Three-dimensional printing of metal parts for tooling and other applications. *Metals and Materials* (2000) 6, S. 589–594
- [12] Wieland, S. u. Petzoldt, F.: Binder Jet 3D-Printing for Metal Additive Manufacturing: Applications and Innovative Approaches. *Ceramic Forum International DKG* (2016) 93, S. 26–30
- [13] Utela, B., Storti, D., Anderson, R. u. Ganter, M.: A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes* (2008) 10, S. 96–104
- [14] Höges, S.: Industrialisation of Binder Jetting (Bremen 2019)
- [15] Turker, M., Godlinski, D. u. Petzoldt, F.: Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Materials Characterization* (2008) 59, S. 1728–1735
- [16] Stevens, E., Schloder, S., Bono, E., Schmidt, D. u. Chmielus, M.: Density variation in binder jetting 3D-printed and sintered Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing* (2018) 22, S. 746–752
- [17] Maleksaeedi, S., Meenashisundaram, G., Lu, S., Salehi, M. u. Jun, W.: Hybrid Binder to Mitigate Feed Powder Segregation in the Inkjet 3D Printing of Titanium Metal Parts. *Metals* (2018) 8, S. 322

- [18] Sheydaeian, E., Fishman, Z., Vlasea, M. u. Toyserkani, E.: On the effect of throughout layer thickness variation on properties of additively manufactured cellular titanium structures. *Additive Manufacturing* (2017) 18, S. 40–47
- [19] German, R. M.: Coordination number changes during powder densification. *Powder Technology* (2014) 253, S. 368–376
- [20] Averardi, A., Cola, C., Zeltmann, S. E. u. Gupta, N.: Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: A critical discussion relevant to additive manufacturing. *Materials Today Communications* (2020) 24, S. 109–164
- [21] Miyanaji, H., Momenzadeh, N. u. Yang, L.: Effect of powder characteristics on parts fabricated via binder jetting process. *Rapid Prototyping Journal* (2018) 74
- [22] Escano, L. I., Parab, N. D., Xiong, L., Guo, Q., Zhao, C., Fezzaa, K., Everhart, W., Sun, T. u. Chen, L.: Revealing particle-scale powder spreading dynamics in powder-bed-based additive manufacturing process by high-speed x-ray imaging. *Scientific Reports* (2018) 8, S. 150–179
- [23] Budding, A. u. Vaneker, T.: New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques. *Procedia CIRP* (2013) 6, S. 527–532
- [24] Parab, N. D., Barnes, J. E., Zhao, C., Cunningham, R. W., Fezzaa, K., Rollett, A. D. u. Sun, T.: Real time observation of binder jetting printing process using high-speed X-ray imaging. *Scientific Reports* (2019) 9, S. 2499
- [25] Miyanaji, H., Zhang, S. u. Yang, L.: A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (2018) 124, S. 1–11
- [26] Godlinski, D. u. Pohl, H.: Rapid manufacturing of dense Stainless Steel parts by 3D printing. *Proc. of the EuroPM 2003 (Valencia 2003)*
- [27] Cao, S., Qiu, Y., Wei, X.-F. u. Zhang, H.-H.: Experimental and theoretical investigation on ultra-thin powder layering in three dimensional printing (3DP) by a novel double-smoothing mechanism. *Journal of Materials Processing Technology* (2015) 220, S. 231–242
- [28] Bai, Y., Wagner, G. u. Williams, C. B.: Effect of Bimodal Powder Mixture on Powder Packing Density and Sintered Density in Binder Jetting of Metals (2015)
- [29] Myers, K., Paterson, A., Iizuka, T. u. Klein, A.: The Effect of Print Speed on Surface Roughness and Density Uniformity of Parts Produced Using Binder Jet 3D Printing. *The Minerals, Metals & Materials Society* (2019)
- [30] Fang, W., He, X., Zhang, R., Yang, S. u. Qu, X.: Evolution of stresses in metal injection molding parts during sintering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (2015) 25, S. 552–558
- [31] Fang, Z. Z., Paramore, J. D., Sun, P., Chandran, K. S. R., Zhang, Y., Xia, Y., Cao, F., Koopman, M. u. Free, M.: Powder metallurgy of titanium – past, present, and future. *International Materials Reviews* (2018) 63, S. 407–459
- [32] Wasz, M. L., Brotzen, F. R., McLellan, R. B. u. Griffin, A. J.: Effect of oxygen and hydrogen on mechanical properties of commercial purity titanium. *International Materials Reviews* (1996) 41, S. 1–12
- [33] Finlay, W. L. u. Snyder, J. A.: Effects of three interstitial solutes (nitrogen, oxygen, and carbon) on the mechanical properties of high-purity, alpha titanium. *JOM* (1950) 2, S. 277–287

- [34] Mereddy, S., Bermingham, M. J., Kent, D., Dehghan-Manshadi, A., StJohn, D. H. u. Dargusch, M. S.: Trace Carbon Addition to Refine Microstructure and Enhance Properties of Additive-Manufactured Ti-6Al-4V. *JOM* (2018) 70, S. 1670–1676
- [35] Olevsky, E. A.: Theory of sintering: from discrete to continuum. *Materials Science and Engineering* (1998) 23, S. 41–100
- [36] Riedel, H. u. Blug, B: A Comprehensive Model for Solid State Sintering and Its Application to Silicon Carbide. Springer Netherlands (2002), S. 49–70
- [37] Riedel, H.: A constitutive model for the finite-element simulation of sintering - distortions and internal stresses. *Stoffgesetze für die Finite-Elemente-Simulation des Sinterns - Spannungen und Verzug. Ceramic powder science* (1990) 3, S. 619–630
- [38] Li, W.-B., Ashby, M. F. u. Easterling, K. E.: On densification and shape change during hot isostatic pressing. *Acta Metallurgica* (1987) 35, S. 2831–2842
- [39] Olevsky, E., van Dyck, S., Froyen, L. u. Delaey, L.: Shrinkage anisotropy and optimization of container design for hot isostatic pressing
- [40] Abdelhafeez, A. M. u. Essa, K.: Influences of Powder Compaction Constitutive Models on the Finite Element Simulation of Hot Isostatic Pressing. *Procedia CIRP* (2016) 55, S. 188–193
- [41] Kang, S.: Sintering. Densification, Grain Growth, and Microstructure. Elsevier Ltd. (2005)
- [42] Sheppard, T. u. Norley, J.: Deformation characteristics of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Technology* (1988) 4, S. 903–908
- [43] Sadeghi-Borujeni, S., Shad, A., Venkata, K., Günther, N. u. Ploshikhin, V.: Numerical simulation of shrinkage and deformation during sintering in metal binder jetting with experimental validation. *Materials & Design* (2022) 216
- [44] Osakada, K., Nakano, J. u. Mori, K.: Finite element method for rigid-plastic analysis of metal forming—Formulation for finite deformation (1982) 24, S. 459–468

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: graphische Kurzvorstellung des Projektvorhabens.....	2
Abbildung 2: Arbeitspakete des geplanten Projektvorhabens	6
Abbildung 3: Partikelgrößenverteilung des verwendeten Pulvers.....	17
Abbildung 4: REM-Aufnahme des verwendeten Pulvers.....	18
Abbildung 5: Drucklayout der Parameterstudie	19
Abbildung 6: Bauteil für die Penetrationstiefenbestimmung	19
Abbildung 7: Pulver- und Grünteildichte (a), Biegefestigkeit von Grünteilen (b), Sinterdichte (c), Mikrostruktur (d) und Proben mit Schichtverschiebung (e) für die unterschiedlichen Auftragsparameter	20
Abbildung 8: Mikroskopaufnahme des angesinterten Ti64-Pulvers (links: mit Binder, rechts: ohne Binder).....	20
Abbildung 9: Messung der Penetrationstiefe.....	21
Abbildung 10: Grünteilporosität ermittelt mittels μ -CT	22
Abbildung 11: schematische Darstellung der Binderapplikation bei unterschiedlichen Schichtdicken	22
Abbildung 12: Vergleich des 10 und 30 pL Druckkopfes.....	23
Abbildung 13: Massenspektrometrie des Abgasstroms der Entbinderung	24
Abbildung 14: Kohlen- und Sauerstoffgehalte der Proben in unterschiedlichen Stadien der Prozesskette	24
Abbildung 15: Verlauf der Verdichtung mittels Abbruchsinterungen.....	25
Abbildung 16: Schlifffbilder für Porenanalyse der Abbruchsinterungen	26
Abbildung 17: Sinterdilatometrie zur Auswirkung der Druckausrichtung (X: Beschichter; Y: Druckkopf; Z: Aufbaurichtung).....	26
Abbildung 18: Thermische Ausdehnung – Ermittlung über Abkühlphase im Dilatometer .	27
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der Anisotropie	27
Abbildung 20: Dilatometermessungen in Aufbaurichtung mit verschiedenen Auflasten bis 500mN	28
Abbildung 21: Überhanggeometrien für Bestimmung der Schubviskosität.....	28
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Verdichtung $\rho(t)$ mit Temperaturprofil des Sinterprogramms $T(t)$, rechts: Mit Abkühlung in jedem Zeitschritt im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen, links: Verlauf über kompletten Sinterzyklus mit horizontalen Linien für offene und geschlossene Porosität (gestrichelte Linien) sowie für den Übergangparameter ρ_{trans} (horizontale Linie)	30
Abbildung 23: Mit MAGMASOFT berechnetes Temperaturfeld im verwendeten Ofen.....	32
Abbildung 24: Programmfluss der entwickelten Simulationsmethode.....	33
Abbildung 25: Vergleich der Ergebnisse aus der Sintersimulation mit der experimentellen Daten der Dilatometermessung, bei Z Ausrichtung der Proben bei unterschiedlichen Auflasten (100mN, 250mN und 500mN).....	34
Abbildung 26: Vergleich der Ergebnisse aus der Sintersimulation mit der experimentellen Daten der Dilatometermessung, bei X und Y Ausrichtung und einer Auflast von 100mN.....	34
Abbildung 27: Darstellung Innen- und Außenmaß bei der Überhangsgeometrie.....	35

Abbildung 28: Simulationsergebnisse der Verzugskompensierter C-Geometrien, mit Verzugskompensation durch Invertierung des Verzugsvektors (oben) und mit Verzugskompensation durch Invertierung des Sinterprozesses (unten), schwarzer Rahmen zeigt Sollgeometrie.....	36
Abbildung 29: Gesinterte C-Geometrie, links ohne Verzugskompensation und rechts mit Verzugskompensation	36
Abbildung 30: Oberflächenvergleich zwischen simulierten und gemessenen Verzug beim Demonstratorbauteil 1.....	37
Abbildung 31: Oberflächenvergleich zwischen simulierten und gemessenen Verzug (2 Version beim ersten Demonstratorbauteil 2	38
Abbildung 32: Oberflächenvergleich zwischen simulierten und gemessenen Verzug beim ersten Demonstratorbauteil 3	38
Abbildung 33: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie beim Demonstratorbauteil 1, links: 1. Durchgang, rechts: 2. Durchgang.....	39
Abbildung 34: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie beim Demonstratorbauteil 1, links: 2. Durchgang ohne Kontakt, rechts: 2. Durchgang mit Kontakt	40
Abbildung 35: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie Demonstratorbauteil 2, links: 1. Durchgang, rechts: 2. Durchgang	40
Abbildung 36: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie beim zweiten Demonstratorbauteil 3, links: 1. Durchgang, rechts: 2. Durchgang	41
Abbildung 37: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie beim ersten Demonstratorbauteil 4, links: 1. Durchgang, rechts: 1. Durchgang mit invertierter Druckrichtung	41
Abbildung 38: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie Demonstratorbauteil 5 (2. Durchgang, Messwerte von Bauteil 1).....	42
Abbildung 39: Oberflächenvergleich zwischen Sollgeometrie und gesinteterter verzugskompensierter Geometrie beim Demonstratorbauteil 6 (2. Durchgang, Messwerte von Bauteil 1).....	42

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Simulation verwendete Materialkennwerte, die sich aus der Parameterstudie ergeben haben	30
Tabelle 2: Vergleich zwischen experimentellen Ergebnissen und den Simulationsergebnissen anhand des Verhältnisses zwischen Außen- und Innenmaß (vgl. Abbildung 27)	34
Tabelle 3: Vom projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellte Demonstratoren	35
Tabelle 4: Vergleich 1. und 2. Durchgang bei der Verzugskompensation	39
Tabelle 5: 4.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielen aus dem Antrag	43
Tabelle 6: Personaleinsatz Fraunhofer IFAM	48
Tabelle 7: Personaleinsatz ISEMP	48
Tabelle 8: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	50
Tabelle 9: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens ...	51