



Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung

Gesammelte Ergebnisse des geförderten
Verbundforschungsprojekts

Absichtlich leere Seite

Impressum

Autoren der Einzelkapitel

Martin Sjarov | Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Kilian Geiger | WZL | RWTH Aachen University
Rainer Horstkotte | Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Thomas Laag | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Thomas Kosche | BCT GmbH
Markus Langer | toolcraft AG
Jonas Zielinski, Stefan Reich | DAP | RWTH Aachen University
Niklas Natterer, Simon Goldbach | Siemens AG
Philipp Glötter, Andre Danzig, Lukas Drewietzki | Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH
Joachim Wagner | TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
Christian Liebl | MTU Aero Engines AG
Mirco Schöpf, Tino Pfalz, Matthias Geisbauer | EOS GmbH
Julius Schurb | Siemens Energy AG
Samuel Schmidt | RPTU Kaiserslautern-Landau

Weitere Projektbeteiligte

Dominik Emonds, Jonas Großeheide | WZL | RWTH Aachen University
Sebastian Rott, Johannes Casper, Kai Dietrich | MTU Aero Engines AG
Felix Gabriel Fischer | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Gestaltung

Martin Sjarov | Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Stand: Mai 2023

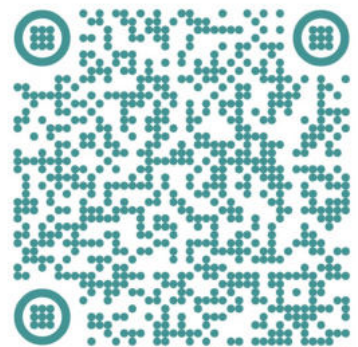
DOI dieses Berichts: 10.24406/publica-467

Förderkennzeichen IDEA: 13N15003

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**



Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsprojekt IDEA wurde im Rahmen des Programms „Photonik-Forschung“ gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Projektträger VDI betreut.

Projektpartner

ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH, Unterthingau
BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH, Dortmund
EOS GmbH, Krailing
JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH, Villingen-Schwenningen
Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, Lindenberg im Allgäu
ModuleWorks GmbH, Aachen
MTU Aero Engines AG, München
Siemens AG, München
Siemens Energy AG, Berlin
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Ditzingen
toolcraft AG, Georgensgmünd

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen
Lehrstuhl für Digital Additive Production (DAP), RWTH Aachen University
Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen University

(Sortierung alphabetisch)

SIEMENS
energy



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

SIEMENS

 **Fraunhofer**
ILT

toolcraft

LIEBHERR
Aerospace


JENOPTIK

TRUMPF

BCT.


Aero Engines

ALLMATIC
Spannsysteme JAKOB

 **ModuleWorks**

 **Fraunhofer**
IPT

Inhalt

Abkürzungen	8
1 Projektmotivation	9
1.1 Ausgangssituation	9
1.2 Lösungsansatz	9
1.3 Über diesen Bericht	9
2 Gesamtüberblick Prozesskette	10
2.1 Pre-Process	10
2.2 Bauprozess	10
2.3 Post-Process	11
2.4 Pulverkreislauf	11
3 Pulvermanagement	12
3.1 Pulveralterung und -recycling	12
3.2 Pulverhandling und digitale Abbildung des Pulverkreislaufs	14
4 Bauteildesign	15
4.1 Digitale Prozesskette	15
4.1.1 Problemstellung	15
4.1.2 Vorgehensweise	15
4.1.3 Ergebnisse	16
4.2 Design-Assistenzsysteme	16
4.2.1 Datenanalyse	17
4.2.2 Optimierte Prozessparameter	18
5 Bauteilsimulation	21
5.1 Methode der bleibenden Dehnung	21
5.2 Verwendete Software	21
5.3 Simulationsbenchmark	22
5.4 CAD Vorverformung (Pre-Deformation)	23
5.5 Fazit	24
6 3D-Digitalisierung von Bauteilen mittels optischer Messtechnik	25
6.1 Qualifizierung von optischen Messsystemen	26
6.2 Untersuchung verschiedener Antireflexionssprays zur Reduktion von Reflexionen bei optischen Messungen	27
6.3 Automatisierung von optischen Messsystemen	31
6.4 Nutzung von optischen Messdaten für die Prozessplanung	33
6.4.1 Lokale Registrierung	33
6.4.2 Globale Registrierung	34

7	Prozessuntersuchungen.....	37
7.1	Gepulst-modulierte Konturbelichtung.....	37
7.2	Vorheizung mit bis zu 500°C	42
7.3	Multi-Laser-Prozessführung	44
7.3.1	TiAl6V4 (TRUMPF TruPrint 5000)	44
7.4	Reproduzierbarkeit.....	46
7.4.1	Inconel 718 (EOS M400-4)	49
8	Hybride Additive Fertigung durch L-PBF	53
8.1	Vor- und Nachbereitung.....	53
8.1.1	Positionierung und Spannung des Halbzeugs	53
8.1.2	Anpassung der CAD/CAM-Kette für Hybrid-AM	55
8.2	Positionierung des AM Bauteils auf die IST-Geometrie.....	59
8.2.1	Positionsgenauigkeit der EOS M400	59
8.2.2	Positionierung Baujobdatei auf einer TruPrint 5000	60
8.3	Funktionserprobung	62
8.4	Validierung der Projektziele	63
8.5	Zusammenfassung	64
9	Maschinencharakterisierung und -übertragbarkeit.....	66
9.1	Übertrag der Materialqualität	66
9.2	Maschinencharakterisierung.....	69
9.3	Untersuchungen an Inconel 718.....	71
10	Prozessüberwachung.....	73
10.1	Defektuntersuchungen.....	73
10.2	Messtechnik zum Erkennen von Abweichungen im Pulverbett und der Bauteiloberfläche	75
11	Automatisierungsansätze entlang der Prozesskette.....	77
11.1	Automatisierungskonzepte.....	77
11.1.1	Analysephase.....	77
11.1.2	Generierungsphase.....	79
11.1.3	Detaillierungsphase	80
11.1.4	Auswahlphase.....	81
11.2	Automatisierte Entpulverung.....	81
11.2.1	Vorgehensweise.....	81
11.2.2	Technologieübersicht.....	82
11.2.3	Entpulverungsversuche	82
11.2.4	Prototypische Anwendung	83
11.3	Automatisiertes Greifen	84
12	Nachbearbeitung	87

12.1	Nachbearbeitungsoptimierte Stützstrukturkonzepte und Entfernung.....	87
12.1.1	Virtuelle Analyse	87
12.1.2	Physische Analyse.....	91
12.2	Kosteneffiziente Referenzierungskonzepte.....	101
12.3	Optimierung der Postprozesskette	102
12.3.1	Adaptive NC-Bahnplanung.....	102
12.3.2	Finishing Verfahren.....	105
12.4	Messen auf der Werkzeugmaschine.....	109
13	Digitale Prozesskette.....	111
13.1	MES-Einsatz in der Additiven Fertigung.....	111
13.2	Virtuelle Trainings.....	114
13.3	Fabriksimulationsstudien	116
13.4	Konzept zur übergreifenden Datenintegration.....	118
13.4.1	Prozesskettenanalyse	118
13.4.2	Integrationskonzept	120
14	Pilotlinie	122
14.1	Konzeption und Planung der Pilotlinie.....	122
14.2	Installation der physischen und digitalen Infrastruktur	123
15	Literatur	126

Abkürzungen

AHP	Analytic Hierarchy Process
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAX	Oberbegriff für CAD, CAM, CAE
CT	Computertomographie
CW	Continuous Wave (in Abgrenzung zu PW, Pulsed Wave)
DfAM	Design for Additive Manufacturing
EHS	Environment, Health, Safety
ERP	Enterprise Resource Planning
ICP	Iterative Closest Point
IDEA	Industrialisierung von digitalem Engineering und Additiver Fertigung
KPI	Key Performance Indicator
LCIA	Low Cost Intelligent Automation
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion
MES	Manufacturing Execution System
NC	Numeric Control
NGV	Nozzle Guide Vane
NPSS	Nullpunkt-Spannsystem
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Product Manufacturing Information
PW	Pulsed Wave (in Abgrenzung zu CW, Continuous Wave)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFID	Radio Frequency Identification
ROS	Robot Operating System
Sk	Stützkontur / Support
STL	STL-Dateiformat - dort: Stereolithographie, Standard Triangle/Tesselation Language

1 Projektmotivation

Das Vorhaben „Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung (AM) – IDEA“ hat zum Ziel, einen wichtigen Beitrag zur Industrialisierung der Additiven Fertigung für die deutsche Industrie zu leisten. Der erfolgreiche Abschluss von IDEA und die konsequente Umsetzung durch die Projektpartner bei der Verwertung stärken die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen und etablieren die Wertschöpfung von „high-end“ AM-Maschinen- und Anlagentechnik, Software- und Steuerungssystemen sowie gefertigten Endprodukten.

1.1 Ausgangssituation

Der additive Fertigungsprozess L-PBF hat sich vor dem Beginn von IDEA kontinuierlich von der Prototypenherstellung hin zur industriellen Fabrikation komplexer Bauteile in Kleinserien entwickelt. Allerdings findet L-PBF in einer manufakturähnlichen Produktionsumgebung statt. Vor- und nachgelagerte Prozessschritte sind nur unzureichend oder nicht effektiv miteinander verknüpft. Verfügbare Softwaretools innerhalb der digitalen AM-Prozesskette zeichnen sich durch zeitaufwendige, manuelle Arbeitsschritte aus. Dies resultiert in einer eingeschränkten Plan- und Abstimmbarkeit der gesamten Prozesskette. Eine fehlende Standardisierung der Software-Schnittstellen führt häufig zu Informationsverlusten und kostenintensiven Einzellösungen zur Übertragung produktionsrelevanter Daten für verschiedene Komponenten. Als Konsequenz ergeben sich erhöhte Fertigungskosten, unzureichende Qualität, zu hohe Durchlaufzeiten und geringe Flexibilität.

1.2 Lösungsansatz

Bisher wurden in zahlreichen Projekten ausschließlich Einzelaspekte der additiven Fertigung untersucht. In Betracht dessen wurde IDEA anhand dreier Merkmale definiert:

1. Erstmalig wird die Additive Fertigung (AM) als komplette Fertigungsroute vom Rohmaterial bis zum fertigen Endprodukt betrachtet – aus Endanwender- und aus OEM-/ Ausrüsterperspektive.

2. Erstmalig werden aufeinander abgestimmte Einzelprozesse entwickelt und deren holistisches Zusammenspiel entlang der vertikalen und horizontalen Prozesskette durch verknüpfte, modulare Standardschnittstellen sichergestellt. Dazu werden die Herausforderungen bzw. Defizite der Prozessketten anhand konkreter Demonstratorbauteile adressiert.

3. Erstmalig wird in industriellem Umfeld eine vollintegrierte, automatisierte AM-Produktionslinie ihrer Art entwickelt, aufgebaut und an konkreten Bauteilen iterativ validiert und optimiert, die als zukünftige Pilotlinie für die Industrialisierung von AM dient. Die bauteilbezogene Ausrichtung von IDEA ermöglicht das vollständige Durchlaufen dieser Pilotlinie und entwickelt Signalcharakter.

1.3 Über diesen Bericht

Der vorliegende Bericht fasst ausgewählte Arbeitsergebnisse des Projektes allgemeinverständlich zusammen. Die Gliederung der Kapitel orientiert sich an der AM-Prozesskette. Neben diesem Bericht mit projektübergreifendem Fokus und den Einzelberichten der Projektpartner gibt es eine Reihe von spezifischen akademischen Veröffentlichungen, die an geeigneter Stelle ebenfalls referenziert und im Literaturverzeichnis aufgelistet sind.

Ein Dank gilt an dieser Stelle allen Projektpartnern für die zielgerichtete Zusammenarbeit sowie auch dem Projektträger VDI Technologiezentrum, welcher bei Bedarf unterstützend tätig war.

2 Gesamtüberblick Prozesskette

In diesem Abschnitt wird die L-PBF-Prozesskette von der Design-Phase bis hin zum finalen Produkt definiert. In diese ordnen sich später die jeweiligen Teilprojekte ein. Es werden typische Herausforderungen betrachtet, wie beispielsweise die Erstellung des Stützstrukturdesigns mittels CAD und deren spätere Entfernung, die Bauteilverzugsimulation, die Prozessüberwachung oder auch eine optimierte Nachbearbeitung. Die jeweiligen Ergebnisse sind in den entsprechenden Folgekapiteln dargelegt.

Allgemein können die Arbeiten entlang der Prozesskette in drei Abschnitte eingeordnet werden:

- Pre-Process
- Bauprozess
- Post-Process

Ferner wird die Prozesskette noch in einen vertikalen

- Pulverprozess

untergliedert (vgl. Abbildung 1).

2.1 Pre-Process

IDEA hat sich zum Ziel gesetzt, die Prozesskette holistisch zu betrachten. Dies schließt auch die Berücksichtigung des fertigungsgerechten Designs mit ein, welches in Anlehnung an den Fertigungsprozess AM als Design for Additive Manufacturing (DfAM) bezeichnet wird. Kennzeichnend dafür ist die konsequente Berücksichtigung von grundlegenden Regeln der Additiven Fertigung, wie beispielsweise die Konstruktion und Erstellung von Stützstrukturen. Darüber hinaus werden auch die Möglichkeiten der verknüpften Prozesssimulation zur Deformationsvorhersage untersucht. Darin integriert sind weitere Aspekte der Bauteildigitalisierung, um diese für weitere Nachbearbeitungsschritte oder Simulationskalibration zu nutzen.

2.2 Bauprozess

Der essenzielle Bestandteil der AM-Fertigung wird durch Überlagerung der horizontalen sowie vertikalen Fertigungskette gekennzeichnet.

Dies umfasst zum einen die Untersuchungen an neuen Prozessstrategien wie moduliert gepulste Laserstrahlung (PW) und eine Prozessführung bei 500°C zur Eigenspannungsreduktion. Darüber hinaus

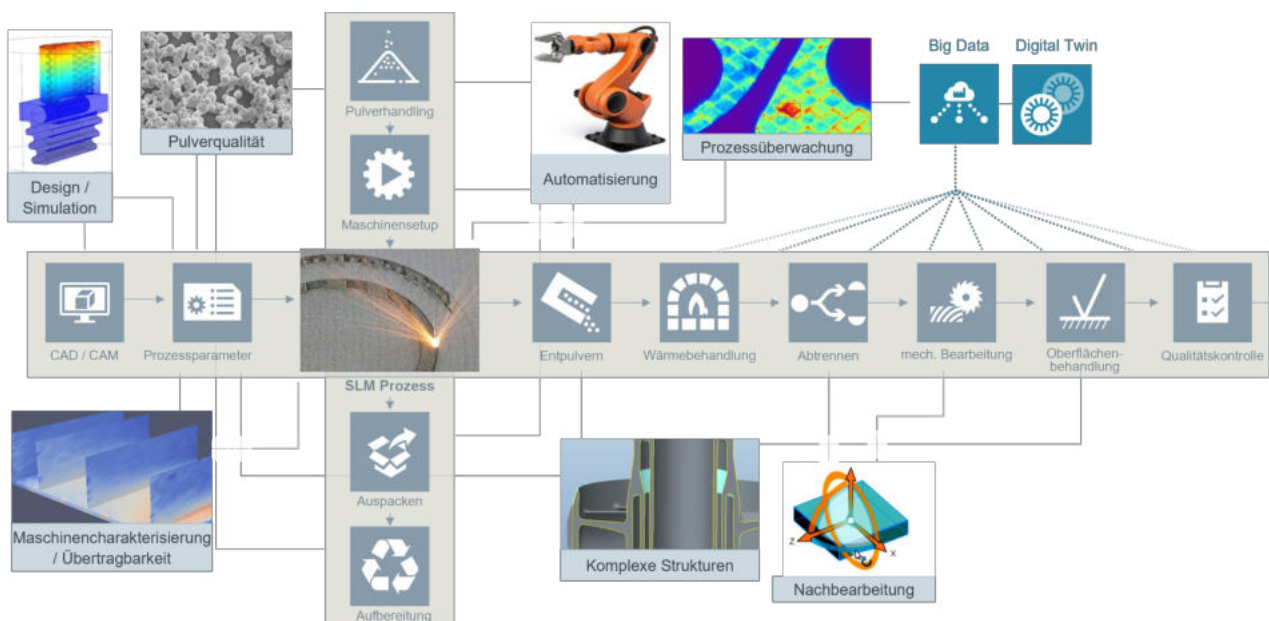


Abbildung 1: Prozesskette der additiven Fertigung durch L-PBF – unterteilt in die horizontale Prozesskette, die vom CAx bis hin zur Qualitätskontrolle reicht, sowie die vertikale Prozesskette, welche den Pulverkreislauf abbildet.

wird die Maschinencharakterisierung der Multi-Laser AM-Maschinen betrachtet. Sie dient als Basis, um die Stückkosten zu reduzieren. Weitere Untersuchungen zur Prozessüberwachung haben das Ziel, die durch nachgelagerte Qualitätsmaßnahmen entstehenden Kosten zu reduzieren.

2.3 Post-Process

Im Rahmen der nachgelagerten Schritte werden zum einen die Automatisierungsgrade sowie -potentiale der einzelnen Arbeitsschritte analysiert. Darüber hinaus wird insbesondere die Entfernung von Stützstrukturen mittels verschiedener Strategien auf Machbarkeit und Reifegrad untersucht.

2.4 Pulverkreislauf

Vor dem Hintergrund der Qualitätsanforderungen von AM-Bauteilen, muss sichergestellt sein, dass die Produkte die berechneten mechanischen Eigenschaften aufweisen. Es müssen strikte Qualitätsanforderungen bezüglich des Pulvermaterials eingehalten werden und dies über die gesamte Nutzungsdauer mit mehreren Wiederaufbereitungszyklen gewährleistet sein. Dementsprechend finden sich auch zu diesem Thema spezifische Ergebnisse.

3 Pulvermanagement

3.1 Pulveralterung und -recycling

Motivation

Die pulverbettbasierte additive Fertigung beruht auf dem selektiven Schmelzen von Metallpulver. Das aufgeschmolzene und wieder erstarrte Material bildet das fertige Teil, während das umgebende, lose Pulver nach Prozessende entfernt wird. Typischerweise beträgt der Anteil der Bauteilvolumina am Gesamtbaujobvolumen nicht mehr als 25%. Das restliche Volumen ist loses Pulver. Daher ist die Wiederverwendung von nicht geschmolzenem Pulver für weitere Baujobs eine wirtschaftliche Notwendigkeit. Bei Anwendungen mit speziellen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen, wie sie beispielsweise in der Luftfahrtindustrie vorkommen, ist es von großer Wichtigkeit, sicherzustellen, dass die Pulverqualität im Rahmen der Wiederverwendung, Lagerung und Handhabung nicht negativ beeinflusst wird.

Zielstellung und Vorgehen

Im Rahmen von IDEA wird das Pulverhandling in einem dedizierten Arbeitspaket adressiert. Das Ziel ist die Entwicklung eines Pulverrecyclingkonzepts sowie dessen prototypische Implementierung und Validierung an den Pilotlinien der Projektpartner. Gegenstand der Untersuchungen ist die Legierung Inconel 718 (In718), die in der Luftfahrt vielerlei Anwendungsgebiete hat. Ziel der Recyclingversuche ist eine Wiederverwendungsrate von 90% oder mehr des jeweiligen Pulvers bei gleichzeitiger Einhaltung der vorgegebenen Qualitätsstandards. Um die Untersuchungen und Beobachtungen zur Pulveralterung umzusetzen, wurden repräsentative "worst case" Baujobs durchgeführt, deren Anordnung in Abbildung 2 dargestellt ist. Bei diesem Baujob besteht ein Viertel des Volumens aus Bauteilen und der Rest aus losem Pulver. Damit liegt er deutlich über dem Baujob-Füllgrad von 4% bis 15%, welcher für IDEA-Partner in deren Tagesgeschäft typisch ist. Es ist anzunehmen, dass die Alterung des Pulvers mit zunehmender Baujobzeit, welche wiederum mit zunehmendem Füllgrad ansteigt, beschleunigt wird, da dieses dann

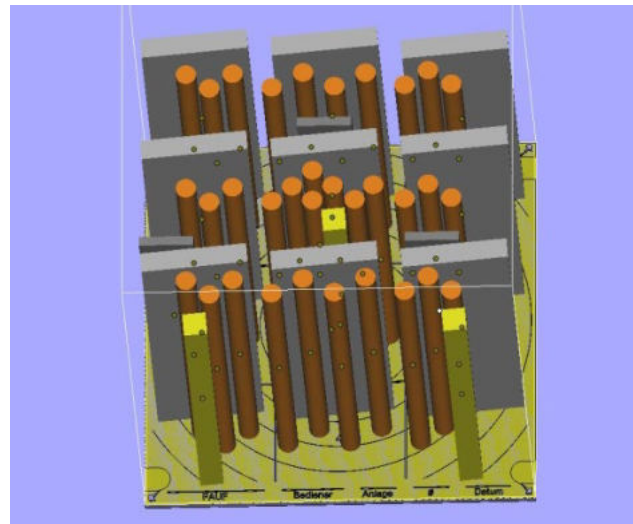


Abbildung 2: Zu Pulverversuchen gehörige Baujob-Anordnung

entsprechend länger den Prozessbedingungen ausgesetzt ist. Aussagen dieser Versuchsreihe gelten somit bis zu einem Füllgrad bis 25%, was die Mehrheit der relevanten Baujobs in der industriellen Praxis abdeckt.

Das Vorgehen ist in Abbildung 3 beschrieben. Eine einzelne Charge In718 wurde verwendet, um den Referenzjob (Abbildung 2) wiederholt zu bauen. Es erfolgte keine Beimischung von Neupulver. Nach der Fertigstellung des Referenzbaujobs wurde das überschüssige Pulver mittels eines Saugers entfernt, anschließend gesiebt, getaumelt und dem nächsten Baujob zugeführt. Mit der Einzelcharge konnten so zehn Wiederholungen durchgeführt werden, bis das Restpulver nicht für eine weitere Wiederholung genügte.

Ergebnisse

Um die Pulveralterung zu beurteilen, wurden nach dem Taumeln Proben entnommen. Chemische Analysen zeigen, dass die Aufnahme von Sauerstoff der dominierende Alterungseffekt ist, wenn es um die Wiederverwendung von In718 geht. Nach den zehn Baujobs respektive Alterungszyklen steigt der Sauerstoffgehalt im Pulver um 83 ppm auf 146 ppm an. Der Anteil anderer Elemente wie Wasserstoff oder Stickstoff steigt nicht signifikant.

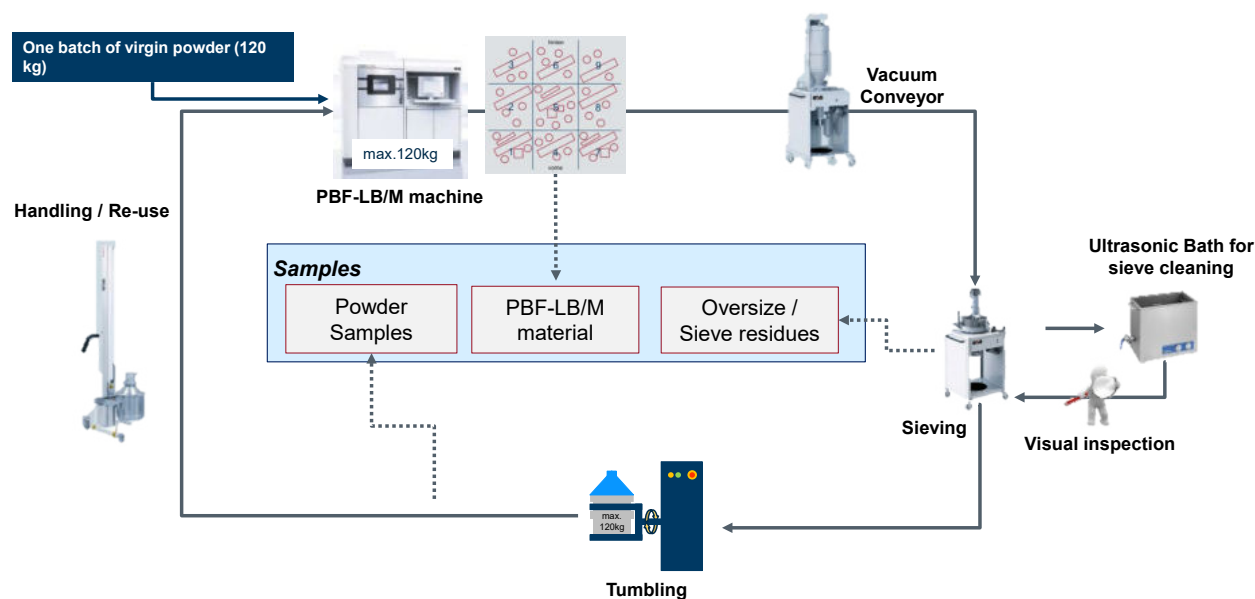


Abbildung 3: Vorgehen der Versuche zu Pulveralterung und Pulverrecycling

Neben der chemischen Analyse wurde die Größenverteilung der Pulverpartikel kontinuierlich gemessen. Diese Verteilung ist neben der Anreicherung des Sauerstoffs der zweite wesentlich durch die Alterung beeinflusste Faktor und wird durch den Siebvorgang einerseits sowie durch die Schutzgasströmung in der Maschine andererseits verursacht. Sie sollte bei der Nutzung von Recycling im Zusammenhang mit In718 sorgfältig gemessen werden.

Die Mikrostrukturanalyse der Baujobproben zeigt keine auffälligen Unterschiede zwischen Proben aus Zyklus 1 bis hin zu Zyklus 10. Diese Beobachtung deckt sich mit den ebenfalls vergleichbaren Ergebnissen der Zug- sowie Dauerfestigkeitsversuche, bei welchen Proben aus Zyklus 10 ähnliche Eigenschaften zeigten, wie Proben aus Neupulver.

Um den Einfluss des Sauerstoffgehalts des Pulvers auf die spätere Bauteilqualität weiter zu untersuchen, wurde In718-Pulver künstlich gealtert, indem es erhöhten Temperaturen unter Sauerstoffeinfluss ausgesetzt wurde. Dadurch konnte eine Sauerstoffkonzentration von 600 ppm erreicht werden. Die mit diesem künstlich gealterten Pulver hergestellten Proben zeigen bei Raumtemperatur schlechtere Kennwerte bei Festigkeit und Duktilität. Bei höheren Temperaturen, welche näher an den tatsächlichen Einsatztem-

peraturen liegen, zeigen sich jedoch keine Unterschiede. Es ist dabei zu beachten, dass mit 600 ppm mehr als der vierfache Wert erreicht wird, der nach zehn Zyklen der Pulverwiederverwendung vorliegt und bei dem sich keine Beeinträchtigungen der Festigkeitskennwerte ergeben. Somit ist für die Praxis genügend Spielraum vorhanden, um In718 ohne signifikante Qualitätseinbußen wiederzuverwenden. Da jedoch höhere Sauerstoffgehalte allgemein mit schlechteren Festigkeitskennwerten korrelieren, sollte dieser Parameter dennoch ebenfalls unter Berücksichtigung individuell festgelegter Grenzwerte überwacht werden.

Ausblick

Die im Rahmen von IDEA durchgeführten Untersuchungen umfassten Recyclingstrategien, bei denen Einzelchargen ohne Vermischen wiederverwendet wurden. Diese Strategie ist durch ihre Einfachheit gekennzeichnet und limitiert ebenfalls durch die beschränkte Zahl an möglichen Zyklen pro Charge eventuelle Kontaminationen.

Zukünftig gilt es, eine weitere Strategie zu untersuchen, nämlich jene, der stetigen Zumischung von Neupulver. Bei dieser wird der entsprechend des Baujobfüllgrades verbrauchte Pulveranteil durch

Neupulver ersetzt. Dadurch wird eine optimale Pulverausnutzung gewährleistet. Ferner stellt sich theoretisch ein quasi-statischer Pulverzustand ein, welcher mit ebenfalls konstanter Qualität einhergeht. Nachteil dieser Strategie ist die aufwendige Überwachung und Dokumentation der Pulverzusammensetzung, einhergehend mit komplizierteren Zertifizierungsprozessen. Die genaue Durchmischung ist bei jedem Mischvorgang sicherzustellen. Zukünftig sind weitere Experimente nötig, um diese Recyclingstrategie zu untersuchen.

3.2 Pulverhandlung und digitale Abbildung des Pulverkreislaufs

Neben den physischen Aspekten des Pulverhandlings ist die digitale Abbildung der Prozesse essentiell, um eine Nachverfolgbarkeit der Pulvermengen zu ermöglichen. Aus Sicht des finalen Produktes muss der Qualitätszustand des genutzten Pulvers klar zugeordnet werden können. Dazu gehört die Lieferanweisung sowie das Lieferzertifikat als Ausgangsgröße sowie Nutzungsdaten des Pulvers, welches zur Herstellung genutzt wurde.

Für digitale Abbildung wurden zu einen die entsprechenden Arbeitsschritte des Pulverdurchlaufs abgebildet, wie Lagern, Sieben, Beladen und Entladen. Dazu wurden entsprechende Nutzerrollen definiert, um die einzelnen Arbeitsschritte und Nutzungsprofile

sinnvoll abzubilden. Als Plattform wurde ein Microservice auf Basis einer Amazon Cloud realisiert. Dieser wurde entsprechend in die bestehende IT-Landschaft eingebunden, sodass Sicherheit und Nutzeridentifikation gewährleistet werden. Darüber hinaus ist es möglich, die entsprechenden Arbeitsmittel, Lagerorte und Nutzungspunkte mittels QR-Code und Smartphone zu verknüpfen. Dadurch wird das Führen von händischen Unterlagen für den Werker obsolet. Darüber hinaus gewährleistet eine programmierte Logik die Nutzung von ungesiebttem Pulver in einer Maschine. Die Erfassung der einzelnen Pulvermengen und deren Zustand beinhaltet trotz digitaler Hilfsmittel einen gewissen manuellen Aufwand, der von den Bedienern per Smartphone eingetragen werden muss.

Die Programmierung als Microservice erlaubt auch unterschiedliche Nutzungsszenarien, wie die kontinuierliche Beimischung von Pulver. Dazu können die einzelnen Schritte geändert werden und die Synchronisation an die PLM- und ERP-Systeme abgestimmt werden.

Ausblick

Für eine Erweiterung des Pulvermanagements sollte die automatisierte Erfassung der Pulvermengen an den einzelnen Stationen in Betracht gezogen werden. Dies würde bei einer Skalierung des Maschinenparks die manuelle Erfassung reduzieren.

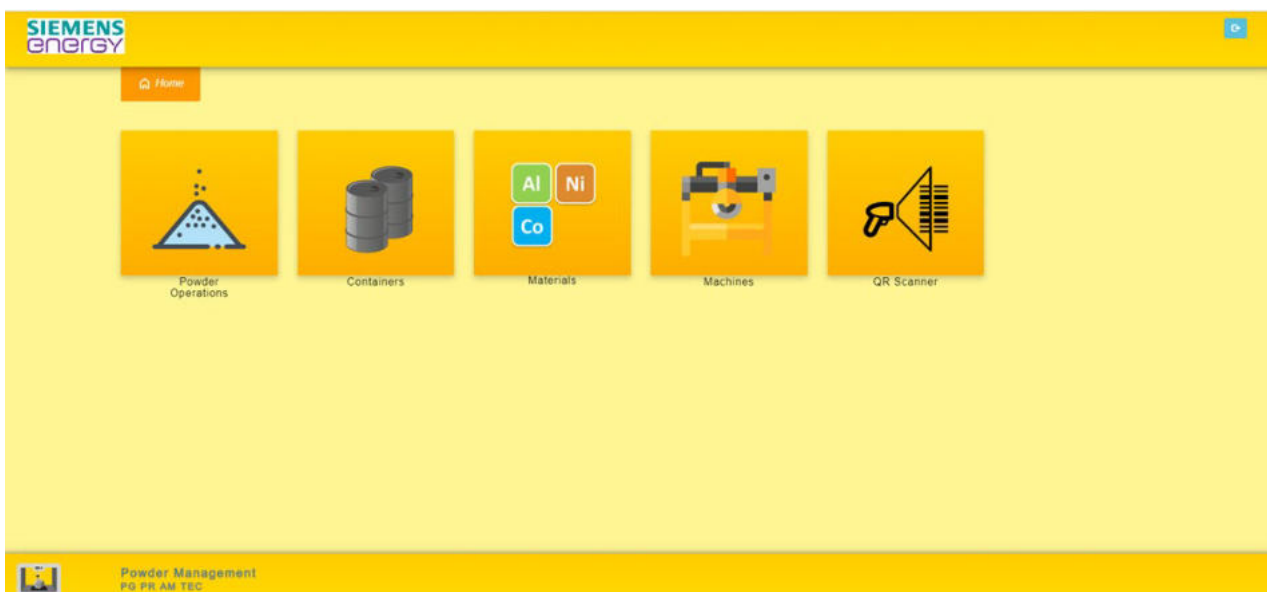


Abbildung 4: Screenshot der Startseite des Pulvermanagement-Tools

4 Bauteildesign

Im Bereich des Pre-Processings wurden im Rahmen des IDEA-Projekts verschiedene Zielstellungen bearbeitet. Die Ergebnisse werden in diesem und dem folgenden Kapitel erläutert. Bezüglich des Bauteildesigns wurden Verbesserungspotentiale durch AM-spezifische Designanpassungen im entwickelten Tool "Design Wizard" gemacht. Im Bereich der Simulation wurden verschiedene Tools auf ihre Vorhersagegenauigkeit von prozessbedingten Bauteilverzügen hin evaluiert. Das nachgelagerte Ziel ist die Kompensation jener Verzüge. Um ein besseres Verständnis für die digitale Prozesskette im Pre-Process zu gewinnen und daraus abgeleitet deren Leistungsfähigkeit zu steigern, wurde eine entsprechende Analyse vorgenommen.

Aus dem Blickwinkel des Bauteildesigners ermöglicht AM, insbesondere L-PBF, eine deutliche Vergrößerung des Gestaltungsspielraums. Mit der Möglichkeit hin zu filigraneren und komplexeren Designs gehen jedoch auch Designrestriktionen einher. Diese Möglichkeiten und Grenzen des Designs werden im Rahmen von DfAM (Design for Additive Manufacturing) methodisch erfasst. Ein Ziel ist es, die Restriktionen zu digitalisieren und so AM-ungeschulten Designern zugänglich zu machen. Diese Lösung soll eine noch schnellere Umsetzung von neuen AM-Bauteilen

durch kürzere Designzyklen und eine Abschätzung der Bauteilqualität hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien ermöglichen.

4.1 Digitale Prozesskette

4.1.1 Problemstellung

Derzeit sind die einzelnen Schritte der digitalen Prozesskette für ein AM-Produkt in hohem Maße isoliert, manuell, zeitintensiv und benötigen teilweise Expertenwissen. Funktionierende Schnittstellen zu den PLM-Systemen (Product Lifecycle Management) sind häufig nicht vorhanden, was die Datenverwaltung aufwendig bis unmöglich gestaltet. Es gilt, die Unzulänglichkeiten in der realen und virtuellen Umgebung zu identifizieren, zu eliminieren und durch wertschöpfende, kreative Tätigkeit in Produktentstehung und Qualitätssicherung zu ersetzen.

4.1.2 Vorgehensweise

Im Rahmen der Schnittstellenanalyse werden die inhomogenen, d.h. von Endanwender zu Endanwender verschiedenen, Arbeitsabläufe und Softwarelandschaften dokumentiert und die Ergebnisse für ein Softwarebenchmarking verwendet. In Abbildung 5 wird exemplarisch die initiale Situation des Projektpartners Siemens Energy dargestellt. In dieser Abbildung ist unten die konventionelle Prozesskette mit Medienbrüchen, verschiedenen Datenformaten und

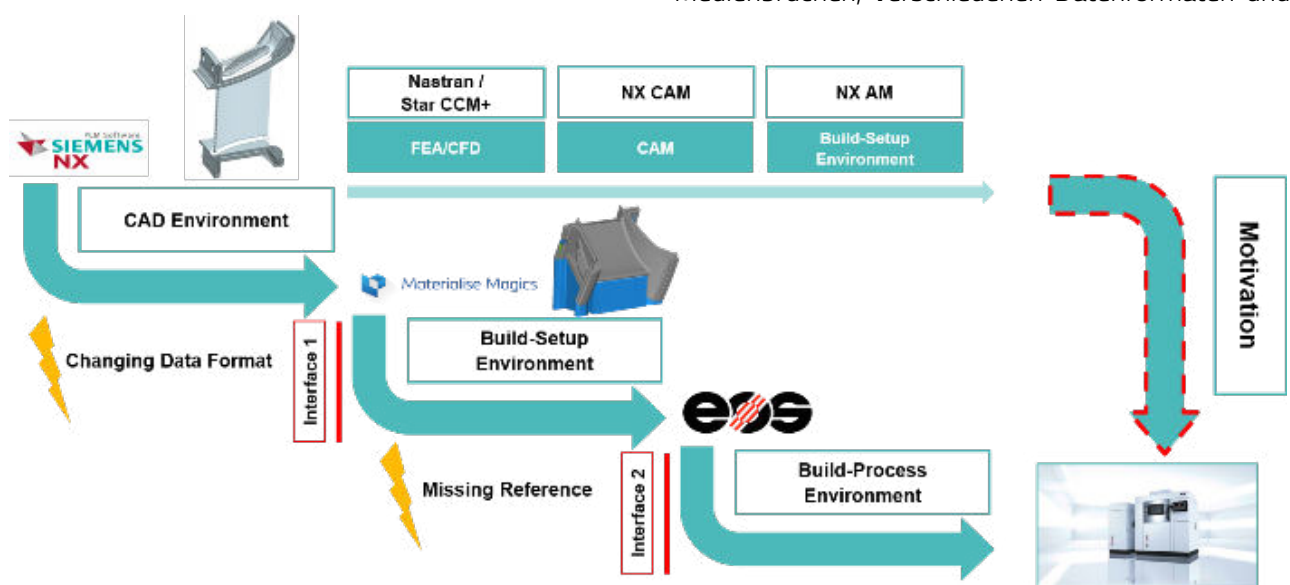


Abbildung 5: Konventionelle (unten) vs. durchgängige Prozesskette im AM-Präprozess

einhergehendem Informationsverlust abgebildet. Oben dargestellt ist eine Möglichkeit der durchgängigen Prozesskette, basierend auf einer integrierten Softwarelösung vom Designprozess über die Bauteil- und Prozesssimulation bis hin zur Maschinenkonnektivität in den AM-Shopfloor.

Im Rahmen des Projekts IDEA werden zunächst die Durchlaufzeiten der jeweiligen Prozessschritte erfasst, um die Grundlage für die spätere Bewertung zu schaffen. Es wird jeweils ein Flussdiagramm des IST-Arbeitsablaufes erstellt und anhand der im Konsortium entwickelten Kriterien auf folgende Fragestellungen hin systematisch analysiert:

- Wo finden Iterationsschleifen statt?
- Entsteht Datenverlust durch Übergabe bzw. Formatwechsel an Schnittstellen?
- Wo wird großer zeitlicher Aufwand in einem Prozessschritt (T_i) bei Vergleich mit der Gesamt Prozessdauer (T_{ges}) gesehen?
- Ist für die Bearbeitung dieses Schrittes Expertenwissen erforderlich?

Abgeleitet aus diesen Erkenntnissen entsteht ein Maßnahmenkatalog, dessen Inhalt priorisiert und die Umsetzung respektive Implementierung innerhalb des Konsortiums adressiert wird.

4.1.3 Ergebnisse

Zusätzlich zur Aufnahme der vom jeweiligen Demonstrator abhängigen Arbeitsabläufe, wurden mit dem Partner toolcraft die Durchlaufzeiten von konventioneller Prozesskette (IST-Situation) und durchgängiger Prozesskette (SOLL-Situation) verglichen. Die Ergebnisse zeigen, basierend auf den getroffenen Annahmen, eine mögliche initiale Reduzierung (ohne komplette Umsetzung der im Folgenden diskutierten Maßnahmen) der Gesamtdurchlaufzeit T_{ges} von ca. 12 %, hauptsächlich durch den Wegfall der Iterationsschleife zur Stützstrukturzeugung, da in der konventionellen Prozesskette das vorverformte Bauteil (Output der Simulation) erneut mit Stützstruktur versehen werden muss. Die automatisierte Stützstrukturgenerierung bietet weiteres Optimierungspotential, da die Stützstrukturerstellung durch Experten

zeitaufwendig und abhängig vom Bauteil (Funktionsflächen, Anforderungen an Form- und Lagetoleranzen) ist. Zudem ist die Stützstrukturgenerierung oft nicht robust und Anpassungen sind nur bedingt möglich bzw. aufwendig, da bei Änderungen am Bauteil die nicht assoziative Stützstruktur gelöscht wird. Hier kann eine automatisierte, algorithmenbasierte Stützstrukturerstellung unter Einbeziehung der Produktdefinitionsdaten den Aufbereitungsprozess beschleunigen. Benötigt werden dafür Meta-Bauteildaten, die entlang der Prozesskette weitergegeben werden und die Integration der Stützstruktur in die CAD-Umgebung als assoziativem Bestandteil der Produktdefinition. Um die Produktdefinitionsdaten als sogenannte PMI (Product Manufacturing Information) über die gesamte Prozesskette zu erhalten, ist es unerlässlich, eine Alternative zum STL-Format in der Prozesskette zu nutzen. Bei der Umwandlung in dieses Dateiformat, welches die Bauteiloberfläche mittels Dreiecksfacetten annähert, gehen diese Informationen verloren. Das STL-Modell ist nicht assoziativ zum nativen CAD-Modell. Im Rahmen der Projektlaufzeit war es nicht möglich, die Prozesskette derart zu gestalten, dass sie gänzlich ohne das seit Jahrzehnten etablierte und in der Industrie weit verbreitete STL-Format auskommt. Stattdessen wurden über kurz- bis mittelfristig umsetzbare Workarounds und Best-Practice-Lösungen Effizienzsteigerungen, in der Formulierung allgemeingültiger STL-Exportparameter und automatisierter STL-Reparaturmechanismen, gesucht.

Es lässt sich zudem feststellen, dass großes Potential in der Weiterentwicklung der Bauteilsimulation gesehen wird, insbesondere bei der Vernetzung komplexer Strukturen und der Kalibrierung von Werkstoffdaten.

4.2 Design-Assistenzsysteme

Ziel ist die Erstellung eines Moduls zur Vorhersage der Oberflächenrauheit unter Berücksichtigung der Prozessparameter (Laserleistung, engl. Laser Power PL; Schraffurabstand, engl. Hatch Distance HD und Scangeschwindigkeit, engl. Scan Velocity SV). Dazu wird ein Regressionsmodell für die Abhängigkeit der

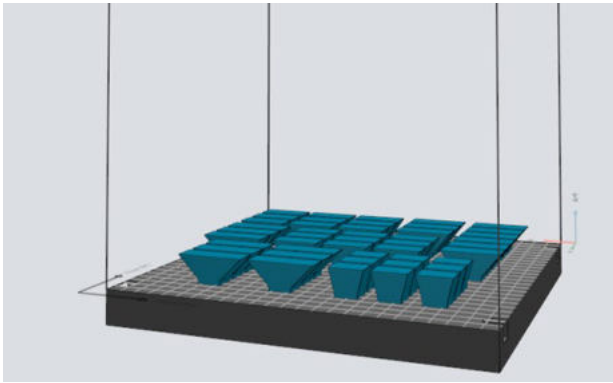


Abbildung 6: Testgeometrien für Prozessparametervariation in der Aufbereitungssoftware EOS Print

Oberflächenrauheit von den Prozessparametern, der Bauraumposition als auch dem Lasereinflusswinkel und der Scanrichtung erstellt, welches die wechselseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt.

4.2.1 Datenanalyse

In diesem Abschnitt werden Messungen der Oberflächenrauigkeit auf den ausgewählten Bauteilen (siehe Abbildung 6), die mittels L-PBF gefertigt wurden, durchgeführt. Die Messungen sind in drei Kategorien, die drei verschiedene Flächenneigungen der Testgeometrie darstellen, unterteilt.

Um zu prüfen, ob es möglich ist, eine Beziehung zwischen den Prozessparametern und der Oberflächenrauheit ohne Berücksichtigung ihrer physikalischen Beziehungen herzustellen, werden die Daten analysiert.

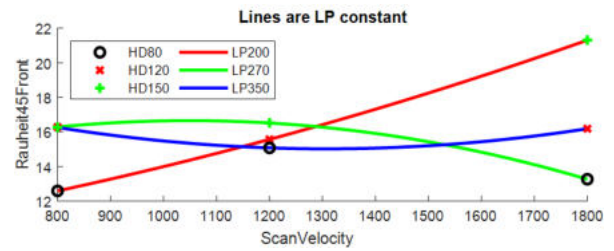


Abbildung 7: Rauheit zu Scangeschwindigkeit an der Stirnfläche.

Den aufgenommenen Daten zufolge tritt die niedrigste Rauheit bei einer Scangeschwindigkeit von 800 mm/s auf. Die Scangeschwindigkeit ist in Bezug auf die Oberflächenrauheit der einflussreichste Faktor. Dabei führt eine kleinere Scangeschwindigkeit zu einer reduzierten Oberflächenrauheit.

Es ist erkennbar, dass bei einer Laserleistung von 200 W (rote Linie in Abbildung 7) die Erhöhung der Scangeschwindigkeit die Rauheit proportional vergrößert wird, während bei anderen Laserleistungen die Rauheit bei unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten weniger anfällig für Veränderungen ist.

Der Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Oberflächenrauheit kann in erster Näherung linear dargestellt werden. Die Ergebnisse der Regression sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Ergebnisse der Regression sind im Allgemeinen zuverlässig, da in den meisten Fällen der relative Fehler unter 5% liegt (Ausreißer rel. Fehler bis zu 24%). In Abbildung 8 ist zu sehen, dass die durch die lineare Regression berechnete Oberflächenrauheit und die

Tabelle 1: Regressionsvorhersage und Messungen der Oberflächenrauigkeit

Laser power (W)	Scan velocity (mm/s)	Hatch distance (µm)	Measured	Regression	Error	Error%
200	800	80	4,1	4,1	0,04	1,0
200	1200	120	15,2	13,5	1,65	-12,2
200	1800	150	22,4	24,1	1,63	6,8
270	800	120	4,4	5,4	0,95	17,7
270	1200	150	16,2	16,2	0,00	0,0
270	1800	80	13,0	13,4	0,45	3,3
350	800	150	5,6	7,4	1,76	24,0
350	1200	80	8,8	8,7	-0,12	-1,4
350	1800	120	16,5	17,2	0,75	4,3

gemessenen Daten qualitativ ein ähnliches Verhalten aufweisen. Dies bedeutet, dass die Regression die Rauheit der Oberfläche, im Rahmen einer akzeptablen Toleranz (~10%) reproduzieren kann.

4.2.2 Optimierte Prozessparameter

Da die Regression über ein breites Parameterfenster akzeptabel mit den experimentellen Daten übereinstimmt, können die Prozessparameter für eine gegebene Geometrie, hinsichtlich reduzierter Oberflächenrauheit als auch gesteigerter Aufbaurrate, optimiert werden.

Die Abbildung 9 (a) bis (c) zeigen die Vorhersagen der Oberflächenrauigkeit der Oberseite (Up-Skin).

In Abbildung 9 ist erkennbar, dass das beste Ergebnis bei einer Laserleistung von 200 W (a) auftritt und dass bei konstanter Laserleistung die Scangeschwindigkeit den größten Einfluss aufweist. Das absolute

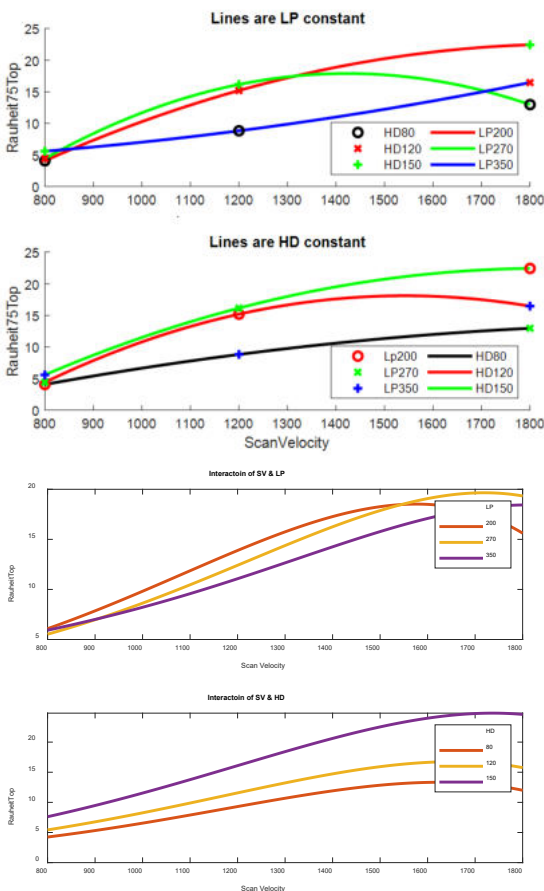


Abbildung 8: (a) Regressionsergebnisse; (b) Gemessene Rauheit.

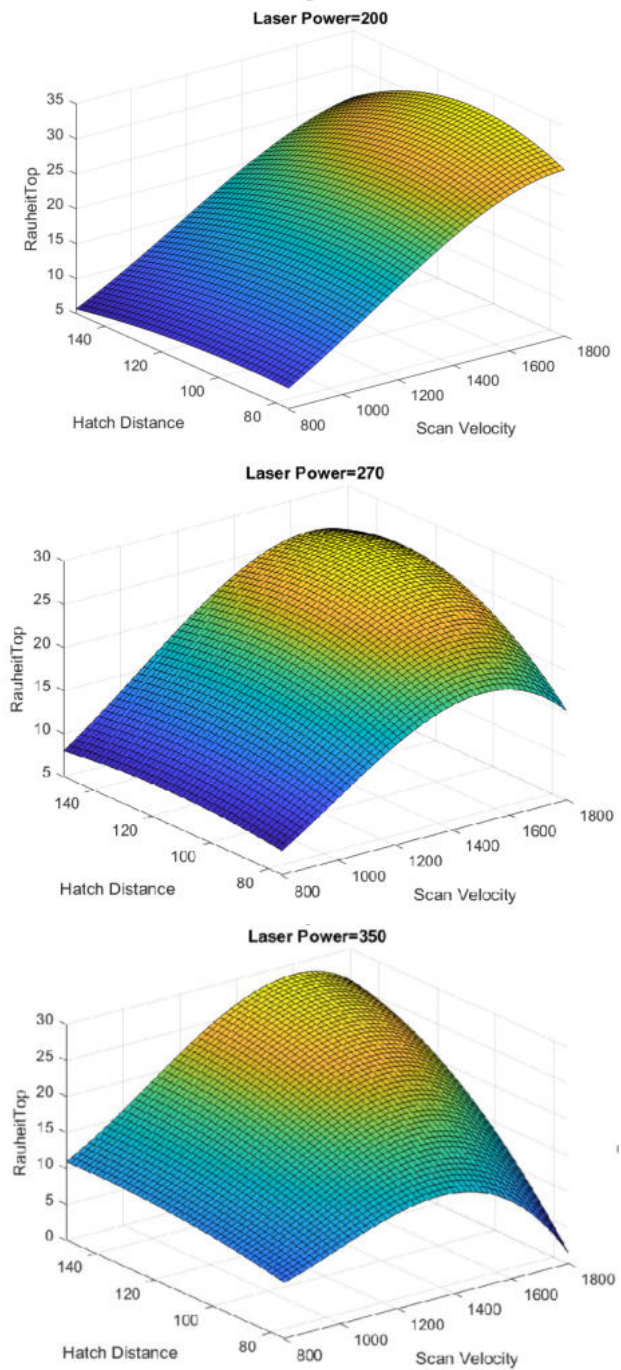


Abbildung 9: (a) Regression mit Laserleistung 200 W; (b) Laserleistung 270 W; (c) Laserleistung 350 W.

Minimum der Oberflächenrauheit liegt bei einer Kombination aus Laserleistung von 200W, einem Schraffurabstand von 140 µm und einer Scangeschwindigkeit von 800 mm/s.

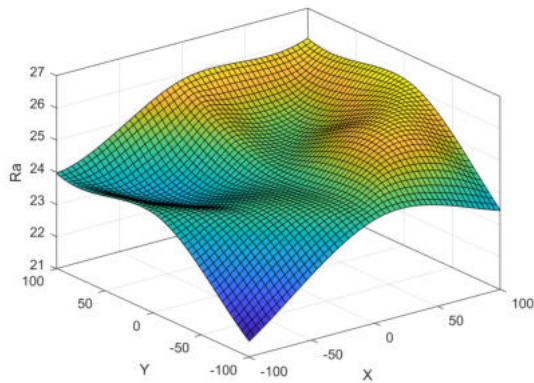


Abbildung 10: Positionsabhängige Rauheitswerte

Positionierung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Bauteilposition im Bauraum auf die Oberflächenqualität analysiert. Zum Test wird dieselbe Geometrie an dreizehn unterschiedlichen Bauraumpositionen gefertigt. Dies führt zu unterschiedlichen Randbedingungen im Prozess hinsichtlich der Lasereinstrahlwinkel und der Schutzgasströmung.

Die Rauheit der Oberfläche wird an jeder Stelle mehrfach gemessen, die Daten sind in Abbildung 10 gegen die x,y-Position im Bauraum aufgetragen. Gemäß den gezeigten Daten tritt die niedrigste Rauheit am Punkt (-100, -100) auf. Die Daten zeigen jedoch nur die mittlere (hinsichtlich aller anderen Parameter) Rauheit je Position. Diese ist unabhängig von der Scanrichtung.

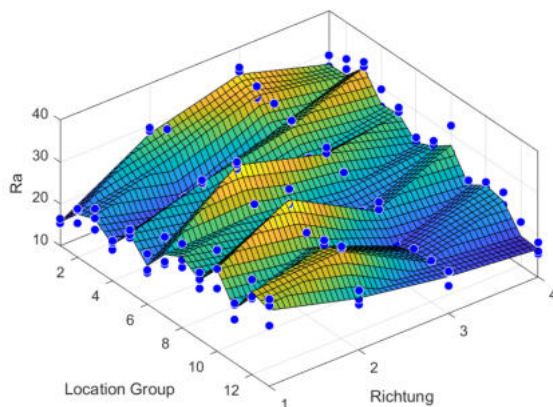


Abbildung 11: Rauheitswerte in Bezug auf die Richtung des Lasers

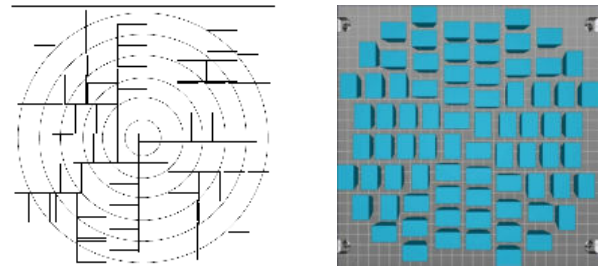


Abbildung 12: a) AutoCAD b) EOSPrint; Entworfenes Muster der Proben auf der Bauplattform

Scanrichtung

An den genannten Positionen wird die Testgeometrie in vier verschiedenen Ausrichtungen aufgebaut. Um die Auswirkung der Scanrichtung auf die Oberflächenrauigkeit besser zu beschreiben, wird eine analytische Funktion gesucht. Die Beziehung ist jedoch stark nichtlinear und zur Verbesserung des Modells werden weitere Daten benötigt. Abbildung 11 zeigt die Beziehung zwischen der Scanrichtung und der Oberflächenrauheit (die Laserscanrichtung ist farblich kodiert).

Versuchsplanung Positionsabhängigkeit

Zur Entwicklung eines erweiterten Modells werden Daten aus zwei weiteren Experimenten benötigt. Ein kreisförmiges Muster für die Bauteilpositionierung (gleicher Lasereinflusswinkel) wird entwickelt, um den Einfluss der Position auf die Oberflächenrauheit auszuschließen (siehe Abbildung 12).

In jedem Kreis sind die Prozessparameter über den gesamten Bereich statistisch verteilt, so dass der Einfluss der Position im endgültigen Modell ausgeschlossen werden kann. Die Oberflächenrauheit wird nach Präparation mit einem elektronischen Mikroskop gemessen und die Daten in MATLAB verarbeitet. Das Regressionsmodell hat die folgende Form:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_m x_i^m + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Es wird davon ausgegangen, dass jede Variable eine Potenz von 1 bis 9 haben kann. Zur Ermittlung des genauen Grad des Polynoms (111 bis 999) werden die R-Quadrat und P-Werte herangezogen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

R-Quadrat: Ein Maß dafür, wie gut ein Modell die Daten vorhersagen kann [0,1].

\hat{y} : Berechneter Wert

\bar{y} : Mittelwert der gemessenen Daten.

P-Wert: Wenn der p-Wert des Modells unter 0,05 liegt, ist das Modell signifikant. Daher sollte zunächst sichergestellt werden, dass diese Voraussetzung erfüllt wird.

Tabelle 2 zeigt den R-Quadrat-Wert für Modelle mit einem P-Wert von weniger als 5 %. Anhand dieser Zahlen wird das Polynom mit dem höchsten R-Quadrat und dem niedrigsten Grad gefunden. Zur Untersuchung des endgültigen Modells werden die folgenden Faktoren überprüft:

- R-Quadrat: nah an 1
- P-Wert: < 5 %
- Wert der Fehler

Die folgende Tabelle 2 ist ein Beispiel für die Untersuchung der Ergebnisse:

Max Error (µm)	Max Error %	Mean Error %	P-Value	R-Squared
3,4	28,5	0,027	1.3e-28	0.923

Tabelle 2: Fehlerbetrachtung des Modells

In Abbildung 13 ist zu sehen, dass alle Fehler eine normale Wahrscheinlichkeit haben und nicht stark von der Normallinie abweichen. Dies ist ein Indiz dafür, dass kein systematischer Fehler im Modell vorliegt.

Final werden die Ergebnisse der vorhergesagten Rauigkeit farbkodiert im Design Wizard dargestellt.

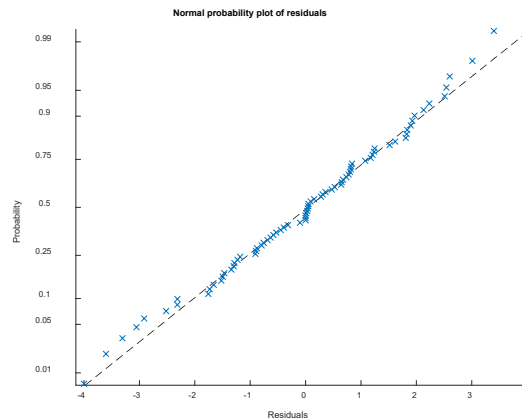


Abbildung 13: Wahrscheinlichkeitswert für den Wert der Fehler

Die Softwaregrundlage des Design-Assistenten

Um die Überprüfung der Funktionalität der „CAM Design Checker Komponente“ zu ermöglichen ist diese in das „DbgVis - ModuleWorks Debug Visualizer Tool“ integriert worden. Hiermit können nun die Eingaben und die Ausgaben der Schnittstelle visuell überprüft werden.

DbgVis ist eine einbettungsfähige 3D-Visualisierungshilfe mit dem Ziel, eine flexible, einfach nutzbare und hochleistungsfähige Visualisierungsplattform zu bieten, um Gitterverarbeitungs- oder Bahnplanungsalgorithmen zu debuggen oder zu prototypisieren.

5 Bauteilsimulation

Die Vorstellung der Ergebnisse der Bauteilsimulation ist in drei Abschnitte gegliedert. Im ersten wird die Methode der bleibenden Dehnungen, welche häufig zur Simulation des entstehenden Bauteilverzugs verwendet wird, erläutert und in den Stand der Technik eingeordnet. Im darauffolgenden Abschnitt werden die verwendeten, kommerziell verfügbaren Softwarelösungen vorgestellt und deren Funktions- und Bedienungsweise voneinander abgegrenzt. Mit den drei Simulationsprogrammen wurde ein Benchmark an zur Reduzierung des Rechenaufwands vereinfachten Geometrien durchgeführt. Die berechneten Verzüge werden im dritten Abschnitt mit experimentellen Daten verglichen und die benötigten Ressourcen CPU-Zeit und Speicher quantifiziert.

5.1 Methode der bleibenden Dehnung

Der numerische Rechenaufwand für thermo-mechanische Simulationen ist je nach Komplexität des Simulations- und Materialmodells sowie gewählter räumlicher Auflösung extrem groß. Dies betrifft gerade Prozesse wie das L-PBF, bei denen die relevanten Längen- und Zeitskalen sehr unterschiedliche sind: Aufschmelz- und Erstarrungszeiten \sim ms bei Bauzeiten \sim 30 Stunden, Laserstrahldurchmesser \sim 100 μ m bei Laserscanstrecken \sim km sowie Bauteilgrößen mit Kantenlängen bis zu 400 / 250 mm machen die Lösung des vollen thermo-mechanischen Problems meist nicht praktikabel. Zum im Vergleich zur sehr kleinen Bearbeitungszone großen Bauteil kommen große Temperaturgradienten von $\sim 10^6$ K/mm in Prozessnähe. Da der L-PBF Prozess

jedoch zyklisch ist, ist das Erstarrungsverhalten, genauer die Temperaturhistorie in erster Näherung positionsunabhängig. Damit kann die Annahme getroffen werden, dass die entstehenden Spannungen bzw. Dehnungen im Bauteilvolumen homogen sind. Dieser Methode liegt die Annahme zugrunde, dass die bleibenden Dehnungen (engl. inherent strain) die Ursache für residuale Schweißspannungen sind [1]. Diese Annahme ist umso zutreffender, je gleichförmiger das Bauteil hinsichtlich des Temperaturverlaufs ist und je weiter der betrachtete Punkt innerhalb des Bauteilvolumens liegt. Das Beschreiben von dünnwandigen Strukturen ist mit dieser Methode nicht zwangsläufig möglich und andere Effekte (wie eng. „Buckling“) können je nach Randbedingungen einen größeren Einfluss haben.

Die bleibenden Dehnungen, welche für die Bestimmung des inhärenten Bauteilverzugs durch die additive Fertigung vonnöten sind, können entweder 1) thermo-mechanisch berechnet oder 2) anhand von Testgeometrien (gefertigt, gemessen und mit Simulationen der gleichen Geometrie) kalibriert werden. Nach aktuellem Stand (2022) hat sich die Methode der Kalibration durchgesetzt. Je nach verwendeter Software läuft die Kalibration unterschiedlich ab.

5.2 Verwendete Software

Im Rahmen der Untersuchungen sind folgenden Programme verwendet worden:

- Siemens NX 2007 und vorherige
- ANSYS 2021 R1 Additive Print und Mechanical
- Simufact Additive 2021

Tabelle 3: Elementgröße, eingestellte vorgegebenen bleibende Dehnungen, berechneter radialer Verzug an der verzugsensitivsten Bauteilstelle sowie die benötigte Rechenzeit für die verwendete Software

Voxel-/Elementgröße [mm]	Bleibende Dehnung [-]	ANSYS		NX		Simufact	
		Verzug [mm]	Rechenzeit [min]	Verzug [mm]	Rechenzeit [min]	Verzug [mm]	Rechenzeit [min]
1	0,0164	0,74	2	0,71	13	0,79	2
0,5	0,0060	0,32	7	0,26	40	0,34	15
0,25	0,0035	0,17	86	0,17	300	0,17	223

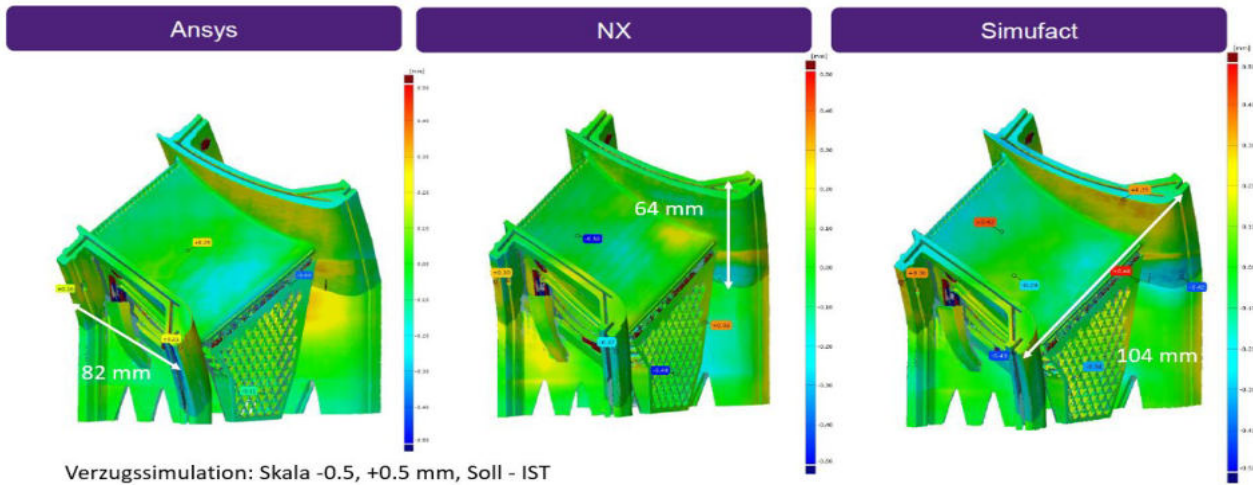


Abbildung 14: Vergleich der drei Simulationsprogramme für die Siemens Energy Vane, gezeigt ist die Abweichung von Simulation zu tatsächlich entstandenem Verzug

Ziel ist die Erfassung der Übertragbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit von Simulationsergebnissen zwischen den Programmen.

Die verwendeten Algorithmen weisen deutliche Unterschiede in der Verzugsberechnung auf. Vollständig kann an dieser Stelle nicht auf die Lösungsstrategien eingegangen werden, da diese geschütztes Eigentum der Hersteller sind. Unterschiede sind jedoch klar im Bereich Meshing zu sehen. Siemens verwendet ein klassisches, aber konturangepasstes finite Tetraeder-Elemente-Netz. Dies ermöglicht eine feinere Auflösung der Geometrie als die von der anderen Software (z.B. Ansys Additive) verwendeten Voxel-Ansätze.

5.3 Simulationsbenchmark

Neben den Cantilevern und der Siemens Kalibrationsgeometrie wird im Simulationsbenchmark eine dünnwandige rotationssymmetrische (90°) zylinderartige Geometrie gefertigt (IN718), vermessen und mit den drei Softwarelösungen simuliert. Durch die L-PBF Fertigung entsteht bei der Geometrie ein Verzug (Schrumpfung) im oberen Bauteilbereich, woher der Name „Schrumpfring“ rührt, siehe Abbildung 15.

Die erreichte Genauigkeit der Verzugssimulation (Abweichung zur gefertigten Geometrie) sowie die Rechenzeiten und die in der Software verwendeten bleibenden Dehnungen zur Berechnung sind in Tabelle 3

angegeben. Um die Übertragbarkeit zu prüfen, wurde mit drei unterschiedlichen Elementgrößen gerechnet und die bleibenden Dehnungen jeweils vorgegeben. Der Verzug ist an der Oberkante (Bereich mit dem größten Verzug) gemessen. Die erzielten Ergebnisse liegen unabhängig von der zur Berechnung verwendeten Software in derselben Größenordnung und relativ nah (~60 µm) aneinander. Mit steigender Auflösung (feineres Netz) wird die Abweichung geringer. Die Rechenzeiten weisen, gerade für die hochauflösten Simulationen teils erhebliche Unterschiede auf. Das verwendete linear-elastische Modell ist, zur Gewährleistung der Übertragbarkeit, der kleinste gemeinsame Nenner in den Programmen: ein linear elastisches isotropes Modell für bleibende Dehnungen.

Nach Kalibration jeder Software mit ihrem spezifischen Kalibrationsverfahren für das „beste“ Modell (inklusive thermischer Berechnung) und anschließender Berechnung des Schrumpfrings (SOLL-IST-Simulation Abgleich) ist folgendes Ergebnis festzuhalten:

- IST Verzug: 0,56 mm
- ANSYS Additive (Thermal Strain): 0,25 mm
- Siemens NX (Stiffness dependent α): 0,26 mm

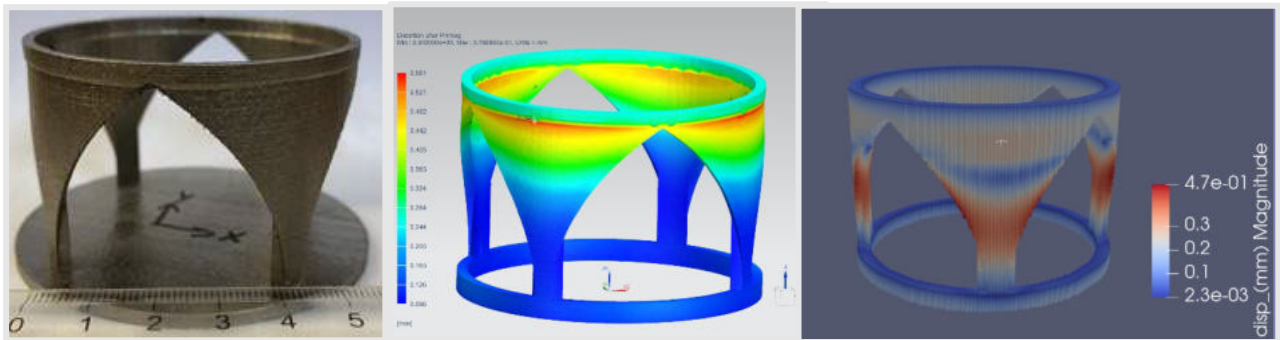


Abbildung 15: Im Simulationsbenchmark verwendete Geometrie: Schrumpfring; Links: Geometrie nach additiver Fertigung; Mitte: Siemens NX Simulation mit konturnaher Vernetzung; Rechts: Voxelbasierte Darstellung des Verzugs berechnet mit ANSYS Additive

Beim Schrumpfring sind die Berechnungen relativ ungenau, denn es entsteht eine „Schrumpflippe“ beim Zusammenschluss der vier Säulenartigen Strukturen. Dieser Effekt wird einzig bei der Berechnung mittels Siemens NX abgebildet, da dort für jede numerische Schicht ein steifigkeitsabhängiger Ausdehnungskoeffizient berechnet wird. Dadurch kann der Schrumpfung im oberen Bereich überhaupt wiedergegeben werden. Weder die Simufact- noch Ansys-Lösung sind durch die Formulierung ihrer thermo-mechanischen Modelle dazu in der Lage. Die ausgewählte Testgeometrie ist jedoch nicht repräsentativ, um einen Rückschluss auf alle in der Additiven Fertigung relevanten Fälle zuzulassen.

5.4 CAD Vorverformung (Pre-Deformation)

Im folgenden Abschnitt wird exemplarisch auf die Simulation der Siemens Energy Vane, einen der vier IDEA Demonstratoren und die Verzugskompensation auf Basis der Simulationsdaten eingegangen. Der verwendete Parametersatz zur Fertigung ist der EOS Standardparameter für das verwendete Material Inconel 718. Das Bauteil wird auf der Bauplatte nach Fertigstellung und Abkühlung mit einem Streifenlichtscanner (GOM ATOS Blue Light Scan) eingescannt und mit dem simulierten, verformten Bauteil in Form eines Best-Fits in der Software GOM-Inspect verglichen, siehe Abbildung 16. Die größte Abweichung

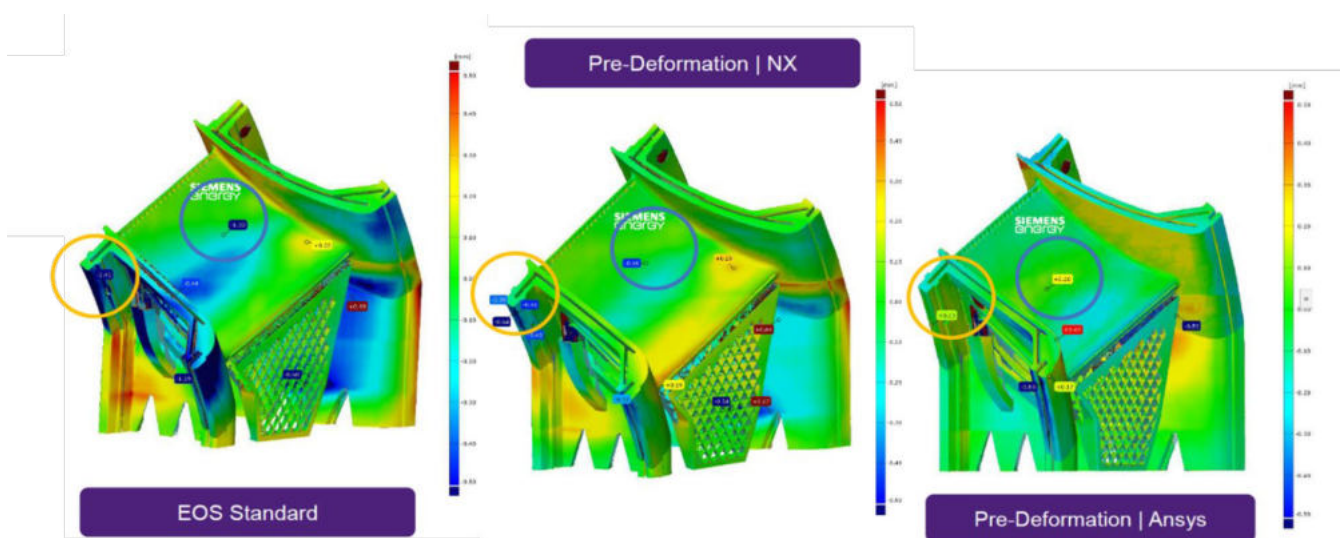


Abbildung 16: Links: Bauteilverzug ohne Kompensation Mitte: Bauteilverzug mit Siemens NX Kompensation, Rechts: Bauteilverzug mit ANSYS Kompensation. Skala +0,5 mm (rot) bis -0,5 mm (blau).

zwischen Verzugsvorhersage und auftretendem Verzug beträgt 0,36 mm bis hin zu 0,42 mm (je nach Software). Der bei der Fertigung auftretende maximale Verzug beträgt ~1,5 mm (siehe Abbildung 16 links). Besonders im Bereich von dünnwandigen Strukturen kommt es zu Verformungsmechanismen, die wie zu erwarten, nicht durch den Ansatz der bleibenden Dehnungen abgebildet werden können.

Im Allgemeinen werden jedoch große Bauteilbereiche sehr genau (Abweichung < 0,1 mm) vorhergesagt. Auf Basis der durchgeführten Simulationen kann die originale Geometrie nun so verzogen werden, dass der im Prozess entstehende Verzug größtenteils kompensiert wird. Je genauer die Simulation ist, desto besser kann der Verzug kompensiert werden. Die Methode der Kompensation kann im Allgemeinen auch auf Basis von experimentell bestimmten Verzugswerten (3D-Scan) basieren. In Abbildung 16 ist der Bauteilverzug ohne Kompensation (links) und der entstandene Bauteilverzug mit Kompensation durch Siemens NX (mittig) und ANSYS Additive (rechts) auf Basis der jeweiligen Simulationsdaten dargestellt. Zur Analyse wurden zwei Bauteilregionen 1) „Passgeometrie“ und 2) „dünnwandiger Support“ ausgewählt, durch den orangen bzw. blauen Kreis in Abbildung 16 gekennzeichnet. Durch die Kompensation kann der Verzug drastisch reduziert werden. Region 1 (orange) von -1,41 mm auf -0,46 mm bzw. -0,13 mm und in Region 2 (blau) von -1,32 mm auf -0,45 mm bzw. -0,20 mm für Siemens NX respektive ANSYS Mechanical. Der entstehende Bauteilverzug kann durch die Anwendung von Simulationsbasierten Kompensationsmethoden um bis zu 90% (in den Bereichen des größten Verzugs) reduziert werden, ohne, dass dabei in anderen Bereichen mehr Verzug entsteht. Das genaue Ausmaß des Potentials der Verzugskompensation durch Pre-Deformation der Originalgeometrie ist Teil aktuell laufender Untersuchungen: Das Ziel ist es Stützstrukturen einzusparen und den dadurch erhöhten Bauteilverzug durch die vorgestellte Methode zu reduzieren. Dies hat eine erhöhte Produktivität und einfachere Nachbearbeitung bei gleichbleibender Bauteilqualität zur Folge. Auf Grund der stetigen Weiterentwicklung und Verbesserungen

der Software, stellt diese Untersuchung nur einen einzelnen Messpunkt dar. Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der einzelnen Software sind nur bedingt möglich.

5.5 Fazit

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden weitere Geometrien respektive Bauteile untersucht. Die Programme sind alle dafür geeignet, den qualitativen Verzug schnell vorherzusagen. Je filigraner, bzw. dünnwandiger ein Bauteil ist, desto schwieriger wird eine quantitative, akkurate Vorhersage. Mit den weiterentwickelten Modellen (Berücksichtigung des Temperaturverlaufs und des schichtweisen Aufbauprozesses) ist die Verzugsvorhersage bis zu einer maximalen Abweichung von ~30 % genau. Dies ist ausreichend um durch Vorverformung den Verzug signifikant (~66 %) zu reduzieren.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass das Konzept der Pilotlinie mit der räumlichen Nähe und Konzentration von vielfältigem Know-how und Maschinen als zielführend anzusehen ist, um die Komplexität der Industrialisierung mit allen Chancen und Risiken zu begreifen.

6 3D-Digitalisierung von Bauteilen mittels optischer Messtechnik

Um die Linienintegration additiver Fertigungsverfahren und die dadurch ermöglichte effiziente Herstellung von hochindividualisierten Produkten zu realisieren, ist die stetige Kenntnis über den aktuellen Zustand der Geometrie der additiv gefertigten Bauteile und die Änderung dieser entlang der Prozesskette entscheidend. Aufgrund unzureichend bekannter Einflüsse von Prozessparametern oder nicht kontrollierbarer Abweichungen innerhalb der einzelnen Prozessschritte, kann die tatsächliche Geometrie der additiv gefertigten Bauteile von der festgelegten Soll-Geometrie abweichen. Da die Einflüsse der einzelnen Prozessschritte auf die Bauteile bei derzeitigem Stand der Technik nicht vollständig vorhersagbar sind, ist eine Digitalisierung der Bauteile mittels zerstörungsfreier Messtechnik notwendig. Eine optische Digitalisierung zwischen den einzelnen Prozessschritten ermöglicht eine zerstörungsfreie und zeiteffiziente Aufnahme des Produktzustands zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Herstellungszyklus. Diese vollständige Nachverfolgbarkeit der Produkte innerhalb der Fertigungskette stellt die Grundlage für eine moderne prozessübergreifende Qualitätssicherung dar. Um die Anwendbarkeit von optischen Messsystemen für die Qualitätssicherung zu prüfen, wurde die Eignung des Streifenlichtmessverfahrens für die geometrische Prüfung von additiv gefertigten Bauteilen untersucht. Dazu wurde unter anderem der Einsatz unterschiedlicher Antireflexionssprays zur Unterbindung von Reflexionen bei Streifenlichtmessungen analysiert. Im Sinne der vollständigen Linienintegration wurde weiterhin ein Konzept zur effizienten Einbindung der optischen Digitalisierung in die Prozesskette entwickelt und erprobt. Dabei konnte durch eine Knickarmroboter-basierte Bauteilhandhabung der manuelle Aufwand bei der Streifenlichtmessung reduziert werden. Um die Anwendbarkeit der erzeugten Messdaten für die weitere Prozesskette sicher-

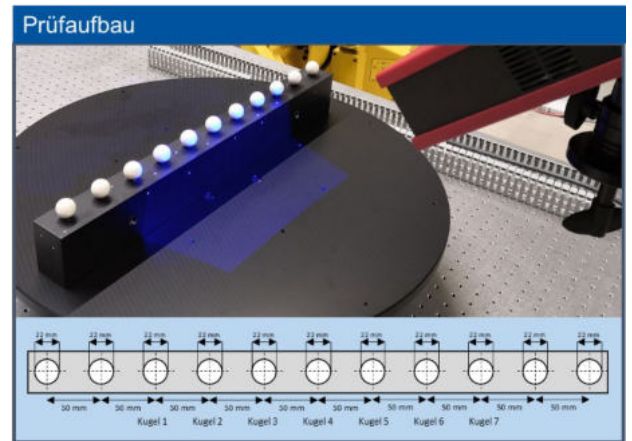


Abbildung 17: Prüfaufbau einer Messsystemanalyse eines Streifenlichtscanners mittels Kugelbalken.

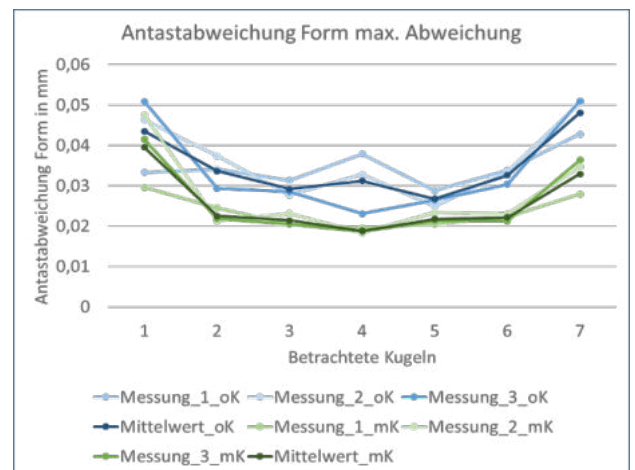


Abbildung 18: Auswertung des Merkmals „Antastabweichung Form“.

blau: 30 Tage nach Kalibrierung

grün: Kalibrierung kurz vor der Messung

zustellen, wurden schließlich Verfahren zur Registrierung der 3D Messdaten in andere Koordinatensysteme evaluiert.

6.1 Qualifizierung von optischen Messsystemen

Ein ATOS Core™ 300 Streifenlichtscanner der Firma GOM wurde in Anlehnung an eine Studie durch MENDŘICKÝ [2] basierend auf der VDI/VDE 2634 [3] Richtlinie für die Annahmepfung von „bildgebende[n] Systeme[n] mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten“ anhand einer ausgiebigen Messsystemanalyse qualifiziert. Für diese Untersuchung wurde ein Kugelbalken, bestehend aus 10 keramischen Hochpräzisionskugeln, angebracht auf einem Profil aus Faserverbundkunststoff, als Kalibriernormal verwendet (Abbildung 17).

Der geringe Temperaturexpansionskoeffizient dieser Werkstoffe minimiert Fehlereinflüsse, welche durch eine Messung desselben Prüfkörpers bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen entstehen könnten. Diese Eigenschaft war von Relevanz, da die taktile Referenzmessung auf einem Koordinatenmessgerät in einem temperierten Messraum durchgeführt wurde, die Messungen mit dem Streifenlichtscanner hingegen in einer offenen Halle, welche abhängig von der Jahres- und Tageszeit Temperaturunterschieden von mehreren Grad Celsius unterliegen kann. Außerdem wurde dasselbe Kalibriernormal verwendet, um die Antastgenauigkeit einer taktilen Messung auf einer Werkzeugmaschine, deren Erwärmung im laufenden Betrieb einen deutlichen Einfluss auf die Messung von Prüfkörpern mit einer höheren Temperaturabhängigkeit hätte, zu charakterisieren. Für die Messsystemanalyse des Streifenlichtscanners wurden zwei Messreihen, eine direkt im Anschluss an eine vom Messsystemhersteller empfohlene Kalibrieroutine und eine 30 Tage nach der Kalibrierung, bestehend aus jeweils drei Messungen mit unterschiedlicher Positionierung des Streifenlichtscanners durchgeführt. Pro Messung wurden 10 Aufnahmen aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen, dabei wurde das Stativ, auf welchem der Streifenlichtscanner montiert ist, nicht bewegt, der Streifenlichtscanner wurde allerdings um die Achse

der Blickrichtung verkippt. Zusätzlich wurde das Kalibriernormal um seine vertikale Achse durch einen elektrisch angetriebenen Drehtisch rotiert. Für die Analyse wurden die vier, in VDI/VDE 2634 definierten Merkmale „Antastabweichung Form“, „Antastabweichung Maß“, „Kugelabstandsabweichung“ und „Längenmessabweichung“ verwendet. Diese Merkmale lassen sich mittels einer Annäherung der gemessenen Kugeloberflächen durch Regelgeometrien bestimmen. Die Auswertung der einzelnen Messreihen lässt eine Zunahme der Abweichung zwischen taktile Referenzmessung und optischer Messung mit wachsendem Abstand zum Zentrum des Messbereichs des Streifenlichtscanners erkennen (Abbildung 18).

Ein Vergleich beider Messreihen macht deutlich, dass dieser Trend durch eine zeitnahe Kalibrierung reduziert werden kann. Allgemein sind deutlich geringere Abweichungen zur Referenzmessung bei der kalibrierten Messreihe zu erkennen. Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Empfehlungen für die optische Digitalisierung von additiv gefertigten Bauteilen mit Streifenlichtscannern ableiten. Zum einen sollte das Messsystem mindestens einmal in der Woche, bei häufigem Gebrauch bis zu einmal am Tag kalibriert werden. Zum anderen sollte ein Messsystem ausgewählt werden, dessen Messvolumen ungefähr der Größe der zu messenden Bauteile entspricht. Messsysteme mit kleineren Messvolumina ermöglichen zwar in der Regel höhere Auflösungen und geringere minimale Messunsicherheiten, jedoch müssen Bauteile, die das Messvolumen übertreffen durch eine Zusammensetzung mehrerer Aufnahmen gemessen werden. Dadurch nimmt der Einfluss der höheren Messabweichung in den Randbereichen des Messvolumens zu. Zwar wäre es möglich mehrere Messungen, welche jeweils einen anderen Bereich des Bauteils im Zentrum des Messvolumens betrachten, zu kombinieren, diese Fusion ist allerdings mit weiteren Fehlern behaftet, welche mit der Länge der Kette an Messungen zunehmen. Des Weiteren erhöht sich durch diese zusätzlichen Messungen der Messaufwand und die Dauer der Messung deutlich. Ein Messsystem mit einem großen Messvolumen bietet eine große Flexibilität bei der Auswahl der zu messenden

Tabelle 4: Parameterauswahl für die Untersuchung des Einflusses von Reflexionen bei optischen Messungen mit einem ATOS III Streifenlichtscanner.

Scan	1	2	3	4	5	6
Antireflexions-spray	Nein	Nein	Nein	DIFFU-THERM	AESUB white	AESUB blue
Reflexions-erkennung	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Scanqualität	Hohe Qualität, volle Auflösung	Hohe Qualität, volle Auflösung	Hohe Qualität, volle Auflösung	Hohe Qualität, volle Auflösung	Hohe Qualität, volle Auflösung	Hohe Qualität, volle Auflösung
Eingestellte Belichtungszeit	3 ms	3 ms	3 ms	10 ms	10 ms	10 ms
	9 ms	9 ms	9 ms	30 ms	30 ms	30 ms
	27 ms	27 ms	27 ms	90 ms	90 ms	90 ms

Bauteile, jedoch bei einer geringeren Auflösung und größeren Messunsicherheit der einzelnen Messpunkte. Durch den größeren Abstand zwischen den zwei Kameras und dem Streifenlichtprojektor wird es außerdem erschwert, feine Details der Bauteilgeometrie und insbesondere Hinterschneidungen zu erfassen. Generell zeigen diese Ergebnisse der Messsystemanalyse und die dabei gesammelten Erfahrungen bei der Verwendung des Messsystems, dass das Streifenlichtverfahren ein Messverfahren darstellt, das in der Qualitätssicherung von additiv gefertigten Produkten eine vielseitige Anwendung finden kann. Insbesondere die große Dichte an Messpunkten bietet für komplexe Bauteilgeometrien, welche in der additiven Fertigung häufigen vorkommen, gegenüber den klassischen, taktilen Messverfahren einen deutlichen Vorteil. Die Einsparung von Messdauer- und Aufwand geht allerdings aktuell noch mit Einbußen in der Messauflösung und –Unsicherheit einher. Je nach Anforderungen und Bauteilgeometrie sind somit in den meisten Fällen weitere Messverfahren für eine vollständige Qualitätssicherung von additiv gefertigten Produkten von Nöten.

6.2 Untersuchung verschiedener Antireflexions-sprays zur Reduktion von Reflexionen bei optischen Messungen

Aufgrund von Reflexionen stellen Bauteile mit glatten metallischen Oberflächen eine Herausforderung für optische Messsysteme dar. Um die negativen Einflüsse von Reflexionen zu reduzieren, kann die Bauteiloberfläche mit einem mattierenden Antireflexions-spray eingesprüht werden. Im Folgenden wird die Fähigkeit unterschiedlicher Antireflexions-sprays zur Reduktion von Messfehlern aufgrund von Reflexionen bei optischen Messungen mit einem ATOS III Streifenlichtscanner der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH untersucht.

Für diese Studie wurde ein Scan ohne Antireflexions-spray (1), ein Scan ohne Antireflexions-spray mit aktiver Reflexionserkennung (2), ein Scan ohne Antireflexions-spray mit den Einstellungen „schnelles Scannen“ und „mehr Punkte“ (3) und jeweils ein Scan mit dem Antireflexions-spray „DIFFU-THERM“ (4), „AESUB white“ (5) und „AESUB blue“ (6) durchgeführt. Die verwendeten Einstellungen in der zur Mes-

sung verwendeten ATOS Professional Software werden in Tabelle 4 aufgeführt. Pro Scannerpose wurden jeweils drei Bilder aufgenommen.

Die Messdauer der Scans mit Standardeinstellungen betrug jeweils ca. 14 Minuten. Während dieser Zeit wurden Photogrammetrie und Streifenprojektion durchgeführt. Die Messdauer des Scans mit Reflexionserkennung beträgt ca. 52 Minuten. Der Scan mit den Einstellungen „Schnelles Scannen“ und „Mehr Punkte“ benötigte ca. 11 Minuten.

Ohne Verwendung eines Antireflexionssprays, war eine stark reflektierende Oberfläche des Bauteils erkennbar. Bei Verwendung von „DIFFU-THERM“ Spray war die Oberfläche des Aluminiumkörpers an keiner Stelle mehr sichtbar. Die Verwendung des Sprays „AESUB white“ führte zu einer bleibenden Überdeckung trotz derer noch die Oberfläche des Aluminiumkörpers sichtbar war. „AESUB blue“ begann sofort nach dem Auftragen zu verfliegen, sodass nach ca. fünf Minuten das Spray an einigen Stellen keine Überdeckung mehr lieferte. Während des Scans verflieg das Spray noch weiter, sodass nach Abschluss des Scans überwiegend keine Überdeckung vorlag. Um die mit Spray versehene Oberfläche nicht zu beschädigen, wurde der Referenzkörper beim Auftragen des Sprays an einem Spannklotz an der Unterseite gehalten. In Abbildung 19 ist das untersuchte Bauteil in den unterschiedlichen Zuständen dargestellt.

Abbildung 20 zeigt die generierten Netze aller Messungen. Bei Scan (1) mit Standardparametern und ohne Antireflexionsspray ist erkennbar, dass sowohl an Kanten und Ecken als auch in Bohrungen größere Fehlstellen auftreten. Ähnliche Fehler treten auch bei Scan (2) mit Reflexionserkennung, Scan (3) mit den Einstellungen „Schnelles Scannen“ und „Mehr Punkte“ und Scan (6) mit dem Antireflexionsspray „AESUB blue“ auf. Bei allen Scans wird die Querbohrung nur einige Zentimeter tief abgebildet. Scan (1) und Scan (3) weisen deutliche Oberflächenverwerfungen auf. Es wird vermutet, dass dies ebenfalls auf Reflexionen am Bauteil zurückzuführen ist. Die detailliertesten und glattesten Oberflächen werden mit den Antireflexionssprays „DIFFU-THERM“ (4) und „AESUB white“ (5) erzielt. Der Scan mit „DIFFU-

THERM“ (4) bildet innere Geometrien besser ab als der Scan mit „AESUB white“ (5). Es wird vermutet, dass „AESUB blue“ (6) keine vergleichbaren Ergebnisse liefert, da es zum Zeitpunkt des Scans bereits teilweise verfliegen war. Weiterhin wird vermutet, dass Fehlstellen aufgrund von Reflexionen auftreten. An den Kanten zwischen Zylinder und Grundkörper wird von zwei Seiten Licht reflektiert. Ebenso treten in den Bohrungen der Zylinder und in der Querbohrung Reflexionen von mehreren Seiten auf.

Die Gegenüberstellung des Scans ohne Antireflexionsspray und den Scans mit Antireflexionsspray zeigt, dass der Einsatz von Antireflexionsspray zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächenerfassung an reflektierenden Messobjekten führt. Die Auswertung der Messungen des Hohlzylinders ergibt keinen erkennbaren systematischen Einfluss des Auftrags einer Antireflexionschicht auf das Messergebnis. Das Messergebnis weicht durch den Einsatz von Antireflexionsspray nicht systematisch von den Referenzwerten ab.

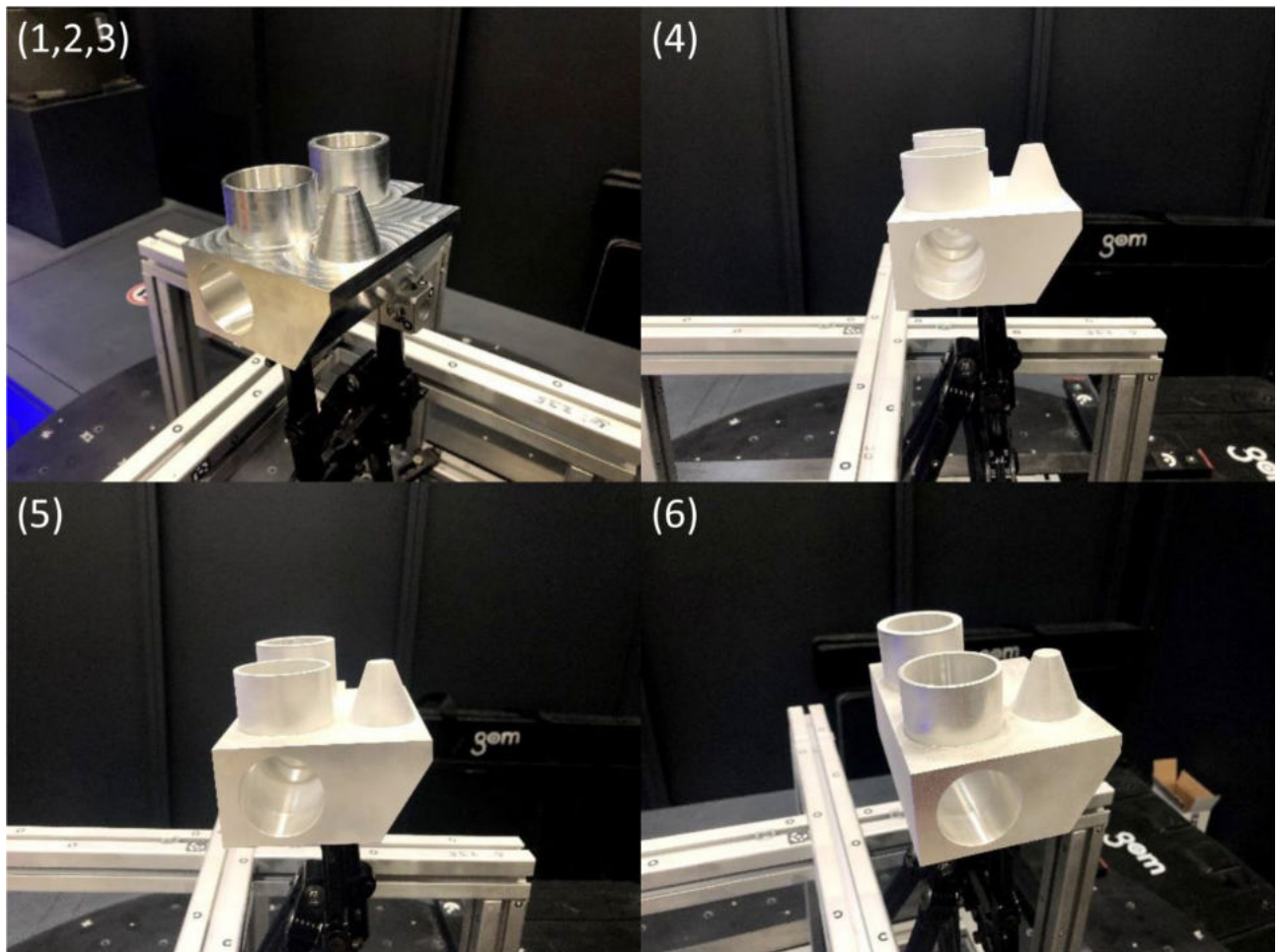


Abbildung 19: Reflektierendes Bauteil zur Untersuchung des Einflusses von Antireflexionsspray auf Streifenlichtmessungen.

(1,2,3) ohne Antireflexionsspray, (4) Antireflexionsspray „DIFFU-THERM“,
 (5) Antireflexionsspray „AESUB white“, (6) Antireflexionsspray „AESUB blue“

Die Auswertung der Scans mit den Einstellungen „Reflektionserkennung“ und „Schneller Scan / Mehr Punkte“ zeigt in Bohrungen und an Kanten große Fehlstellen in der erfassten Oberfläche. Die Scans mit den nicht verfliegenden Antireflexionssprays weisen diese Fehlstellen nicht auf. Durch die Fehlstellen ist die Aussagekraft der Scandaten gemindert. Folglich wird empfohlen Antireflexionsspray gegenüber den Einstellungen „Reflektionserkennung“ und „Schneller Scan / Mehr Punkte“ zu bevorzugen.

Bei einer Gegenüberstellung der Scans mit unterschiedlichen Antireflexionssprays weist der Scan mit dem verfliegenden Antireflexionsspray „AESUB blue“ eine deutlich schlechtere Oberflächenabbildung auf, als die Scans mit nicht verfliegendem Antireflexionsspray. Verfliegende Antireflexionssprays mit an die Messdauer angepassten Sublimationszeiten könnten

die beschriebenen Probleme bei der Oberflächenmessung reduzieren, wurden im Rahmen der dargestellten Studie jedoch nicht untersucht. Wenn Antireflexionssprays eingesetzt werden, wird entsprechend die Verwendung nicht verfliegender Antireflexionssprays empfohlen. Dabei haben sich die Antireflexionssprays „DIFFU-THERM“ und „AESUB white“ bewährt.

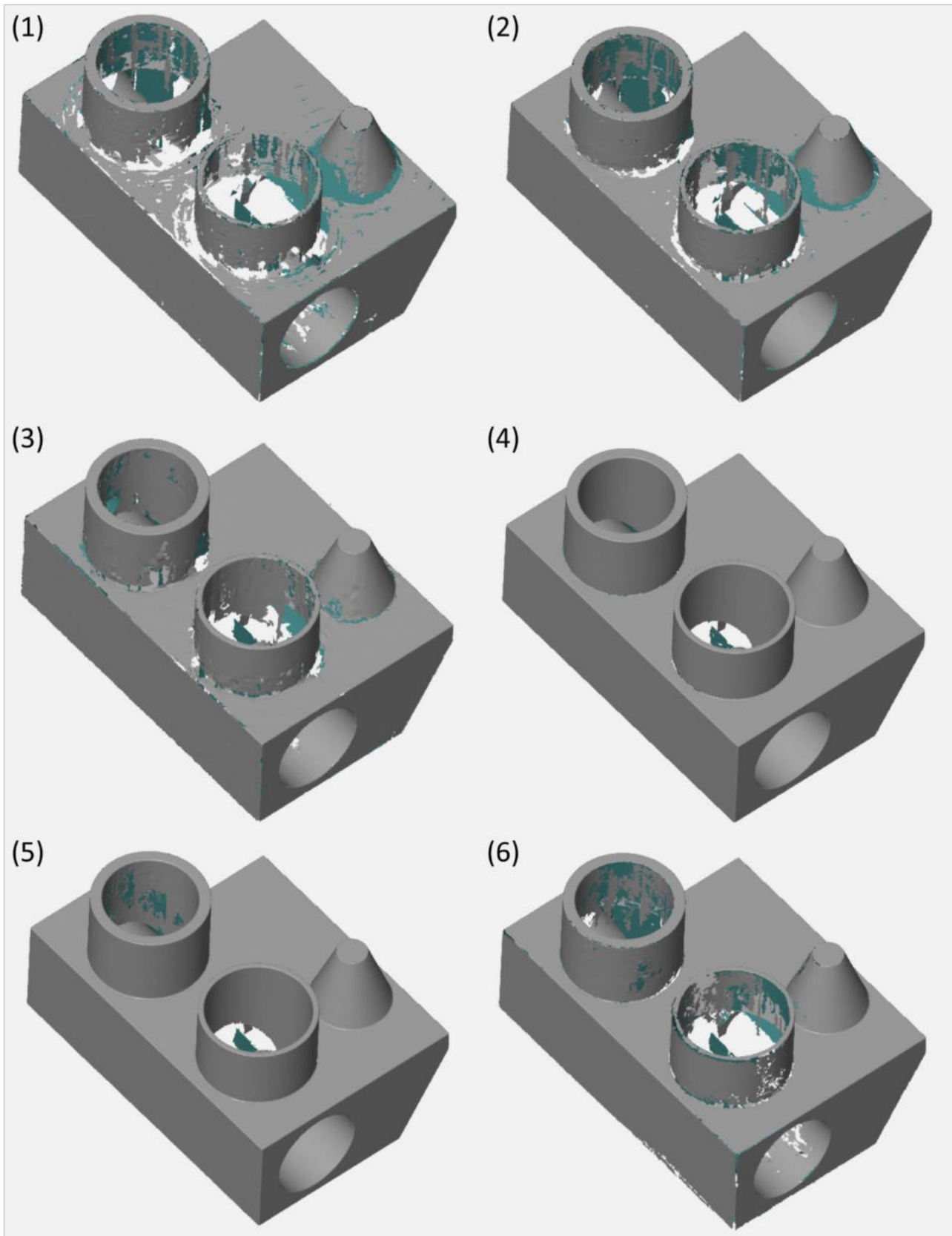


Abbildung 20: Messergebnisse zur Untersuchung des Einflusses von Kontrastspray auf Streifenlichtmessungen. (1) ohne Kontrastmittel, (2) ohne Kontrastmittel mit softwareseitig aktiver Reflexionserkennung, (3) ohne Kontrastmittel mit den Einstellungen „schnelles Scannen“ und „mehr Punkte“, (4) Kontrastmittel „DIFFU-THERM“, (5) Kontrastmittel „AESUB white“, (6) Kontrastmittel „AESUB blue“

6.3 Automatisierung von optischen Messsystemen

Um manuelle Prozessschritte in der Qualitätssicherung von additiv gefertigten Bauteilen zu reduzieren, wurden Methoden zur Automatisierung der optischen Digitalisierung durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Messzelle zur Roboter-gestützten Streifenlichtmessung umgesetzt. Diese *MV4Automation* („Machine Vision für die Automatisierung“) genannte Messzelle besteht aus zwei industriellen Knickarm-Robotern (im Folgenden als *Roboter* vereinfacht), einem optischen Tisch mit Innengewinden zur Befestigung von optischen Komponenten, einem Drehtisch und einem Streifenlichtprojektor und ist in Abbildung 21 dargestellt. Diese Konfiguration ermöglicht neben der semiautomatischen optischen Digitalisierung von Bauteilen unter Verwendung eines Drehtischs, die Untersuchung von Methoden zur vollautomatischen, Roboter-gestützten optischen Digitalisierung. Die Positionierung der beiden Roboter wurde so gewählt, dass diese in der Lage sind Bauteile, welche auf oder neben dem Drehtisch platziert wurden zu greifen und diese im Messvolumen des

Streifenlichtscanners zu positionieren. Durch die Überschneidung beider Arbeitsbereiche ist es des Weiteren möglich, Ansätze zur Kollaboration von Robotern zu erproben. Zusätzlich wird durch die Platzierung der gesamten Messzelle innerhalb eines weitläufigen Bereichs für mobile Robotik eine Schnittstelle für eine zukünftige Anbindung an übergreifende Automatisierungskonzepte geboten. Der konzeptionierte Prozessablauf der *MV4Automation*-Zelle ist zusammen mit Lösungsansätzen für die einzelnen Prozessschritte in Abbildung 22 dargestellt. Grundsätzlich kann in der verketteten additiven Fertigung davon ausgegangen werden, dass eine digitale Repräsentation der Soll-Geometrie der zu fertigenden Bauteile in Form einer CAD-Datei (Computer Aided Design) vorliegt. Damit diese Daten für die Messung genutzt werden können, muss bekannt sein, welches Bauteil digitalisiert werden soll. In einer vollständig verketteten Produktion sollte jederzeit bekannt sein wo sich welches Produkt befindet. Da die *MV4Automation*-Zelle allerdings einen gekapselten Prozess darstellt, muss jedes Bauteil, das zur Digitalisierung auf dem optischen Tisch platziert wird, identifiziert

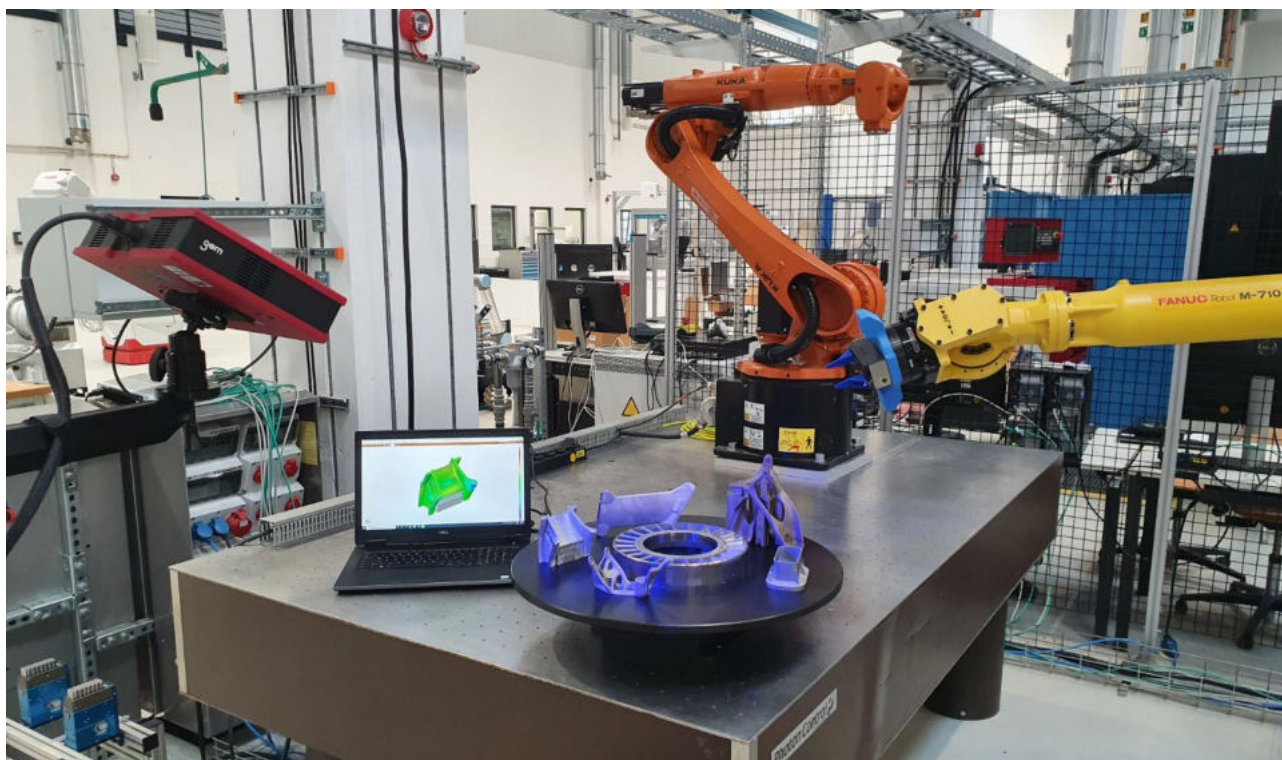


Abbildung 21: Messzelle zur Roboter-gestützten optischen Digitalisierung von additiv gefertigten Bauteilen in der neu errichteten WZL-Maschinenhalle.

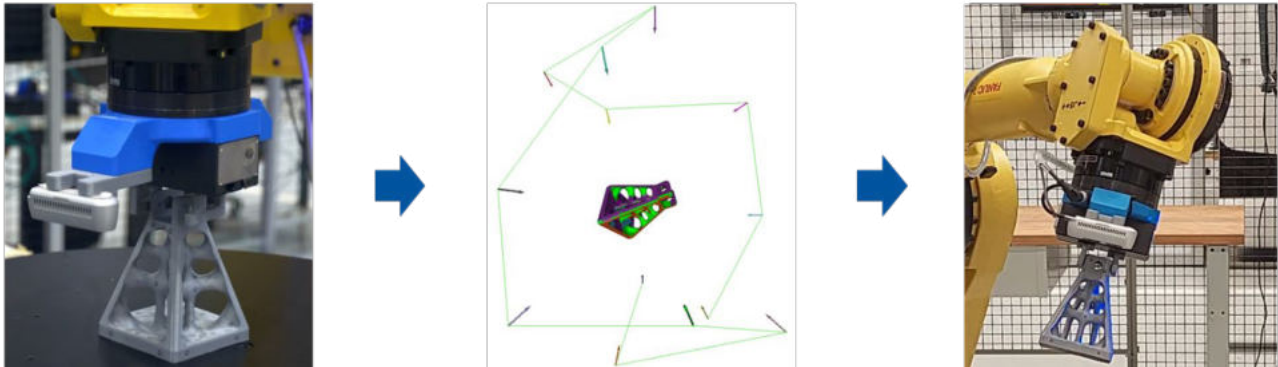
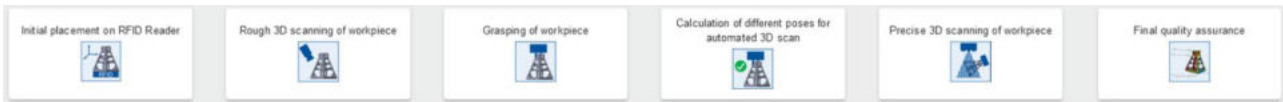
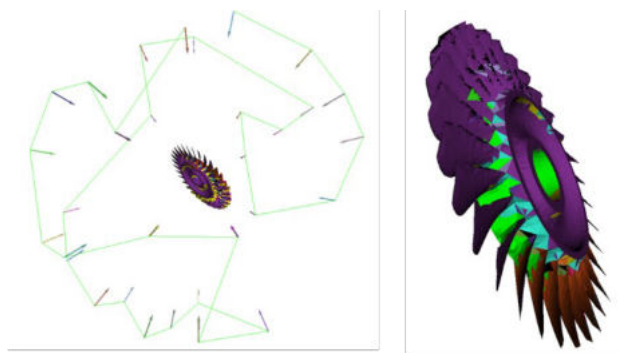


Abbildung 22: Übersicht des Prozessablaufs zur Roboter-gestützten optischen Digitalisierung in der MV4Automation Messzelle.

werden. Dies kann entweder durch eine manuelle Eingabe geschehen oder zum Beispiel durch die Verwendung von RFID-Tags (engl., radio-frequency identification). In diesen kann eine eindeutige Produkt-ID hinterlegt werden, welche kontaktlos durch einen RFID-Lesegerät ausgelesen werden kann. Sobald das zu messende Bauteil identifiziert wurde, kann die zugrundeliegende Soll-Geometrie im Rahmen der automatisierten optischen Digitalisierung genutzt werden, um den Roboter-basierten Handhabungsprozess zu planen. Dieser unterteilt sich grob in zwei Teilaufgaben: Zunächst wird das Bauteil durch ein geeignetes Greifersystem am Roboter fixiert, daraufhin wird das Bauteil mit Hilfe des Roboters in einer Art und Weise im Messvolumen des Streifenlichtscanners positioniert, welche eine vollständige Digitalisierung der Bauteiloberfläche ermöglicht. Dazu muss das Bauteil aus mehreren Blickwinkeln optisch erfasst werden. Entgegen des häufig verwendeten Ansatzes eines Roboter-geführten Messsystems, wird in dem hier untersuchten Konzept ein statischer Sensor verwendet. Stattdessen wird das Bauteil durch den Roboter geführt und in unterschiedlichen Posen im Messvolumen positioniert, während dieses weiterhin durch den Roboter gegriffen wird. Nachdem das Bauteil, wie in 11.3 beschrieben, gegriffen wurde, muss dieses durch den Roboter im Arbeitsbereich des Streifenlichtsensors platziert wer-

den. Die notwendigen Posen für eine möglichst vollständige optische Digitalisierung werden auf Basis eines digitalen Modells der Bauteilgeometrie bestimmt. Das entwickelte Verfahren basiert auf Methoden zur Blickwinkelbestimmung bei der Messung mit beweglichen Messsystemen, welche in der wissenschaftlichen Literatur unter dem Begriff „View Planning“ zusammengefasst werden. In einer Literaturrecherche wurden diverse bestehende Methoden untersucht und auf Basis ihrer Stärken und Schwächen bewertet.

Da keiner der gefundenen Ansätze die zuvor gestellten Anforderungen vollständig erfüllen konnte, wurde ein Verfahren implementiert, welches unterschiedliche Ansätze kombiniert und diese um zusätzliche



31 Viewpoints
 Coverage: 99.74 %
 Planning time: 120 seconds

Abbildung 23: Ergebnis einer Modell-basierten Bestimmung von Kameraposen.

Methoden erweitert. Dabei werden zunächst virtuelle Kamerapositionen auf einer Kugel um ein STL Modell des zu messenden Bauteils generiert. Nachdem bestimmt wurde, welche Facetten (die Dreiecke aus denen das 3D-Gitter zusammengesetzt ist) jeweils durch diese Kameraposen erfasst werden können, werden alle Kameraposen aussortiert, welche gegenüber dem Rest der Kameraposen keine neuen Informationen liefern können. Für den Fall, dass Facetten existieren, welche durch keine der bestehenden Kameraposen erfasst werden, werden weitere Kameraposen generiert. Abschließend wird ein Pfad berechnet, welcher alle Kameraposen auf dem kürzesten Wege verbindet.

In Abbildung 23 wird ein resultierender Pfad dargestellt. Die Einfärbung der Oberflächendreiecke entspricht den, in der linken Hälfte als Pfeile dargestellten, zugehörigen Kameraposen. Das Verfahren wurde auf der MATADOR 21 Konferenz einem internationalen Fachpublikum vorgestellt und ist in dem zugehörigen Tagungsband publiziert [4].

6.4 Nutzung von optischen Messdaten für die Prozessplanung

Die In-Prozess-Messung von Bauteilen ist eine anspruchsvolle Aufgabe innerhalb der Produktionskette. Messungen auf einer Werkzeugmaschine mit einem taktilen Messsystem sind vergleichsweise zeitintensiv bei geringer Punktdichte, während ein Linienscanner aufgrund von Zugänglichkeit, Oberflächeneigenschaften und notwendiger Kalibrierung möglicherweise nicht die gewünschte Genauigkeit liefert.

Um dennoch eine effiziente Bearbeitung von Bauteilen auf Basis der jeweiligen Ist-Geometrie anstelle der erwarteten Soll-Geometrie durchzuführen, bietet es sich an, anderweitig, unter besseren Bedingungen durchgeführte Messungen (z.B. durch Streifenlichtprojektion) zu verwenden. Um diese Messdaten zu nutzen, wird das Bauteil in der Bearbeitungsmaschine mit einem Messtaster an wenigen Punkten taktil gemessen, um eine Referenzierung der Messdaten, d.h. eine Überlagerung der neuen Messpunkte

mit den bereits bestehenden Messdaten zu ermöglichen. Die Herausforderung besteht hier vor allem darin, die Koordinatensysteme automatisch aufeinander auszurichten, also die affine Transformation zwischen der optischen externen Messung und der taktilen maschinenintegrierten Messung zu finden.

Für diese sogenannte Punktsatzregistrierung sind verschiedene Algorithmen im Stand der Technik bekannt, welche in lokale und globale Algorithmen unterteilt werden können. Die lokalen Algorithmen funktionieren, wenn die Transformation zwischen den beiden Punktmengen klein ist, während globalen Algorithmen keine solche Einschränkung haben.

6.4.1 Lokale Registrierung

Der gebräuchlichste Algorithmus für die lokale Registrierung ist der Algorithmus „Iterative Closest Point“ (ICP, engl. „iterativer nächster Punkt“). Für den ICP-Algorithmus wird zunächst eine anfängliche Vermutung über die Transformation zwischen den zwei Punktmengen (als Quelle und Referenz bezeichnet) benötigt. Daraufhin werden iterativ, d.h. wiederholend bis eine geeignete Lösung gefunden wird, die folgenden drei Schritte durchgeführt:

1. Finde für jeden Punkt in der Quelle den nächstgelegenen Punkt in der Referenz.
2. Aktualisiere die Lösung, um ein gewisses Maß an Fehlern zu minimieren.
3. Wende die aktualisierte Lösung auf die Referenz an.

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit des ICP-Algorithmus auf die dargestellte Problemstellung untersucht.

Um die Stabilität des Algorithmus zu quantifizieren, werden auf künstlichen Messdaten unterschiedliche Messpunktverteilungen auf der Bauteiloberfläche

Tabelle 5: Evaluierung des ICP-Algorithmus anhand künstlicher Messdaten mit unterschiedlicher Verteilung von Antastpunkten auf der Bauteiloberfläche und verschiedenen initialen Transformationen.

Anzahl Punkte		Abweichungen, Chaos						
		Transformation						
		klein			mittel			groß
Punkt Verteilung		Translation	Rotation	Kombi	Translation	Rotation	Kombi	Kombi
	Ecken 4	0	0	0	0	0	0	0
	Ecken 12	0	0	0	0	0	0	0
	Ecken 24	100	100	100	100	100	100	62
	Ecken 78	100	100	100	100	100	100	64
	Teilweise, eine Seite	0	0	0	0	0	0	0
	Teilweise, zwei Seiten	0	0	0	0	0	0	0
	Gesamt, eine Seite	0	0	0	0	0	0	0
	Gesamt, eine Seite+ Ecken	100	100	100	100	100	100	66
	Gesamt 2 Seiten	100	100	100	100	100	100	72

und verschiedene initiale Positionierungen der Referenzdaten getestet. Die folgenden Verteilungen wurden für die taktilen Messpunkte untersucht (Abbildung 24):

- Punkte auf Ecken: Variation der Punktzahl
- Teilweise abdeckend: Eine oder beide Seiten des Bauteils.
- Bauteil vollständig abdeckend: Eine Seite, eine Seite plus Ecken, beide Seiten.

Um den Einfluss der initialen Positionierung zu untersuchen, werden unterschiedliche Transformationen auf die Referenzdaten angewendet: kleine, mittlere und große Abweichung. Zusätzlich wird eine Zufallskomponente beaufschlagt. Durch dieses Vorgehen können die Ergebnisse der ICP Berechnungen mit den bekannten Eingangstransformationen verglichen werden.

Die Ergebnisse (Tabelle 5) zeigen, dass der ICP-Algorithmus für Transformationen kleiner und mittlerer Versätze zwischen den Koordinatensystemen geeignet ist, wenn genügend Punkte an den Ecken ausgewählt werden. Eine stabile automatische Berechnung ist hingegen nicht möglich, wenn die Messpunkte das Bauteil nur teilweise bedecken. Wenn Punkte auf dem gesamten Bauteil auf einer Seite plus Eckpunkte oder auf beiden Seiten ausgewählt werden, gelingt die Berechnung der Transformation wiederum.

6.4.2 Globale Registrierung

Der ICP-Algorithmus und seine Varianten finden schnell und zuverlässig die Lösung für lokale Probleme. Für Fälle in denen große Versätze ohne eine initiale Lösung vorliegen, werden allerdings keine Lösungen gefunden. Ansätze, um diese sogenannten „globalen“ Referenzierungsprobleme in angemessene



Abbildung 24: Verschiedene Verteilungen von Messpunkten auf der Bauteiloberfläche.

- Oben:** Punkte auf den Ecken
- Mitte:** Punkte teilweise abdeckend
- Unten:** Punkte auf dem gesamten Bauteil

ner Zeit zu lösen, sind Teil laufender Forschungsarbeiten. Einer dieser Ansätze ist der global optimal ICP (Go-ICP).

Dieser Algorithmus wird anhand der Demonstrator Bauteile im IDEA-Projekt evaluiert. Dazu wurden die Demonstrator Bauteile zunächst optisch per Streifenlichtprojektion digitalisiert und daraufhin mit einem taktilen Sensor in einer Werkzeugmaschine punktweise erfasst. Erneut werden unterschiedliche Konfigurationen von Antastpunkten verwendet, um zu prüfen, wie viele taktile Messungen für eine globale Registrierung notwendig sind.

Ein Auszug der Ergebnisse ist in Abbildung 25 dargestellt. Aus der Studie kann geschlossen werden, dass etwa 40 bis 70 Punkte ausreichen, um eine globale Registrierung für Bauteile mit vergleichsweise komplexen Geometrien durchzuführen. Bei symmetrischen Bauteilen ist das Problem jedoch mathematisch unzureichend definiert, weswegen keine eindeutige Lösung existiert. Für solche Fälle sollten in der Bauteilgeometrie Merkmale definiert oder dediziert hinzugefügt werden, welche eine eindeutige globale Registrierung zulassen.

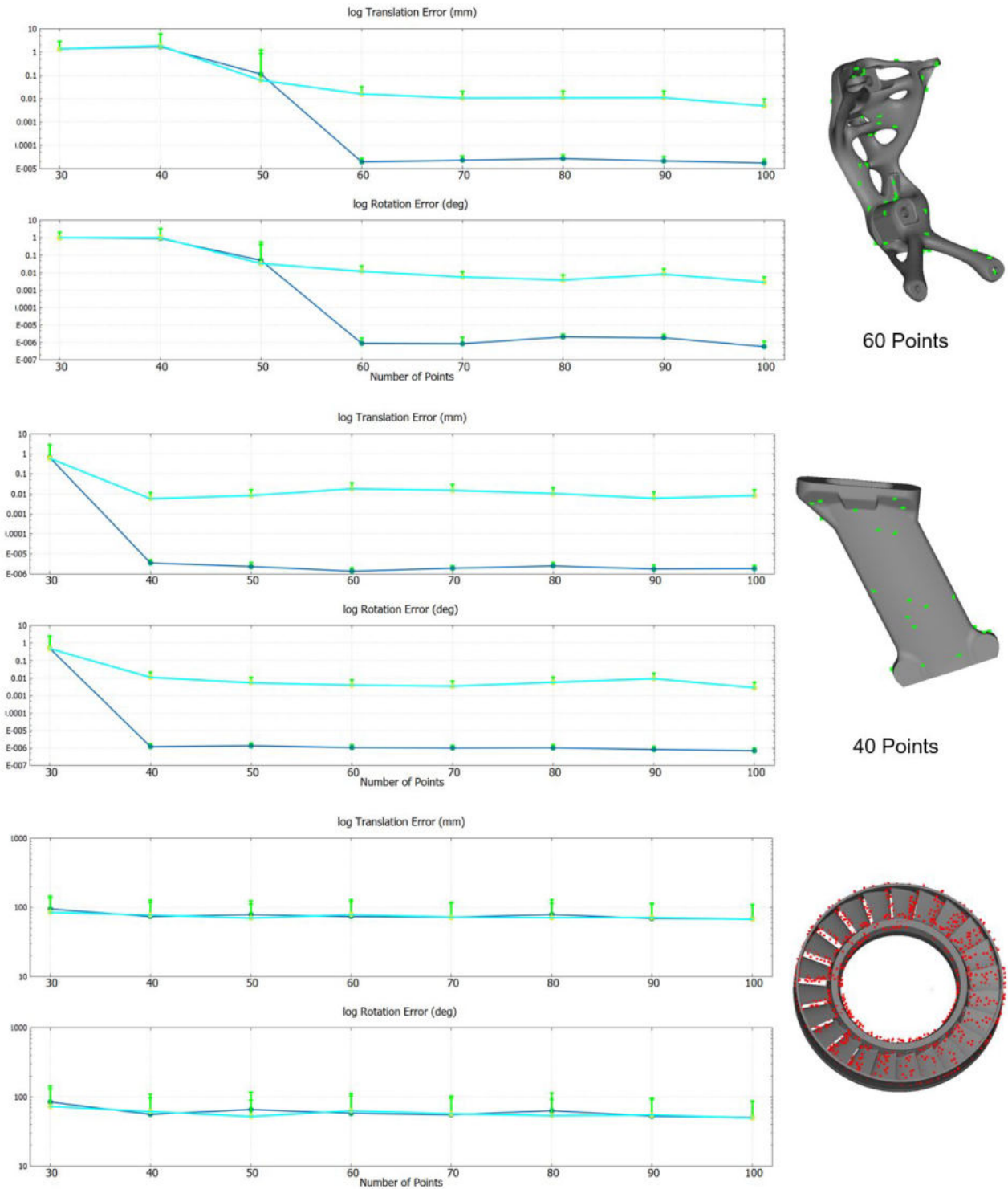


Abbildung 25: Auszug aus den Ergebnissen der Anwendung des global optimal ICP auf die IDEA Demonstratoren zur globalen Registrierung mit unterschiedlicher Anzahl an Antastpunkten.

7 Prozessuntersuchungen

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden verschiedene Untersuchungen mit Bezug auf den L-PBF-Fertigungsprozesses durchgeführt. Die Arbeiten wurden in mehrere Arbeitspakete gegliedert. Im ersten Arbeitspaket wurde am Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT) eine Prozessführung für die Konturbelichtung mit gepulst-modulierter Laserstrahlung entwickelt, im zweiten wurde beim Projektpartner TRUMPF eine Vorheizung von 500°C zur Reduktion von Eigenspannungen und Verzug für den Werkstoff TiAl6V4 evaluiert sowie im dritten Arbeitspaket bei den Projektpartnern TRUMPF sowie EOS der Einfluss einer Multi-Laser-Prozessführung auf die Bauteileigenschaften auf den Maschinen TruPrint 5000 sowie EOS M400-4 untersucht. Abschließend wurden die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf einer TruPrint 5000 validiert. Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

7.1 Gepulst-modulierte Konturbelichtung

Bei der konventionellen L-PBF-Konturbelichtung mit kontinuierlicher (engl. continuous wave – cw) Laserstrahlung treten insbesondere in Bauteilbereichen mit eingeschränkter Wärmeableitung, wie zum Beispiel in dünnwandigen Bereichen, geometrische Abweichungen der Ist-Bauteilkontur von der Soll-Bau-

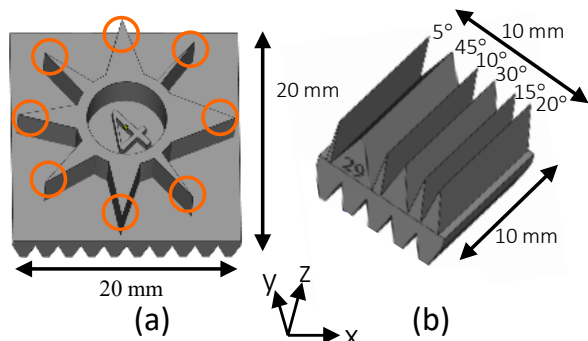


Abbildung 26: Probekörper mit variablem Konturwinkel innerhalb der xy-Bearbeitungsebene (a) sowie in Aufbaurichtung (z) (b)

teilkontur auf. Diese werden bspw. durch Vergrößerung von Schmelzbädern aufgrund von Wärmestau hervorgerufen. Insbesondere bei Anwendungen, in denen eine hohe Präzision der Bauteilgeometrie gefordert ist, resultiert hieraus die Notwendigkeit subtraktiver Nachbearbeitung, die bei komplex geformten Bauteilen hohe Kosten verursacht.

Aus diesen Gründen wurde die Entwicklung einer Prozessführung mit gepulst-modulierter (engl. pulsed wave – pw) Laserstrahlung verfolgt. Durch die Erzeugung signifikant kleinerer Schmelzbäder im Vergleich zur cw-Prozessführung sollen Überhitzungserscheinungen unterdrückt sowie die Detailauflösung mittels L-PBF gefertigter Bauteile erhöht werden. Zudem wird der Einfluss einer pw-Konturbelichtung auf die Oberflächenrauheit und -Topographie untersucht. Die experimentellen Arbeiten wurden auf einer TruPrint 3000 L-PBF-Maschine für die Werkstoffe Inconel 718 sowie TiAl6V4 durchgeführt.

Zunächst wurde ein Prozessfenster identifiziert, in dem möglichst kleine Schmelzbäder mit minimalen Schmelzbadbewegungen sowie reduzierter Pulververarmung (engl. powder denudation) erzeugt werden. Hierzu müssen die Verfahrensparameter Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_s , Pulsdauer t_p und Pulsfrequenz f_p derart aufeinander abgestimmt werden, dass aufeinanderfolgende Schmelzbäder diskret, d.h. unabhängig voneinander, erstarren, dabei aber dennoch eine vollständig stoffschlüssige Verbindung zwischen den Schmelzbädern entsteht.

Als Probekörper für die Prozessentwicklung wurden zunächst würfelförmige Proben (10x10x10 mm) verwendet und die identifizierten Parameter anschließend auf Probekörper mit variablem Konturwinkel übertragen. Die hierfür verwendeten Probengeometrien sind in Abbildung 26 dargestellt.

Die gefertigten Proben wurden u.a. qualitativ mithilfe von Rasterelektronenmikroskopie (REM) bewertet. Abbildung 27 zeigt REM-Aufnahmen der Probengeometrie (a) aus Abbildung 26 für einen Konturwinkel von 5°. Gegenübergestellt ist eine Probe, welche mit einem cw-Referenzparametersatz gefertigt wurde, sowie eine Probe mit pw-Konturbelichtung. Die Ver-

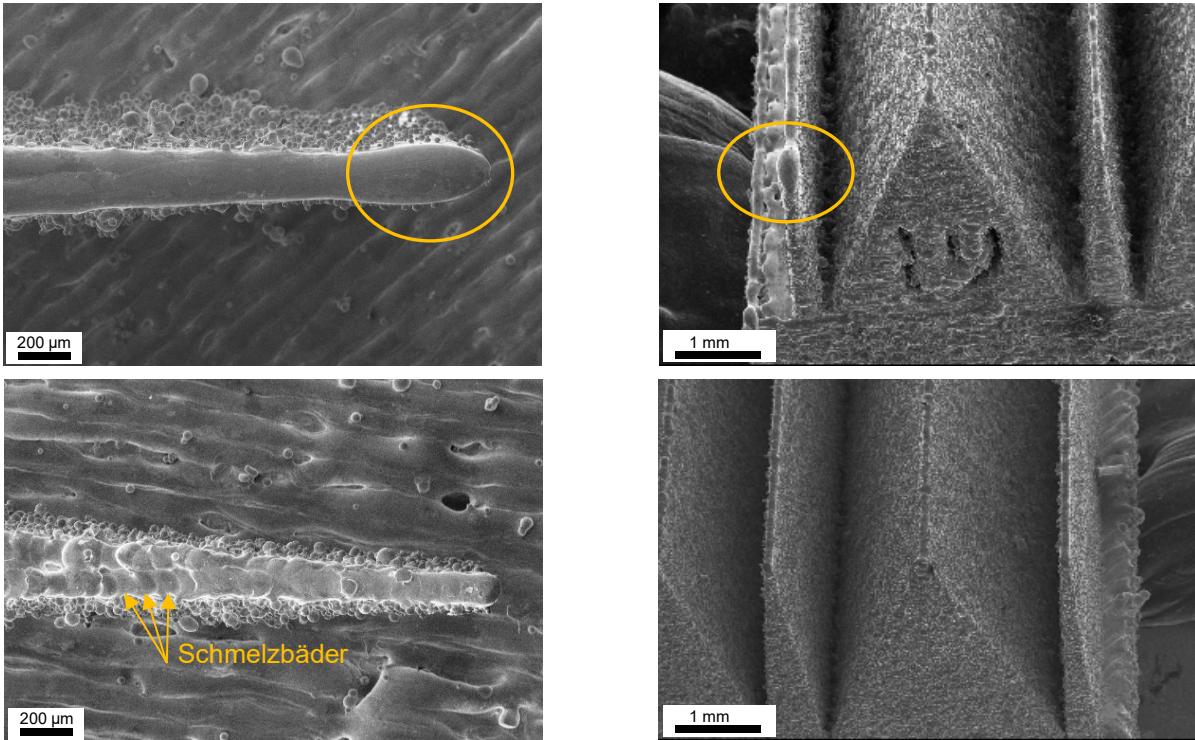


Abbildung 27: REM-Aufnahmen der Bauteilkontur der gefertigten Probengeometrien aus [Abbildung 26](#). Obere Zeile: cw-Referenzparameter, untere Zeile: pw-Bauteilkontur. Orange markierte Bereiche zeigen Schmelzbadvergrößerung durch Wärmestau. Werkstoff: Inconel 718

fahrensparameter der pw-Belichtung sind so gewählt, das diskret erstarrende Schmelzbäder erzeugt werden. Diese sind durch Schmelzbadgrenzflächen voneinander getrennt. Eine regelmäßige Überlappung der Schmelzbäder ist deutlich sichtbar. Die konventionell durch cw-Belichtung gefertigte Bauteilkontur ist durch ein zusammenhängendes, kontinuierlich erstarrtes Schmelzbad gekennzeichnet. Der positive Effekt einer pw-Konturbelichtung auf die Konturgenauigkeit ist im Bereich der Bauteilspitze erkennbar. Während bei der cw-Konturbelichtung deutliche Anzeichen von Wärmestau und dadurch überschüssig aufgeschmolzener Werkstoff erkennbar sind, ist dieses Phänomen bei der pw-Konturbelichtung weitgehend unterdrückt. Durch die Erstarrung der Schmelzbäder zwischen den Laserpulsen wird das schmelzflüssige Volumen reduziert, sodass Schmelzbadbewegungen verringert werden.

Die beschriebenen Effekte können insbesondere bei in Aufbaurichtung sehr spitzen Geometrien, bei denen die Wärmeableitung limitiert ist, beobachtet werden (vgl. [Abbildung 27](#), rechte Teilabbildung). Zudem ist

eine schärfere Ausbildung der Bauteilkanten bei Verwendung der pw-Belichtung zu erkennen

Um diskrete Erstarrung der Schmelzbäder zu ermöglichen, sind bei der pw-Konturbelichtung generell niedrigere Scangeschwindigkeiten notwendig als bei der cw-Konturbelichtung. Da hierdurch die Produktivität des L-PBF-Prozesses verringert wird, wurde in einer Versuchsreihe die Scangeschwindigkeit der Konturbelichtung variiert, um eine Maximalgeschwindigkeit zu identifizieren, bis zu der diskrete Erstarrung zu beobachten ist.

Neben der Konturgenauigkeit wurde auch der Einfluss einer pw-Konturbelichtung auf die Oberflächenbeschaffenheit betrachtet. [Abbildung 28](#) zeigt exemplarisch REM-Aufnahmen der Oberflächentopographie von cw- bzw. pw-Bauteilkonturen des Werkstoffes Inconel 718. Bei der cw-Bauteilkontur bildet sich durch die schichtweise Lage der Konturschmelzbäder eine in Aufbaurichtung wellige Oberfläche aus. Die Anzahl angesinterter Pulverpartikel ist vergleichsweise gering und resultiert in einer niedrigen, optisch gemessenen, Oberflächenrauheit. Bei

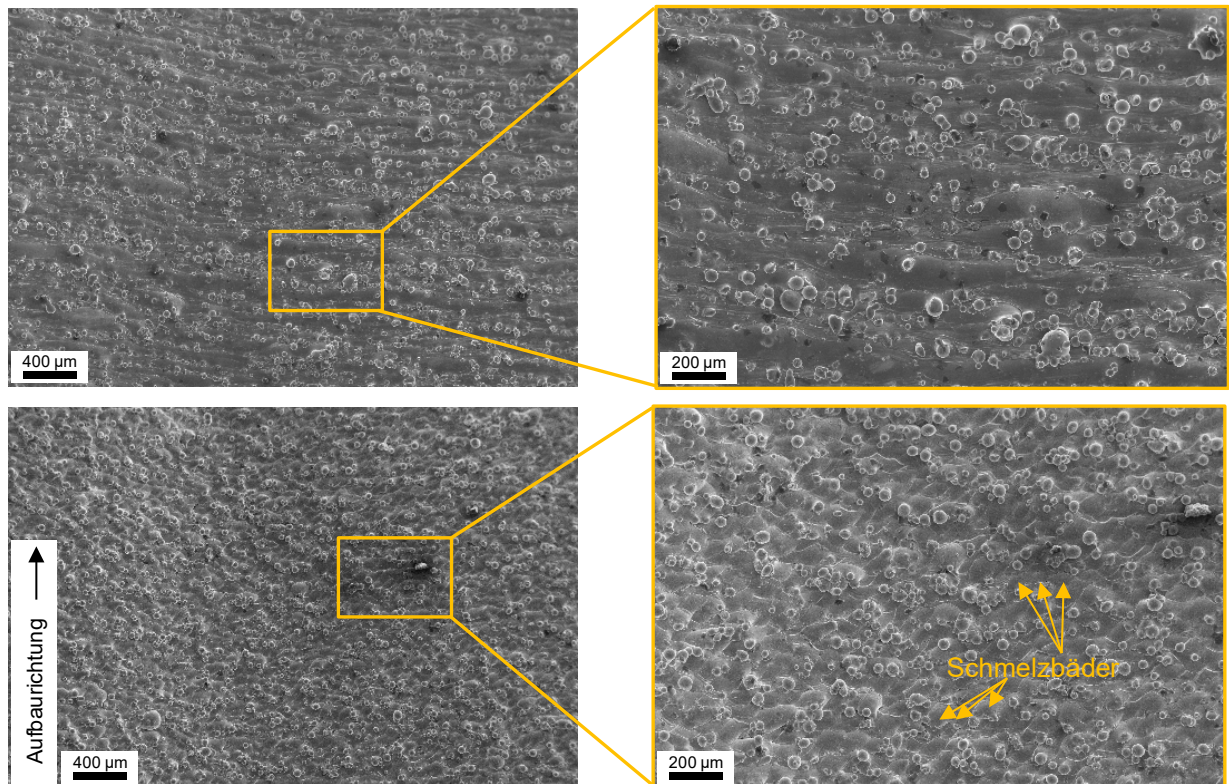


Abbildung 28: REM-Aufnahmen der Oberflächenstruktur von Bauteilen mit cw-Kontur (obere Bildhälfte) bzw. pw-Kontur (untere Bildhälfte). Werkstoff: Inconel 718

Oberflächen der pw-Bauteilkontur bildet sich durch die Überlappung der Schmelzbäder eine Oberfläche mit reduzierter Welligkeit und Texturierung aus. Der Überlappungsgrad der Schmelzbäder kann hierbei durch Anpassung der Verfahrensparameter variiert werden. Die Anzahl angesinterter Partikel ist größer als bei der cw-Bauteilkontur, die Partikelgröße aber tendenziell kleiner. Während angesinterter Pulver im Rahmen eines Post-Processings mit geringem Aufwand, bspw. durch Sandstrahlen, entfernt werden kann, stellt die Entfernung einer Oberflächenwelligkeit eine größere Herausforderung dar.

Ähnliche Beobachtungen hierzu werden auch für den Versuchswerkstoff TiAl6V4 gemacht (vgl. Abbildung 29). Im Gegensatz zu IN718 wird bei TiAl6V4 für den Prozessbereich der diskreten Erstarrung eine deutlich vergrößerte Anzahl angesinterter Pulverpartikel im Vergleich zur cw-Referenz beobachtet. Begründet ist dies in den deutlich leichteren TiAl6V4-Pulverpartikeln und somit verstärkter Pulverdynamik innerhalb der Belichtungszone. Pulverpartikel gelangen hierbei vermehrt in die Schmelzbadumgebung. Aufgrund des

kleinen Schmelzbadvolumens bei pw-Belichtung erstarren die Schmelzbäder schneller als bei einer cw-Belichtung, sodass nicht alle Pulverpartikel im Schmelzbad aufgeschmolzen werden und somit an der Oberfläche ansintern. Durch Einsatz einer mehrfachen Konturbelichtung kann für den Werkstoff TiAl6V4 der Grad an Pulveransinterungen reduziert werden, allerdings werden höhere Flächenrauheitswerte als an Vergleichsproben mit einer mehrfachen cw-Konturbelichtung gemessen. Durch das große Schmelzbadvolumen bei cw-Belichtung können Pulverpartikel vermehrt aufschmelzen, sodass weniger Pulverpartikel an die Oberfläche ansintern.

Die entwickelte pw-Konturbelichtung wurde anhand von technischen Demonstratoren verifiziert. In Abbildung 30 ist eine adaptierte Francis-Turbine jeweils mit cw- und pw-Konturbelichtung dargestellt. Sowohl die Turbinenschaufeln als auch die Honeycomb-Gitter stellen dünnwandige Bereiche dar, bei denen die Kontrolle des Energieeintrags ins Bauteil besonders relevant ist. Beim Bauteil mit cw-Konturbelichtung

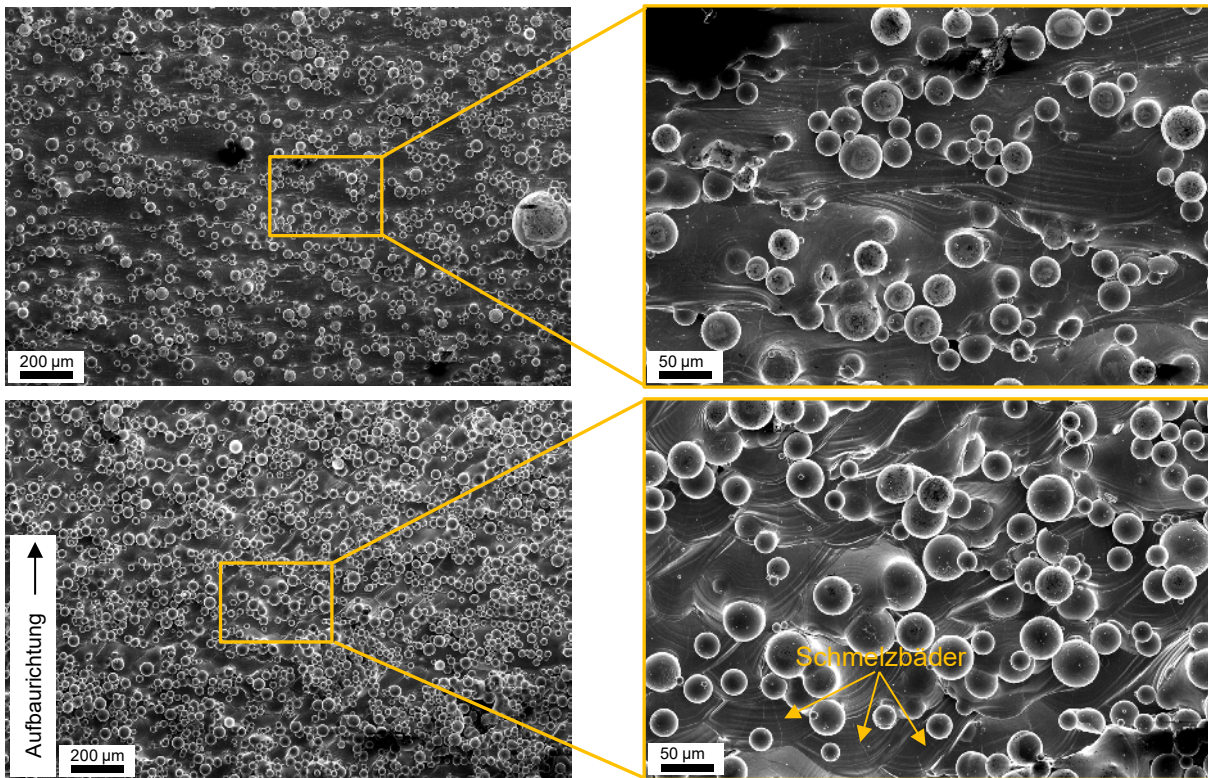


Abbildung 29: REM-Aufnahmen der Oberflächenstruktur von Bauteilen mit cw-Kontur (obere Bildhälfte) bzw. pw-Kontur (untere Bildhälfte). Werkstoff: TiAl6V4

lichtung sind vergleichsweise dicke Honeycomb-Gitterstreben, eine wellige Schaufeloberfläche, sowie Aufwölbungen der Bauteilkontur an den Schaufelkanten erkennbar. Die Schaufeloberfläche der Bauteile mit pw-Kontur ist homogener und Aufwölbun-

gen sind nicht erkennbar. Die Honeycomb-Gitter weisen dünnere Streben auf als bei Verwendung einer cw-Konturbelichtung. Auffallend ist auch der teils signifikante Bauteilverzug an einigen Schaufeln des Bauteils mit cw-Kontur. Dieser wurde mittels Streifenlichtmessung bestätigt.

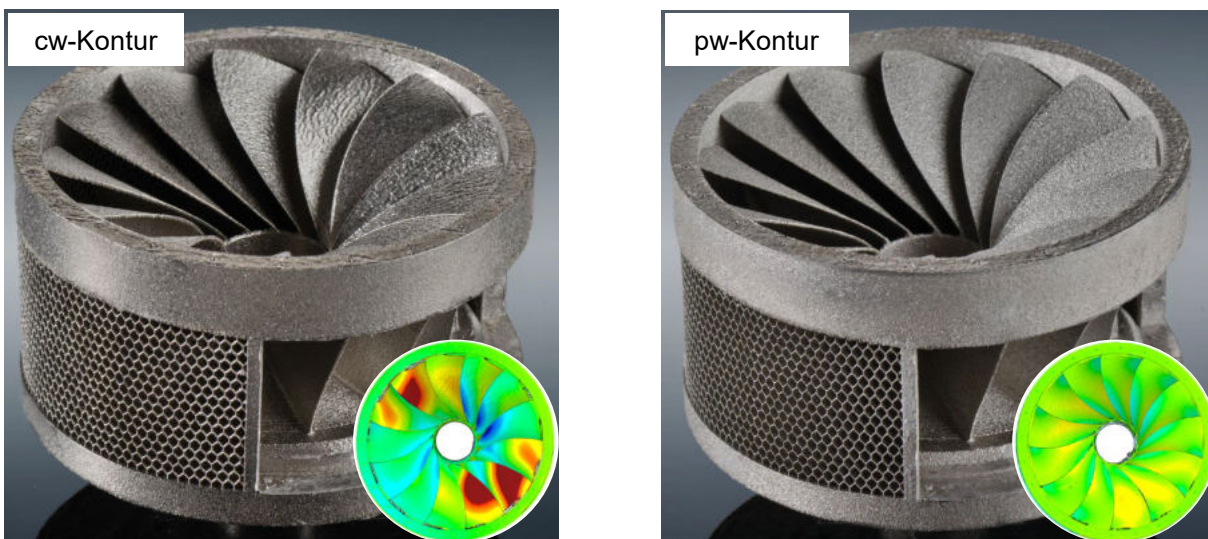


Abbildung 30: Francis-Turbine mit dünnwandigen Bauteilbereichen, gefertigt mit cw-Kontur (links) sowie pw-Kontur (rechts). Werkstoff: Inconel 718

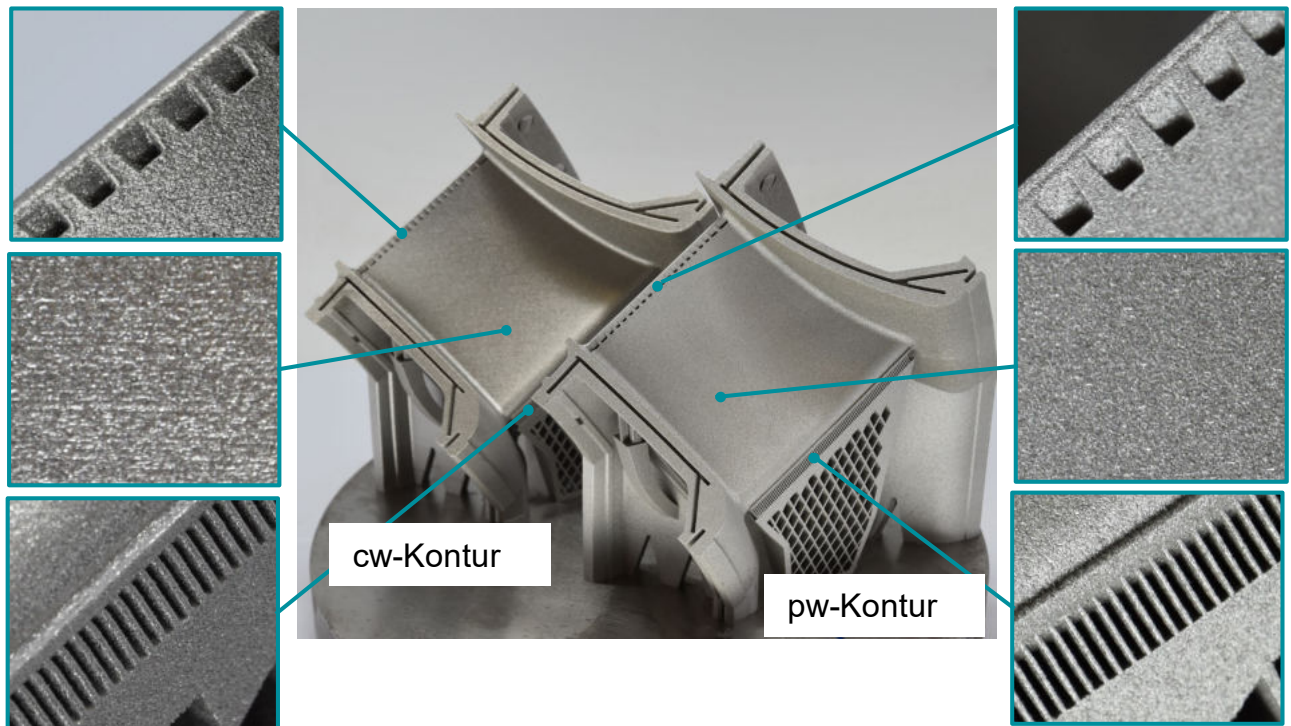


Abbildung 31: IDEA Demonstrator einer Gasturbinen-Vane, gefertigt mit cw- und pw-Konturbelichtung. Detailaufnahmen zur Verdeutlichung der Unterschiede in Bezug auf Detailauflösung und Oberflächenstruktur. Werkstoff: Inconel 718

Zudem wurde der von Siemens Energy im Rahmen des Projektes zur Verfügung gestellte Demonstrator einer Vane mit cw- und pw-Konturbelichtung gefertigt. Insbesondere in komplexen Bauteilbereichen, die eine hohe Präzision erfordern, führt die pw-Konturbelichtung zu einer erhöhten Konturgenauigkeit (vgl. Detailaufnahmen in Abbildung 31). Die Oberfläche der Vane ist bei Verwendung einer pw-Konturbelichtung homogener strukturiert, ausgeprägte Welligkeit wie bei Verwendung einer cw-Konturbelichtung tritt nicht auf.

Fazit

Der Einsatz einer pw-Konturbelichtung führt bei beiden untersuchten Werkstoffen bei entsprechender Abstimmung der Verfahrensparameter zu einer Erhöhung der Konturgenauigkeit. Ursächlich ist das reduzierte Volumen an Schmelze, welches durch diskret erstarrende Schmelzbäder minimiert wird. In Bezug auf den Einfluss der pw-Konturbelichtung auf Ansinterung von Pulverpartikeln wird zwischen den

Werkstoffen in unterschiedliches Verhalten beobachtet. Während für Inconel 718 (Dichte = 8,19 g/cm³) vergleichbare Oberflächenrauheiten ermittelt werden, führt die pw-Konturbelichtung beim Werkstoff TiAl6V4 (Dichte = 4,42 g/cm³) zu verstärkter Ansinterung von Pulverpartikeln und somit höheren Oberflächenrauheiten. Aufgrund der geringeren Masse der TiAl6V4-Pulverpartikel verglichen mit Inconel 718 reagieren diese sensibler auf Schutzgasströmungen sowie Schmelzbadbewegungen und sintern vermehrt an die Schmelzbadoberflächen.

Die entwickelte Prozessführung wurde erfolgreich an industriellen Anwendungen demonstriert. Die höhere Detailauflösung sowie die erhöhte Konturgenauigkeit bringen allerdings eine im Vergleich zur konventionellen cw-Konturbelichtung reduzierte Produktivität mit sich. Am Beispiel der Gasturbinen-Vane ergibt sich je nach Bauteilorientierung eine Verlängerung der gesamten Produktionszeit zwischen 2 und 5 %.

7.2 Vorheizung mit bis zu 500 °C

Untersuchungsziel war die industrielle Demonstration und Adaption einer Vorheizung mit 500 °C maximaler Vorheiztemperatur für die Maschine TruPrint 5000. Als Werkstoff für die Arbeiten wurde die Titanlegierung TiAl6V4 verwendet. Dieser Werkstoff zeichnet sich bei der Verarbeitung mittels L-PBF durch die Entstehung von signifikanten thermischen Eigenspannungen und erheblichem Bauteilverzug aus. Aktuell kommerziell verfügbare L-PBF-Maschinen verfügen größtenteils über keine Vorheizung oder nur über eine mit maximaler Vorheiztemperatur von 200 °C. Dies führt aktuell bei der Verarbeitung von TiAl6V4 zu Bauteilverzug, welcher im Rahmen eines Post-Processings, z.B. durch Spannungsarmglühen, reduziert werden muss. Eine Reduktion der ther-

mischen Eigenspannungen durch eine höhere Vorheiztemperatur kann diesen Nachbearbeitungsschritt verkürzen oder sogar entfallen lassen. Dies führt somit zu einer drastischen Verkürzung der additiven Prozesskette.

Als Anwendungsbauteil wurde der von Liebherr Aerospace zur Verfügung gestellte Demonstrator verwendet. Im ersten Schritt wurde eine numerische Simulation der während des L-PBF-Prozesses im Bauteil induzierten thermischen Eigenspannungen sowie des Bauteilverzugs bei Vorheiztemperaturen von 200 °C, 500 °C und bei Raumtemperatur, durchgeführt. Die Simulationsergebnisse der Vorheizungen sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Für den Bauteilverzug ist (im angebundnen Zustand) keine signifikante Abhängigkeit von der Vorheiztemperatur zu erkennen. Durch die Anbindung der Bau-

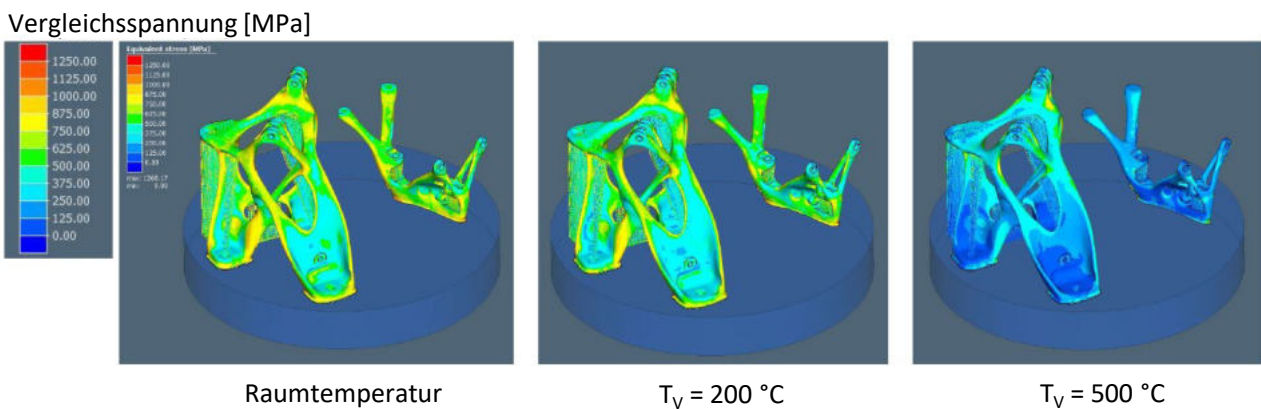


Abbildung 32: Simulation der thermisch induzierten Eigenspannungen bei verschiedenen Vorheiztemperaturen

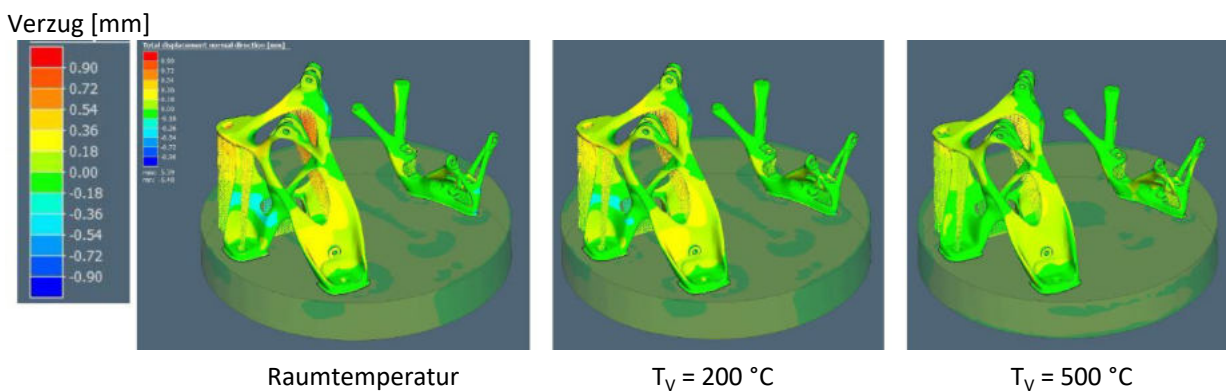


Abbildung 33: Simulation des Bauteilverzugs bei verschiedenen Vorheiztemperaturen

teile an die Substratplatte sowie durch die verwendeten Supportstrukturen wird ein Bauteilverzug effektiv verhindert. Allerdings resultieren hierdurch bei Vorheiztemperaturen bis $T_V = 200\text{ °C}$ lokal hohe Eigenspannungen, die zu Bauteilverzug nach dem Abtrennen von der Bauplattform, bzw. Entfernen der Stützstrukturen, führen können. Bei der Vorheiztemperatur von 500 °C sind diese Eigenspannungen deutlich reduziert. Zur Verifikation der Simulationen wurden beide Demonstratoren jeweils mit 200 °C bzw. 500 °C Vorheizung additiv gefertigt. Sowohl vor als auch nach dem Abtrennen der Bauteile von der Bauplattform wurde bei diesen mittels Streifenlichtprojektion der Bauteilverzug gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 dargestellt. Durch die höhere Vorheiztemperatur von 500 °C liegt der maximale Bauteilverzug auch im abgetrennten Zustand innerhalb der geforderten Spezifikation, sodass ein nachgelagertes Spannungsarmglühen entfallen und damit

die Durchlaufzeit reduziert werden kann. Das nachgelagerte aufwendige Spannungsarmglühen der Bauteile vor dem Abtrennen könnte bei einer Vorheizung von 200 °C nicht entfallen.

Fazit

Durch den deutlich reduzierten Bauteilverzug kann die nachgelagerte Wärmebehandlung zur Spannungsreduktion verkürzt werden oder entfallen. Zudem kann bei reduzierten Eigenspannungen die Menge an Supportstrukturen reduziert werden, sodass Ressourcen eingespart werden. Einer verlängerten Anlagenrüstzeit durch die längere Abkühldauer bei 500 °C wird durch austauschbare Bauzylinder vorgebeugt, sodass das Abkühlen der Bauteile hauptzeitparallel zur Fertigung weiterer Bauteile erfolgt. Der industrielle Einsatz der Vorheiztemperatur von 500 °C für kommerzielle Anwendungen kann somit nachgewiesen werden.

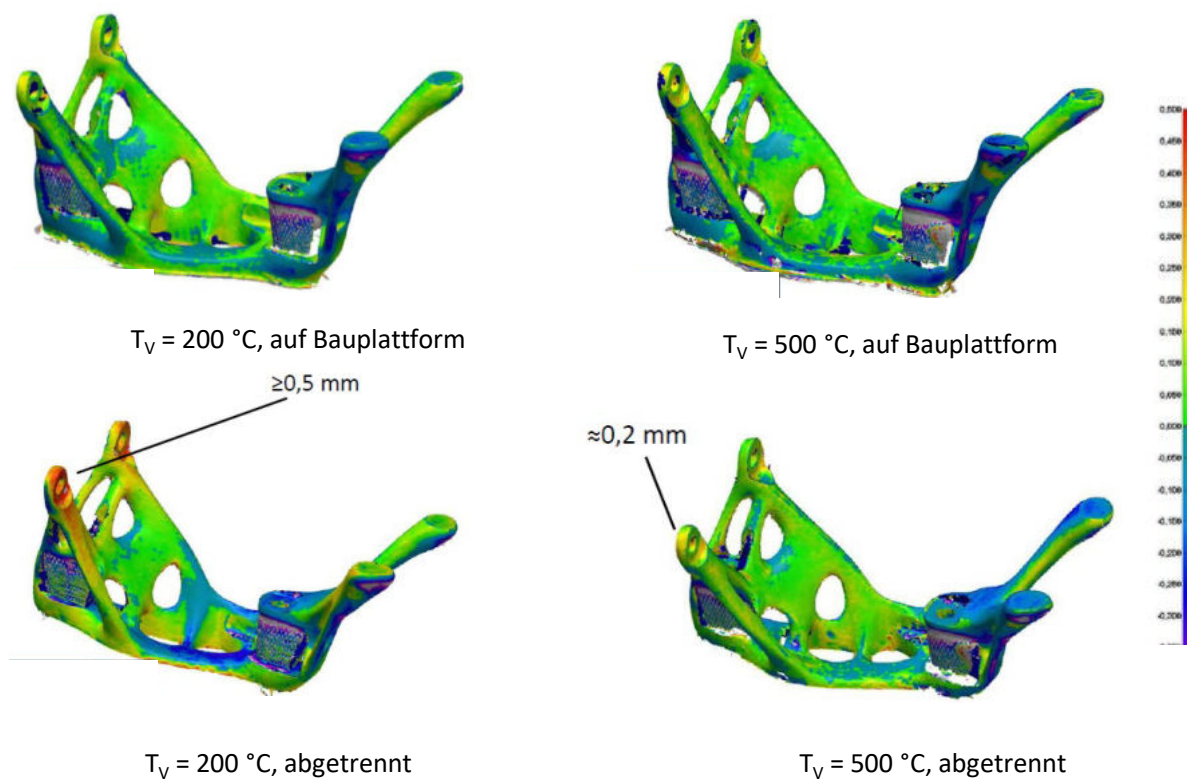


Abbildung 34: Ergebnisse der Verzugsmessung in Abhängigkeit der Vorheiztemperatur im angebondenen sowie abgetrennten Zustand. Die Skala reicht von $+0.5\text{ mm}$ (rot) bis -0.5 mm (blau/violett).

7.3 Multi-Laser-Prozessführung

Ein Ansatzpunkt zur Steigerung der Produktivität beim L-PBF-Fertigungsprozess ist die Nutzung von L-PBF-Maschinen mit mehreren Laserstrahlquellen (Multi-Laser-Maschinen). Durch die parallelisierte Belichtung wird die Aufbaurrate im Vergleich zu Anlagen, die nur eine Laserstrahlquelle besitzen (Single-Laser-Maschinen) theoretisch vervielfacht. Gleichzeitig ergeben sich durch die parallelisierte Bearbeitung neue, zu untersuchende Fragestellungen, bspw. wie sich der Überlappungsbereich zwischen zwei Belichtungsbereichen innerhalb eines Bauteiles auf dessen Eigenschaften (mechanisch, mikrostrukturell) auswirkt. Zu diesem Zweck wurde für zwei Versuchswerkstoffe auf zwei verschiedenen kommerziellen L-PBF-Multi-Laser-Maschinen der Einfluss der Multi-Laser-Prozessführung auf die Bauteileigenschaften untersucht. Hierzu wurde beim Projektpartner TRUMPF auf einer TruPrint 5000 TiAl6V4 mit bis zu drei Lasern parallel belichtet. Beim Partner EOS wurde auf einer EOS M400-4 der Werkstoff Inconel 718 verarbeitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse für beide Werkstoffe vorgestellt.

7.3.1 TiAl6V4 (TRUMPF TruPrint 5000)

Die TruPrint 5000 ist mit drei Laserstrahlquellen ausgestattet, welche alle die komplette Bauplattform belichten können. Somit ist eine Vollfeld-Überlappung der Belichtungsbereiche möglich. Für die Charakterisierung des Einflusses der Multi-Laser-Prozessführung wurden drei verschiedene Betriebsmodi verglichen.

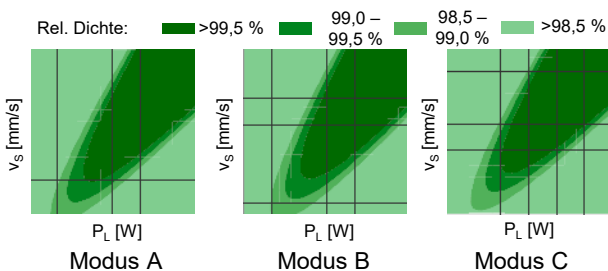


Abbildung 35: Relative Werkstoffdichte unter Variation der Volumenenergiedichte für Betriebsmodi A - C

- I. Alle Proben werden von einem Laser belichtet (Modus A)
- II. Alle Laser belichten, je Probe nur ein Laser (Modus B)
- III. Alle Laser belichten, je Probe bis zu drei Laser (Modus C)

Zunächst wurde unter Variation der Energiedichte ein möglicher Einfluss des Betriebsmodus auf das Prozessfenster zur Fertigung dichter Bauteile bei einer Schichtdicke $D_s = 60 \mu\text{m}$ untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 gegenübergestellt.

Die Prozessfenster zur Fertigung dichter Bauteile ist für alle drei Betriebsmodi annähernd gleich. Somit ist kein signifikanter Einfluss des Betriebsmodus auf die Bauteildichte zu ermitteln, die Anforderungen an die Prozesssicherheit in Bezug auf die Bauteildichte sind erfüllt.

Je Versuch wurden Proben für die mechanische Zugprüfung sowie für die Analyse der Bauteildichte mit jeweils sechs verschiedenen Parametersätzen in horizontaler Orientierung gefertigt. Die Probenanordnung in den Baujobs für die Fertigung der Zugproben ist in Abbildung 36 dargestellt. Als mechanische Kennwerte wurden die Streckgrenze $R_{p0,2}$ die Zugfestigkeit R_m sowie die Bruchdehnung A ermittelt.

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung sind in Abbildung 37 zusammengefasst. Parametersatz I (niedrigste Energiedichte) sowie Parametersatz VI (höchste Energiedichte) entsprechen den Randberei-

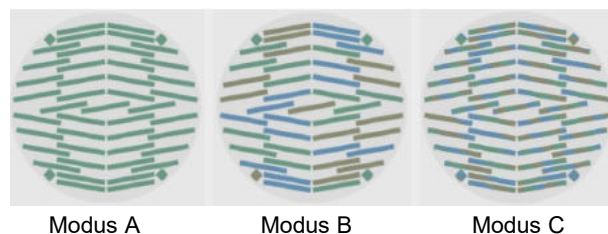


Abbildung 36: Verwendetes Probenlayout zur Fertigung der Rundzugproben. Unterschiedliche Farben kennzeichnen die Zonen der Einzellaser. Modus A: Single-Laser; ein Laser pro Schicht und Bauteil. Modus B: Multi-Laser „parallel“; drei Laser pro Schicht und ein Laser pro Bauteil. Modus C: Multi-Laser; drei Laser pro Schicht und bis zu drei Laser pro Bauteil.

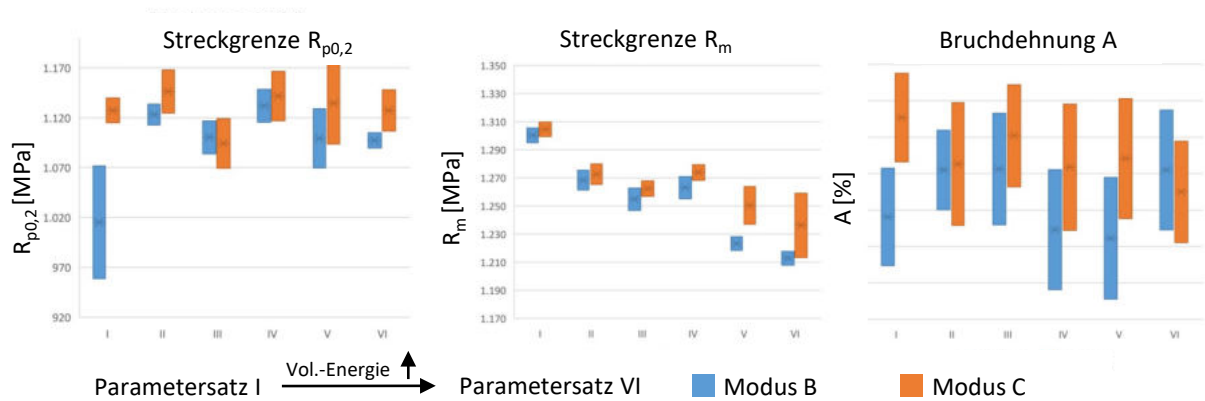


Abbildung 37: Übersicht der ermittelten statischen mechanischen Kennwerte für sechs verschiedene Parametersätze I – VI mit ansteigender Volumenenergiedichte. Zur Erläuterung der Modi B und C siehe [Abbildung 36](#).

chen des Prozessfensters aus [Abbildung 35](#). Für Parametersatz I wird der größte mittlere Unterschied zwischen den Belichtungsmodi in Bezug auf die Streckgrenze in Höhe von mehr als 100 MPa ermittelt, was in der höheren Defektdichte bei niedrigem Energieeintrag begründet ist. Für die Parameter II – VI werden nur geringfügige, technisch nicht relevante Abweichungen < 50 MPa gemessen. Bei der Zugfestigkeit ist tendenziell eine Abnahme mit zunehmender Volumenenergie zu erkennen. Dies könnte mit einer Zunahme der Korngröße mit Zunahme des Energieeintrags begründet werden. Die relativen Abweichungen zwischen den Belichtungsmodi sind für die Parameter II-VI minimal und steigen mit weiterer Zunahme der Volumenenergie an, wobei für alle untersuchten Parameter Belichtungsmodus C zu stets höheren mittlere Zugfestigkeiten im Vergleich zu Modus B führt. Für die Bruchdehnung wird keine signifikante Abhängigkeit vom Energieeintrag ermittelt. Mit Ausnahme von Parametersatz VI (höchste Energiedichte) liegen die mittlere Bruchdehnungswerte bei Modus C höher als bei Modus B. Die Streubreite ist bei beiden Modi annähernd gleich groß. Die technischen Spezifikationen für TiAl6V4 werden für beide Belichtungsmodi erfüllt.

Nach der Untersuchung des Einflusses der Betriebsmodi auf die Bauteilqualität, wurde der Einfluss auf die Produktivität des Fertigungsprozesses untersucht. Hierzu wurden verschiedene Baujoblayouts mit variierender Anzahl und Kombination der De-

monstratoren analysiert. In [Abbildung 38](#) ist die relative Belichtungszeit für die Multi-Laser-Prozessführungen (Modus B und C) in Bezug auf die Single-Laser-Prozessführung am Beispiel eines dieser Baujoblayouts mit fünf Exemplaren der von Liebherr gestellten Demonstratoren aufgeführt. Dieses Baujoblayout besteht aus einer heterogenen Verteilung der Bauteile im Bauraum aufgrund der Bauteilgeometrie. Die Bauteilanzahl entspricht nicht dem Vielfachen der Laseranzahl der AM-Anlage. In diesem bei der industriellen Fertigung typischen Baujoblayout führt der Betriebsmodus C zu der größten Steigerung der Produktivität, bzw. zur größten Einsparung der Belichtungszeit. Die höhere Steigerung der Produktivität wird durch die Vollfeld-Überlappung der Bearbeitungslaser ermöglicht, wodurch die Auslastung der

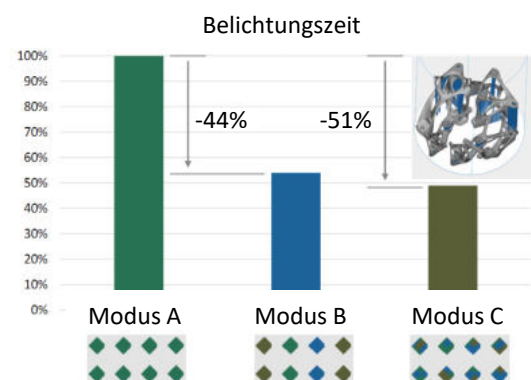


Abbildung 38: Relative Belichtungszeit der Multi-Laser Prozessführungen (Modus B und C) im Vergleich zur Single-Laser-Prozessführung (Modus A)

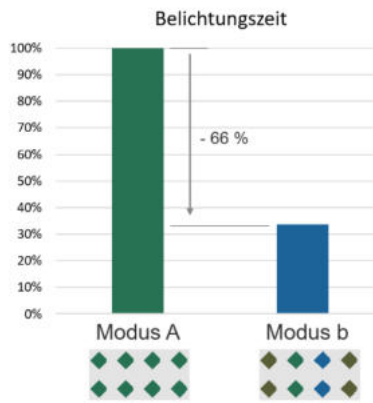


Abbildung 39: Ideale relative Belichtungszeit der Multi-Laser Prozessführung (Modus B) im Vergleich zur Single-Laser Prozessführung

Bearbeitungslaser gleichmäßig in jeder Schicht verteilt wird. Hierdurch wird eine möglichst große Auslastung jedes Bearbeitungslasers erreicht.

Die größte theoretisch mögliche Einsparung der Belichtungszeit wird nur bei einer Bauteilanzahl, welche dem Vielfachen der Bearbeitungslaser entspricht, und bei gleichzeitiger identischer, homogener Verteilung der Bauteile zu jedem Bearbeitungslaser, bzw. Scanner erreicht. Dies ist nur in sehr seltenen Fällen möglich. In diesem idealen Anwendungsfall kann die Belichtungszeit auf ein Drittel der Single-Laser Belichtungszeit reduziert werden, wie in Abbildung 39 zu sehen ist.

Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass die Multilaserbetriebsmodi der TruPrint 5000 keinen signifikanten Einfluss auf die Dichte und die mechanischen Kennwerte der untersuchten TiAl6V4 Proben haben. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass Baujoblayout, Bauteilgeometrie und Bauteilanzahl einen signifikanten Einfluss auf die Größe der Produktivitätssteigerung von Multilaseranlagen haben. Die negative Beeinflussung kann durch eine Vollfeld-Überlappung der Bearbeitungslaser und dadurch eine individuelle Aufteilung der Bearbeitungslaser pro Schicht signifikant vermindert werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Projektziel die Durchlaufzeiten zu halbieren durch die Überführung der Produktion von Single-Laser

Maschinen auf die Multi-Laser Maschine TruPrint 5000 erreicht oder übertroffen wird.

7.4 Reproduzierbarkeit

Im Rahmen weiterführender Arbeiten wurde die Reproduzierbarkeit der ermittelten mechanischen Bauteileigenschaften unter Verwendung der TruPrint 5000 untersucht. Hierzu wurden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt:

- I. **Prozessfähigkeit**
(Abhängigkeit der Fertigungshöhe)
- II. **Vorheiztemperatur**
(200 °C vs. 500 °C)
- III. **Anlagenstabilität**
(Anlage A vs. B vs. C)

Die verwendete Probenanordnung innerhalb der Versuche ist in Abbildung 40 dargestellt. Je untersuchtem Einflussfaktor wurden zwei Parametersätze mit unterschiedlicher Produktivität verwendet sowie Proben in horizontaler sowie vertikaler Orientierung gefertigt.

Zur Evaluierung der Prozessfähigkeit (I) wurden fünf Lagen vertikaler Rundzugproben gestapelt, um die maximale Fertigungshöhe der TruPrint 5000 von 400 mm auszunutzen und die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Fertigungshöhe bei 500 °C Vorheiztemperatur zu ermitteln. Horizontale Zugproben wurden direkt auf der Bauplattform

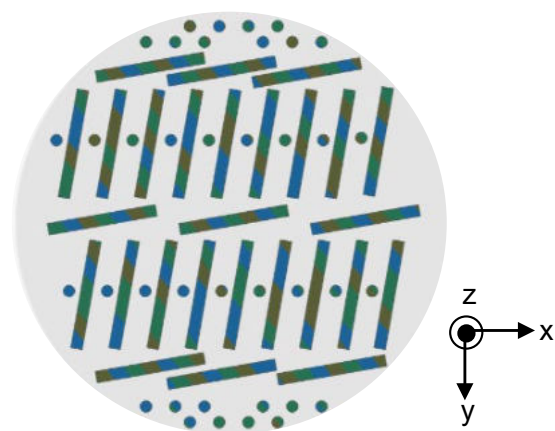


Abbildung 40: Probenanordnung auf der Bauplattform (Durchmesser: 300 mm) im Rahmen der Untersuchungen bezüglich Reproduzierbarkeit

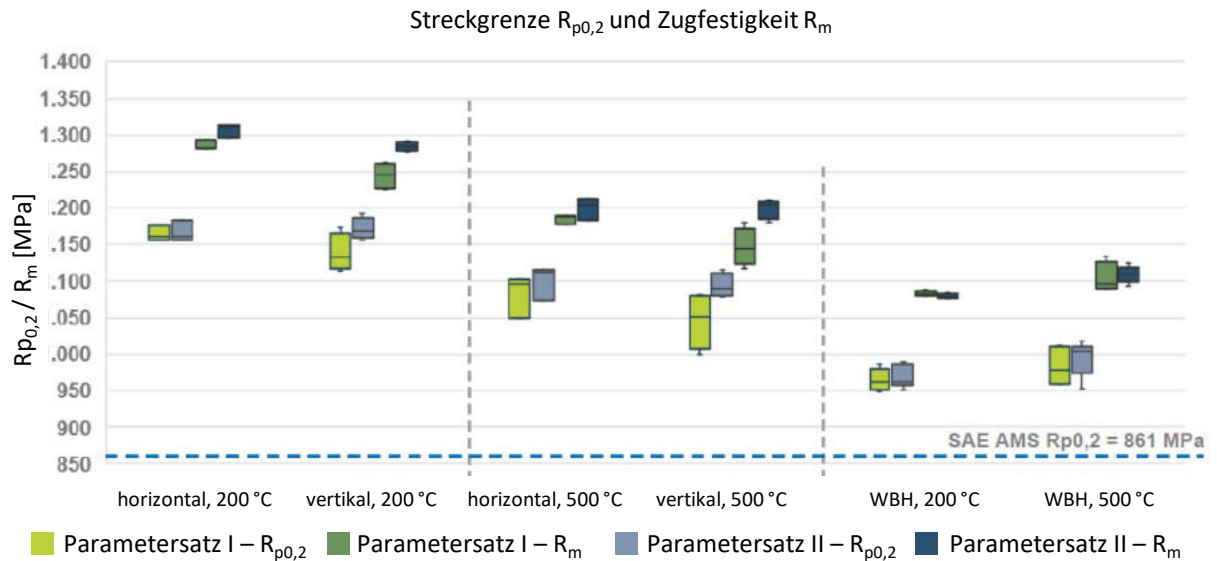


Abbildung 41: Einfluss der Vorheiztemperatur sowie Wärmebehandlung auf die Streckgrenze sowie die Zugfestigkeit

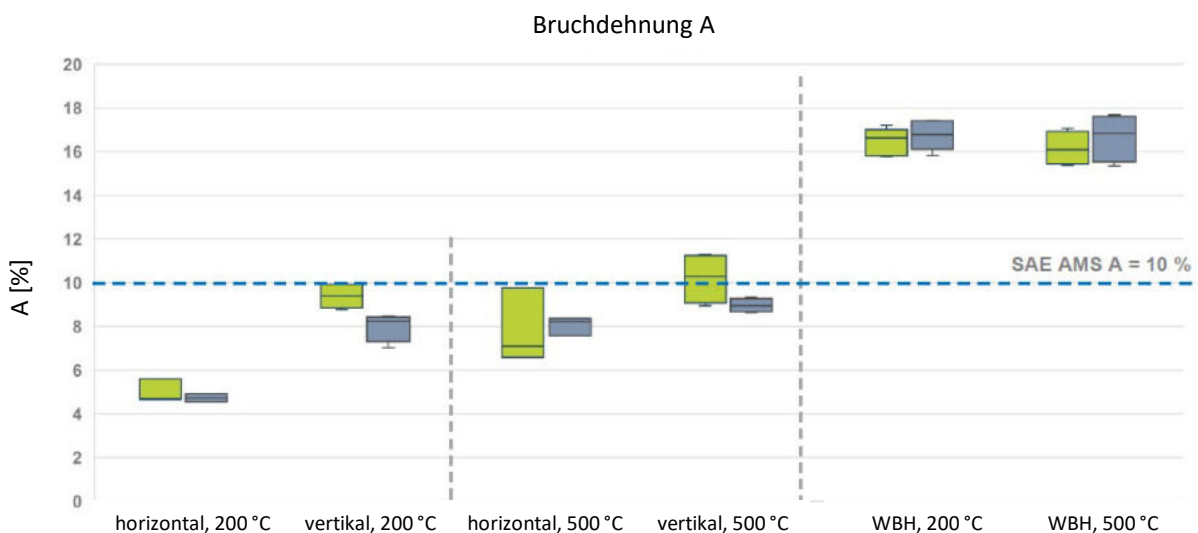


Abbildung 42: Einfluss der Vorheiztemperatur sowie Wärmebehandlung auf die Bruchdehnung

(z=0 mm) sowie bei der Fertigungshöhe z = 400 mm gefertigt. Je Probe wurde ein Laser für die Belichtung verwendet. Die mechanischen Kennwerte sind in Abbildung 41 zusammengefasst. In Bezug auf die Streckgrenze, Zugfestigkeit sowie der Bruchdehnung sind keine technisch relevante Abhängigkeit der Kennwerte von der Fertigungshöhe erkennbar, sodass eine hohe Robustheit und somit Prozessfähigkeit der Multi-Laser-Prozessführung über die gesamte Fertigungshöhe bei einer Vorheizung von 500 °C gewährleistet wird.

Für die Evaluierung des Einflusses der Vorheiztemperatur (II) auf die Multi-Laser-Prozessführung wurden vertikal und horizontal angeordnete Zugproben bei den Vorheiztemperaturen 200 °C und 500 °C gefertigt sowie ein Teil der Proben einer Wärmebehandlung (2 h bei 920 °C) unterzogen. Um eine quantitative, aussagekräftige Analyse sicherzustellen, wurden mehrere Baujobs durchgeführt. Hierdurch wurde eine ausreichend hohe Anzahl an Proben für jeden Behandlungsprozess hergestellt. In Bezug auf die Bruchdehnung wird beobachtet, dass die Kennwerte

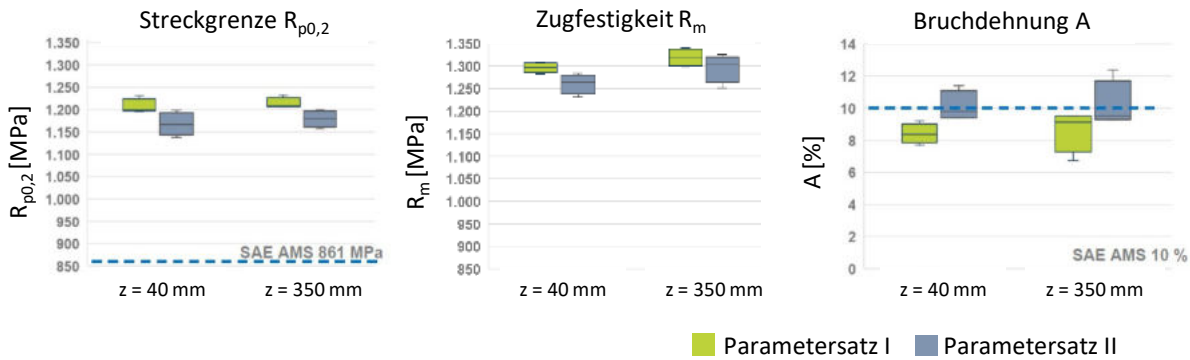


Abbildung 43: Abhängigkeit der statischen mechanischen Kennwerte von der Fertigungshöhe z bei 500 °C Vorheiztemperatur ohne Wärmebehandlung

im unbehandelten Zustand bei Verwendung der höheren Vorheiztemperatur höher sind sowie der Einfluss der Probenorientierung geringer ausfällt, was eine homogenere Bauteilqualität bei Verwendung der höheren bis zu 500 °C Vorheiztemperatur zeigt. Nach der Wärmebehandlung werden unabhängig der Vorheiztemperatur annähernd identische Bruchdehnungswerte unabhängig von der Vorheiztemperatur ermittelt sowie die geforderte technische Spezifikation erfüllt.

Die Streckgrenze sowie Zugfestigkeit sinkt tendenziell mit Zunahme der Vorheiztemperatur, wobei die absoluten Unterschiede technisch nicht relevant sind. Nach Anwendung der Wärmebehandlung werden ebenfalls annähernd identische Kennwerte erzielt, die die technische Spezifikation erfüllen.

Für die Bewertung der Anlagenstabilität (III) wurde das Joblayout aus Abbildung 40 auf drei verschiedenen TruPrint 5000 unter identischen Bedingungen (200 °C Vorheiztemperatur) gefertigt. Um Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde der Betriebsmodus B verwendet. Eine nachgelagerte Wärmebehandlung wurde nicht durchgeführt. Als Bewertungsgröße wurde die Streuung der mechanischen Kennwerte je Probenposition sowie gemittelt je Plattformbereich verwendet. Je Probenposition wird für die Bruchdehnung, Streckgrenze sowie Zugfestigkeit eine maximale Streuung von 7,2 %, 13,8 % und 8,3 % ermittelt. Die korrespondierenden maximalen Streuungen je Plattformbereich werden mit 4,2 %, 10,2 % und 10,2 % ermittelt.

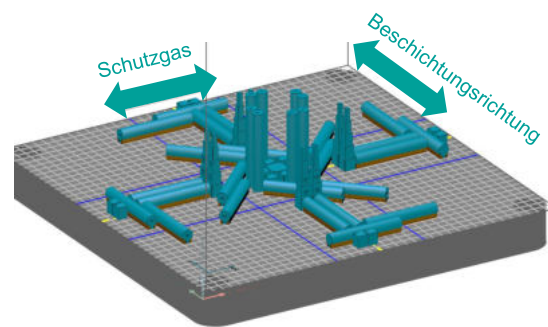


Abbildung 44: Probenanordnung zur Untersuchung der Multi-Laser-Prozessführung auf der Maschine EOS M400-4

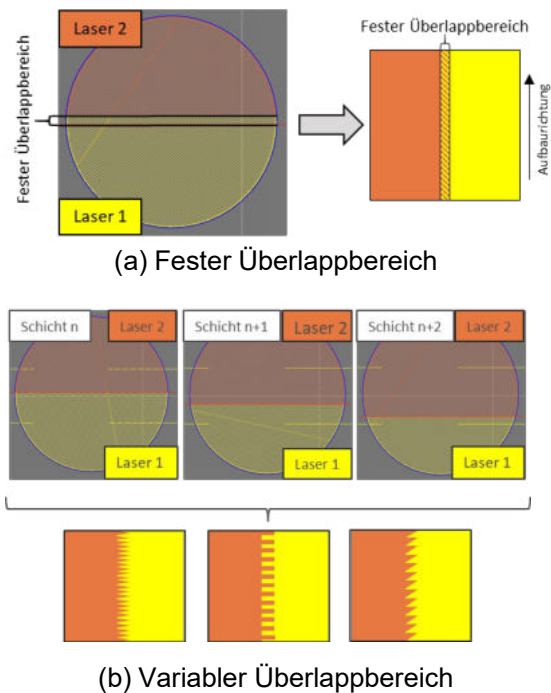


Abbildung 45: Schematische Darstellung der verschiedenen untersuchten Überlappereinstellungen

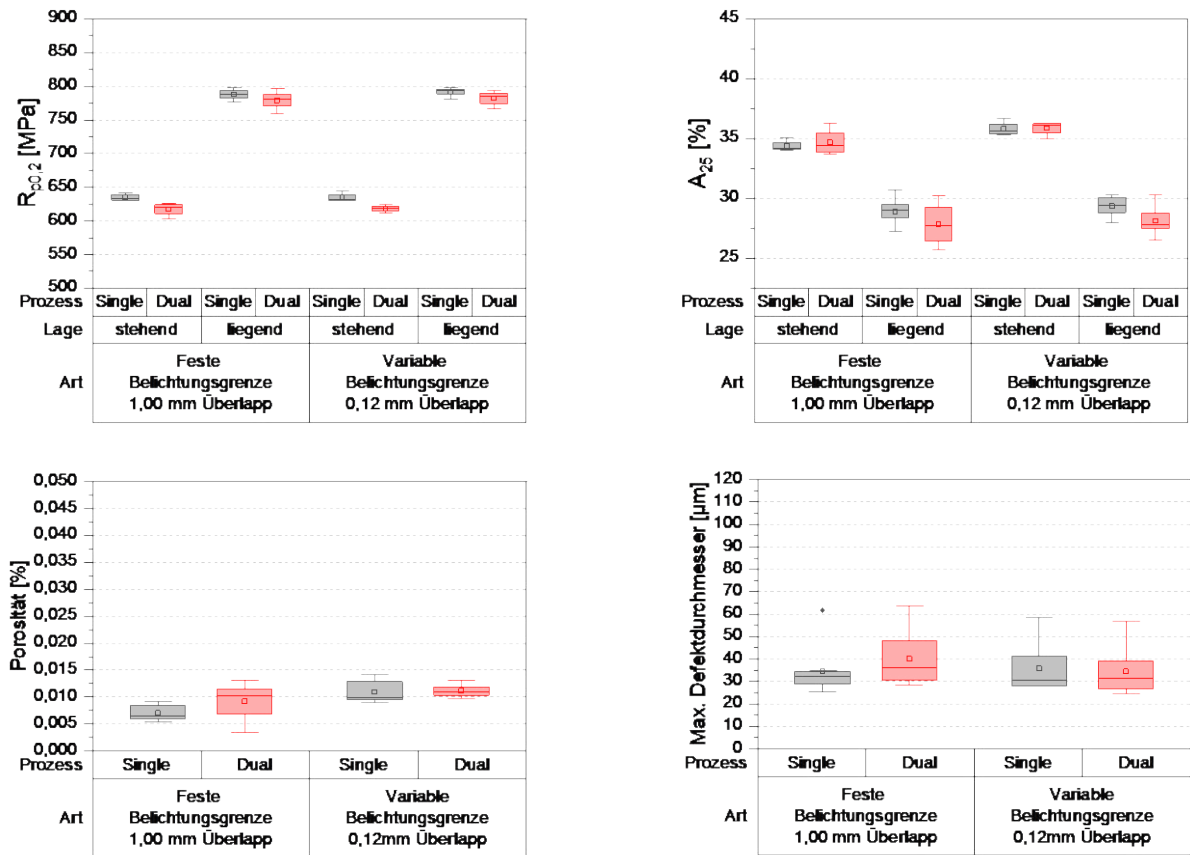


Abbildung 46: Zusammenfassung der Ergebnisse der Probenauswertung für den Werkstoff Inconel 718. (a) Streckgrenze $R_{p0,2}$, (b) Bruchdehnung A_{25} , (c) relative Porosität, (d) Maximaler Defektdurchmesser

4,8 % und 2,0 % ermittelt. Auch unter Berücksichtigung der Streuung werden die technischen Spezifikationen für den Werkstoff TiAl6V4 somit erfüllt.

7.4.1 Inconel 718 (EOS M400-4)

Auf der EOS M400-4 erfolgten Untersuchungen zur Quantifizierung des Einflusses einer Belichtung mit zwei Lasern pro Bauteil auf die resultierenden Bauteileigenschaften (mechanische Eigenschaften, Porosität, Mikrostruktur) in Abhängigkeit der verwendeten Überlappeneinstellungen. Als Verfahrensparameter wurde der EOS Standardparametersatz für IN718 mit einer Schichtdicke von $40 \mu\text{m}$ verwendet. Die Überlappeneinstellungen beschreiben die schichtweise Variation der Belichtungsgrenze im Überlappungsbereich der Scanner. An der Belichtungsgrenze wird die Belichtungsfläche aufgeteilt und den Lasern zugeordnet. Das für die Untersuchung verwendete Joblayout ist in Abbildung 44 dargestellt.

Insgesamt wurden 16 Zugproben (12 liegend, 4 stehend) und acht Dichtewürfel im Dual-Laser-Betrieb gefertigt. Als Referenz wurde zudem die gleiche Anzahl Proben unter Verwendung eines Lasers gefertigt (Single-Laser-Proben). Der Einfluss verschiedener Überlappeneinstellungen auf die Belichtung eines Bauteils ist schematisch in Abbildung 45 dargestellt. Bei Verwendung einer festen Belichtungsgrenze mit Überlappung wird die Position der Belichtungsgrenze von Schicht zu Schicht nicht verändert. Es kann ein bis zu 1 mm breiter Überlappungsbereich zwischen den Belichtungsflächen eingestellt werden, der von beiden Lasern umgeschmolzen wird. Im Falle einer variablen Belichtungsgrenze variiert die Position der Belichtungsgrenze in Aufbaurichtung, wobei ebenfalls eine Überlappung der Belichtungsflächen gewählt werden kann. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine Vielzahl von Überlappeneinstellungen getestet. Da zwischen den getesteten

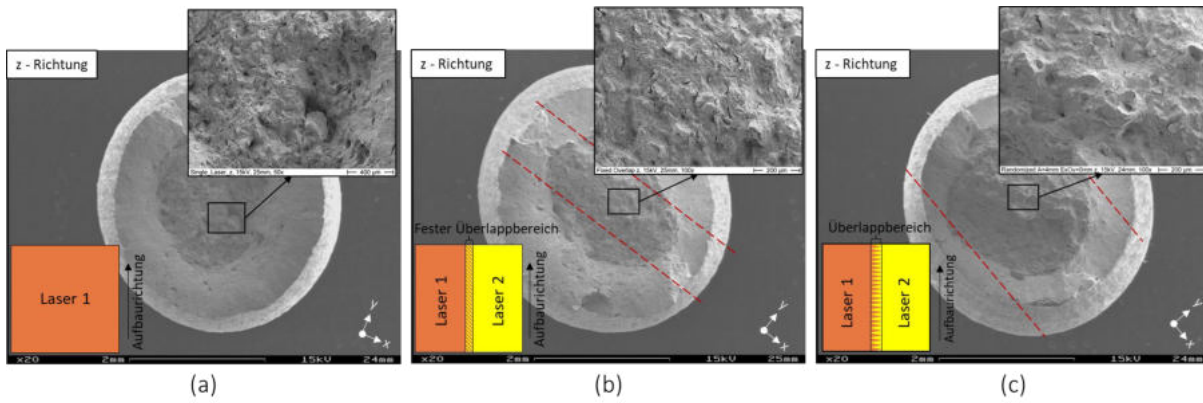


Abbildung 47: REM-Aufnahmen der Bruchflächen geprüfter Rundzugproben in Abhängigkeit der Überlappungseinstellungen. (a) Single-Laser-Referenzprobe (kein Überlapp), (b) feste Belichtungsgrenze mit 1 mm Überlappung, (c) variable Belichtungsgrenze mit 0,12 mm Überlappung

Überlappeneinstellungen mit variabler Belichtungsgrenze keine Unterschiede auf die Bauteileigenschaften festgestellt wurden, werden stellvertretend für alle gefertigten Baujobs, nur die Ergebnisse unter Verwendung einer variablen Belichtungsgrenze mit 0,12 mm Überlappung gezeigt. Die verwendeten Überlappeneinstellungen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Ausgewählte Messergebnisse der Kenngrößen Streckgrenze $R_{p0,2}$, Bruchdehnung A_{25} , relative Porosität sowie dem maximalen Defektdurchmesser sind in Abbildung 46 zusammengefasst.

Für die Streckgrenze fällt auf, dass diese für Proben, welche im Dual-Laser-Modus belichtet wurden, 1 bis 2 % niedriger ausfällt, als für die Referenzproben im Single-Laser-Modus. Die Bruchdehnung der Dual-Laser-Proben liegt auf gleichem Niveau wie die Single-Laser-Proben, jedoch mit leicht erhöhter Streuung.

Die Porosität und der maximale Defektdurchmesser weisen eine leicht erhöhte Streuung bei Verwendung einer festen Belichtungsgrenze auf. Wird hingegen

eine variable Belichtungsgrenze gewählt, sind die Porositätskennwerte identisch im Vergleich zu den Single-Laser-Proben.

Bei Verwendung einer variablen Belichtungsgrenze mit Überlappung werden somit gleiche mechanische Eigenschaften und Porositätskennwerte wie bei einer Belichtung mit einem Laser erreicht.

In Abbildung 47 sind exemplarische REM-Aufnahmen der Bruchflächen geprüfter Rundzugproben für Single-Laser-Belichtung (a) sowie Dual-Laser-Belichtung mit fester (b) sowie variabler Belichtungsgrenze (c) abgebildet. Bei der Single-Laser Referenzprobe ist ein kreisförmiger, gleichmäßig über den Probenquerschnitt verteilter Bereich duktiler Verformung zu erkennen. Ringförmig angelagert ist die spröde Restgewaltbruchfläche zu sehen.

Im Vergleich hierzu ist der Bereich duktiler Schädigung bei Verwendung einer festen Belichtungsgrenze mit Überlappung länglich entlang der Belichtungsgrenzen (rot gestrichelte Linie) gestreckt. Zudem wird eine größere Anzahl intergranularer Risse detektiert, die aufgrund der Verformung im Zugversuch entstehen.

Tabelle 6: Übersicht der getesteten Überlappeneinstellungen

Beschreibung	Scanner Pattern	Amplitude [mm]	Periode [mm]	Überlappung [mm]
Feste Belichtungsgrenze mit Überlapp	Rectangle	0	0,04	1,00
Variable Belichtungsgrenze mit Überlapp	Randomized	4	X	0,12

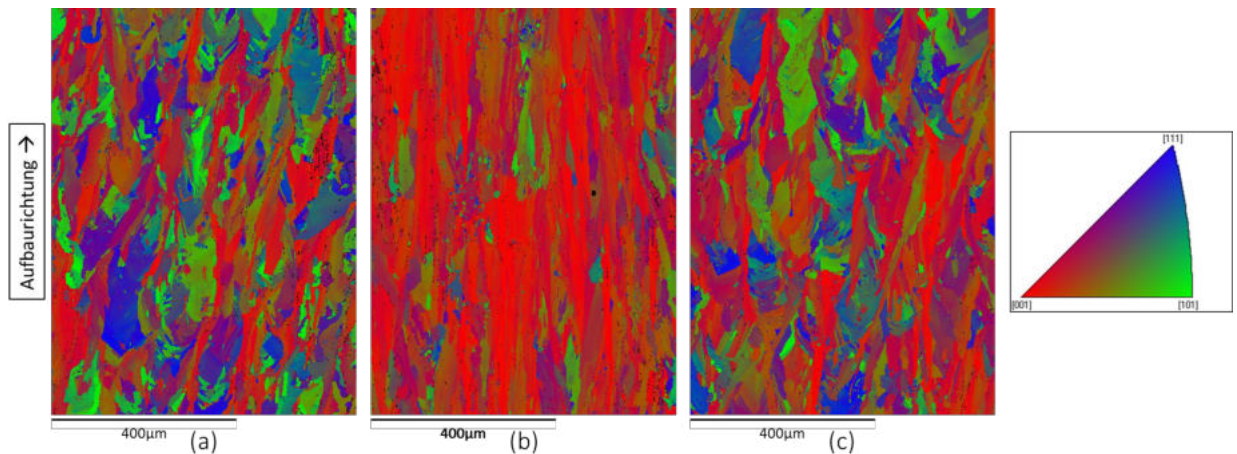


Abbildung 48: EBSD-Aufnahmen der Kornorientierung (transversale Richtung) in Abhängigkeit der Überlappstellungen. (a) Single-Laser-Referenzprobe, (b) feste Belichtungsgrenze mit Überlappung, (c) variable Belichtungsgrenze mit Überlappung

Als mögliche Ursache hierfür wird die Kornvergrößerung im Überlappungsbereich in Folge des doppelten Aufschmelzens vermutet.

Wird eine variable Belichtungsgrenze verwendet, so ähnelt die Bruchflächentopografie der Bruchfläche einer Single-Laser-Referenzprobe. Es bildet sich ein kreisförmiger Bereich duktiler Schädigung, welcher homogen über die Bruchfläche verteilt ist.

In Abbildung 48 sind EBSD-Aufnahmen der einzelnen Proben zu sehen. Dargestellt ist die Orientungsverteilung der Körner. Die Messstelle für die EBSD-Aufnahmen wurde mittig in halber Höhe der Proben platziert.

Für die Single-Laser-Referenzprobe (Abbildung 48 (a)) ist eine für IN718 typische Gefügetextur erkennbar. Aufgrund des großen Temperaturgradienten in Aufbaurichtung sind die Körner in Aufbaurichtung gestreckt, darüber hinaus ist epitaxiales Kornwachstum erkennbar (langgestreckte Gefügebereiche mit gleicher Einfärbung und somit gleicher Orientierung).

Im Falle einer festen Belichtungsgrenze (Abbildung 48 (b)), wird starkes epitaxiales Kornwachstum beobachtet. Der gesamte Bildausschnitt besteht aus einzelnen langgestreckten Körnern, die in [100]-Richtung (bevorzugte Wachstumsrichtung in kfz-Metallen) orientiert sind. Die Kornvergrößerung und verstärkte Texturierung lässt sich durch das doppelte

Aufschmelzen des Überlappungsbereiches begründen. Die ausgeprägte Grobkornstruktur erklärt zudem das vermehrte Auftreten von intergranularen Rissen im Zugversuch (siehe Abbildung 47 (b)).

Bei Verwendung einer variablen Belichtungsgrenze wird keine derart ausgeprägte Kornvergrößerung festgestellt. Die Mikrostruktur ähnelt der einer Single-Laser-Belichtung mit leicht verstärktem epitaxialen Kornwachstum in Aufbaurichtung.

Fazit

Für die Maschinen TruPrint 5000 (TiAl6V4) und EOS M400-4 (Inconel 718) konnten die Multi-Laser-Prozessführung für die industrielle Anwendung qualifiziert werden. Die geforderten Spezifikationen in Bezug auf mechanische Eigenschaften und Defektdichte werden jeweils erfüllt. Auf der M400-4 konnte gezeigt werden, dass bei Verwendung einer variablen Belichtungsgrenze im Multi-Laser-Betrieb gleiche Eigenschaften wie bei einer Single-Laser-Belichtung erreicht werden. Die hohe Bauteilqualität des Single-Laser-Betriebs wird auch im Multi-Laser-Betrieb erreicht. Somit ist eine Transferierbarkeit zwischen den Betriebsmodi gewährleistet.

Bei der TruPrint 5000 konnte gezeigt werden, dass die Multilaserbetriebsmodi identische oder bessere mechanische Bauteileigenschaften erzeugen als im Single-Laserbetrieb. Die Vollfeld-Überlappung der

Bearbeitungslaser gewährleistet eine maximale Produktivität auch bei nicht idealen Baujoblayouts, Geometrien und Anzahl der Bauteile. Durch die Multi-Laser-Prozessführung wird die Produktivität des L-PBF-Prozesses signifikant gesteigert und somit die Fertigungsdauer wesentlich reduziert.

8 Hybride Additive Fertigung durch L-PBF

Die Kosten der additiven Fertigung sind im Allgemeinen höher als z.B. für die konventionelle, spanende Bearbeitung. Ein Ansatz zur Kostenreduzierung der additiven Fertigung ist der Hybrid-AM Prozess. Hierbei wird eine komplexe Geometrie additiv auf eine geometrisch einfache, kostengünstige, konventionell hergestellte Geometrie (Halbzeug) aufgebaut. Zwei Ansätze der hybriden AM Fertigung können unterschieden werden. Zum einen die Fertigung von hybriden Neuteilen und zum anderen die Reparatur von Bauteilen. Die grundsätzliche technische Machbarkeit dieses Prozesses ist bereits demonstriert [5, 6]. Allerdings basiert diese Vorgehensweise noch auf zahlreichen manuellen Arbeitsschritten mit provisorischen Software- und Hardwarelösungen. Aufgrund der provisorischen Lösungen und der damit einhergehenden Fehleranfälligkeit, ist die Hürde für die industrielle Nutzung von Hybrid-AM groß. Eine schematische Darstellung der Prozessschritte ist in Abbildung 49 zu sehen. Bisher konnte sich weder ein Verfahren zur präzisen Positionierung und Vermessung des Halbzeuges noch ein Standardprozess zur Datenvor- und Nachbereitung durchsetzen. Dies hat zur Folge, dass die grundsätzlich sinnvolle Kombination der Vorteile der konventionellen und additiven Fertigung

nur stark eingeschränkt genutzt werden kann. Der wirtschaftliche Einsatz ist deshalb bisher nur in Ausnahmen möglich [7].

Der Schwerpunkt des zugehörigen IDEA-Arbeitspakets ist die Überwindung technischer Hürden zur industriellen Nutzung der Hybrid-AM Fertigung. Als Anwendung wurde deshalb der Ansatz zur Reparatur von bereits im Einsatz befindlichen Bauteilen ausgewählt.

8.1 Vor- und Nachbereitung

Hybrid-AM Bauteile unterliegen mehreren Vor- und Nachbearbeitungsprozessen. Wesentliche Hürden für eine industrielle Nutzung sind hierbei die Positionierung und Einspannen des Halbzeuges und die Bereitstellung einer individuell angepassten Geometrie für die additive Fertigung.

8.1.1 Positionierung und Spannung des Halbzeuges

Im Rahmen des IDEA Projektes wird die Nutzung von einheitlichen Spannsystemen über die gesamte Hybrid-AM Prozesskette angestrebt. Der Vorteil ist, dass hierdurch Spannvorgänge eingespart werden können und somit die Vorbereitungs- und Rüstzeiten deutlich reduzieren kann.

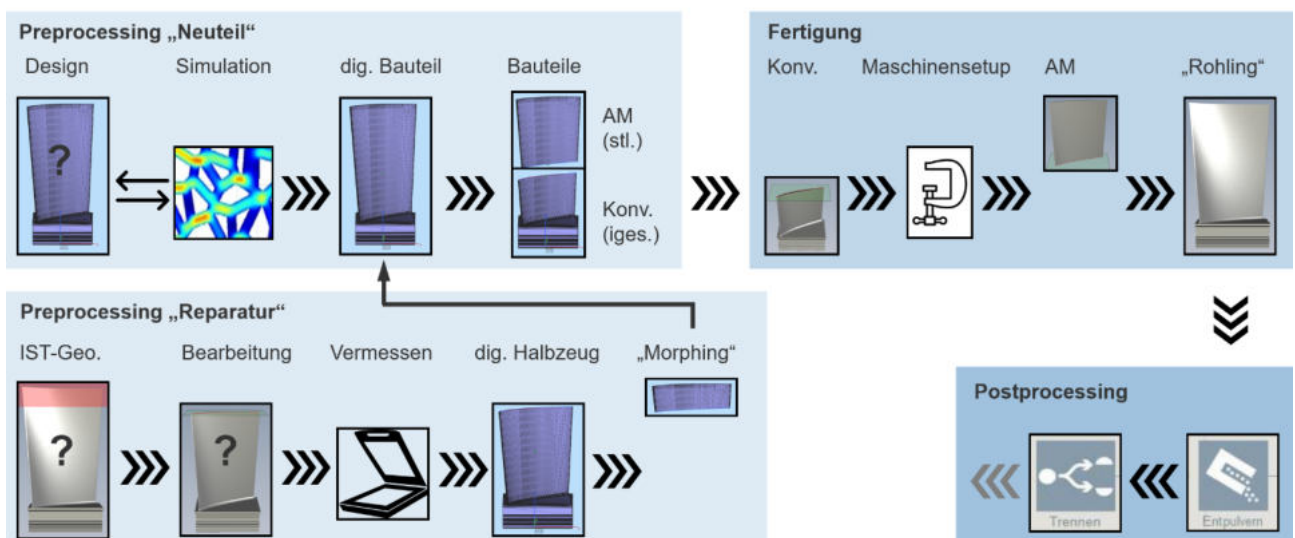


Abbildung 49: Schematische Darstellung der Hybrid-AM Prozesskette

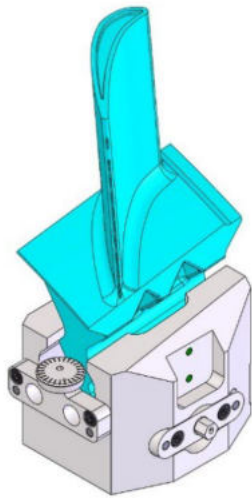


Abbildung 50: Spannsystem und aufgespannter Probenkörper

Als IDEA Demonstrator dient eine Turbinenschaufel von Siemens Energy, welche einen Reparaturprozess durchläuft. Folgende Arbeitsschritte sind dazu nötig:

- Messprozess
- Vorbereitungsprozess (Fräs- oder Schleifprozess)
- Additive Fertigung
- Nachbearbeitung
- Zahlreiche Spannvorgänge mit unterschiedlichen Trägern bzw. mit verschiedenen Spannsystemen zwischen jedem Fertigungsschritt

Diese unterschiedlichen Spannsysteme bringen den Nachteil mit sich, dass jedes Mal wieder neu positioniert und/oder gemessen werden muss. Darüber hinaus fehlen Erfahrungen und Werte über den Einfluss jedes Prozesses auf die Geometrie des Werkstücks. Das einheitliche Spannsystem sollte ein Nullpunktspannsystem (NPSS) integriert haben, um damit Rüstzeiten zu minimieren. Die auf dem Markt verfügbaren Nullpunktspannsysteme (NPSS) benötigen meistens zwei Bolzen um definiert positioniert zu werden, welche einen standardmäßigen Abstand von 200 mm haben. Außerdem wird zusätzlich eine Trägerplatte benötigt. Aufgrund dieser Faktoren sind

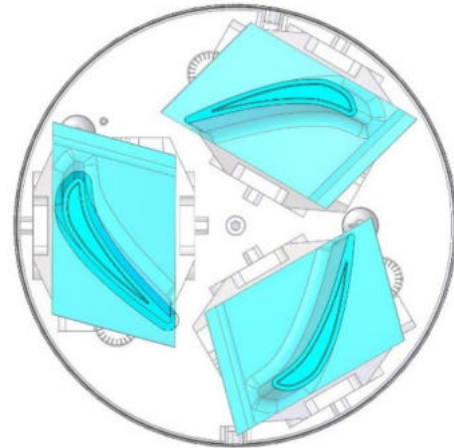


Abbildung 51: Turbinenschaufeln in AM-Anlage Träger von TRUMPF

diese Systeme empfindlich gegenüber Temperaturänderungen. Das in IDEA erarbeitete einheitliche Spannsystem ist in Abbildung 50 dargestellt.

Um die Sensibilität gegenüber Temperaturänderung so gering wie möglich zu halten, wird das Spannsystem mittels einer Bohrung zentriert und mechanisch niedergezogen. Durch einen weiteren Stift wird das Spannsystem indexiert, sodass keine Verdrehung mehr möglich ist.

Typisch für das eingesetzte NPSS ist, dass im Vergleich zu handelsüblichen Systemen das Anzugsmoment von Hand deutlich niedriger ist (10 Nm) und dennoch eine hohe Anzugskraft von 15 kN erreicht

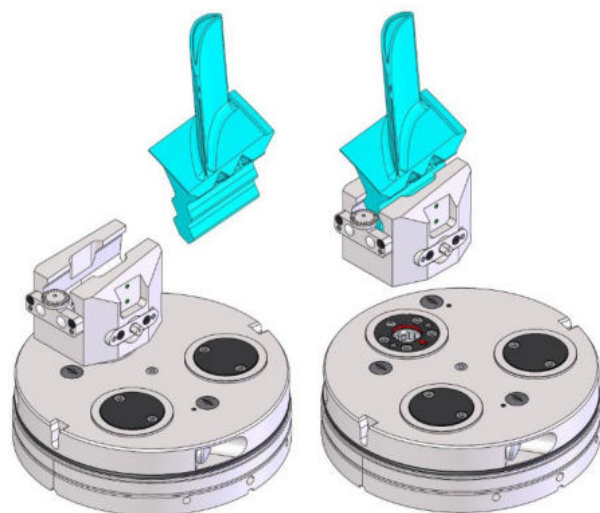


Abbildung 52: Messprozesse

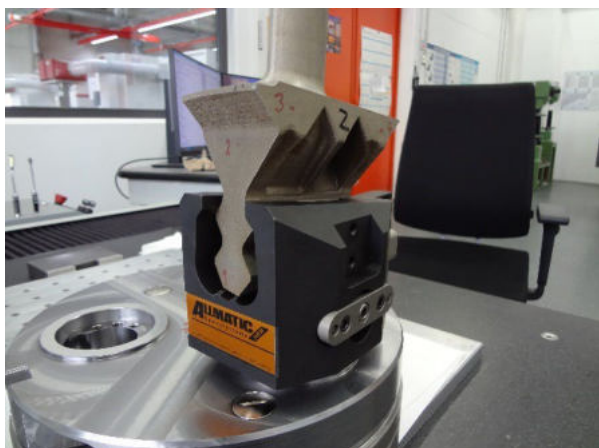


Abbildung 53: Turbinenschaufel in Spannsystem auf Messmaschine

wird. Dieser Mechanismus beruht auf einem System, welches von Allmatic stammt.

Auf Grund der geometrischen Eigenschaften des Spannsystems können nun mehrere Werkstücke auf einer Trägerplatte montiert werden, sodass mit nur einem Rüstvorgang bis zu drei Werkstücke des IDEA Demonstrators in der AM-Anlage bearbeitet werden können (Abbildung 51). Der Träger (Substratplatte) wurde von TRUMPF zur Verfügung gestellt und die notwendigen Anpassungen von Allmatic durchgeführt.

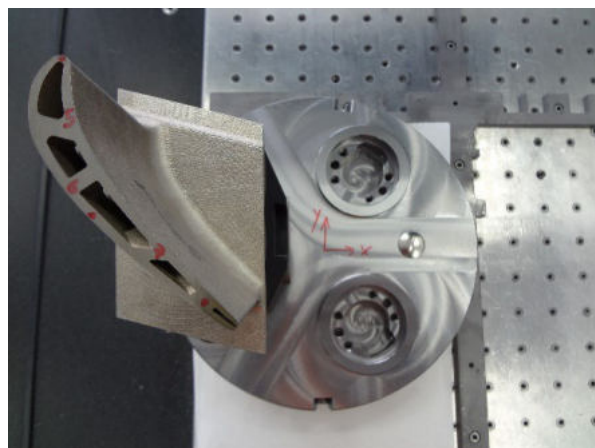
Die Messungen der Wiederholgenauigkeit wurden zum einem für die Be- und Entladung des Werkstücks in das Spannsystem, sowie ferner für die Kombination Werkstück mit Spannsystem in die Substratplatte durchgeführt. Dies ist in Abbildung 52 dargestellt.

Das Ergebnis dieser Messungen ergab folgende Wiederholgenauigkeiten:

- bei alleinigen Werkstückwechsel: 0,005 - 0,032 mm
- beim Wechsel der Kombination Werkstück samt Spannsystem: 0,025 mm

8.1.2 Anpassung der CAD/CAM-Kette für Hybrid-AM

Die weitere Herausforderung bei einer hybrid auszuführenden Reparatur von Bauteilen besteht in der passgenauen Bereitstellung der neu aufzubauenden Geometrie. Bauteile wie z.B. Turbinenschaufeln verändern im Laufe der Benutzung ihre Form durch Ver-



schleiß oder Beschädigungen. Diese Formänderungen führen aber nicht zwangsläufig zu einer Ausmusterung der Bauteile, sondern resultieren vielmehr in der Anforderung, diese Form-Änderungen bei der Reparatur zu berücksichtigen.

Die für eine hybride Reparatur vorgesehene CAD/CAM Prozesskette muss diese Aspekte berücksichtigen. Mit Kenntnis der aktuellen sowie der nominalen Bauteilform ist ein ergänzender Bereich zu berechnen, der die Formänderung des Bauteils aufnimmt und weiterführt.

Diese Aufgabenstellung ist vergleichbar mit einer von BCT entwickelten Methode zur Schaufel-Tip Reparatur, bei der ein verschlissener Tip-Bereich entfernt, Material beispielsweise mittels Laserauftragschweißen wieder aufgetragen und anschließend reprofiliert werden muss.

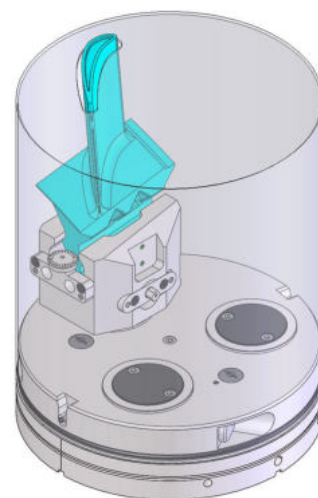


Abbildung 54: Turbinenschaufel in AM-Anlage

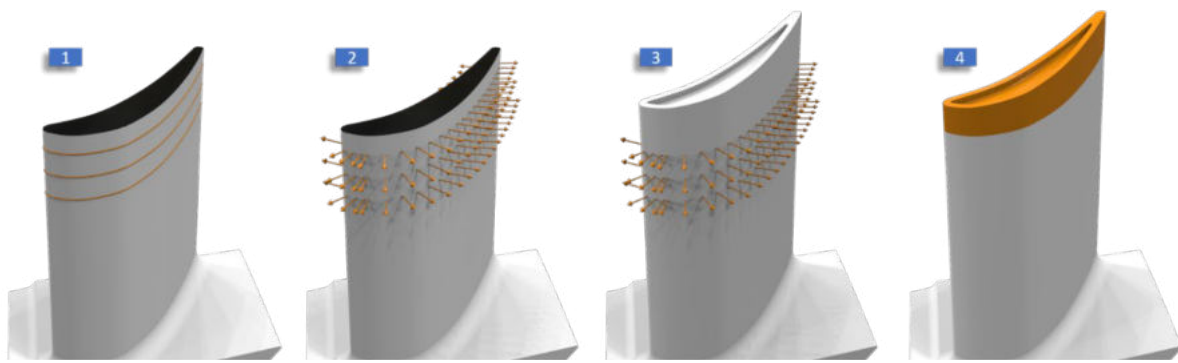


Abbildung 55: Volumenorientierter Lösungsansatz durch Anwendung eines Verformungsfeldes. (1) Mess-Schnitte, (2) Verformungen, (3) Anwendung der Verformungen auf nominales CAD-Modell, (4) berechneter Tip-Bereich

Ausgangspunkt der Berechnung ist die Repräsentation der aktuell zu bearbeitenden Schaufel (vgl. Abbildung 55) durch eine Punktwolke oder ein STL-Netz aus einem Scan, oder durch eine dichte Abfolge einzelner Messpunkte zum Beispiel aus taktile Erfassung.

Im Vergleich mit der nominalen Beschreibung des Bauteils in Form eines CAD-Modells ergeben sich Unterschiede, die in Abbildung 55 als stark überhöhte Vektoren dargestellt sind. Der globale Verformungs-

ansatz verwendet diese Abweichungen, um das nominale CAD-Modell entsprechend zu verändern (Abbildung 56). Vereinfacht gesagt, ziehen die Abweichungen das CAD-Modell in die entsprechenden Richtungen. Hierbei bleibt das Objekt als Volumen erhalten. Integrierte geometrische Bedingungen sorgen dafür, dass sich Änderungen nicht nur lokal am Messpunkt auswirken.

Berechnet wird ein Volumen, welches die Abweichungen einer individuellen Schaufel berücksichtigt und dieser direkt zugeordnet ist. Die neu berechnete

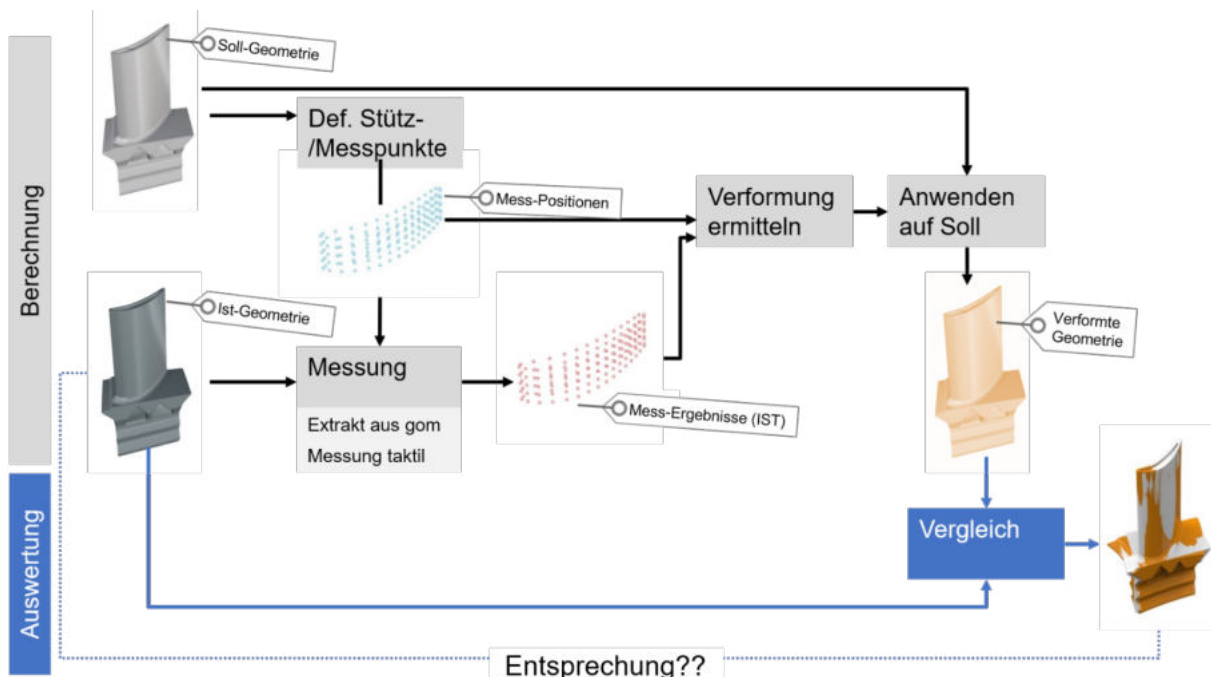


Abbildung 56: Vorgehensweise: Ermittlung der Verformungen durch den Vergleich von Soll und Ist. Anwendung auf das CAD Modell mit anschließendem Vergleich.

Geometrie kann komplett oder in Teilbereichen ausgegeben werden (4).

Der erste Entwicklungsschritt verwendet direkt vom CAD-Modell abgeleitete Verformungen (vgl. Abbildung 56).

Im CAD-Modell werden Messpunkte definiert, deren Verteilung etwa der bei der flächenbasierten Tip-Reparatur verwendeten Verteilung entspricht. Der erste Berechnungsschritt ermittelt die Unterschiede zwischen den Stützpunkten auf dem CAD-Modell und den Entsprechungen auf dem realen Bauteil (hier noch simuliert). Diese Unterschiede repräsentieren die Verformungen und lassen sich zur globalen Verformungsberechnung auf das CAD-Modell anwenden.

Zur Beurteilung der Ergebnisse stehen nun das synthetische Modell der verformten Schaufel (Ist-Geometrie) und die rechnerisch verformte Schaufel zur Verfügung. Da im Idealfall die berechnete Schaufel wieder exakt der verformten Schaufel entspricht, sollten die Unterschiede zwischen beiden Datensätzen gering sein. Das gerenderte Ergebnis in Abbildung 57 zeigt hier bereits eine gute Übereinstimmung im relevanten Tip Bereich. Die im Übergang zur Plattform auftretenden Verformungen sind nicht relevant und durch Auswirkungen der Form-Änderung im oberen Bereich begründet.

Im Rahmen der Erprobung im Projekt werden Scan-Daten einer real verformten Schaufel verwendet. Diese Daten liegen nicht mehr ideal in ein und dem-

selben Koordinatensystem vor. Daher ist eine vorbereitende Ausrichtung der Datensätze erforderlich (vgl. Abbildung 58).

Eine genaue Ausrichtung ist wichtig, da verbliebene Unterschiede zwischen Ist-Geometrie und dem CAD-Modell der idealen Schaufel in die Verformungsberechnung eingehen. Enthalten diese Unterschiede neben reinen Formabweichungen auf Grund von Verschleiß etc. auch durch Lageabweichungen hervorgerufene Anteile, so sind die resultierenden Verformungen als Eingabe für eine Berechnung zu groß. In einem solchen Fall würde das System versuchen, die Lageänderungen durch eine Änderung der berechneten Geometrie auszugleichen.

Die Berechnung der Ausrichtung dient dazu, die Lage von den Formabweichungen zu separieren. Diese Berechnungen erfolgen im BCT System zur Adaptiven Bearbeitung, welches als Basis für die IDEA Arbeiten eingesetzt wird.

Abbildung 59 zeigt das Ergebnis einer Berechnung (oben), und den Vergleich mit den Messdaten der realen Schaufel (unten). Da der obere Teil der realen Schaufel z.B. auf Grund von Beschädigungen fehlt und abgetrennt wurde, kann ein Vergleich nur in dem Bereich erfolgen, der in beiden Datensätzen enthalten ist (grau, oben).

Die Abweichungen innerhalb des untersuchten Bereichs sind sehr klein. Die schmale Kante (blau) mit größeren Abweichungen hat ihre Ursache in der Ver rundung der STL-Daten in der Scandatenverarbeitung und stellt daher für die Bearbeitungen kein Problem dar.

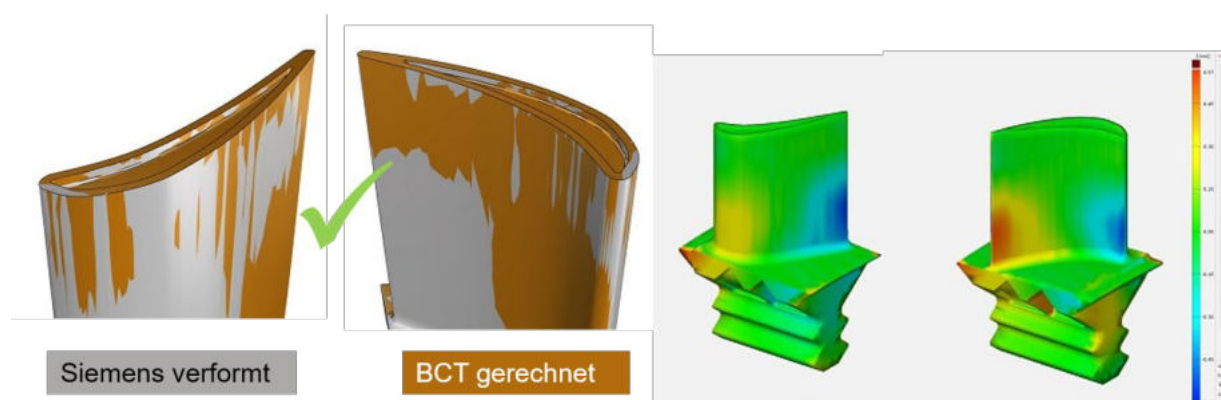


Abbildung 57: Auswertung: Vergleich der Ist-Situation mit der durch Verformung der Nominalgeometrie berechneten Schaufel.

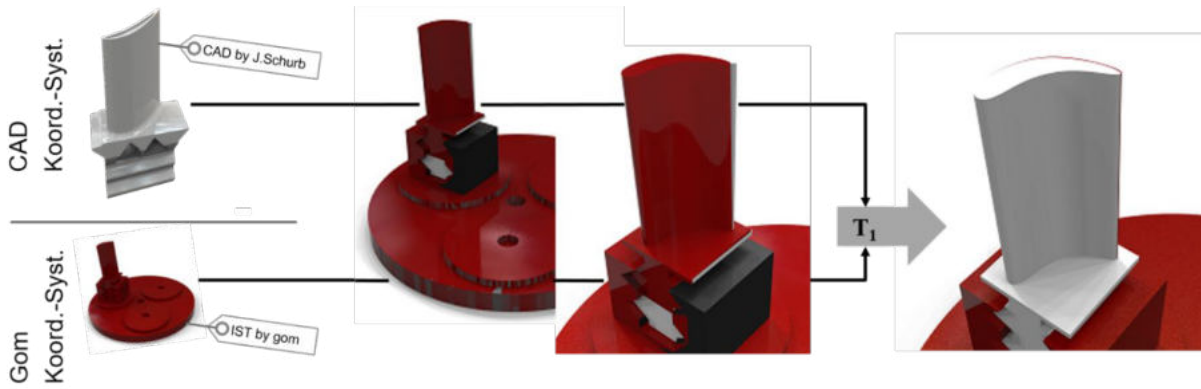


Abbildung 58: Ausrichtung CAD Modell und Scan der verformten Schaufel

Die Entwicklungen zeigen, dass es mit einem neuen Softwareansatz möglich ist, ausgehend von Messungen an realen Bauteilen, Bereiche zu rekonstruieren und diese als Volumen für die Reparatur durch Aufbau im Pulverbett zur Verfügung zu stellen.

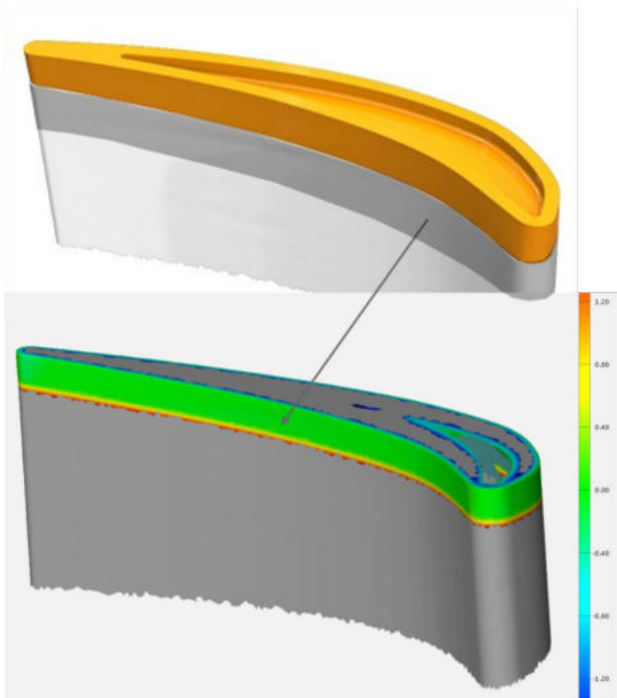


Abbildung 59: Untersuchung der Abweichungen zwischen Bauteilsan und Berechnung



Abbildung 60: Fertige gedruckte Schaufel

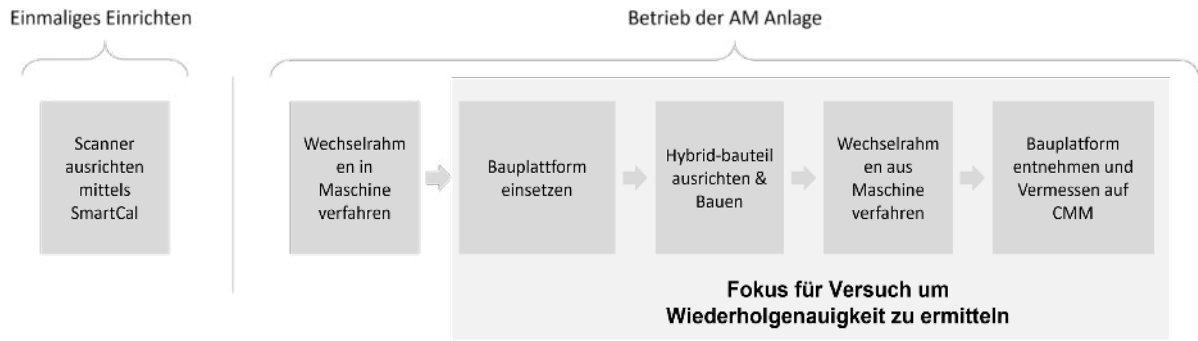


Abbildung 61: Einflussfaktoren auf die Bauteilgenauigkeit im Hybrid-AM

8.2 Positionierung des AM Bauteils auf die IST-Geometrie

Für eine durchgängige, automatisierte und genaue Teilefertigung in der additiven Fertigung spielen die einzelnen Toleranzen jedes Arbeitsschrittes eine entscheidende Rolle. Je mehr Toleranzen über die Prozesskette akkumuliert werden, desto ungenauer wird das finale Bauteil. In dem vorangegangenen Kapitel wurden die Arbeitsschritte in der Vorbereitung für die Reparaturanwendung erläutert. Die Positionierungsgenauigkeit der AM-Anlagen ist ein weiterer wesentlicher Faktor für die Bauteilqualität. Dies gilt im besonderen Maß bei der Hybrid-AM Fertigung, weil ein Versatz durch Abweichungen in der Positionierung zwischen Halbzeug und additivem Bauteil sich negativ

auf die Bauteilqualität auswirkt. Ein unstetiger Übergang zwischen Halbzeug und additivem Bauteil ist eine mögliche Schwachstelle, welche dazu führen kann, dass das reparierte Bauteil die Anforderungen nicht erfüllt.

8.2.1 Positionsgenauigkeit der EOS M400

Die EOS GmbH verfolgt mit den Versuchsreihen im IDEA Projekt an der EOS M400 das Ziel, die Toleranzen des Bauprozesses auf zwei unterschiedliche Wege zu ermitteln, um Rückschlüsse auf die Gesamt-toleranz und Lösungsansätze zur Reduktion dieser geben zu können. In Abbildung 61 ist dargestellt, welche Prozessschritte in dieser Versuchsreihe betrachtet werden.

Versuch 1 ermittelt mittels einer Koordinatenmessmaschine die Wiederholgenauigkeit eines beliebigen

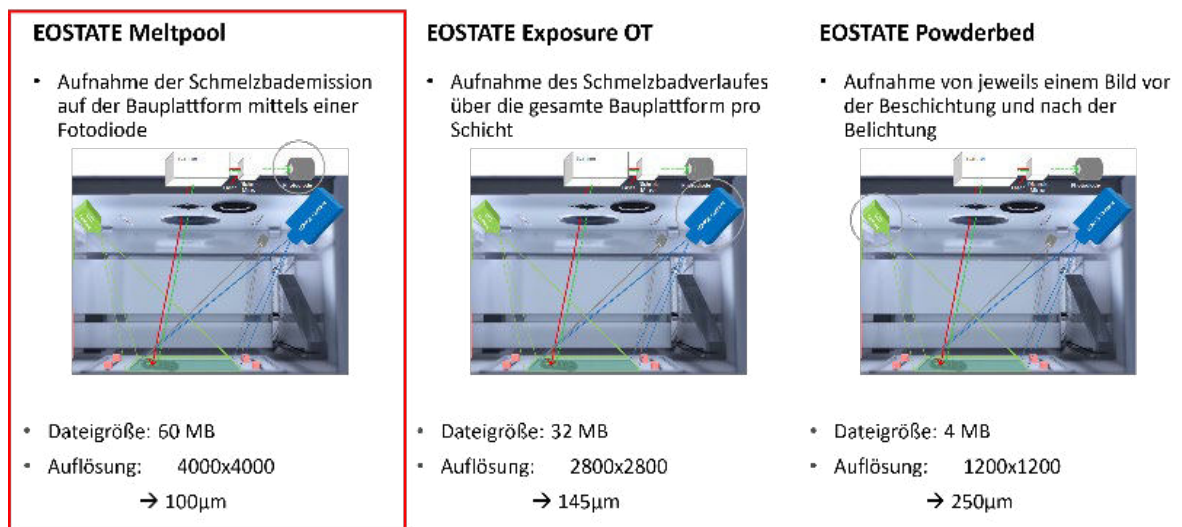


Abbildung 62: Monitoringsysteme zur In-Situ Vermessung

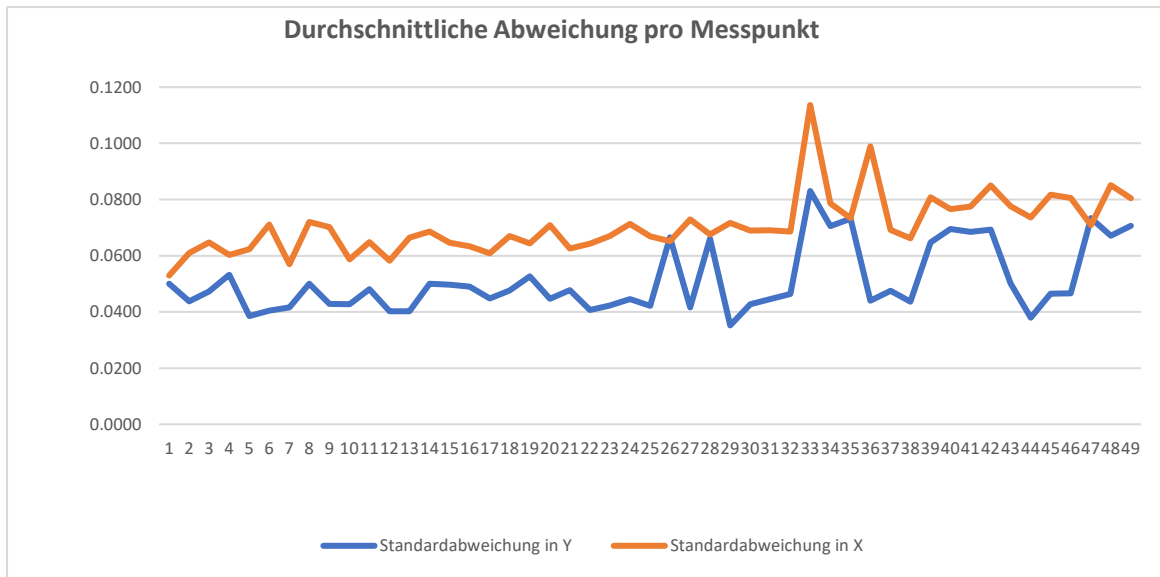


Abbildung 63: Auswertung des Versuchs 1 auf der EOS M400-4

Spannsystems im Drucker. Versuch 2 basiert auf den EOS Monitoring Systemen und untersucht die Lageabweichungen einzelner Schichten, die in vordefinierten Abständen versetzt zueinander gebaut werden (s. Abbildung 62).

Versuch 1 hat ergeben, dass die Standardabweichung in X-Richtung bei 0,0707 mm und in Y-Richtung bei 0,0511 mm liegt. Die Auswertung ist in Abbildung 63 grafisch zu sehen. Bei Versuch 2 werden durch visuelle Konturerkennung die innenliegenden Mittelpunkte der einzelnen Bauteile ermittelt. Diese Werte werden anschließend zusammengelegt und der Versatz bestimmt. 40 Werte pro Schicht und Abweichung liefern die finale Abweichung wie in Abbildung 64 dargestellt.

Aus Versuch 1 wird deutlich, dass die Abweichung der Wiederholgenauigkeit bei ca. 60 µm liegt. Hiermit lässt sich die Aussage treffen, dass sich das bekannte

Verfahren der EOS M290 zur Absolut-Positionierung gut auf die EOS M 400-4 adaptieren lässt.

Die unterschiedlich untersuchten Monitoring Systeme zur In-Situ Messung aus Versuch 2 sind als Ausblick zu verstehen. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass sie sich eignen, jedoch aufgrund ihrer aktuellen Auflösung nicht die gewünschte Genauigkeit liefern. Dieses lässt sich jedoch durch hochauflösende Kamerasysteme beheben. Am vielversprechendsten ist basierend auf den bisherigen Untersuchungen das EOSTATE Exposure OT für einen zukünftigen Einsatz geeignet.

8.2.2 Positionierung Baujobdatei auf einer TruPrint 5000

Die Untersuchungen des Spannsystems, der digitalen Vorbereitung und der Positionsgenauigkeit der EOS

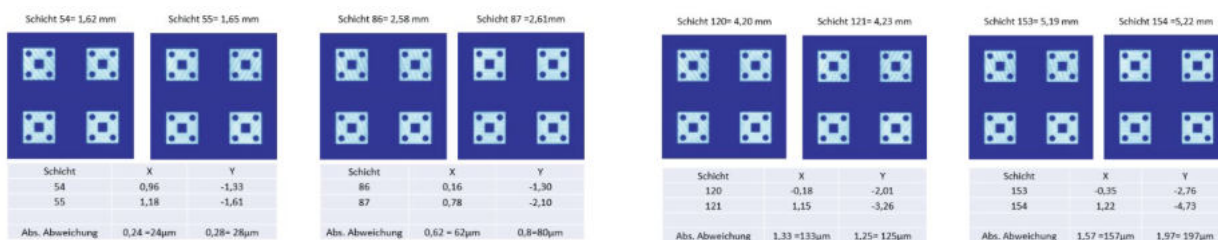


Abbildung 64: Auswertung Versuch 2

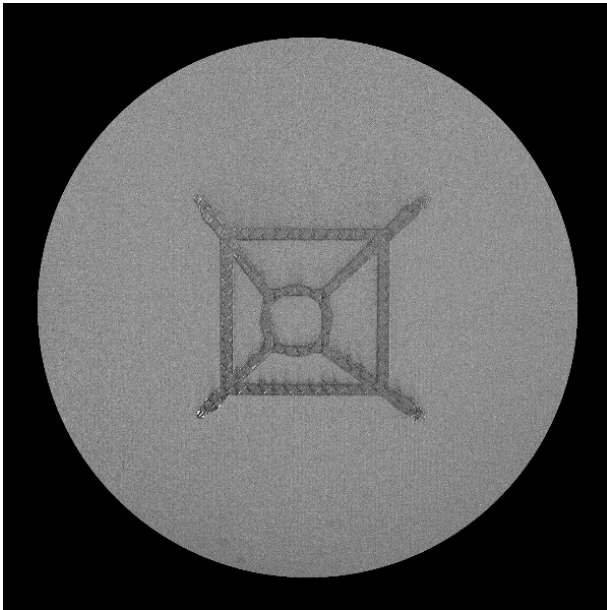


Abbildung 65: Rektifiziertes Kamerabild der Bearbeitungsfläche der TruPrint 5000

M400 haben gezeigt, dass eine akkumulierte Toleranz von mehreren 1/10 mm zu erwarten ist. In zahlreichen Anwendungsfällen würde eine Toleranz von mehreren 1/10 mm insbesondere bei Bauteilen mit innenliegenden Features, welche nicht oder nur sehr aufwendig nachbearbeitet werden können, nicht zulässig sein. Dies würde das Anwendungsspektrum für die hybride Fertigung erheblich einschränken. Um

ein breites Anwendungsspektrum zu ermöglichen, müssen die geometrischen Abweichungen reduziert werden. Eine Möglichkeit ist, die Toleranzkette durch eine Positionsanpassung in der AM-Anlage zu verkürzen. TRUMPF hat in der TruPrint 5000 eine kamerunterstützte, manuelle Positionierung entwickelt. Hierdurch wird dem Maschinenbediener ermöglicht, manuell die Bauteileposition auf dem Halbzeug anzupassen. Die manuelle Ausrichtung erfolgt anhand von rektifizierten Kamerabildern, wie in Abbildung 65 dargestellt. Einzelne Bauteile, sowie auch der ganze Baujob, können translatorisch und rotatorisch auf der TruPrint 5000 verschoben werden. Zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit wird die Kontur der Bauteile eingeblendet, wie exemplarisch in Abbildung 66 dargestellt ist. Die Funktion ermöglicht ein Vergrößern der Bilder, um das Ausrichten an spezifischen Bauteilmerkmalen, wie z.B. Kanten, Bohrungen etc., zu erleichtern.

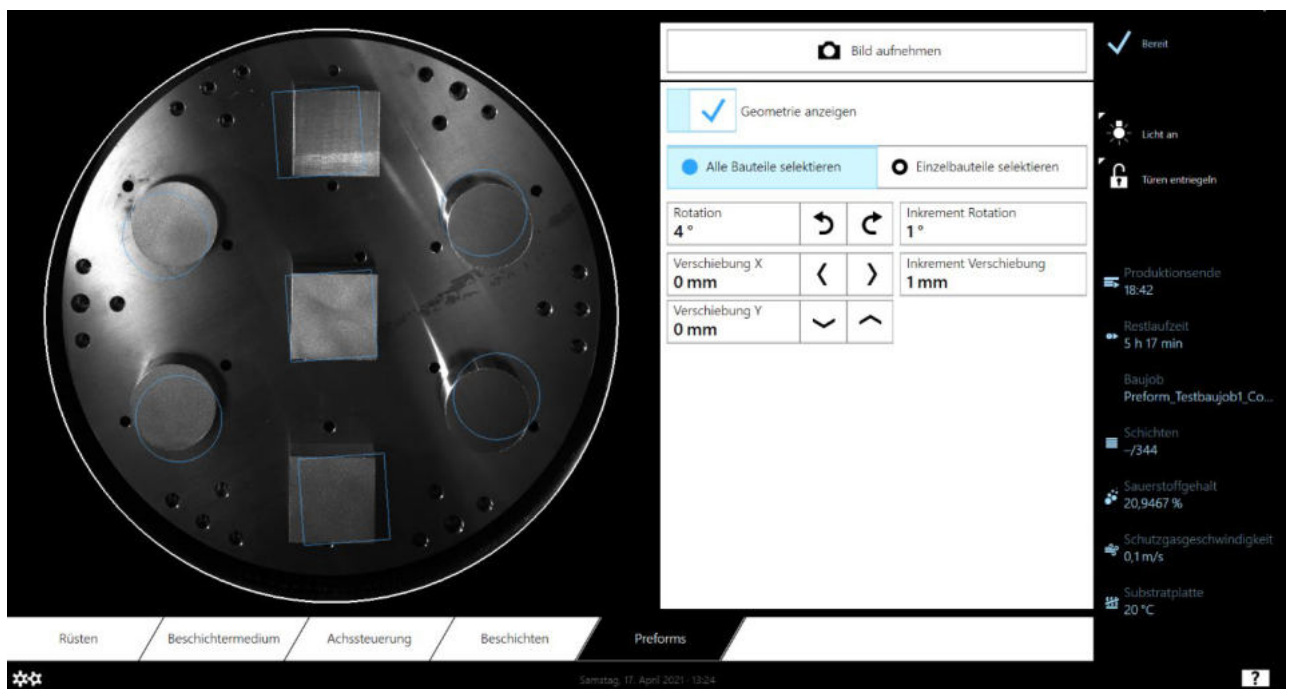


Abbildung 66: Hybrid-AM Bedienoberfläche TruPrint 5000

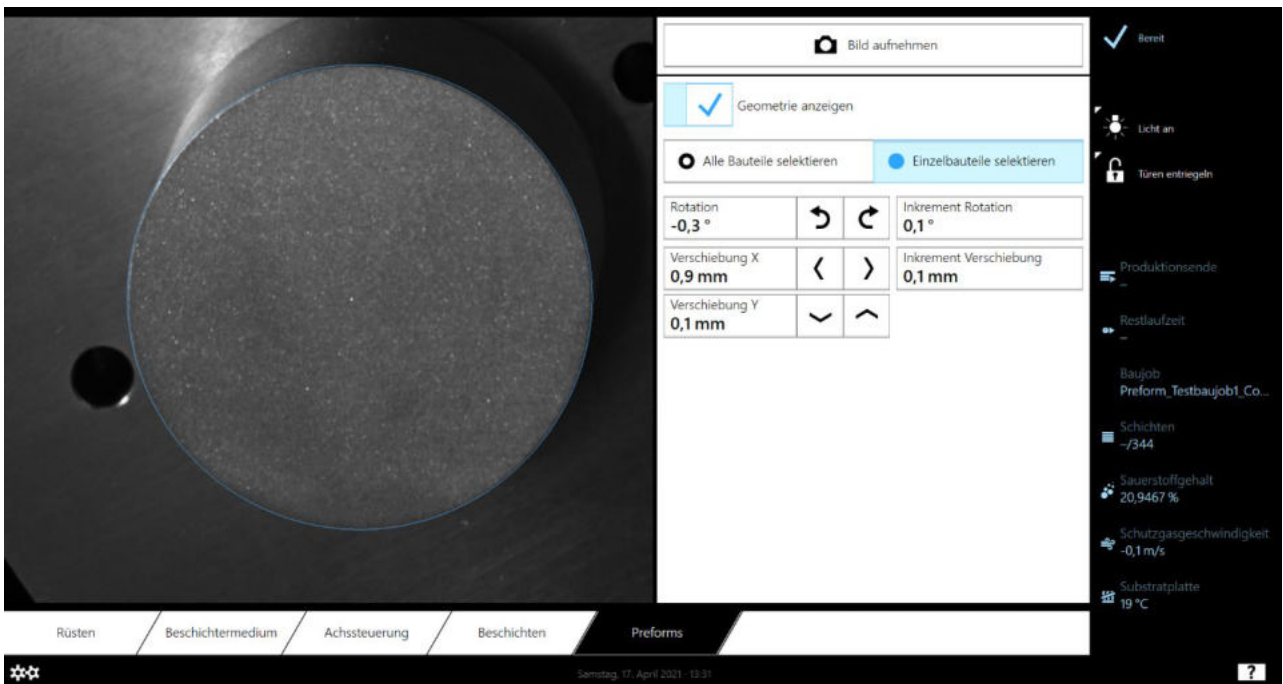


Abbildung 67: Positionierung eines Bauteils anhand gezoelter Ansicht

8.3 Funktionserprobung

Die Erprobung der Funktion ist in zwei Phasen unterteilt. Zunächst wird in der ersten Phase der Schwerpunkt der Erprobung auf die korrekte Funktionsweise, Visualisierung und die Handhabung gelegt. Festgestellte Probleme, Fehler und weitere Optimierungsmöglichkeiten wurden identifiziert und eingearbeitet. Hierbei wurde zunächst der Einfluss des Materials und der Oberflächenbeschaffenheit untersucht. Beide Faktoren haben einen starken Einfluss auf die Güte der Kamerabilder. In Abbildung 68 sind exemplarisch zwei Proben mit unterschiedlicher Bearbeitung dargestellt. Als Optimierungen wurde die Einstellung der Belichtungszeit, eine Zoomfunktion, das Selektieren von Bauteilen und das Sperren der Auswahl, sowie das Einblenden der Bauteilkontur integriert. Dies ermöglicht dem Benutzer eine bestmögliche Unterstützung zur Feinpositionierung der Bauteile auf der Maschine.

In der zweiten Phase wurde die Genauigkeit und Tauglichkeit in einem Produktionsumfeld auf der Pilotlinie untersucht. Hierzu wurde die Hybrid-AM Funktion in die TruPrint 5000 von Siemens Energy in Berlin integriert und die Maschinenbediener eingewiesen. Zunächst wurde die Genauigkeit an simplen

Geometrien getestet. Hierzu wurden als Halbzeuge Quader und Zylinder genutzt. Basierend auf den bekannten Maßen der Halbzeuge wurden Baujobdateien erstellt und mit der Hybrid-AM Funktion positioniert. Die Auswertung der Genauigkeit ermöglicht die Abweichungen durch Deformierungen oder Fertigungstoleranzen des Halbzeugs zu minimieren. In Abbildung 69 ist repräsentativ ein Hybrid-AM Testbaujob dargestellt. Der Versuch hat eine mittlere Abweichung der Mittelpunkte des Halbzeugs zum additiv aufgebauten Bauteil von 94 µm und eine maximale Abweichung von 136 µm.

Während den Untersuchungen wurden keine Prozessinstabilitäten festgestellt. In Abbildung 70 ist eine CT

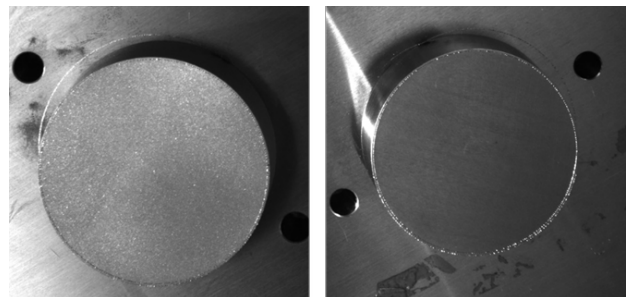


Abbildung 68: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit gestrahlt mit Glasperlen (links) sowie unbehandelt mit Fase (rechts)

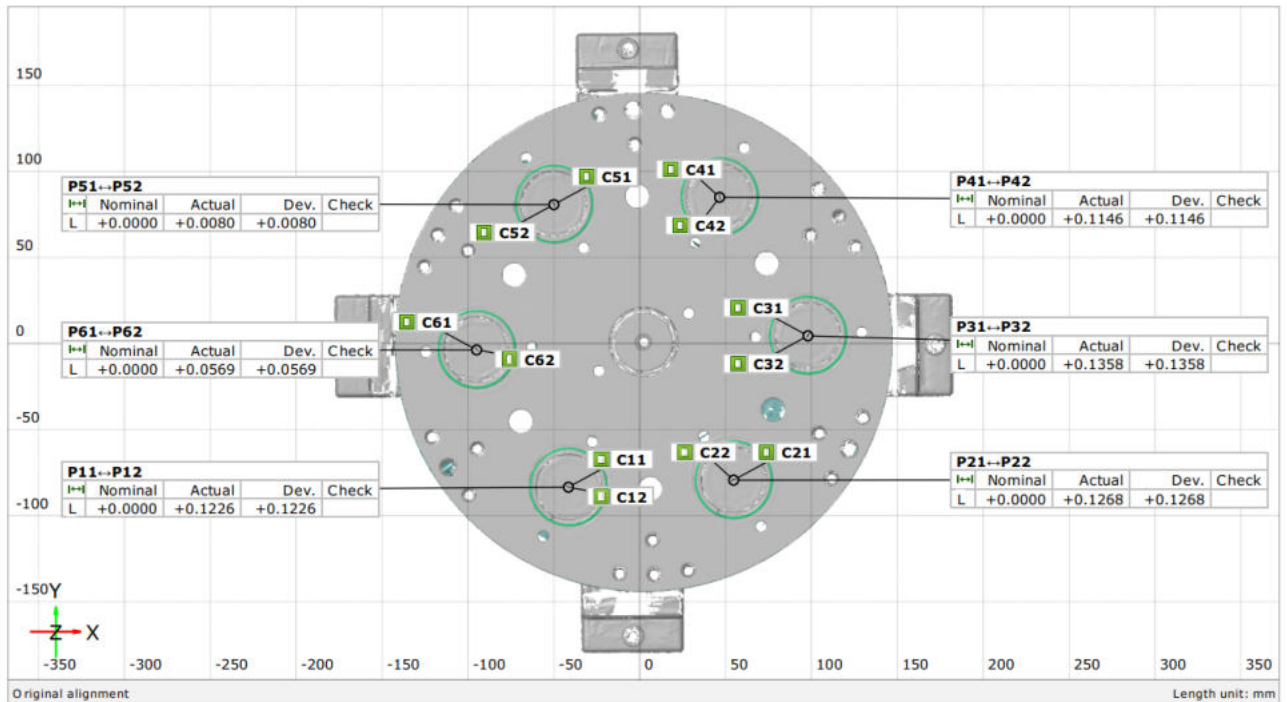


Abbildung 69: Vermessung eines Hybrid-AM Testbaujobs

Untersuchung des IDEA Demonstrators dargestellt. Weder in dem Übergangsbereich zwischen Halbzeug und additiven Bauteil, noch innerhalb des Bauteils, konnten Materialdefekte oder Anbindungsfehler festgestellt werden. Einen Einfluss auf die Ausschussrate ist nicht feststellbar.

8.4 Validierung der Projektziele

Die Projektziele sind eine Halbierung der Produktionskosten (bezogen auf die gesamte Prozesskette), Durchlaufzeiten in der Produktion, Entwicklungszeit (digitale Prozesskette) und der Ausschussrate. Dies soll durch praxisnahe Demonstratoren auf der Pilotline validiert werden. Im Falle des Hybrid-AM Prozesses wird dies anhand der Reparatur von beschädigten Turbinenschaufeln gezeigt. Siemens Energy hat zu diesem Zweck eine realitätsnahe Demonstrationschaufel zur Verfügung gestellt. Anhand dieser wurde die Fixierung durch ein geeignetes Spannsystem, die digitale Vorbereitung, bzw. das Morphing der CAD-Datei und die Positionierung in der AM-Anlage entwickelt und erprobt. In Abbildung 72 sind die wesentlichen technischen Arbeitsinhalte und Ergebnisse der Untersuchung dargestellt.

Die Betrachtung der wirtschaftlichen Kriterien (Produktionskosten, Durchlaufzeiten) erfolgen im Vergleich zum IST-Zustand zum Beginn des IDEA Projektes. Hierzu wurde zunächst die Prozesskette des Hybrid-AM Prozesses erfasst. In Abbildung 71 oben sind die wesentlichen Arbeitsschritte des Hybrid-AM Prozesses zum Beginn des IDEA Projektes dargestellt. Die manuell intensive digitale Vorbereitung, insbesondere das Morphing der CAD-Datei, und das Positionieren der Baujobdatei auf dem Halbzeug neh-

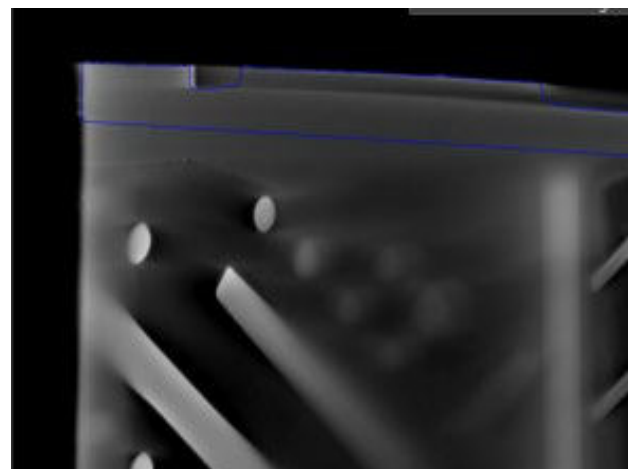


Abbildung 70: CT-Scan des IDEA Hybrid-AM-Demonstrators

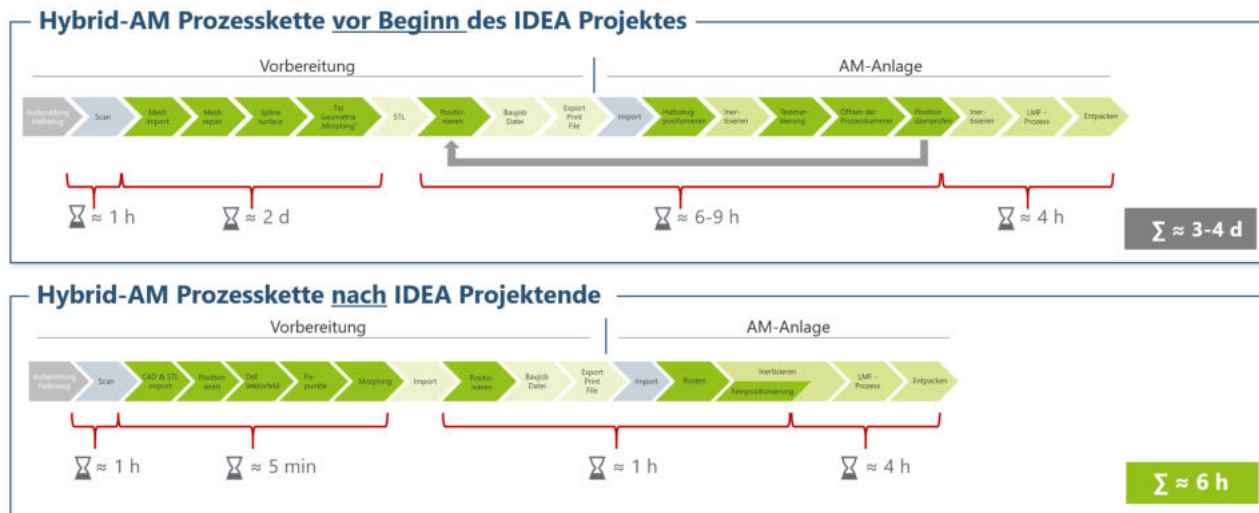


Abbildung 71: Hybrid-AM-Prozesskette samt Durchlaufzeit vor IDEA (oben) sowie nach Projektende (unten)

men den Großteil der Durchlaufzeit ein. Die wertschöpfende Fertigung der Turbinenschaufel nimmt mit ungefähr 4 Stunden nur einen kleinen Teil der Durchlaufzeit ein.

In Abbildung 71 unten ist die Hybrid-AM Prozesskette, welche durch das IDEA Projekt ermöglicht wurde, dargestellt. Die manuellen Arbeitsschritte konnten erheblich reduziert werden. Die digitale Vorbereitung wurde von ungefähr zwei Tagen Aufwand auf wenige Minuten pro Bauteil reduziert. Die Positionierung auf der AM-Anlage wurde von ungefähr einem Arbeitstag auf ungefähr eine Stunde reduziert. Die gesamte Durchlaufzeit konnte um ≈80 % auf sechs Stunden reduziert werden. Der manuelle Aufwand sinkt um ≈90 % und die Maschinenbelegung um

≈85 %. Abbildung 72 bietet einen Gesamtüberblick der Validierungsergebnisse.

8.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des IDEA Projektes wurde ein industriell tauglicher Hybrid-AM Prozess erarbeitet. Die Durchlaufzeit wurde um ≈80 % und die Kosten um bis zu 90 % reduziert. Insbesondere die um ≈85 % reduzierte Maschinenbelegung und um ≈90 % reduzierten Personalaufwand erhöhen den Durchsatz und die Wirtschaftlichkeit des Hybrid-AM Prozesses erheblich. Der Anteil des wertschöpfenden Fertigungsprozesses an der Durchlaufzeit wurde auf ≈66 % (um das Fünffache) gesteigert. Die Projektziele der Halbierung

Validierung der Projektziele anhand von Serienbauteilen auf Demonstrationslinien

Ergebnisse an der Pilotlinie

50 % Produktkostensenkung (finales Bauteil, bezogen auf gesamte Kette, inkl. Nach- und Endbearbeitung sowie Qualitätskontrolle)



≈ -85 % **Maschinenbelegung**
 ≈ -75 % **Gasverbrauch**
 ≈ -90 % **Personalaufwand**

50 % Einsparung im Bereich der Durchlaufzeiten (Produktion, end-to-end)



≈ -80 % **Durchlaufzeit „Hybrid-AM Prozessschritt“**

50 % Entwicklungszeit (Time to Market) → digitale Kette (Dateiformate, standardisierte Softwareschnittstellen)



≈ -95 % **Vorbereitungszeit**

50 % Reduktion der Ausschussrate bei Neuteilen (Simulation, digitale Tools, robuster Prozess)



Keinen Einfluss auf die **Ausschussrate** des AM – Prozess feststellbar

Abbildung 72: Validierung der IDEA-Projektziele im Kontext Hybrid-AM

der Produktionskosten, Durchlaufzeiten und Entwicklungszeit wurden an einem praxisnahen Demonstrator auf der Pilotlinie nachgewiesen und sogar deutlich übertroffen.

9 Maschinencharakterisierung und -übertragbarkeit

9.1 Übertrag der Materialqualität

In einem weiteren Arbeitspaket wurde die Übertragbarkeit der Fertigung zwischen AM-Anlagen unterschiedlichen Typs untersucht. Dazu wurden für das Fokusmaterial Ti6Al4V relevante Kenngrößen zur Charakterisierung der Materialqualität festgelegt und auf je zwei Single-Laser-Anlagen (SL) und Multi-Laser-Anlagen (ML) entsprechende Prüfkörper aufgebaut. Für eine gute Vergleichbarkeit wurden möglichst viele Einflussgrößen entlang der Prozesskette ausgeschlossen: So verwendeten z.B. alle Partner Pulver einer Fertigungscharge und fertigten identische Testcoupons unter Verwendung eines identischen oder ähnlichen Joblayouts (vgl. Abbildung 82). Die Wärmebehandlung erfolgte beim Partner Toolcraft in möglichst wenigen Zyklen und die Prüfung jeweils beim selben Partner bzw. Dienstleister. Die Analysen haben für die verwendeten Single-Laser-Anlagen TruPrint 3000 und M290 zwar signifikante Unterschiede in der Porosität gezeigt (vgl. Abbildung 73), die Zugeigenschaften und Wöhlerkurven waren dennoch sehr ähnlich (vgl. Abbildung 74). Zur Beurteilung der Übertragbarkeit zwischen SL- und ML-Anlagen wurden diese Untersuchungen ebenfalls auf einer EOS M400-4 und einer TruPrint 5000 durchgeführt. Die Maschinen wurden im Single-

Laser-Betrieb (max. Anzahl der Laser pro Schicht; 1 Laser pro Bauteil) und im Multi-Laser-Betrieb (max. Anzahl der Laser pro Schicht; 2 Laser pro Bauteil bei EOS M400-4 und 3 Laser pro Bauteil bei TruPrint 5000) gefertigt.

Bei der Untersuchung der EOS M290 und M400-4 wurden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der statischen mechanischen Eigenschaften (vgl. Abbildung 75) zwischen den Maschinen oder den Betriebsmodi der Multilaseranlage festgestellt. Die beiden Ausreißer im SL-Modus sind auf einen Beschichtungsfehler zurückzuführen. Die Ermüdungseigenschaften der Proben aus der M400-4 im SL-Betrieb und der M290 weisen eine hohe Vergleichbarkeit auf (vgl. Abbildung 76). Die Untersuchungen zum Einfluss des ML-Betriebs auf die Ermüdungseigenschaften sind Gegenstand noch laufender Untersuchungen. Es wird jedoch erwartet, dass ähnliche Ergebnisse wie im SL-Betrieb erreicht werden. Ein Übertrag der Fertigung zwischen den Systemen ist unter Vorbehalt der Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen im ML-Betrieb gegeben.

Bei der Untersuchung von TruPrint 3000 und TruPrint 5000 sind signifikante Unterschiede zwischen den Maschinen festgestellt worden. Aufgrund der Hochtemperaturvorheizung der TruPrint 5000 von bis zu 500 °C wurde eine ausführlichere Untersuchung mit zusätzlichen Einflussfaktoren durchgeführt, die in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert wurden.

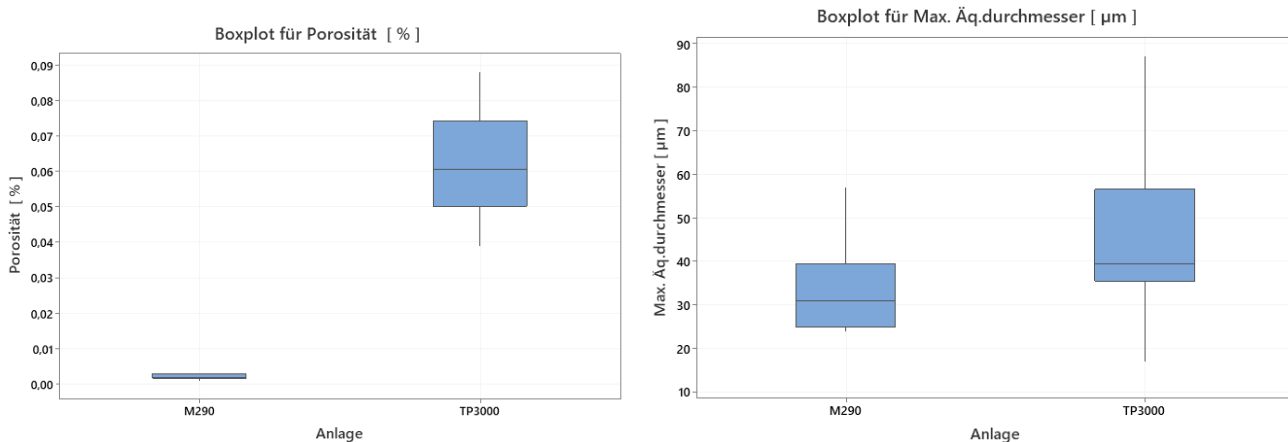


Abbildung 73: Vergleich von Porosität (links) und maximalem Äquivalenzdurchmesser der Poren (rechts) für die SL-Anlagen TP3000 und M290

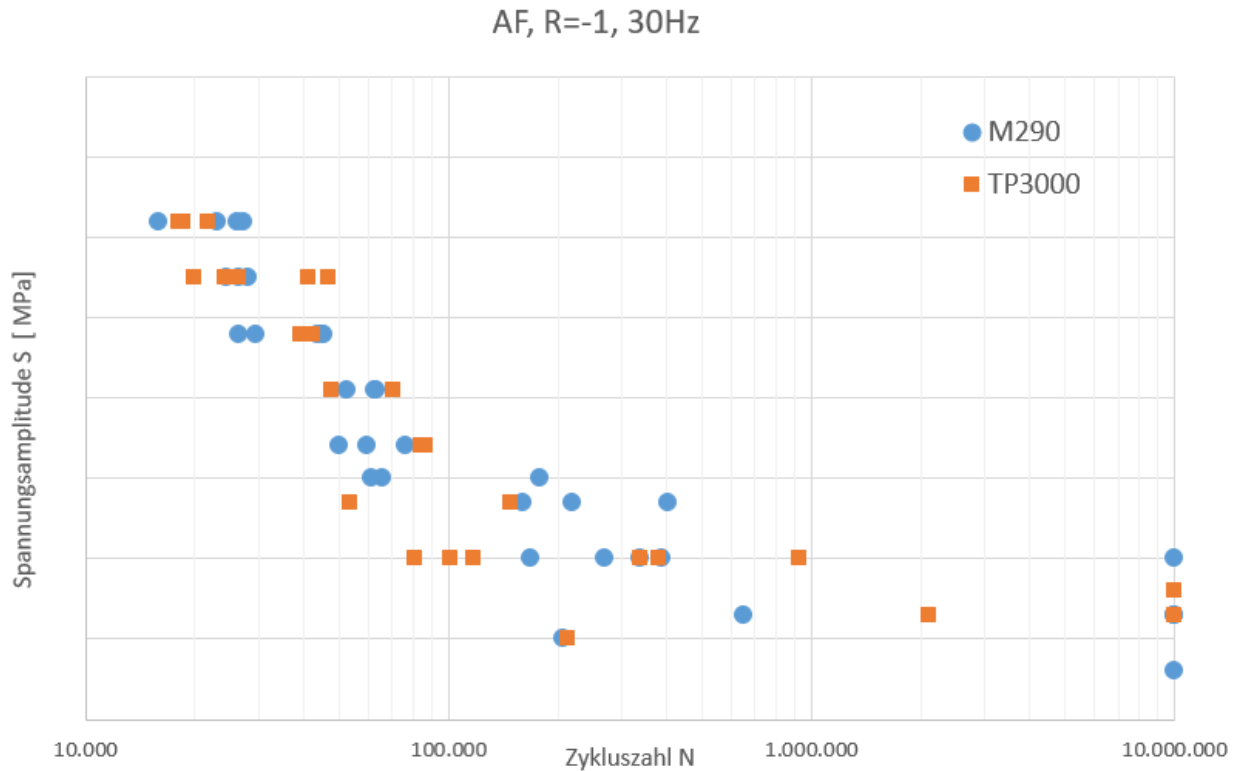


Abbildung 74: S-N-Kurven für TP3000 und M290

Die Untersuchung der Ermüdungseigenschaften (vgl. Abbildung 77) ergibt folgendes Bild: Die meisten Datenpunkte weisen eine signifikante Verbesserung der dynamischen Eigenschaften im Vergleich zur TruPrint 3000 auf, im Zeitstandsbereich steigt die Zykluszahl um etwa den Faktor 20. Gleichzeitig gibt es zahlreiche Datenpunkte, deren Zykluszahl auf das Niveau der

SL-Anlagen abfällt. Diese Datenpunkte können einzelnen Prüfständen zugeordnet werden. Es ist nicht abschließend geklärt, ob es sich um Ausreißer verursacht vom Prüfstand oder erhöhte Streuung im AM-Prozess handelt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Übertrag von der TruPrint 3000 auf die TruPrint 5000 ohne Anpassungen möglich ist.

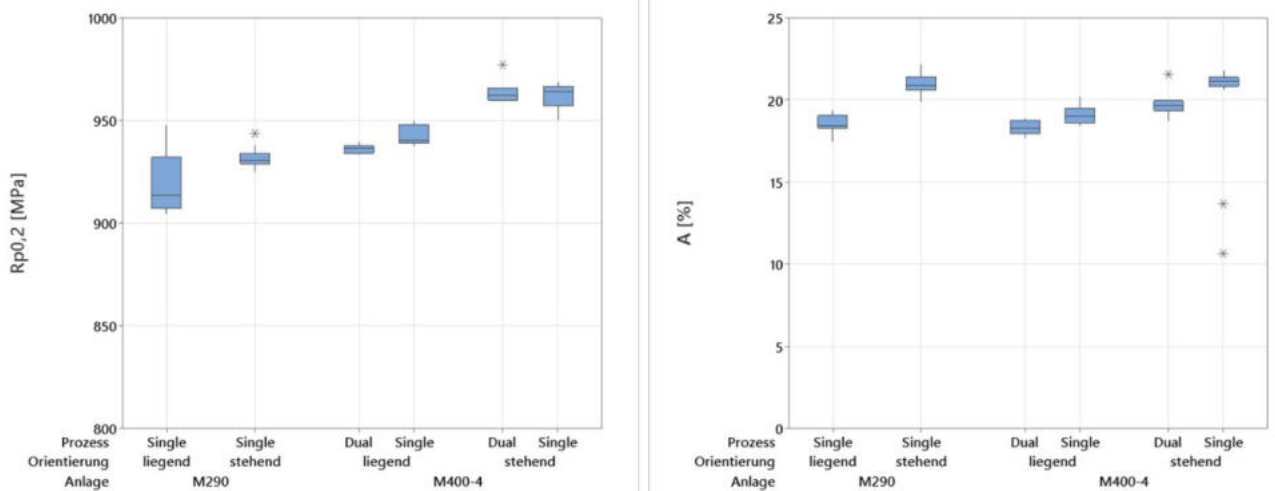


Abbildung 75: Statische Zugeigenschaften für Übertrag zwischen EOS M290 und EOS M400-4

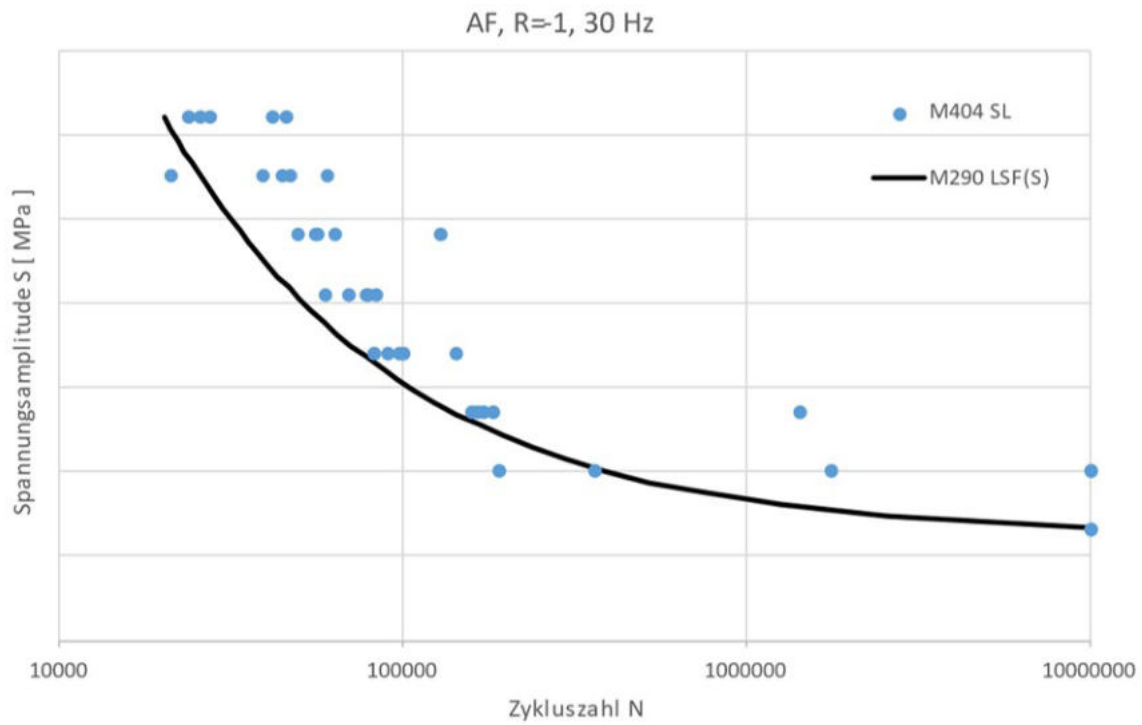


Abbildung 76: S-N-Kurve für SL-Modus der EOS M400-4 im Vergleich zur 50-50-Kurve der EOS M290

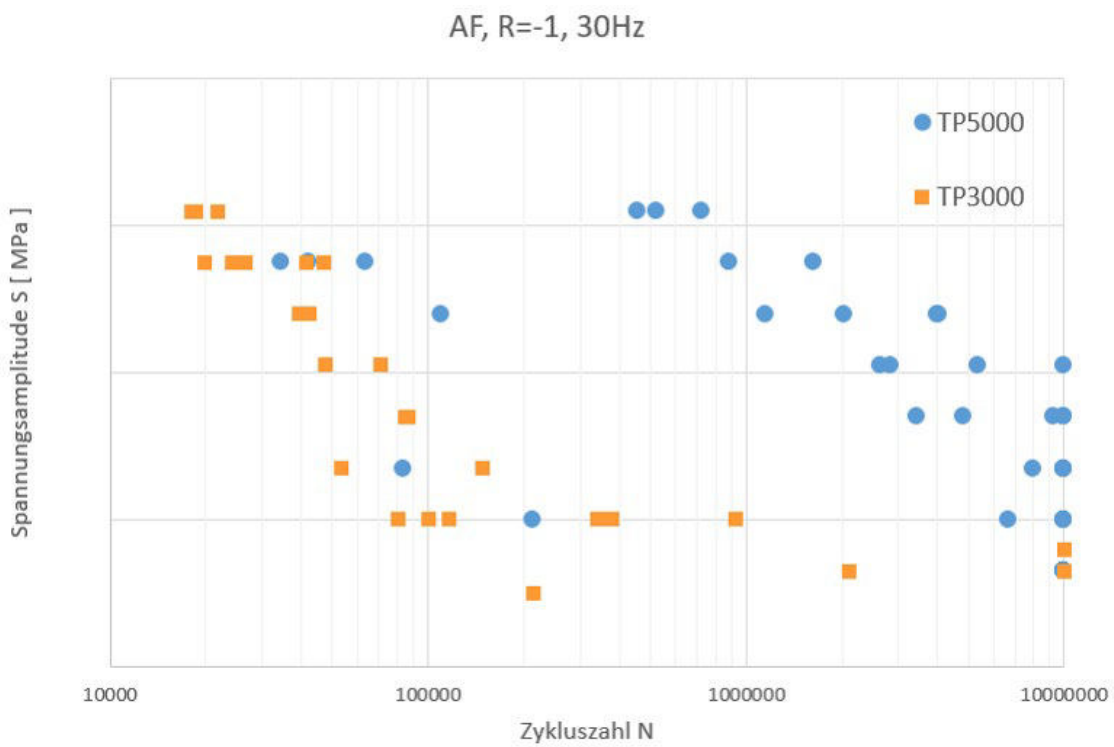


Abbildung 77: S-N-Kurven für die TruPrint 5000 im Vergleich zur TruPrint 3000

Insgesamt lässt sich aufgrund der Untersuchungen schlussfolgern, dass trotz einzelner Unterschiede die maßgeblichen statischen und dynamischen Eigenschaften von Multilaseranlagen mit Singlelaseranlagen mindestens vergleichbar sind. Für sicherheitskritische Anwendungen oder Anwendungen mit hohen Anforderungen an dynamische Eigenschaften wird üblicherweise, anstelle der hier verwendeten drucklosen Wärmebehandlung, das heiß-isostatische Pressen (HIP) verwendet. Die Porosität wird dadurch deutlich reduziert und die Ermüdungseigenschaften weiter verbessert.

Signifikante Unterschiede gibt es zwischen EOS M290 und TruPrint 3000 bei der geometrischen Auflösung feiner Details. Während die EOS M290 unter den gewählten Testbedingungen Strukturen ab 0,3 mm herstellen kann, ist dies für die TruPrint 3000 ab 0,8 mm der Fall. Diese Unterschiede sind auf abweichende anlagenherstellerspezifische Parameter-einstellungen zurückzuführen.

9.2 Maschinencharakterisierung

Neben der Übertragbarkeit wurde untersucht, wie sich eine Variation der Einflussfaktoren Laserleistung und Spotlage auf die Materialqualität bemerkbar macht und ob eine Erweiterung der bisher verwendeten engen Toleranzgrenzen möglich ist. Dabei hat sich gezeigt, dass beide Einflussgrößen deutlich stärker

variiert werden können, als aktuell üblich, ohne dass sich die Materialqualität ändert.

Auffälligkeiten im Gefüge und in der S-N-Kurve sind erst bei einer deutlichen Verschiebung der Spotlage (Abbildung 78d) feststellbar. Die statischen Zugeigenschaften bleiben im gesamten Prüfbereich unverändert. Verglichen mit den bisher definierten Toleranzgrenzen für die Spotlage, ist damit eine deutliche Aufweitung der Toleranzgrenzen möglich. Insbesondere die Vermessung der Fokuslage ist aufwendig. Durch die Senkung der Prüfhäufigkeit bzw. die Verwendung einer einfacheren Methode ist es möglich, die Ausfallzeiten der Anlage signifikant zu senken und Kosten einzusparen.

Die Untersuchung zur Laserleistungsvariation hat gezeigt, dass die SL-Maschinen beider Hersteller EOS und TRUMPF sehr robust gegenüber einer Schwankung der Laserleistung sind. Bei einer Abnahme der Laserleistung konnte keine Änderung der geprüften statischen Eigenschaften nachgewiesen werden.

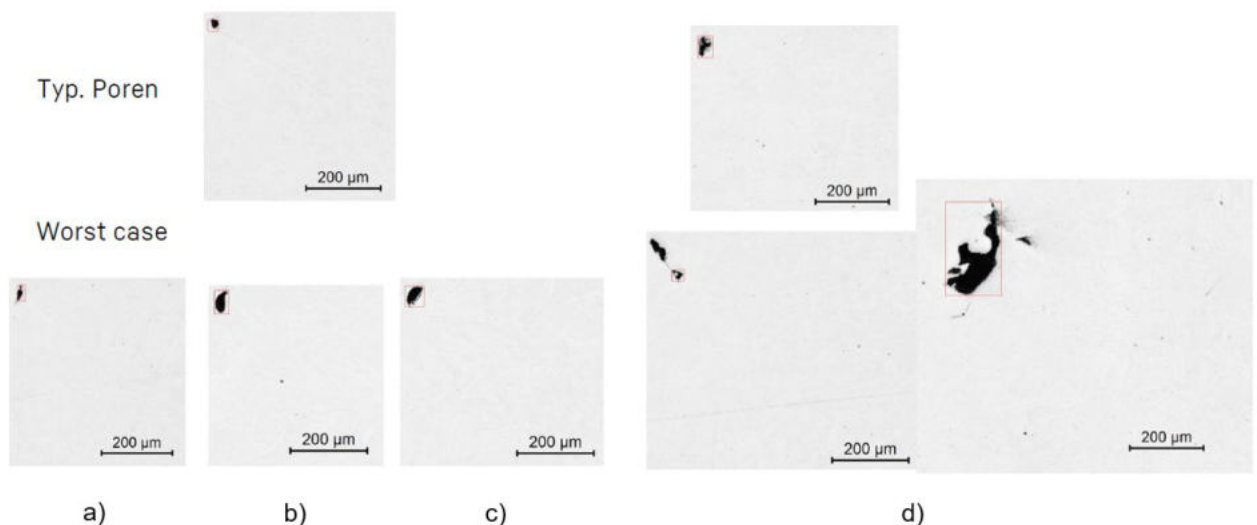


Abbildung 78: Schlichtbilder für verschiedene Einstellungen der Spotlage a-d mit Beispielen für die typische Porenform und -größe sowie worst case-Fall d)

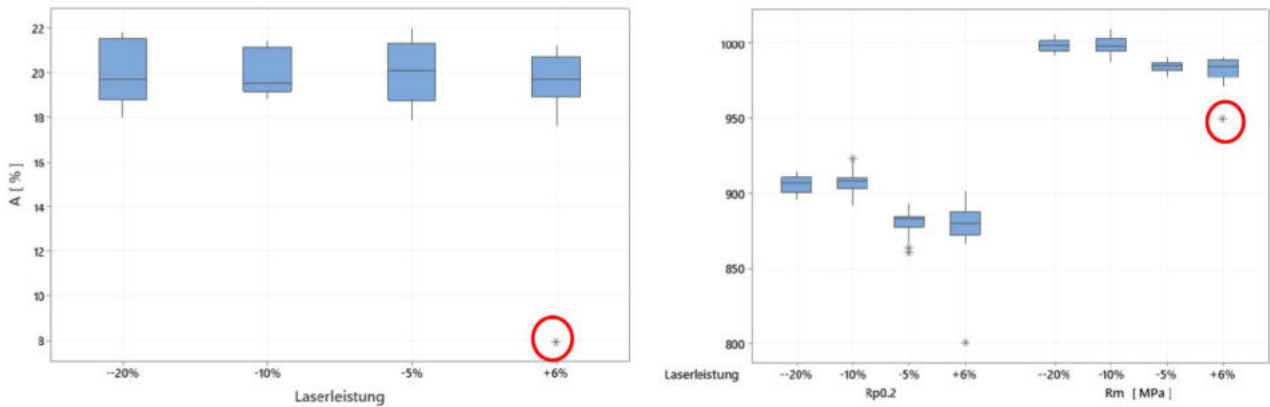


Abbildung 79: Statische Zugeigenschaften für Variation der Laserleistung an der M290

Exemplarisch ist dies für die EOS M290 in Abbildung 79 gezeigt. Die Ergebnisse der Ermüdungseigenschaften bei Variation der Laserleistung der TruPrint 3000 ist in Abbildung 80 und der EOS M290 in Abbildung 81 dargestellt. Bei einer Zunahme der Laserleistung bei der EOS M290 bis zur maximalen Laserleistung (+6 %) wurden Auffälligkeiten in der S-N-Kurve bei gleichzeitiger Zunahme der Porosität gefunden. Außerdem gibt es für dieses Leistungsniveau einen Ausreißer für die Zugeigenschaften in einem Bereich der Bauplattform mit Verwirbelungen in der Schutzgasströmung. Dort führt die Kombination von erhöhtem Energieeintrag und reduziertem Abtransport von

Nebenprodukten zu einer messbaren Verschlechterung der Performance.

Bei der TruPrint 3000 wurde eine Laserleistungsvariation von +6 % bis -5 % untersucht. Im gesamten untersuchten Variationsbereich wurden vergleichbare oder bessere Eigenschaften, als bei der Referenzleistung erreicht. Die bisher definierten Toleranzgrenzen für die Laserleistung können, wie bereits die Spotlagentoleranz, bei beiden Anlagen deutlich vergrößert werden. Bei der EOS M290 ist demnach unter den ge-

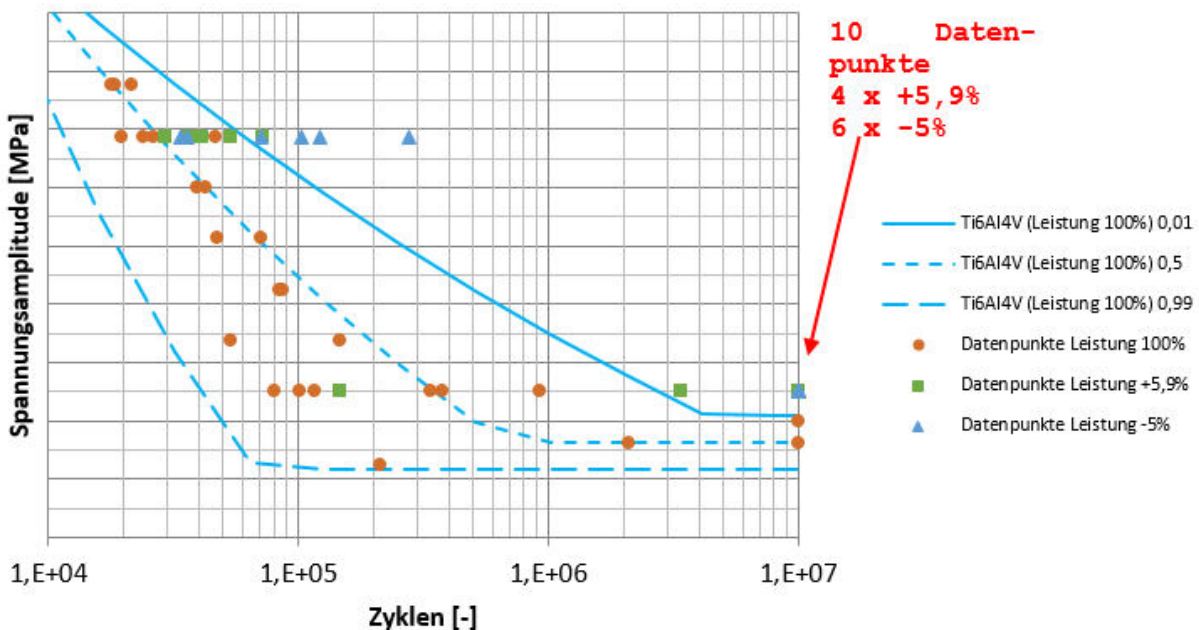


Abbildung 80: Schwingfestigkeit Ti6Al4V zum Vergleich der Laserleistungsvariation an der TruPrint 3000

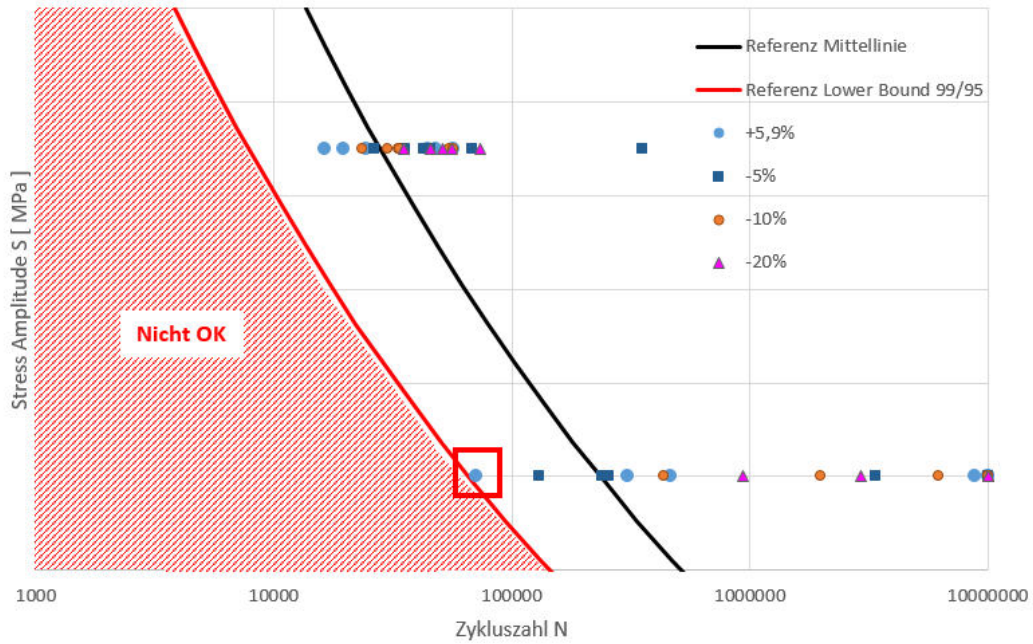


Abbildung 81: Dynamische Eigenschaften für Variation der Laserleistung an der EOS M290

gegebenen Umständen eine Aufweitung des Toleranzbereichs auf +3 % bis -10 % und bei der TruPrint 5000 auf mindestens +6 % bis -5 % der Referenzlaserleistung zulässig.

9.3 Untersuchungen an Inconel 718

Für das Material IN718 wurden folgende Eigenschaften untersucht: Oberflächenrauheiten an verschiede-

nen Positionen im Bauraum, geometrische Genauigkeit, Eigenspannungen, relative Dichte und Detailauflösung.

Des Weiteren wurde bei der Positionierung der Bauteile auf der Bauplatte der verschiedenen Anlagentypen einige Parameter wie Lasereinstrahlwinkel und Bezug zur Beschichterbewegung beachtet. In Abbildung 82 ist das Layout der Baujobs für die AM-Anlagen EOS M290 und EOS M400-4 zu sehen. Für die Bestimmung von Oberflächenrauheiten wurden

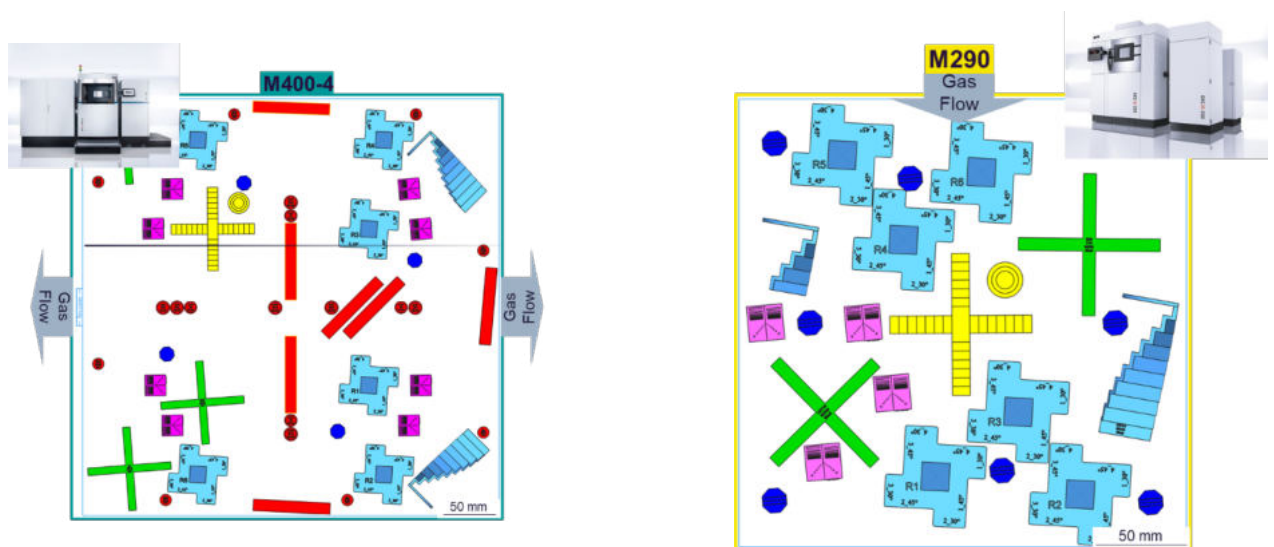


Abbildung 82: Baujoblayout für die AM-Anlagen EOS M290 und EOS M400-4

die dunkel- und hellblauen Probekörper gebaut. Für die Analyse der relativen Dichte wurden ein weiteres Mal die dunkel blauen Probekörper verwendet. Die grünen Probekörper (Kantilever) werden für die Analyse der Eigenspannung verwendet. Für die Machbarkeitsanalyse für den Aufbau von filigranen Strukturen wurden die rosafarbenen Probekörper verwendet. Die gelbfarbenen Probekörper wurden für eine Untersuchung der Geometriegenauigkeit genutzt und die anhand der roten Probekörper (nur EOS M400-4) wurde eine mechanische Kennwertanalyse durchgeführt. Für die IN718-Baujobs wurden die EOS Standard-Parameter verwendet. Das Pulver stammt aus einer Batch und wurde von Siemens Energy bereitgestellt. Die Ergebnisse von IN718 zeigen für Eigenspannungsmessungen, geometrische Genauigkeit und relative Dichte keine Unterschiede zwischen Anlagen und Positionen auf. Hier hat die Positionierung der Bauteile keinen Einfluss auf die gemessene Bauteilqualität.

Bei der Auswertung der Oberflächenrauheiten von Downskinflächen für die EOS M290 wurden der Abstand der Prüfkörper von der Bauplattformmitte und die Ausrichtung der Flächen berücksichtigt. Für die

Prüfkörper R2 und R5, mit gleichem Abstand von der Bauplattformmitte, ergeben sich vergleichbare Rauheiten (Abbildung 83). Es wurde festgestellt, dass Downskinflächen, die in Richtung des Bauplattenzentrums geneigt sind, knapp 50 % geringere Oberflächenrauheitswerte aufwiesen, als die Seitenwände, die gegen den Lasereinstrahlwinkel zeigten (Abbildung 83). Dieses Ergebnis konnte auf der EOS M400-4 nicht bestätigt werden. Die Untersuchung der geometrischen Genauigkeit ergab, dass die verschieden dimensionierten Stifte auf dem entsprechenden Probekörper auf der EOS M400-4 exakter aufgebaut werden konnten als auf der EOS M290. Zylindrische Löcher in der Probe konnten auf der EOS M290 bis zu einer Größe von 0,3 mm aufgebaut werden. Auf einer EOS M400-4-Anlage konnten die Löcher erst ab einer Größe von 0,4 mm vollständig aufgebaut werden.

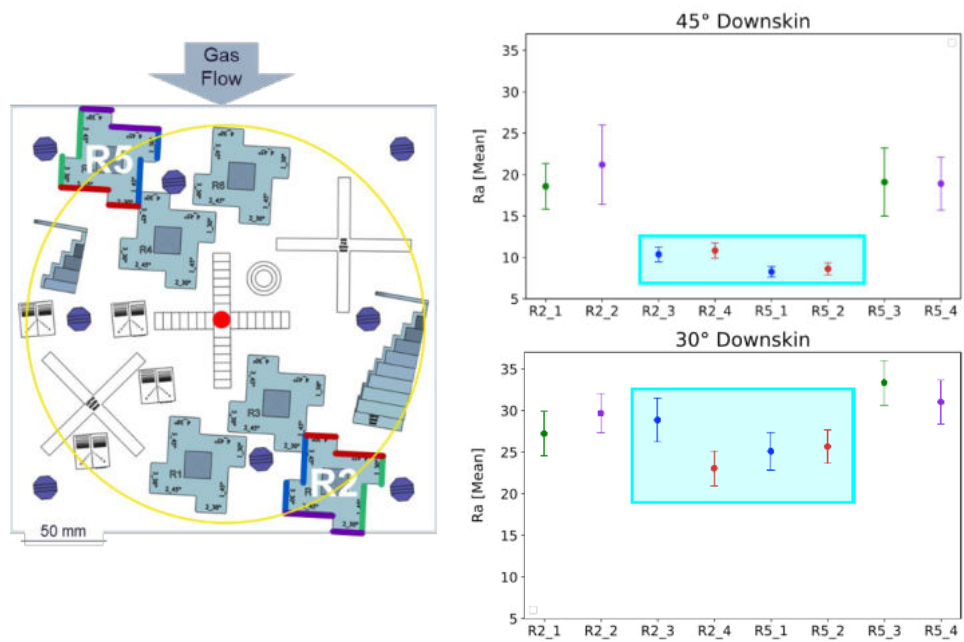


Abbildung 83: Ergebnisse der Oberflächenrauheiten in einer EOS M290 mit IN718

10 Prozessüberwachung

10.1 Defektuntersuchungen

Im Arbeitspaket zur Prozessüberwachung wurden initial die bestehenden Monitoring Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für die additive Fertigung bewertet und darauf basierend ein Lastenheft aus Sicht der Anwender MTU, Liebherr und Siemens Energy über die zur Überwachung notwendigen Maschinen- und Prozessdaten erstellt. Die Maschinenhersteller EOS und TRUMPF haben OPC UA als standardisierte Maschinenschnittstelle in ihren Anlagen implementiert. Ziel war eine Harmonisierung und Erweiterung der Datenschnittstellen und eine einfache und herstellernerneutrale Einbindung in die digitale Prozesskette. Darüber hinaus befasste sich das Arbeitspaket der Prozessüberwachung mit der Erstellung eines Defektkatalogs und der zugehörigen Bewertung der auftretenden Defekte bezüglich ihrer Kritikalität. Das Vorgehen unterteilte sich in:

Katalogisieren

- Sammlung der Defekte und
- Kategorisierung nach
 - Art des Defektes
 - Datenquelle/Monitoringsystem
- Grundlegendes Verständnis der Phänomene

Validieren

- Baujobs mit künstlichen Defekten
- Untersuchung im CT, Schliffe, etc.

Partner	Arbeitsschwerpunkte
LIEBHERR	Pulverbettdefekte
MTU <small>Power Engines</small>	Pulverbettdefekte
SIEMENS energy	Lokale Überhitzung, Cold Spots
TRUMPF	Pulverbettdefekte, lokale Überhitzung, Cold Spots
eos	Unzureichender Pulverauftrag, lokale Überhitzung

Abbildung 84: Arbeitsschwerpunkte der Projektpartner zur Vorhersage der Bauteilqualität

Priorisieren

- Kategorisierung der Defekte in
 - Fehlerschwere: Auswirkung auf Bauteilqualität (niedrig, mittel, hoch)
 - Kritikalitätsbewertung: wie relevant ist die Fehlerschwere für die spezifische Applikation niedrig (Teil OK), mittel (Teil OK + QA), hoch (Ausschuss)
- Priorisierung durch Auswertung der Kriterien (beide „Hoch“)



Abbildung 85: Implementierung der standardisierten Schnittstelle bei EOS und TRUMPF

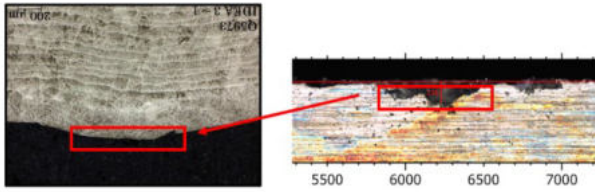


Abbildung 86: Klingendefekte bis 100µm Höhe und 500µm Breite zeigen keine Gefügeauffälligkeiten, nur Geometrieabweichungen

Im Rahmen des Projekts wurden bei den Projektpartnern umfangreiche Testreihen für jeden Defekt durchgeführt und somit konnte eine komplette Aussage zum Fehlerkatalog getroffen werden. So untersuchte der Partner Liebherr z.B. den Einfluss von Beschichterklingendefekten auf das Gefüge des erzeugten Bauteils. Der Partner MTU untersuchte u.a. Pulverbettdefekte, wie Fehlendes Pulver, Rattern oder Pulveraufwurf. Sämtliche untersuchten Phänomene konnten über ein Pulverbettüberwachungssystem detektiert und nachgewiesen werden.

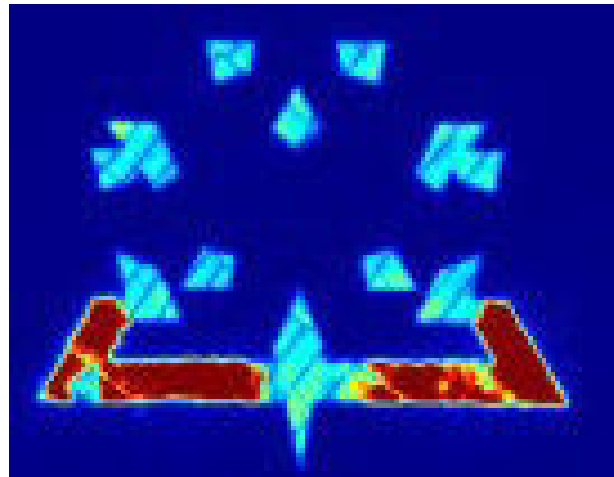


Abbildung 87: OT Aufnahme mit detektierten Überhitzungen

Der Partner Siemens Energy untersuchte unter anderem Pulverbettdefekte sowie die Nachweisbarkeit von Defekten mittels OT Monitoring. Als Resümee des Arbeitspakets lässt sich zusammenfassen, dass abhängig von den entsprechenden

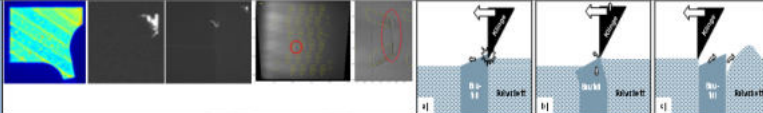



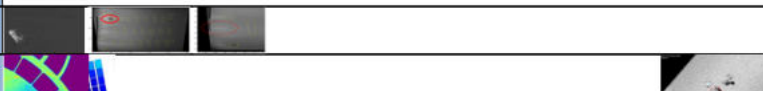


ID	Phänomen	Monitoring Sensor	Beispiele	Liebherr MTU Siemens	Untersuchungsergebnisse	Fehlerrisikoprüfung						
						hoch	mittel	niedrig	hoch	niedrig		hoch
1	Beschichterkontakt	Powderbed Camera			Fehler mit OT schwer zu erkennen. Sichtbar im Pulverbett ab relevanter Größe.	hoch	hoch	hoch	hoch			3
4	Pulverbettvertiefung	Powderbed Camera			Fehler gut mit Pulverbett erkennbar. Schmelzbadüberwachung uneindeutig.	hoch	mittel	hoch	hoch			2
6	Pulversetzen	Powderbed Camera			Sichtbar im Pulverbett ab relevanter Größe. Neubeschichtung als Abhilfe.	hoch	hoch	hoch	hoch			3
8	Hot-Spot	EOS Optical Tomograph			Mit OT gut erkennbar	hoch	hoch	niedrig	niedrig			3
9	Pulverabbläsung	Powderbed Camera			Mit Pulverbett gut erkennbar. Stärker mit längerer Belichtungsdauer. Material abhängig (Korngröße, Dichte).	hoch	niedrig	hoch	niedrig			1
10	Unzureichender Pulverauftrag	Powderbed Camera			Sichtbar im Pulverbett ab relevanter Größe.	hoch	hoch	hoch	hoch			3
21	Verdeckte Linse	EOS Optical Tomograph			Mit OT & MPM gut erkennbar	hoch	hoch	hoch	hoch			3
22	Slice-Fehler	EOS Optical Tomograph			Softwarefehler. Kontrolle der Job-Files nötig. z.B. durch direkten Vergleich der	hoch	hoch	hoch	hoch			3

Abbildung 88: Auszug aus dem erstellten Fehlerkatalog incl. Bewertung

Phänomenen und der angewandten Technik, sämtliche Defekte mit den Monitoring Systemen gut beobachtbar sind.

Die Kritikalität der Defekte ist variabel und abhängig vom jeweiligen Defekttyp. Hierbei sind viele Phänomene sind akzeptabel, einige jedoch nicht.

10.2 Messtechnik zum Erkennen von Abweichungen im Pulverbett und der Bauteiloberfläche

In einem weiteren Arbeitspaket zur Prozessüberwachung wurde ein neuer Ansatz zum Monitoring des Pulverbetts auf seine Eignung für die additive Fertigung untersucht. Beteiligt waren daran das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen und die Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH in Villingen-Schwenningen.

Eine auf dem Stereoprinzip basierende hochauflösende Zeilenkamera wurde in eine modifizierte Laboranlage (Aconity Midi) des Fraunhofer ILT eingebaut. Das System soll während eines realen Druckjobs ohne eine Prozesszeitunterbrechung in Echtzeit Stereobilder von jeder einzelnen Pulver- und Bauteilschicht aufnehmen. Die Auswertung der erfassten

Daten soll jeweils zu Beginn des nächsten Beschichtungsvorgangs zur Verfügung stehen.

Für die erfolgreiche Umsetzung war ein Wärmemanagementsystem erforderlich. Die Kameraelektronik sowie das Kühlkonzept wurden hierzu angepasst. In der Projektlaufzeit konnten von mehreren Testanordnungen sowie Bauteilen realistische Gesamterfassungen kompletter 3D-Drucke detailliert aufgezeichnet werden.

Von jeder Schicht des 3D-Drucks wurden jeweils hochauflösende 3D-Topografien sowohl des Pulverbetts als auch der zuletzt erstarrten Bauteilschicht aufgezeichnet. Für eine aussagekräftige Auswertung war es erforderlich die Verzeichnung des Kamerasystems, das aus 16 einzelnen Kameras besteht, sowie die geometrische Genauigkeit der Schichtbilder durch einen automatisierten Kalibriervorgang wesentlich zu verbessern.

Bei jeder einzelnen Messung an einer Schicht im 3D-Drucker fallen Daten im Bereich von 50 MB an. Um diese Daten jeweils bis zum Beginn des nächsten Beschichtungsvorgangs auszuwerten war es erforderlich die Berechnungen mit Hilfe von GPUs durchzuführen. Für eine flexible Definition der aufzufindenden Abweichungen vom idealen Prozessverlauf wurde die

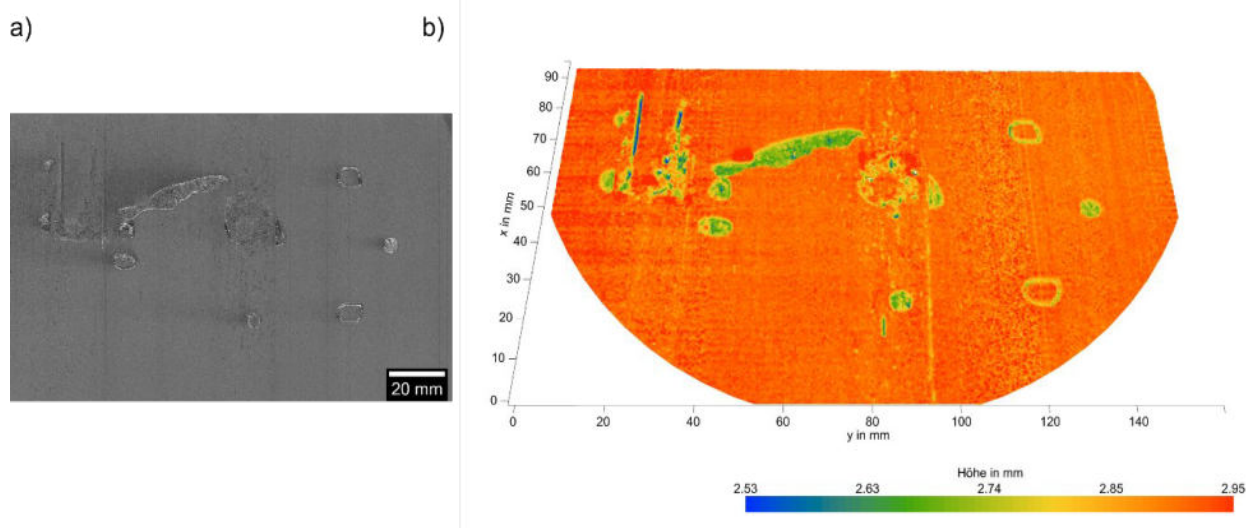


Abbildung 89: In-situ Aufnahmen der Pulverbettoberfläche. In a) ist eine 2D-Aufnahme und in b) die daraus abgeleitete 3D-Topographie zu sehen. Es sind sowohl die im Aufbau befindlichen Bauteile als auch das umgebende Pulverbett zu erkennen. Höhen sind in b) farblich gekennzeichnet.

Auswertung der Bilder mit künstlicher Intelligenz vorgenommen. Dazu wurde ein überwachter Lernansatz verfolgt, um ein faltungsbasiertes Modell für semantische Segmentierung für mehrere Klassen zu trainieren. Dabei wurde ein Human-in-the-loop (HITL) Ansatz verfolgt, bei dem das Modell in mehreren Iterationen immer wieder überprüft, korrigiert und trainiert wird. Die Optimierung des Modells sowie die damit gefundenen Prozessstörungen sind Teil noch andauernder Forschungstätigkeiten.

Die Echtzeitüberwachung des Pulverbetts sowie der jeweils erschmolzenen Werkstückoberfläche verspricht das Potential auftretende Störungen im Druckprozess online erfassen zu können. Dazu gehört das Auffinden typischer Fehler, wie sie im zuvor beschriebenen Fehlerkatalog definiert wurden.

11 Automatisierungsansätze entlang der Prozesskette

In der additiven Prozesskette weisen insbesondere die Handhabung der Bauteile in Form von Rüsten und Transport sowie einzelne Fertigungsverfahren einen hohen manuellen Arbeitsanteil auf. Ein Ziel von IDEA ist daher die Automatisierung der additiven Prozesskette, sodass die Produktivität signifikant gesteigert werden kann und die Grundlage für eine industrielle Serienfertigung gegeben ist. Das folgende Kapitel beschäftigt sich insbesondere mit der methodischen Entwicklung von Automatisierungskonzepten unter Berücksichtigung von fertigungstechnologischen, ökonomischen und unternehmensindividuellen Restriktionen. Zudem werden am Beispiel der Bauteilpulverung und des automatisierten Greifens experimentelle Untersuchungen zur Steigerung der Produktivität, Qualität und Flexibilität durchgeführt.

11.1 Automatisierungskonzepte

Bei der Entwicklung von Automatisierungskonzepten steht die Handhabung der Bauteile im Fokus. Es gilt, die Peripherie der Fertigungsmittel, wie Spann- und Greifsysteme, an die hohe Heterogenität und Komplexität der Bauteile anzupassen. Zudem sollte das Automatisierungskonzept anforderungsgerecht und skalierbar ausgelegt sein. Die entwickelte Methodik zur Generierung und Bewertung von Automatisierungskonzepten für die additive Prozesskette besteht aus vier einzelnen Phasen: Analyse-, Generierungs-, Detaillierungs- und Auswahlphase. Im Folgenden werden das Vorgehen und die erzielten Ergebnisse in jeder Phase beschrieben.

11.1.1 Analysephase

In der Analysephase werden die für die Konzepterstellung benötigten Informationen zusammengetragen und analysiert. Dazu werden eingangs verschiedene Informationsträger systematisiert.

[Informationen über Produktportfolio](#)

Für die anforderungsgerechte Auslegung des Automatisierungskonzepts sind Bauteilinformationen

notwendig. Einerseits dienen diese dazu, die Fertigungsressourcen hinsichtlich Größe und Leistungsfähigkeit entsprechend auszuwählen und andererseits die Herstellbarkeit zu gewährleisten. Zudem sind wirtschaftliche Daten, wie bspw. die Stückzahlenszenarien erforderlich, um eine Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Automatisierungskonzepte zu ermöglichen.

In IDEA wurden für demonstrative Zwecke vier repräsentative Bauteile von den Anwendern bereitgestellt. Jeder Demonstrator bildet für das jeweilige Unternehmen relevante Geometrien und Stückzahlenszenarien ab. Somit liegen repräsentative Bauteile für das Produktportfolio zur Konzeption von Automatisierungslösungen vor.

[Informationen über Prozessketten](#)

Die Betrachtung der Prozessketten stellt sicher, dass unabhängig von den Fertigungsmitteln ein Bauteil mit den gewünschten Eigenschaften hergestellt wird. Somit dienen die Daten zur Spezifizierung der zu verwendenden Fertigungstechnologien und Übergangszustände der Werkstücke.

Durch die Festlegung auf einen repräsentativen Demonstrator und den damit einhergehenden Prozessketten ist sichergestellt, dass die relevanten Prozessketten im Rahmen der Automatisierung berücksichtigt werden. So wurden in IDEA im Detail die Prozessketten für eine Demonstratorfertigung auf den Pilotlinien aufgenommen und als Grundlage für die Konzeption der Automatisierungskonzepte verwendet.

[Informationen über Produktionsmittel](#)

Die Daten der Produktionsmittel beziehen sich auf die verfügbaren Produktionsmittel und deren Spezifikationen. Es können zudem auch Produktionsmittel betrachtet werden, die zeitnah beschafft werden können.

Im Rahmen der Prozessaufnahme wurden diese Informationen für die Pilotlinien erfasst.

[Informationen über Peripheriesysteme](#)

Zu den Peripheriesystemen, deren Informationen gesammelt und analysiert werden müssen, gehören

Spannsysteme, Palettiersysteme, Handhabungsgeräte, Greifer, Transfersysteme, Magazine und Messgeräte. Sie sind zentrale Elemente der Automatisierung. Ebenfalls analog wurden die Peripheriesysteme bei der Prozessaufnahme der Pilotlinien mitbetrachtet.

Zur Aggregation der Informationen, insbesondere zu intern verfügbaren Produktionsmitteln und Peripheriesystemen, bietet sich einerseits ein Entity-Relationship-Datenmodell an, in dem die Daten strukturiert unter Berücksichtigung der jeweiligen Korrelationen hinterlegt werden können (vgl. HORSTKOTTE [8]). Andererseits können zur Informationssammlung, bspw. von am Markt verfügbaren Fertigungsmitteln, sogenannte Kataloge genutzt werden. Dies wurde in IDEA anhand der Peripheriesysteme umgesetzt, indem eine umfangreiche Literatur- und Marktrecherche durchgeführt wurde:

Hierfür wurden zunächst die Peripheriesysteme, bspw. Spann- und Greifsysteme sowie Werkstückpalettierungssysteme, entsprechend dem Typ oder des Wirkprinzips klassifiziert. Nach einer technischen Beschreibung der analysierten Peripheriesysteme und möglicher Ergänzungskomponenten, wie bspw. automatische Werkzeugwechsler oder Sensorik, wurden ein interaktiver Katalog zur kennzahlgestützten Auswahl des Peripheriesystems erstellt. Die Kennzahlen umfassen die Kategorien „Grundlegende Eigenschaften“, „Werkstückbezogene Eigenschaften“, „Prozessbezogene Eigenschaften“, „Automatisierungsbezogene Eigenschaften“ und „Weitere Eigenschaften“ welche mittels eines paarweisen Vergleichs in Expertengesprächen entsprechend ihrer Relevanz für die Auswahl zueinander gewichtet wurden.

Zur Anwendung werden die Anforderungen des Bauteils mit den definierten Kennzahlen beschrieben, sodass ein automatisierter Abgleich mit den hinterlegten Eigenschaften der Peripheriesysteme erfolgen kann. Das Ergebnis ist eine Rangfolge geeigneter Peripheriesysteme. Die erste Version dieser interaktiven Kataloge basierte auf Microsoft Excel™ Dokumenten. Um die Flexibilität und Handhabbarkeit zu erhöhen, wurde am Beispiel des Katalogs für Greifsysteme

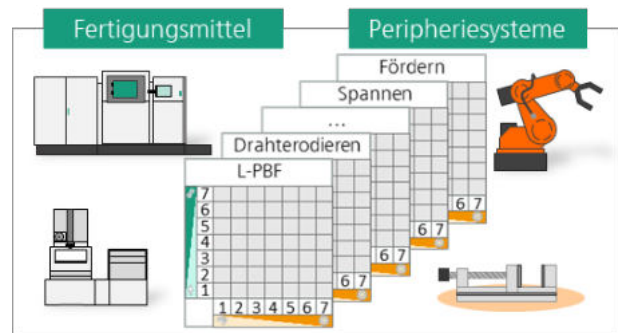


Abbildung 90: Bewertung des Automatisierungsgrads

eine zweite Version basierend auf einer Web-Applikation konzeptioniert und prototypisch umgesetzt. Die „Greifbar“ Web-Applikation erlaubt über das Einladen eines 3D-Modells des zu greifenden Bauteils und das manuelle Setzen weiterer Filter das Erstellen eines Anforderungsprofils für den auszuwählenden Greifer. Dieses Anforderungsprofil wird automatisch mit einer hinterlegten Datenbank abgeglichen und passende Greifersysteme werden identifiziert.

Auf Basis der Informationen ist schließlich eine Bewertung des Automatisierungsgrads der eingesetzten Produktionsmittel möglich. Als Grundlage hierfür dient die Taxonomie nach FROHM [9], die von HORSTKOTTE [10] für die additive Prozesskette technologie- und prozessschrittspezifisch detailliert wurde und im Rahmen von IDEA Anwendung fand. Die Taxonomie bietet eine Klassifizierung der Produktionsmittel bzw. der Prozesse, anhand von maximal sieben parallelen Stufen in Bezug auf Mechanisierung und kognitive Unterstützung (siehe Abbildung 90). Ähnliche Fertigungsmittel und Peripheriesysteme können in Gruppen zusammengefasst werden. Es ist zu beachten, dass auch manuelle Arbeit oder manuelle Handhabung eine Automatisierungsalternative innerhalb der Taxonomie darstellt.

Die Kopplung der Informationen hinsichtlich der Prozesskette und verwendeten Fertigungsmittel sowie Peripheriesysteme ermöglicht schließlich die systematische Analyse des Automatisierungspotentials. Bei den Pilotlinien in IDEA konnte festgestellt werden, dass grundsätzlich die verwendeten Fertigungsprozesse einen hohen mechanisierten Automatisierungsgrad aufweisen. Ausnahmen bestehen bspw.

bei der Entfernung von Stützstrukturen (vgl. Kapitel 12.1.2) sowie der allgemeinen Handhabung von Werkstücken und Komponenten (vgl. Kapitel 11.3).

11.1.2 Generierungsphase

Auf Basis der Analyseergebnisse aus der vorherigen Phase, insbesondere jedoch auf Grundlage der jeweiligen Automatisierungsgrade, können nun Fertigungsprozess-Sequenzen und folgend Produktionssequenzen verschiedener Automatisierungsgrade gebildet werden. Ziel ist Automatisierungskonzepte mit verschiedenen Automatisierungsgraden zu erstellen und mit zunehmenden Detaillierungsgrad das anforderungsgerechte Konzept zu selektieren.

Hierfür wird zur übersichtlichen Darstellung ein im Rahmen von IDEA entwickeltes Visualisierungsmodell angewendet. Der Materialfluss wird mit den Handhabungsfunktionen, die auf der VDI-Richtlinie 2860 [11] basieren, dargestellt. Durch die Angabe von Beziehungen zwischen den Vorgängen ist es möglich, logische Abläufe darzustellen. Dies ähnelt der Vorgehensweise bei der Netzplanung und ist hilfreich, um parallele und sequenzielle Abläufe zu erkennen [12]. Abbildung 91 zeigt einen beispielhaften Materialfluss für eine Fräsbearbeitung unter Verwendung der Handhabungsfunktionen der VDI-Richtlinie. Die Konzepte sollen dabei schrittweise aufeinander aufbauen. Zunächst werden Grobkonzepte anhand von Technologiefolgen ausgelegt. Anschließend können nicht-wertschöpfende Operationen ergänzt werden. Auch werkstückunabhängige Materialflüsse, wie die des Pulvers und der Grundplatte, müssen berücksichtigt und entsprechend integriert werden. Darüber hinaus müssen auch Prozesse zur Qualitätssicherung implementiert werden.

Das Automatisierungskonzept mit dem niedrigsten Automatisierungsgrad wird durch den Automatisierungsbedarf bestimmt, der sich an der ergonomischen Arbeitsgestaltung orientiert. Oftmals geht der Ergonomiefokus hierbei mit geringen Investitionskosten einher [13]. Das Automatisierungskonzept mit dem höchsten Automatisierungsgrad wird durch die technologische Realisierbarkeit bestimmt. Die da-

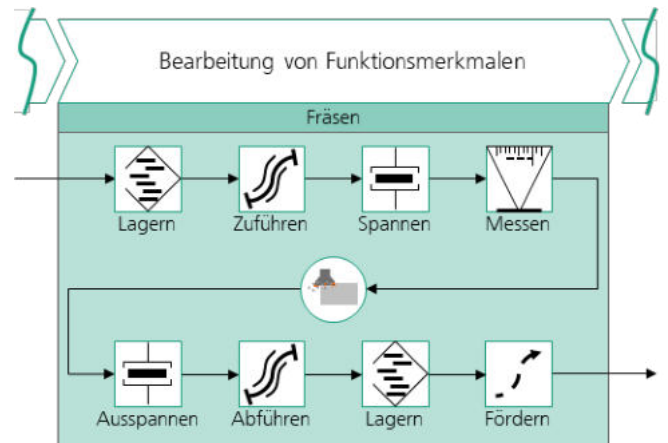


Abbildung 91: Materialfluss auf Basis der Handhabungsfunktionen der VDI-Richtlinie 2860

zwischen liegenden Automatisierungskonzepte basieren auf der von TAKEDA vorgeschlagenen Priorisierung von Automatisierungsaktivitäten, die aus dem Bereich der Low Cost Intelligent Automation (LCIA) [14] stammt. Für jedes Konzept gilt, dass die Handhabungsschritte nicht höher automatisiert werden dürfen als die jeweiligen Fertigungsprozesse, denen sie dienen.

Im Rahmen der Aktivitäten von IDEA wurden für die Pilotlinien jeweils drei verschiedene Automatisierungskonzepte nach dem vorgestellten Vorgehen entwickelt:

Automatisierung des Spannvorgangs

Ziel dieses Konzepts ist die Reduzierung von Rüst- und Nebenzeiten durch das Parallelisieren von Spannvorgängen zum Bearbeitungsvorgang. Zudem sollen notwendige Positionsvermessungen des Werkstücks durch Nutzung von Nullpunktspannsystemen, insbesondere in der Nachbearbeitung von AM-Bauteilen, signifikant reduziert werden. Dementsprechend sind die notwendigen Maßnahmen zur Zielerreichung die Automatisierung und Vereinfachung des Spannvorgangs mittels maschinenexternen Spannens der Werkstücke auf Werkstückträgern und der Einsatz von Nullpunktspannsystemen.

Bei den IDEA-Pilotlinien kann diese Automatisierungsmaßnahme bei vielen Prozessschritten, von der Entpulverung bis zur Qualitätssicherung, angewendet werden.

Automatisierung der Maschinenbeladung

Eine automatisierte Maschinenbeladung ermöglicht die mannlose Bearbeitung von Werkstücken, solange der Werkstückspeicher bzw. das -magazin befüllt ist. Hierdurch wird eine Bearbeitung bei weniger personalintensiven Schichten wie in der Nacht oder am Wochenende ermöglicht. Zudem ist von einer Stückkostendegression durch die Erhöhung des Maschinenoutputs auszugehen sowie einer signifikanten Reduzierung der Nebenzeiten durch die Mechanisierung des Be- und Entladens. Erreicht werden diese Ziele mittels einer Automatisierung der Werkstückzuführung, indem Werkstücke auf Werkstückträgern vorbereitet dem jeweiligen Magazin zugeführt werden. Durch die standardisierte mechanische Schnittstelle der Werkstückträger ist eine Maschinenbeladung und -entladung mittels eines Handhabungssystems möglich.

Bei den in IDEA definierten Pilotlinien kann auch dieses Automatisierungskonzept bei vielen Prozessschritten umgesetzt werden, da oftmals Fertigungsmittel mit entsprechenden Schnittstellen eingesetzt werden. Die Herausforderung bei der Umsetzung liegt in der Adaption auf die Besonderheiten der additiven Fertigung. Daher wurde im Rahmen von IDEA das dedizierte das automatisierte Greifen (vgl. Kapitel 11.3) betrachtet.

Maschinenverkettung

Im Fokus der Maschinenverkettung steht die mannlose Fertigung über verschiedene Fertigungsmittel hinweg, sodass auch der Transfer zwischen einzelnen Maschinen ohne Personaleinsatz realisiert werden kann. Hierdurch können die Nebenzeiten signifikant reduziert werden und es ist ebenfalls von einer Stückkostendegression auszugehen. In der Umsetzung bedeutet ein solches Konzept, dass mehrere Fertigungsmittel mittels eines zentralen Handhabungssystems, häufig ein auf einer Linearachse montierter Industrieroboter, die Be- und Entladung der einzelnen Maschinen vornimmt. Die Bereitstellung von Bearbeitungswerkzeugen und Werkstücken erfolgt oftmals zentral.

Bei den Pilotlinien ist ein solches Konzept anwendbar. Während die vorherigen Konzepte bei nahezu allen Prozessschritten der Prozesskette angewendet werden können, ist eine Maschinenverkettung nicht für alle Prozessschritte sinnvoll. Auf Grundlage der Analyseergebnisse zeigt sich, dass die Potentiale für eine Maschinenverkettung bei einzelnen Prozessschritten in der Nachbearbeitung wie bspw. dem Herstellen von Funktionsflächen am größten sind.

11.1.3 Detaillierungsphase

In dieser Phase werden die erstellten Automatisierungskonzepte durch quantitative Kennzahlen ergänzt. Die Detaillierung erfolgt zunächst über die Durchlaufzeit der einzelnen Fertigungs- und Handhabungsprozesse und die daraus resultierende gesamte Durchlaufzeit. Die Durchlaufzeit, als Summe aller Bearbeitungs- und Rüstzeiten, beschreibt, wie lange ein Bauteil vom Beginn bis zum Ende der Fertigung benötigt. Die Durchlaufzeit ist abhängig von den eingesetzten Fertigungsmitteln und deren Auslastung, vom Bauteil selbst sowie von der Sequenzierung und den daraus resultierenden Wartezeiten. Die Durchlaufzeiten können bspw. mit Hilfe von vorgegebenen Zeitsystemen für manuelle Arbeiten und rechnerischen Methoden für automatisierte Prozesse ermittelt werden [13]. Mit diesen Methoden können den Fertigungsprozessen und Handhabungsvorgängen Prozesszeiten zugeordnet werden.

Bei der erforderlichen Kapazitätsanpassung der Fertigungsmittel, also der Nivellierung des Outputs pro Periode entlang der Fertigungsprozesskette, fungiert ein Engpass als „Taktgeber“. Somit ist die Grundlage für die Berechnung der Kosten für die erstellten Automatisierungskonzepte vorhanden. Für jedes Konzept werden die Kosten für die Anlagen sowie die Personalkosten ermittelt. Die Personalkosten ergeben sich aus der Summe der Zeit, die eine Person am Fertigungsprozess beteiligt ist, multipliziert mit den Personalstundensätzen. Als Eingangsgrößen werden die benötigten Informationen, wie Kosten für Fertigungsmittel, Abschreibungszeiten und Personalstundensätze, benötigt bzw. vorhandene aggregierte Stundensätze des Unternehmens.

Im Rahmen von IDEA wurden die beschriebenen Schritte der Detaillierung durch eine Simulation quantifiziert. Hierfür wurden die Prozessketten und die Fertigungsumgebung in einer Simulationsumgebung modelliert (vgl. Kapitel 13.3). Anhand der Demonstratoren konnten schließlich verschiedene Kennzahlen wie Durchlaufzeit, manuelle Maschinenlaufzeit, Durchsatz der Werkstücke sowie Kosten betrachtet werden. Es zeigt sich, dass in Abhängigkeit des Automatisierungskonzepts die einzelnen Kennzahlen variieren. Entsprechend der stufenweisen Konzeption der Automatisierungskonzepte und den damit einhergehenden Automatisierungsgraden reduziert sich die Durchlaufzeit schrittweise um bis zu 15 % bei dem Konzept der Maschinenverkettung. Auch die notwendige Einbindung des Personals ist abhängig von den Automatisierungskonzepten und kann um bis zu 18 % mit dem entsprechenden Automatisierungskonzept reduziert werden.

11.1.4 Auswahlphase

Die letzte Phase dient schließlich der Auswahl eines Automatisierungskonzepts. Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung kann der Analytic Hierarchy Process (AHP) eingesetzt werden [8, 15]. AHP ermöglicht eine präferenzbasierte Gewichtung ausgewählter Kriterien, die sich aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Phasen ergeben. Die Hauptkriterien sind die Durchlaufzeit und die Kosten der Automatisierungskonzepte. Der AHP ermöglicht einen direkten Vergleich der Konzepte auf Basis der ausgewählten und gewichteten Kriterien und unterstützt den Anwender bei der Auswahl eines Best-Fit-Konzeptes. Es ist zudem auch möglich, Unsicherheiten bei den Daten, bspw. bei der Abschätzung zukünftiger Stückzahlenszenarien, zu berücksichtigen.

Beim AHP werden die gewählten Kriterien paarweise verglichen mit dem Ziel, eine Priorisierung zu erreichen. Der Vergleich wird in einer entsprechenden Präferenzmatrix durchgeführt. Der zu berechnende Eigenvektor der Präferenzmatrix bildet den Gewichtungsvektor [8, 15].

Die Automatisierungskonzepte, bzw. deren Eigenschaften, müssen anhand der gewählten Kriterien

hinsichtlich des Grades der Zielerfüllung bewertet werden. Die jeweiligen Eigenschaften der Konzepte, können dann anhand einer normierten Skala bewertet werden. Durch die Normierung können unterschiedliche Eigenschaften bzgl. ihres Erfüllungsgrads verglichen werden. Es ist sinnvoll, den Erfüllungsgrad auf einer Spannweite zwischen der maximalen und der minimalen Ausprägung einer Eigenschaft zu betrachten. Je nach gewünschtem Zielkriterium, bspw. Maximieren, kann schließlich der Erfüllungsgrad berechnet werden.

Zum Schluss werden die Erfüllungsgradmatrix und der Gewichtungsvektor multipliziert. Das Produkt ist ein Bewertungsvektor, dessen Einzelwerte die Endbewertungen der einzelnen Automatisierungskonzepte hinsichtlich der Erfüllung der gewählten und gewichteten Kriterien darstellen. Das Automatisierungskonzept mit der höchsten Endbewertung ist in der Menge der generierten Konzepte, hinsichtlich der gewählten Kriterien, das zu favorisierende Konzept.

11.2 Automatisierte Entpulverung

Der Status quo der Pulverentfernung ist oftmals von manueller Prozessausführung geprägt, sodass hinsichtlich der Produktivität und Gesundheitsrisiken Verbesserungspotenziale bestehen. Daher wurde im Rahmen von IDEA dediziert die automatisierte Entpulverung von additiven Bauteilen betrachtet.

11.2.1 Vorgehensweise

Auf Basis der Problemstellung bei der Entpulverung additiver Bauteile hinsichtlich manueller Tätigkeiten, Verbleib von Restpulver und dem Gesundheitsrisiko für das Personal wurden in IDEA folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt:

- Erarbeitung einer Technologieübersicht
- Durchführung von Entpulverungsversuchen
- Prototypische Anwendung

Im Folgenden wird detailliert auf die Arbeitsschwerpunkte und die erzielten Erkenntnisse eingegangen.

11.2.2 Technologieübersicht

Ziel der Technologieübersicht für die Entpulverung von Bauteilen ist die übersichtliche Darstellung geeigneter Technologien sowie eine Bewertung der Leistungsfähigkeit im Kontext der additiven Fertigung. Zunächst wurden im Konsortium von den Anwendern Anforderungen an die Entpulverung erarbeitet. Es wurden 38 technologische Anforderungen definiert, die in sechs Bereiche geclustert werden können:

- Pulverhandhabung
- Werkstückhandhabung
- Entpulverung
- Software
- Sicherheitsanforderungen
- Sonstiges

Die Anforderungen bilden die Grundlage für die Recherche zu Technologien, die für eine Entpulverung geeignet sind. Hierfür wurden zunächst einheitliche Bewertungskriterien festgelegt. Neben der Prozesscharakteristik sind die zu erwartenden Werkstückeigenschaften hinsichtlich der Oberflächencharakteristik ein wichtiges Erfolgskriterium. Zudem wurden weitere Bewertungskriterien wie Produktivität, Flexibilität und Reifegrad der Technologie im Kontext der additiven Fertigung mit einbezogen. Als Ergebnis der Recherche konnten sechs geeignete Technologien,

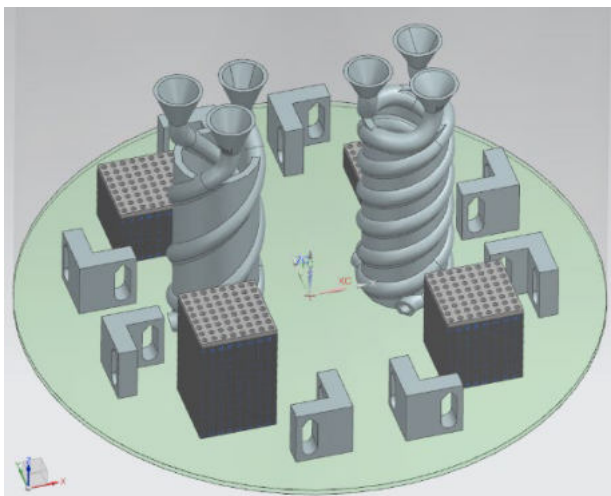


Abbildung 92: Darstellung der verwendeten Bauteilgeometrien

wie bspw. kinematische Entpulverung, identifiziert werden, die von 33 verschiedenen Anbietern angewendet werden.

11.2.3 Entpulverungsversuche

Zur technologischen Analyse der Bauteilentpulverung in Bezug auf Automatisierung und Qualität wurden beim Projektpartner toolcraft Versuche mit einem neuartigen Anlagenkonzept durchgeführt. Das Konzept basiert auf zwei separaten Einheiten: Eine Reinigungskammer, die zur Abführung des Pulvers und zur Abschirmung dient, sowie eine Transporteinheit bestehend aus Vibrationsgeneratoren und Achssystem, sodass Werkstücke in verschiedenen Positionen entpulvert werden können. Der Vorteil des zweigeteilten Konzepts, besteht u.a. in dem flexiblen Einsatz im produktiven Umfeld bei der Verwendung verschiedener Werkstoffe.

Für die systematische Analyse und Bewertung der Entpulverungsanlage wurden zwei grundsätzlich verschiedene Werkstückgeometrien verwendet: Einerseits eine Helix-Struktur mit Variation der Steigung bzw. Windungsanzahl sowie Querschnittsgeometrie (rund, oval, rautenförmig), andererseits in Anlehnung an Supportstrukturen, Lochplatten unterschiedlicher Höhe. In Abbildung 92 sind die für die Versuche genutzten Bauteilgeometrien dargestellt.

Für die Durchführung der Entpulverungsversuche wurden die Werkstücke einmalig aufgebaut und wiederkehrend mit Pulver beaufschlagt, eingerüttelt sowie entpulvert und analysiert.

Die Erkenntnisse der Versuche sind vielfältig. So zeigt sich, dass ein runder Kanalquerschnitt zu besseren

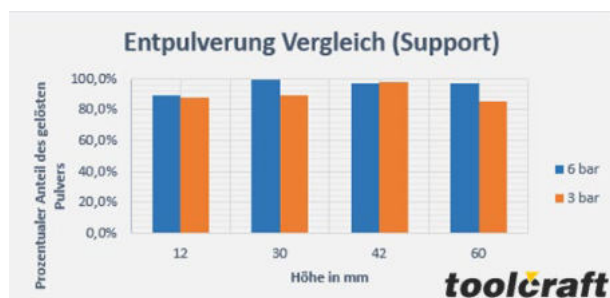


Abbildung 93: Ergebnisse der Lochplatte bei Variation der Frequenz und Bauteilhöhe

Entpulverungsergebnissen führt und demnach zu bevorzugen ist. Des Weiteren ist eine kurze Kanallänge vorteilhaft für das Ergebnis der Entpulverung. Abbildung 94 zeigt, dass bei gleicher Entpulverungsdauer mit einer höheren Entpulverungsfrequenz (eingestellt durch höheren Druck) signifikant bessere Ergebnisse erzielt werden.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der entpulverten Lochplatten mit verschiedenen Höhen, dass die Bauteilhöhe keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Entpulverung hat. Wie auch bei der Helix-Geometrie ist die Tendenz zu erkennen, dass eine erhöhte Schwingungsfrequenz einen positiven Einfluss auf das Ergebnis der Entpulverung hat (vgl. Abbildung 93).

Weitere Entpulverungsversuche zeigen zudem, dass bei Kanalgeometrien ein steiler Neigungswinkel sowie ein zusätzlicher Anstellungswinkel zur Entpulverung vorteilhaft sind.

11.2.4 Prototypische Anwendung

Die prototypische Anwendung der Entpulverungseinheiten unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den verschiedenen Versuchsreihen verlief positiv. Jedoch konnten auch weitere Optimierungspotentiale abgeleitet werden. So kann die Automatisierung der Entpulverungseinheiten hinsichtlich der Steuerung und die Entkopplung der einzelnen Einheiten verbessert werden.

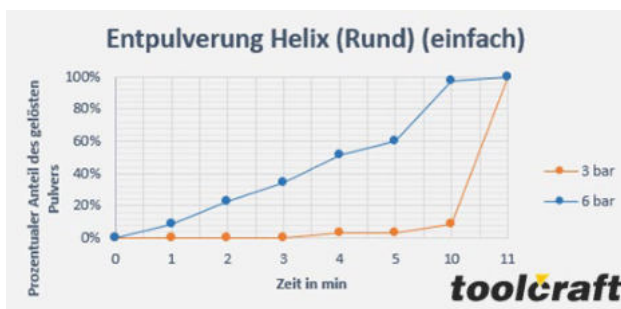


Abbildung 94: Ergebnisse der Helix-Geometrie bei Variation der Frequenz, welche über den Druck eingestellt wird

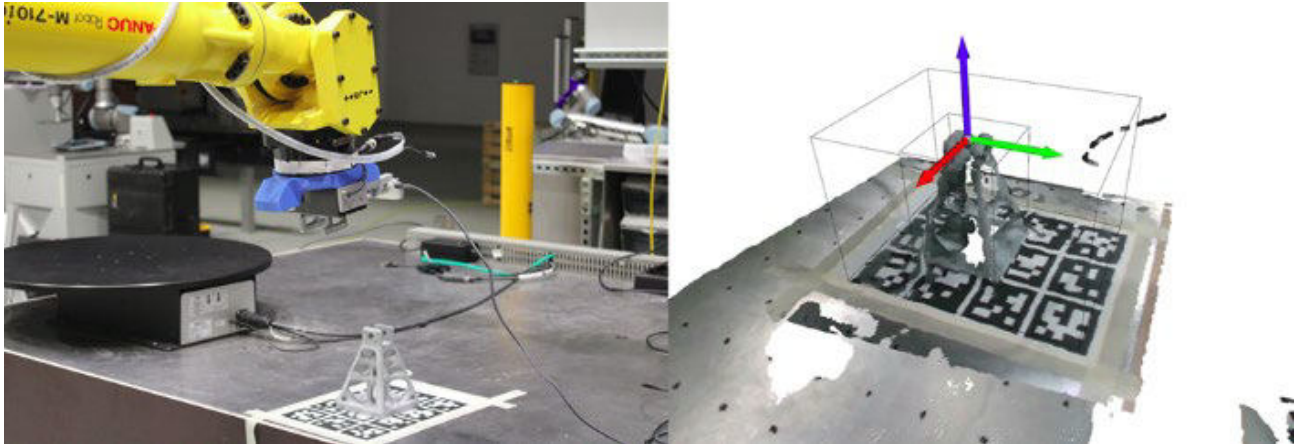


Abbildung 95: Automatisierter Greifprozess mittels Machine Vision

links: Aufnahme von Punktwolken durch eine am Roboter Endeffektor angebrachte RGB-D-Kamera

rechts: Fusion von Punktwolken aus vier unterschiedlichen Kameraposen. Der äußere Kubus grenzt den Arbeitsbereich ein, der innere Kubus umschließt die extrahierte Punktwolke. Die farbigen Pfeile stellen das Koordinatensystem im vorher definierten Greifpunkt dar

11.3 Automatisiertes Greifen

Mit dem Ziel einer fortschreitenden Automatisierung der industriellen additiven Fertigung, gewinnen Ansätze zur automatisierten Handhabung von komplexen Bauteilen zunehmend an Bedeutung. In diesem Zusammenhang wurden im Rahmen von IDEA Konzepte für ein Machine Vision-basiertes, automatisiertes Bauteilhandling mit industriellen Knickarmrobotern untersucht. Der konzeptionierte Greifprozess besteht aus vier Teilschritten, welche aufeinanderfolgend durchgeführt werden. Zunächst wird das zu greifende Bauteil aus unterschiedlichen Perspektiven mit einer RGB-D-Kamera, welche am Endeffektor des Roboters befestigt ist, erfasst (siehe links in Abbildung 95). Durch eine zuvor durchgeführte Kalibrierung nach dem „eye-in-hand“-Verfahren (engl. „Auge-in-Hand“, wobei „Auge“ den optischen Sensor und „Hand“ den Roboter-Endeffektor beschreibt) ist es möglich, die aufgenommenen Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen. Infolgedessen können die einzelnen Punktwolken, welche aufgrund des eingeschränkten Sichtbereichs der Kamera nur einen Teil des Bauteils darstellen, zu einer vollständigen Punktwolke fusioniert werden. Da die grobe Position des Bauteils in Relation zum Roboter durch die Kalibrierung bekannt ist, kann die

generierte Punktwolke in einem Post-Processing Schritt bereinigt werden. In der rechten Hälfte von Abbildung 95 sind zwei in Schwarz eingezeichnete Kästen zu erkennen. Der äußere, größere Kubus beschreibt den zuvor definierten Arbeitsbereich, in welchem das Bauteil positioniert wird. Punkte außerhalb dieses Bereichs können entsprechend aus der Punktwolke entfernt werden. Des Weiteren werden statistische Ausreißer, welche eine überdurchschnittlich große Distanz zu ihren Nachbarn aufweisen, entfernt. Das Ergebnis dieser Filterung stellt eine Punktwolke dar, welche ausschließlich die Geometrie des zu greifenden Bauteils darstellt. Der innere schwarze Kubus im rechten Teil von Abbildung 95 stellt den umhüllenden Quader dieser Punktwolke dar. Anhand dieses Quaders kann das Koordinatensystem des Bauteils bestimmt werden. Woraufhin ein zuvor im selben Koordinatensystem definierter Greifpunkt bestimmt werden kann (dargestellt als Pfeile in der rechten Hälfte von Abbildung 95). Die „eye-in-hand“-Kalibrierung ermöglicht wiederum eine Transformation dieses Punktes in das Basis-Koordinatensystem des Roboters. Diese Information stellt die Grundlage für eine dynamische Roboter-Pfadplanung mit Hilfe der Pfadplanungssoftware „MoveIt“ innerhalb der Roboterumgebung ROS (Robot Operating System) dar.

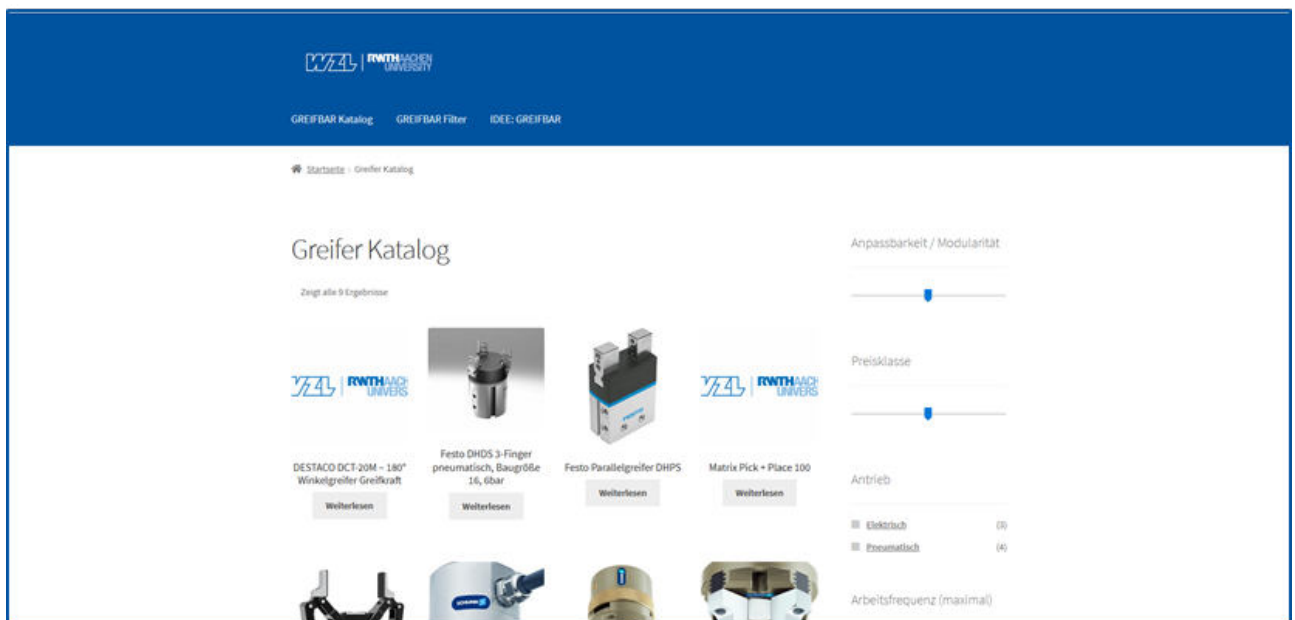
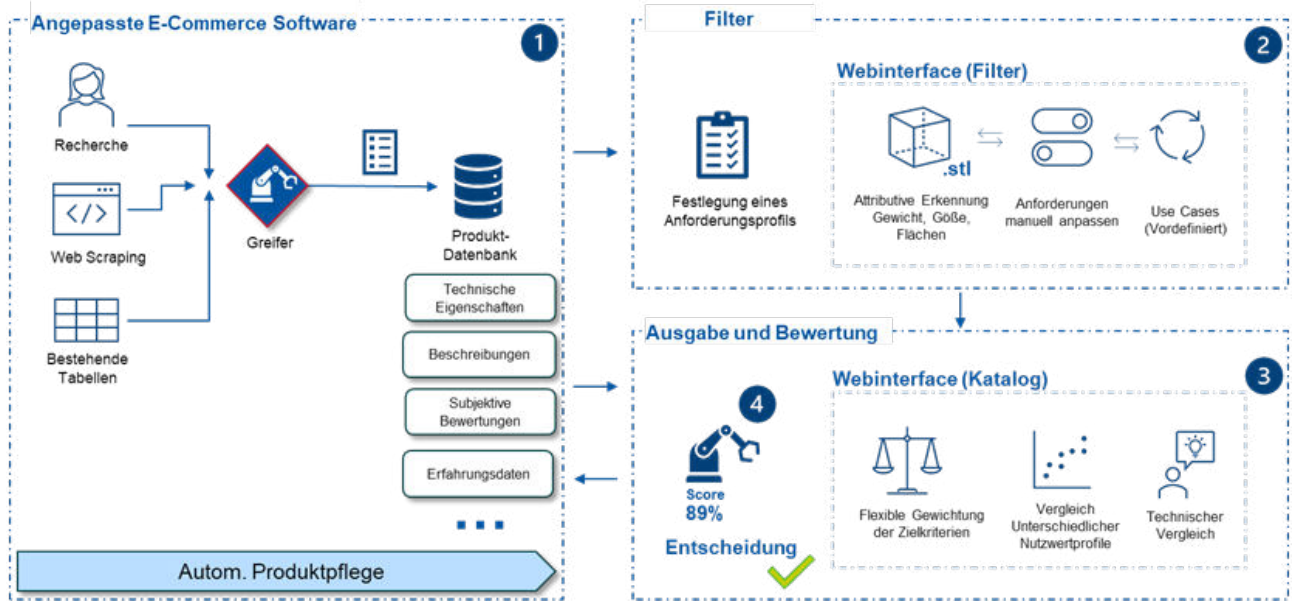


Abbildung 96: Schematische Darstellung der „Greifbar“-Applikation (oben); Screenshot des graphischen Interfaces der „Greifbar“-Applikation (unten)

Auswahl von Greifersystemen

Um das Potential des automatisierten Greifens von additiv gefertigten Bauteilen mittels Knickarmrobotern in einer industriellen Umgebung zu evaluieren, wurde durch eine Literatur- und Marktrecherche der aktuelle Stand der Technik kommerziell erhältlicher Greifersysteme für Knickarmroboter erfasst. Zur systematischen Zusammenfassung der gefundenen Greifersysteme wurden diese zunächst anhand der Kategorien „Anzahl Finger“, „Betätigung“, „Angriff“, „Bewegungsmechanismus“ und „Greifertyp“ eingeteilt. Die Greifertypen wurden wiederum nach den

Wirkprinzipien „mechanisch“, „pneumatisch“, „magnetisch“ und „Sonderformen“ unterteilt. Nach einer technischen Beschreibung der analysierten Greifersysteme und möglicher Ergänzungskomponenten, wie beispielsweise automatische Werkzeugwechsler oder zur Regelung verbaute Sensorik, wurden unter Berücksichtigung der zuvor festgelegten Kategorien ein interaktiver Katalog zur Unterstützung der Auswahl eines Greifertypen erstellt. Dazu wurden 15 Greifertypen bestimmt und anhand kommerziell verfügbarer Systeme Kennwerte festgelegt. Diese Kenn-

werte umfassen die Kategorien „Grundlegende Eigenschaften des Greifersystems“ (z.B. Greifkraft, Hub pro Greifbacke), „Werkstückbezogene Eigenschaften“ (z.B. magnetisch, flächig greifbar), „Prozessbezogene Eigenschaften“ (z.B. Schließzeit, maximale Arbeitsfrequenz), „Automatisierungsbezogene Eigenschaften“ (z.B. digitale Kommunikationsschnittstellen) und „Weitere Eigenschaften“ (z.B. Flexibilität), welche mittels eines paarweisen Vergleichs in Expertengesprächen entsprechend ihrer Relevanz für die Auswahl zueinander gewichtet wurden. Zur Anwendung wird ein Bauteil ausgewählt und entsprechend Werte für die einzelnen Kriterien der zuvor beschriebenen Kategorien festgelegt. Anhand dieser Werte wird automatisch bestimmt, welche Greifertypen für das jeweilige Bauteil geeignet sind. Die erste Version dieses interaktiven Greiferkatalogs basierte auf einem Microsoft Excel™ Dokument. Um die Flexibilität und Handhabbarkeit des Systems zu erhöhen, wurde eine zweite Version basierend auf einer Web-Applikation konzipiert (Abbildung 96 oben) und beispielhaft umgesetzt (Abbildung 96 unten). Die „Greifbar“ Web-Applikation erlaubt über das Einladen eines 3D-Modells des zu greifenden Bauteils und das manuelle Setzen weiterer Filter das Erstellen eines Anforderungsprofils für den auszuwählenden Greifer. Dieses Anforderungsprofil wird automatisch mit einer hinterlegten Datenbank abgeglichen und geeignete Greifersysteme werden ausgegeben.

12 Nachbearbeitung

Obwohl AM Verfahren immer besser und genauer geworden sind, ist eine Nachbearbeitung der gefertigten Bauteile weiterhin nötig. Zur Unterstützung des Bauvorgangs erforderliche Zusatzelemente müssen entfernt, Flächen bearbeitet und Anschlüsse an andere Komponenten vorbereitet werden. Der Umfang einer Nachbearbeitung kann je nach Bauteil für 20 % und 40 % der Bauteilkosten verantwortlich sein.

Dem Grundgedanken von IDEA folgend, wird die Nachbearbeitung zusammen mit anderen Prozessen der Prozesskette betrachtet. Erkenntnisse lassen sich dann z.B. wieder in die Gestaltung des Bauprozesses zurückführen. Es ist beispielsweise nicht sinnvoll, erforderliche Stützkonturen separat zu betrachten und als gegeben anzunehmen, wenn deren Umgestaltung den Aufwand der Nachbearbeitung signifikant reduzieren könnte. In diesem Zusammenhang wird intensiv untersucht, welche Auswirkung unterschiedliche Ausprägungen dieser Stützen auf die Entfernung und Oberflächennachbearbeitung haben. Zudem werden unterschiedliche Strategien zur Entfernung von diversen Stützgeometrien untersucht. Generell muss die Nachbearbeitung an den AM-Bauteilen dort stattfinden, wo sie geplant ist. Hierzu sind die Lage und Orientierung der Bauteile innerhalb der Bearbeitungsmaschine zu berücksichtigen. Die beim 3D-Druck entstehenden kleineren Formabweichungen der Bauteile müssen in die Referenzierungskonzepte einbezogen werden. Die Untersuchungen umfassen daher mechanische Referenzierungen durch die Spannelemente selbst, sowie entsprechende Unterstützungen durch Software.

Beim Pulverbett-Verfahren startet der Aufbau auf einer so genannten Bauplattform und erfordert das spätere Abtrennen der Bauteile von der Plattform. Ob dies vor oder nach einer Wärmebehandlung geschieht, oder direkt innerhalb der Nachbearbeitung, hängt vom Einzelfall ab.

Durch AM gefertigte Bauteile weisen oft Rauigkeiten auf, welche eine Nachbearbeitung notwendig machen. Gemäß dem Gedanken der werkzeuglosen Fer-

tigung werden Gleitschleifverfahren zur Verbesserung der Oberflächen-Eigenschaften untersucht. Auch das Fügen von Bauteilen ist ein wichtiger Aspekt hin zu einer wirtschaftlichen Serienfertigung. So können Größen- und Prozessbeschränkungen an Gesamtprodukten entfallen und effiziente Prozesskombinationen erzielt werden.

Um verbliebene Abweichungen der Bauteile untereinander bei der Nachbearbeitung zu berücksichtigen, bieten sich adaptive Verfahren an. Dieser Ansatz erlaubt automatische Anpassungen vorgegebener Bearbeitungsstrategien basierend auf der Kenntnis der aktuellen Bauteilgeometrie.

Eine Validierung schließt die Arbeiten zum Thema Nachbearbeitung ab.

12.1 Nachbearbeitungsoptimierte Stützstrukturkonzepte und Entfernung

12.1.1 Virtuelle Analyse

Im ersten Schritt wurde eine virtuelle Analyse der Stützstrukturen bzw. Support (Sk) anhand der Demonstratoren durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf Ort, Lage und der Anbindung der Sk von Bauplatte zum Rohteil. Resultierende Ergebnisse sind die Reduzierung des eingesetzten Stützstrukturvolumens, welches Auswirkungen auf die additive und subtraktive Fertigungszeit hat.

Die Analyse ist in drei Vorgehensweisen innerhalb des AM-Preprocessings (Abbildung 97) unterteilt:

- Automatisiertes Generieren von Sk
Der Prozess der automatischen Supportgeometrienerstellung dient lediglich als Vergleich. Ein Ziel dieser Untersuchung ist, dass wichtige Faktoren für die automatische Supportgeometrien identifiziert werden. Diese Erkenntnisse können ggf. in eine Verbesserung der Funktion miteinfließen. Zusätzlich sollen Potentiale einer manuellen Aufbereitung ermittelt werden. Durch hinterlegte Zwangsbedingungen in der Software werden Ort, Lage und die Anbindung der SK automatisiert bestimmt.

- Halbautomatisiertes Generieren von Sk
Die Sk aus a) wurden anhand der ermittelten Potentiale manuell modifiziert und angepasst.
- Generieren der Sk explizit für die Nachbearbeitung
Es soll die Supportgeometrie optimal ausgelegt und hinsichtlich Kosten und technischer Machbarkeit optimiert werden. Komplex divergente Ansätze können hier verfolgt werden.

Eigenschaften und Geometrie des Supports wurden in diesem Kapitel nicht betrachtet.

Im weiteren Verlauf wird die Vorgehensweise der AM-Prozesskette und das Auswertedokument anhand des Demonstrators *Leitrad* von *toolcraft* vorgestellt.

Vorgehensbeschreibung und Auswertedokument

Ziel ist es, die Sensitivitäten von Entwicklungs- und Durchlaufzeiten und Produktionskosten in Abhängigkeit der Stützkonturanbindung der drei oben beschriebenen Varianten a), b) und c) unter den heterogenen Arbeitsweisen der Partner zu identifizieren. Weiterführende Intention ist den AM-Prozess bei den Partnern zu analysieren. Daher wurde eine Vorlage zur Vorgehensbeschreibung des Pre-In-Post-Processing und ein Auswertedokument von *toolcraft* erstellt.

Für eine verbesserte Vergleichbarkeit der am Ende ausgewerteten Ergebnisse sind Rahmenbedingungen wie Art und chemische Zusammensetzung des Pulvers, Art der Supportstruktur-Geometrien (Block,

Solid, Cone) und Informationen zum Rohteil und Fertigteil in der Vorgehensbeschreibung anzugeben.

Das Fertigteil entspricht dem Kundenteil, woran die Funktions- und Spannflächen, kritische Maßtoleranzen, Form- und Lagetoleranzen und Oberflächengüte bezüglich Machbarkeit der additiven Fertigung zu definieren sind. Für die Herstellung des Kundenteils ist es erforderlich ein AM-geeignetes Rohteil durch konstruktive Datenaufbereitung für die mechanische Nacharbeit vorzubereiten, da die meisten Toleranzanforderungen von Funktionsflächen nicht additiv herstellbar sind. Hierzu können die Mitglieder des Arbeitspakets eigenständig über die Aufbereitung entscheiden. Ein Vorschlag für die Reihenfolge der Arbeitsschritte wurde gegeben. Die beiden Dokumente Vorgehensbeschreibung und Auswertedokument wurden den AM-Anwendern zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird nur auf die Ergebnisse des *toolcraft* Demonstrators *Leitrad* eingegangen.

Aus Abbildung 97 können die Funktionsflächen, Spannflächen und Flächen zur Nachbearbeitung des Demonstrators *Leitrad* entnommen werden.

Anforderungen von Stützstrukturen für die Nachbearbeitung

Die Anforderungen an Stützstrukturen für die digitale Erzeugung wurden mittels eines Brainstormings innerhalb eines projektübergreifenden Workshops ermittelt. Anschließend erfolgte eine Konsolidierung und Priorisierung.

Erkenntnisse für den jeweiligen Abtrennprozess werden anhand der physischen Versuche identifiziert.

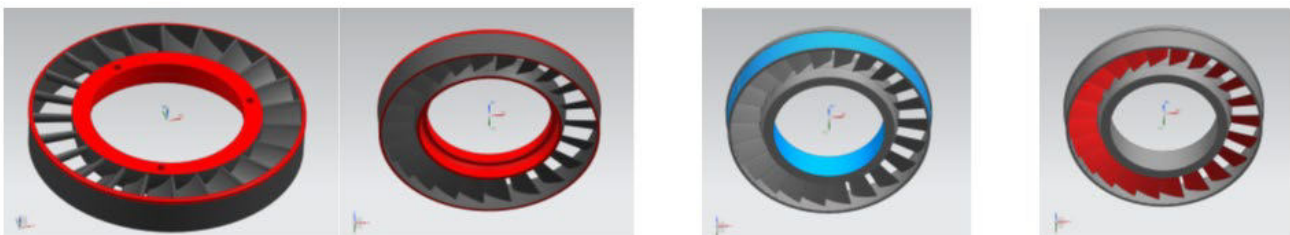


Abbildung 97: Flächeneinteilung Leitrad, links: Funktionsflächen mit Aufmaß rot markiert = Rohteil; mittig: Spannflächen für maschinelle Bearbeitung blau markiert; rechts: Flächen zur Nachbearbeitung (Entfernung der Stützstrukturen) rot markiert.

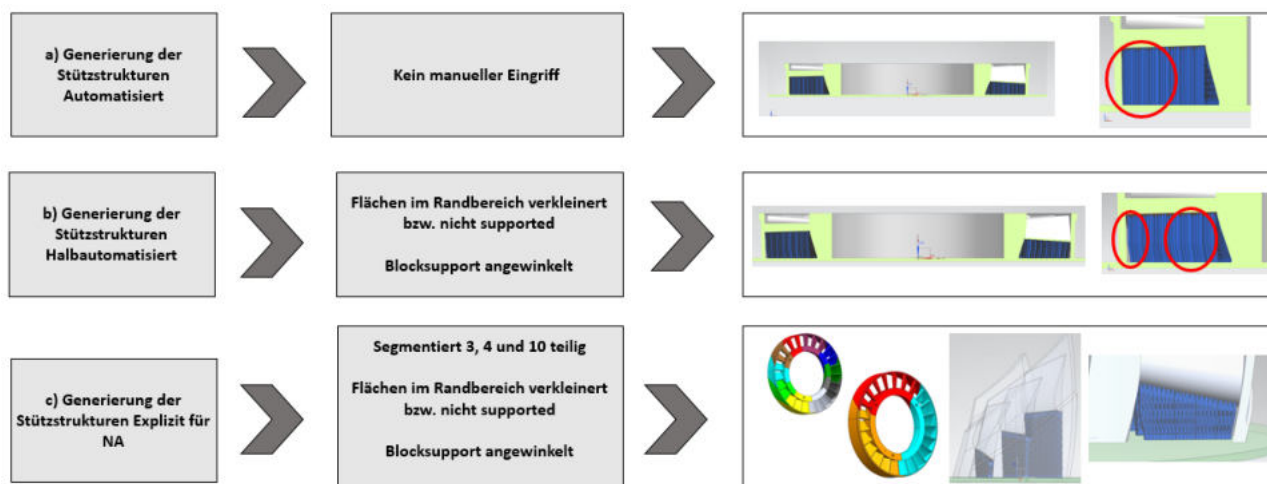


Abbildung 98: Übersicht Generierung von Stützstrukturen mit den Auswirkungen

Auswirkungen der Stützstrukturanbindung zum Roh- teil auf die Nachbearbeitung

Das Rohteil wurde mit dem Strömungs-Austritts-
querschnitt bzw. der Saugseite wie in Abbildung 99
dargestellt auf der Bauplatte horizontal orientiert. Die
Druckseite des Leittrads erfährt somit keine Anbin-
dung mittels Support. Vorhandene Bohrungen wurden
geschlossen. Eine direkte Anbindung zur Bauplatte
ergibt eine höhere Prozessstabilität und einen
verbesserten Wärmeabtransport.

Nachfolgend wird die Anbindung der Stützstruktur
zum Rohteil in Abhängigkeit zu den Vorgehensweisen
in Abbildung 98 aufgezeigt und die Ergebnisse vorge-
stellt.

In Variante a) wurden die Sk automatisiert in der Soft-
ware erzeugt. Resultierend ist eine ungeeignete Anbin-
dung der Sk im Randbereich, Übergang von Schau-

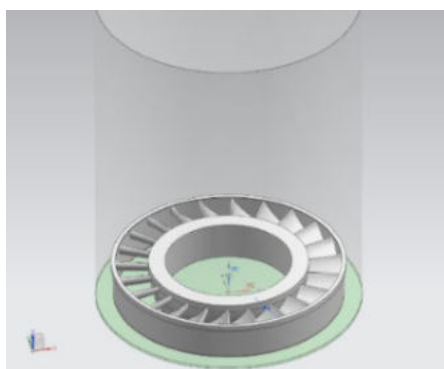


Abbildung 99: Orientierung und Anbindung des
Leittrads auf der Bauplatte

felblatt zur Ringfläche und an der Innenfläche des Au-
ßenrings. Diese Bereiche bzw. Hinterschnidungen
sind in der Nachbearbeitung, sowohl händisch als
auch maschinell, schwer zugänglich und in der Praxis
mit hohem Aufwand verbunden.

Aufgrund dessen wurden in b) die Sk angewinkelt und
der Randbereich verkleinert, wodurch eine Anbindung
zu Regionen, die nicht nachgearbeitet werden müs-
sen, vermieden werden konnte. Somit ist eine händi-
sche Nachbehandlung der Innenfläche des Außen-
rings überflüssig und reduziert den Aufwand.

Weiterverfolgt wurde in c) die Aufteilung des Leittrads
in Segmente, 3-, 4- und 10-teilig, wobei die Seg-
mente um 180 Grad gedreht auf der Bauplatte ange-
bunden sind. Der verkleinerte Randbereich und die
angewinkelte Geometrie sind aus b) übernommen.
Abbildung 100 zeigt die beiden Varianten. Augens-
cheinlich ist, dass die zu bearbeitende Fläche (Anbin-
dung der Sk zur Schaufel, rot markiert) verkleinert und
der Einsatz von Stützstrukturvolumen unter c) we-
sentlich reduziert werden konnte.

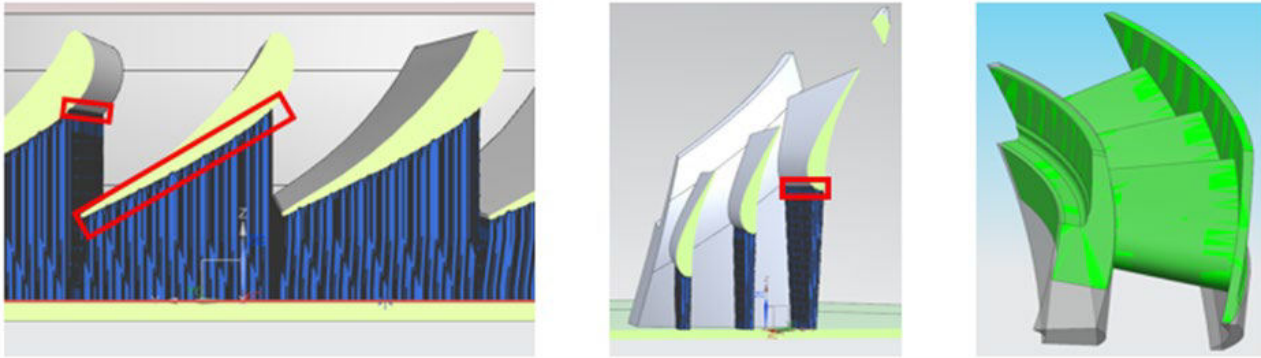


Abbildung 100: Links: Variante b) Halbautomatisiert; Mitte: Variante c) Explizit für die Nachbearbeitung 10-teilig; rot markiert: zu bearbeitende Fläche; Rechts: Zusätzliches Materialvolumen (grau) zur Anbindung an der Bauplatte

Für eine quantitative Beurteilung der oben beschriebenen Vorgehensweisen wurden die Prozesszeiten des AM-Postprocessing, der manuelle Abtrag von Sk einschließlich des Verschleifens und die anschließende spanende Fertigung der Funktionsflächen experimentell und die additive Bauzeit simulativ bestimmt.

Abbildung 101 stellt die Ergebnisse des Auswertedokuments der Durchlaufzeiten über den Prozessschritten dar. Die Entwicklungszeiten im AM-Preprocessing, konstruktive Daten- und CAM-Aufbereitung steigt stetig an, ebenso ist die additive Bauzeit der Segmente intensiver. Auffallend ist, dass die Bearbeitungszeit für die manuelle Entfernung und das Verschleifen der Stützstrukturen wesentlich reduziert werden konnte. Dem entgegen steht die ansteigende

additive Bauzeit der Segmente, die durch den höheren Materialeinsatz (Volumen) in Abbildung 101 begründet ist.

Der Materialeinsatz, das Volumen des Supports, konnte durch die Segmentierung des Demonstrators signifikant reduziert werden, was sich positiv auf die die Durchlaufzeiten und Produktionskosten auswirkt. Die notwendige Orientierung, Anstellung und Anbindung der Segmente auf der Bauplatte führen wiederum zu einem erhöhten Materialbedarf für das Rohteil (Abbildung 100, rechts sowie Abbildung 102). Hinweis: Das Supportvolumen ist nicht der tatsächliche Materialeinsatz, sondern das eingenommene, Volumen von Anbindung der Bauplatte bis zur Schaufelunterseite.

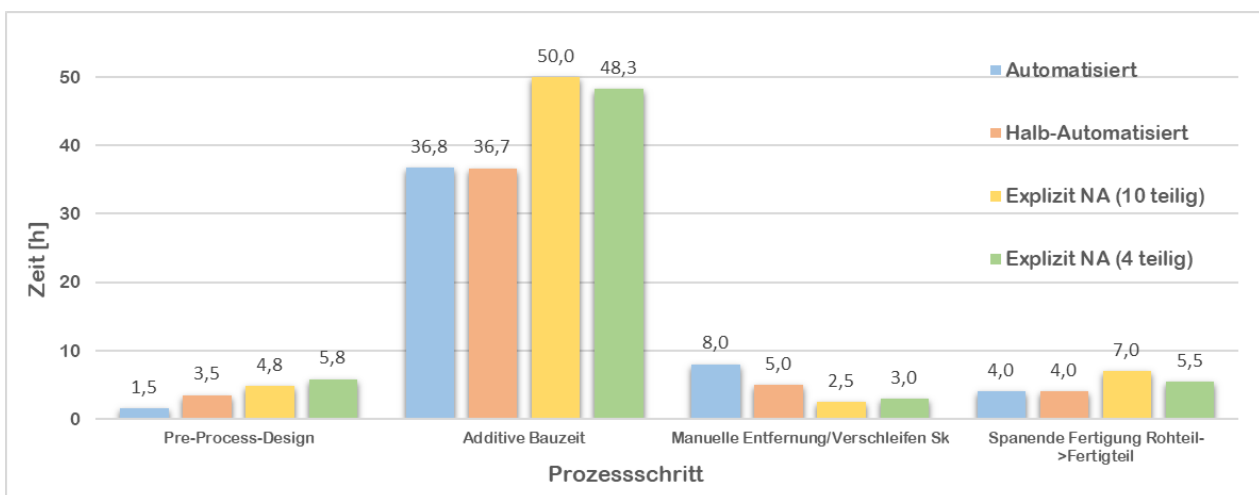


Abbildung 101: Auswertung Durchlaufzeit der Prozessschritte

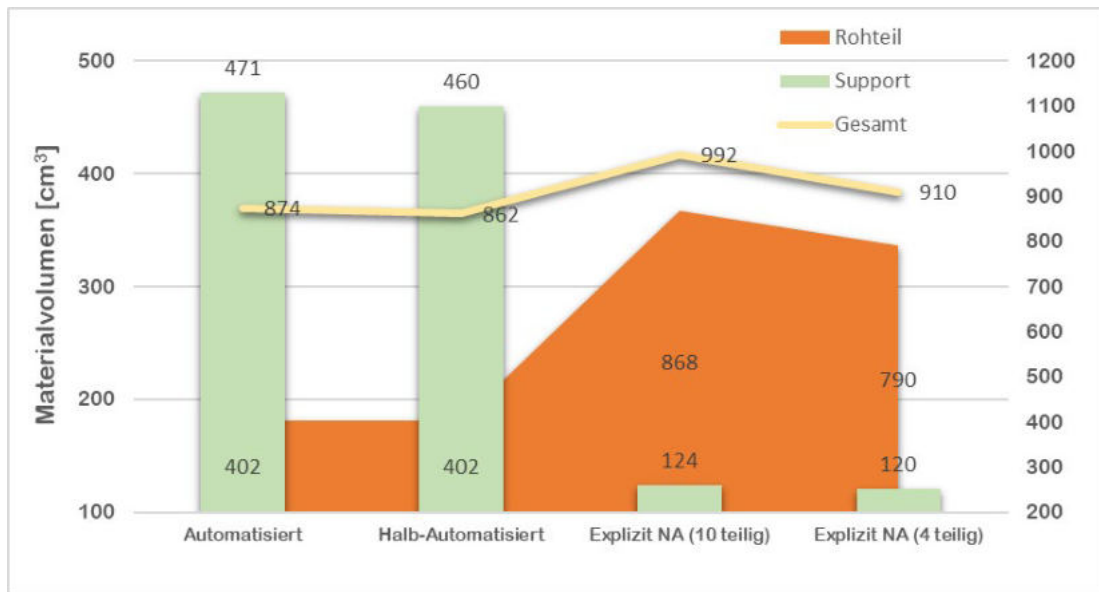


Abbildung 102: Materialvolumen Rohteil/Support IN 718

12.1.2 Physische Analyse

Fräsen - Loop I

Im ersten Loop wurden Fräsversuche mit dem fragmentieren Blocksupport durchgeführt. Der Blocksupport kommt sehr häufig zum Einsatz. Dieser besteht aus x-förmigen, konisch zulaufenden Stäben mit einer Wabenstruktur als Außenwand. Der Support ist an der konvexen Kontur der Schaufelunterseite angebunden. Zudem wurde ein Aufmaß vergeben, um die Endbearbeitung auf die Zielgeometrie besser testen zu können. Eine Nachbearbeitungsstrategie wurde mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik (IPT) aufgestellt, wie in Abbildung 103 dargestellt.

Die Abtragsimulation in Abbildung 104 zeigt eine 2D-Spanstrategie in einer horizontalen Ebene. Eine Zustellung erfolgte nicht. Die Prozessparameter wurden nicht variiert. Als Werkzeuge wurden ein Torus- und Kugelfräser verwendet. Es trat so gut wie kein Verschleiß an den Schneiden auf.

Während der Versuche wurde festgestellt, dass ein spanender, stabiler Fräsprozess nicht erzielt werden konnte. Die x-förmigen Konturen rissen aus der stoffschlüssigen Verbindung der Schaufelfläche und an den Randzonen zu den Außen- und Innenseiten der Ringe blieben vereinzelt Konturen stehen. Die verbleibende Fläche wird aufgrund der Noppen intern als „Gänsehaut“ bezeichnet. Dieses Flächengebilde

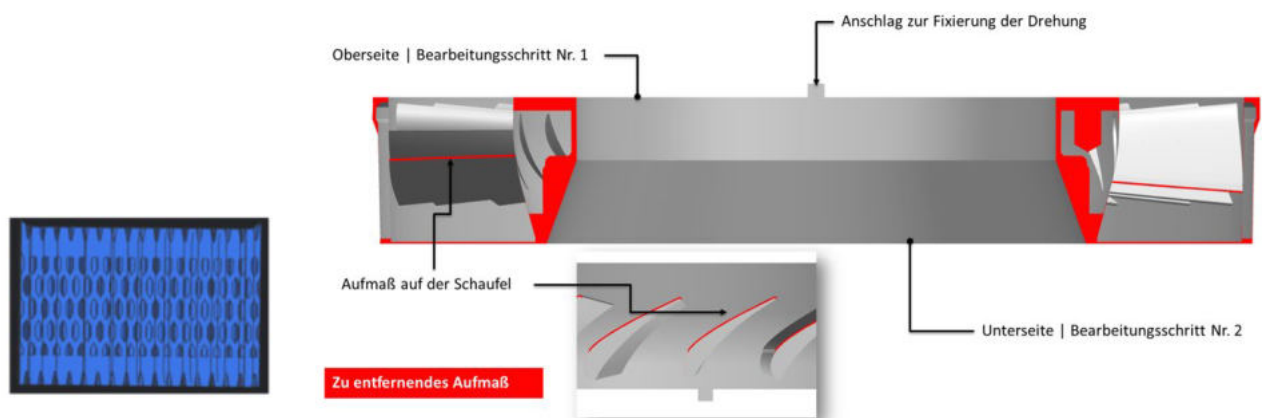


Abbildung 103: Materialvolumen Rohteil/Support IN 718

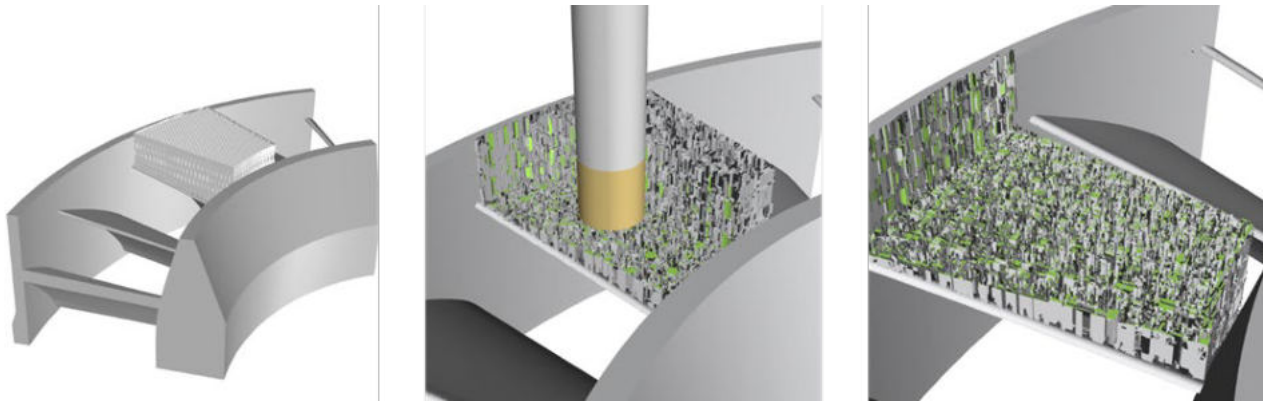


Abbildung 104: Abtragssimulation

wurde im Anschluss subtraktiv nachbearbeitet. Der kantige Übergangsbereich macht die Zugänglichkeit des Fräsers für eine Bearbeitung der kompletten Fläche nahezu unmöglich. Abbildung 105 links zeigt die Fläche nach der Entfernung der Konturen mittels Fräsen. Die übrigen Konturen an den Außen- und Innenseiten sind deutlich zu erkennen.

Fräsen - Loop II

Im zweiten Loop wurde der Demonstrator segmentiert. Es wurden 4 Segmente mit je 4 Schaufeln je einer Stützkontur konzipiert. Für das Fragmentieren und Perforieren einer Stützkontur stehen dem Anwender in Siemens NX ca. 200 Einstellmöglichkeiten zur Verfügung. Zudem wurden Spannflächen für die anschließende Fräsbearbeitung mitberücksichtigt. Zusammenfassend wurden folgende Variationen untersucht:

- 16 Supportvarianten
- Variation der Anbindung (Form, Eindringtiefe)
- Variation der Kontur (mit vs. ohne, Zellbreite und -höhe der Maschen, Strebenbreite)
- Perforationstypen (Raute, Zylinder, Kegel, X-Form)
- Fragmentierung (Zerlegung bzw. Definition von Teilbereichen)

In Abbildung 106 links ist der Baujob mit den vier Segmenten dargestellt. Dieser wurde mittels einer TruPrint 3000 aufgebaut, anschließend entpackt und entpulvert, lösungsgeglüht, ausgehärtet und die Segmente von der Bauplatte getrennt. Im Anschluss wurden die Segmente optisch gemessen und ein Flächenvergleich mit der Nominalgeometrie durchgeführt. Dadurch lässt sich der Verzug der Segmente



Abbildung 105: Links: Fläche nach Entfernung der Konturen mittels Fräsen; Rechts: Fläche nach Abtrag des Aufmaßes mittels Zerspanung (Schruppe, Schlicht- und Feinschlichten)

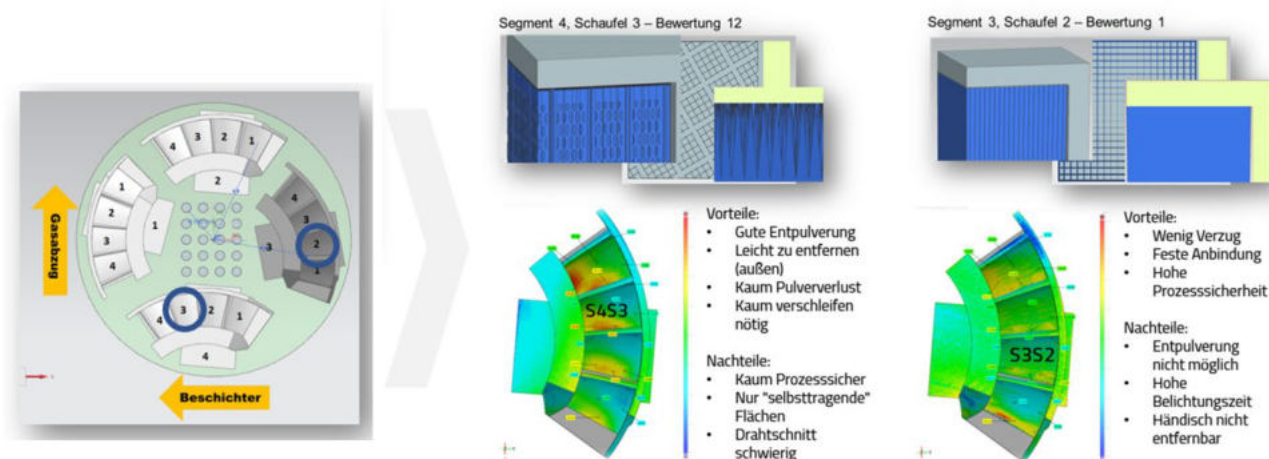


Abbildung 106: Links: Baujob mit den 4 Segmenten; Rechts: 2 Konzepte von Stützkonturen mit Vor- und Nachteilen und dem Flächenvergleich (Ist- und Nominalgeometrie).

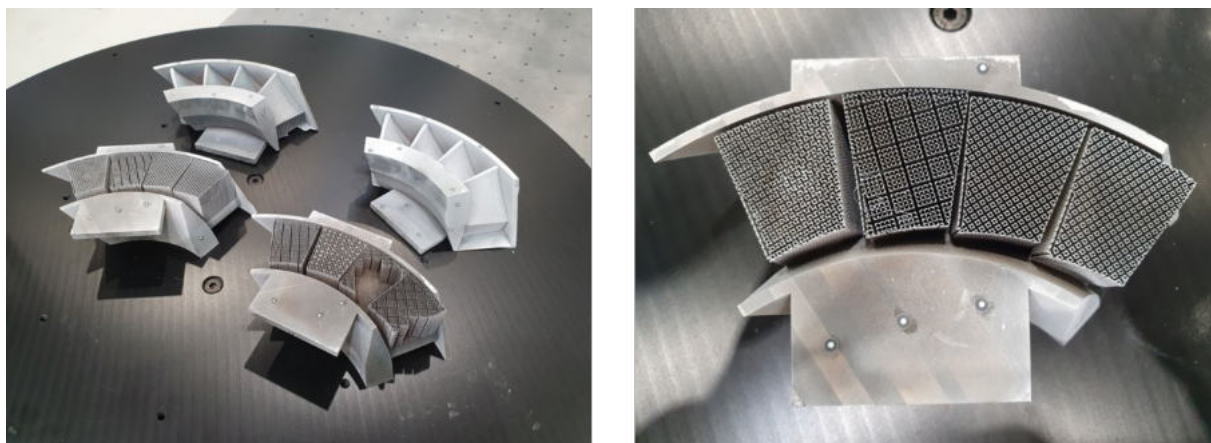


Abbildung 107: GOM-Scan der vier Segmente mit den unterschiedlichen Stützkonturen

während des AM-Prozesses und der Nachbearbeitung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Stützstrukturen feststellen. Die additiv hergestellten Segmente sind bei der optischen Vermessung in Abbildung 107 zu sehen. In Abbildung 106, rechts, sind zwei Ergebnisse von den Segmenten 3, Schaufel 2 und 4, 3 dargestellt. Schaufel 3 hat eine sehr geringe Anbindung, Schaufel 4 eine sehr massive Anbindung zur konkaven Kontur der Schaufel. Die Validierung zeigt, beide Varianten liegen in der technischen Spezifikation (Form- und Profiltoleranz der Schaufelgeometrie). Der Flächenvergleich wurde für jede Schaufel durchgeführt und bewertet. Danach fanden Absprachen im Konsortium hinsichtlich Nachbearbeitungsstrategie statt.

Die Fräsversuche erfolgten durch das IPT. Bewertungsgrößen sind optische Geometriemessung, maximale und mittlere radiale Prozesskraft und der Werkzeugverschleiß.

Abbildung 108 stellt die bearbeiteten Schaufeln dar. Die Zerspankräfte wurden mit einem rotierenden Mehrkomponenten-Dynamometer am Werkzeughalter gemessen. Im Anschluss wurde der Mittelwert der Prozesskraft \bar{F}_r bestimmt. Der Werkzeugverschleiß wurde nach ISO 8868-2 – Tool life testing in milling bewertet. Für jede einzelne Schaufel wurde ein neuer Torusfräser (4 Schneiden) verwendet.

In Abbildung 109 werden die Messergebnisse aus den Zerspanversuch dargestellt. Für den Fräsversuch in Loop III wurden die Stützkonturen mit der geringsten geometrischen Abweichung von der nominalen

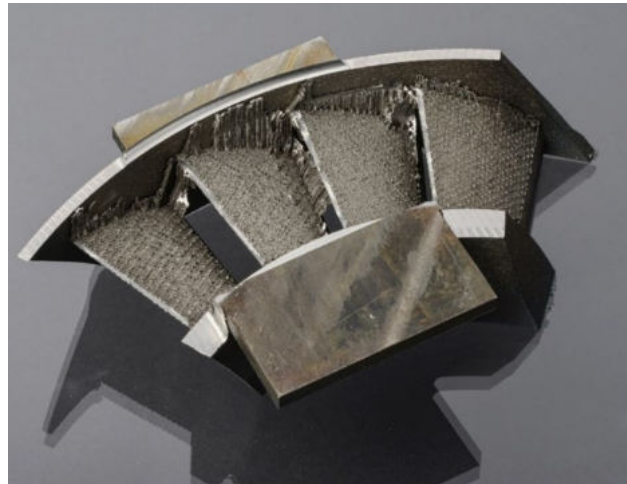
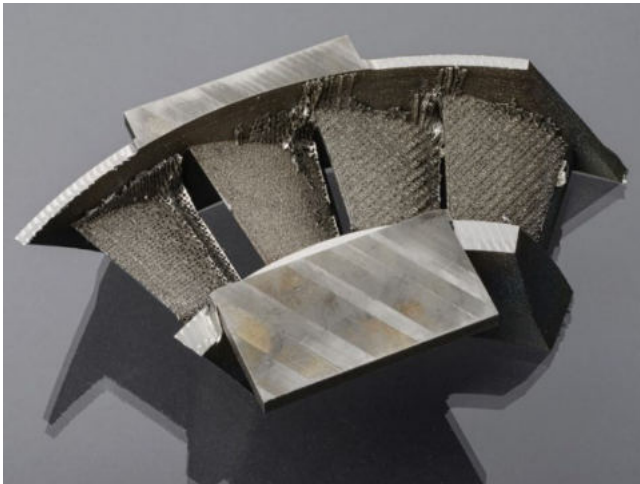


Abbildung 108: Ergebnis der Fräsnachbearbeitung

Geometrie, geringstem Werkzeugverschleiß und der höchsten Zerspankraft ausgewählt.

Fräsen - Loop III

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, innerhalb einer durchgängigen in Siemens NX verfügbaren Prozesskette, Supportstrukturen für das maschinelle Entfernen mittels Fräsen zu entwickeln. Dazu wurden beim Projektpartner Fraunhofer IPT Bearbeitungsversuche beauftragt, um die Ergebnisse hinsichtlich Prozessverhalten und Werkzeugverschleiß beim Zerspannen der einzelnen Supportdesigns mittels verschiedener analytischer Verfahren (bspw. Prozesskraftmessungen) zu untermauern.

Die Versuche sind in mehreren Iterationen abgelaufen, die Erkenntnisse einer jeden Supportvariation

bzw. Fräsiteration flossen in die jeweils nachfolgende Iteration mit ein. Insgesamt erfolgten drei Iterationen. In der ersten Iteration wurden insbesondere nicht-fragmentierte Supportdesigns mit breiter Geometrievariation aus NX AM heraus generiert, um die grundsätzlichen Gestaltungsmöglichkeiten aus der CAD-Software heraus im Hinblick auf die Zerspanbarkeit zu untersuchen und darüber hinaus die Druckbarkeit sicherzustellen, siehe Abbildung 110.

Auf Basis von Standardparametern wurden die Supportstrukturen zerspannt, mit dem Ergebnis, dass mit einer Ausnahme makroskopischer Werkzeugverschleiß bzw. instationäres Prozessverhalten beobachtet werden konnte.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde eine gezielte Variation der vielversprechendsten Supportstruktur aufgestellt und einer weiteren Fräsiteration zugeführt. Insbesondere der Werkzeugverschleiß konnte hierbei, im Vergleich zum Vollmaterial, deutlich gesenkt werden, siehe Abbildung 111, ebenso konnte die volumenbezogene Bauzeit im Vergleich zum Vollmaterial deutlich reduziert werden.

Da jedoch aufgrund des bei diesen Proben grundsätzlich vorliegenden Designkonzeptes Pulvereinschlüsse nicht zu vermeiden sind, wurde auf Basis der Schlussfolgerungen zu den dominanten Werkzeugverschleißmechanismen eine weitere Supportvariation entwickelt, die insbesondere die schnelle Aufbaurrate bei gleichzeitig reduzierten Material-Festigkeitswer-

Abweichung GOM	Position SK	Mittelwert Verschleiß	Bewertung mittlere Kraft	Position SK
0,05	Segment 3 Schaufel 2	72	75	Segment 3 Schaufel 4
0,07	Segment 3 Schaufel 3	93	200	Segment 1 Schaufel 3
0,08	Segment 4 Schaufel 1	93	175	Segment 1 Schaufel 4
0,08	Segment 1 Schaufel 2	94	225	Segment 1 Schaufel 2
0,09	Segment 1 Schaufel 1	94	250	Segment 1 Schaufel 1
0,10	Segment 1 Schaufel 3	100	80	Segment 4 Schaufel 1
0,10	Segment 1 Schaufel 4	122	80	Segment 4 Schaufel 2
0,10	Segment 4 Schaufel 4	124	160	Segment 4 Schaufel 3
0,11	Segment 4 Schaufel 2	137	70	Segment 3 Schaufel 2
0,11	Segment 3 Schaufel 4	140	38,5	Segment 2 Schaufel 1
0,11	Segment 2 Schaufel 4	152	90	Segment 4 Schaufel 4
0,12	Segment 4 Schaufel 3	154	90	Segment 1 Schaufel 3
0,12	Segment 2 Schaufel 1	158	95	Segment 2 Schaufel 3
0,13	Segment 3 Schaufel 1	159	110	Segment 2 Schaufel 2
0,13	Segment 2 Schaufel 3	160	65	Segment 3 Schaufel 1
0,13	Segment 2 Schaufel 2	191	75	Segment 2 Schaufel 4

Abbildung 109: Messergebnisse aus dem Zerspanversuch: Optischer Flächenvergleich, Mittlerer Verschleiß und mittlere Zerspankraft

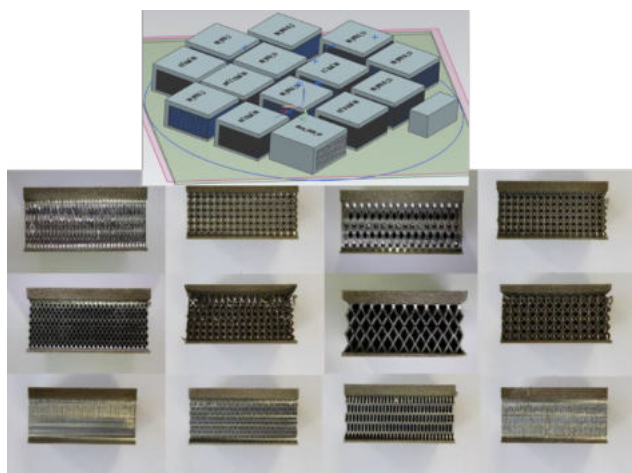


Abbildung 110: Darstellung Supportparametervariation in NX CAM Umgebung (oben) und Seitenansicht der Supportstrukturen (unten)

ten adressierte. In zwei Iterationen wurden hierzu zunächst die Laserparameter entwickelt und im Anschluss eine Variation von Proben einer letzten Fräsiteration zugeführt. Im Wesentlichen konnte hierbei eine Steigerung der Aufbaurrate von bis zu 210% im Vergleich zum Vollmaterial erzielt werden, bei gleichzeitig reduziertem Werkzeugverschleiß, siehe Abbildung 112.

Meißeln, Teilergebnisse Siemens Energy

Die Fertigungsprozesskette additiv gefertigter Komponenten ist, nicht nur bei geringen Stückzahlen, derzeit noch von sehr viel Handarbeit geprägt. Neben Aktivitäten zur Substitution von Supportstrukturen zur manuellen Entfernung hin zur mechanischen, bspw. durch Fräsen, wurde durch grundlegende Machbarkeitsuntersuchungen geprüft, inwieweit sich die bestehenden Supportstrukturen mittels automatisierter Meißelstrategien entfernen lassen. Dazu wurde zunächst eine Probengeometrie entworfen, die über eine Vielzahl an geometrischen Elementen verfügt, die die Herausforderungen von additiven Komponenten hinsichtlich Zugänglichkeit, Komplexität der zu unterstützenden Fläche sowie notwendiger Bahnplanung abbildet, siehe Abbildung 113.

Die erzeugten Proben verfügten über konvexe und konkave Überhänge, Radien, und Schrägen, die Supporterzeugung wurde im NX AM Modul durchgeführt. In Zusammenarbeit mit Siemens AG (T und DI), toolcraft und Moduleworks und Siemens Energy wurde ein komplettes Setup zur Versuchsdurchführung erstellt und die Supportstrukturen mittels Druckluftmeißel auf einer Roboterzelle entfernt, siehe Abbildung 113 sowie Abbildung 114.

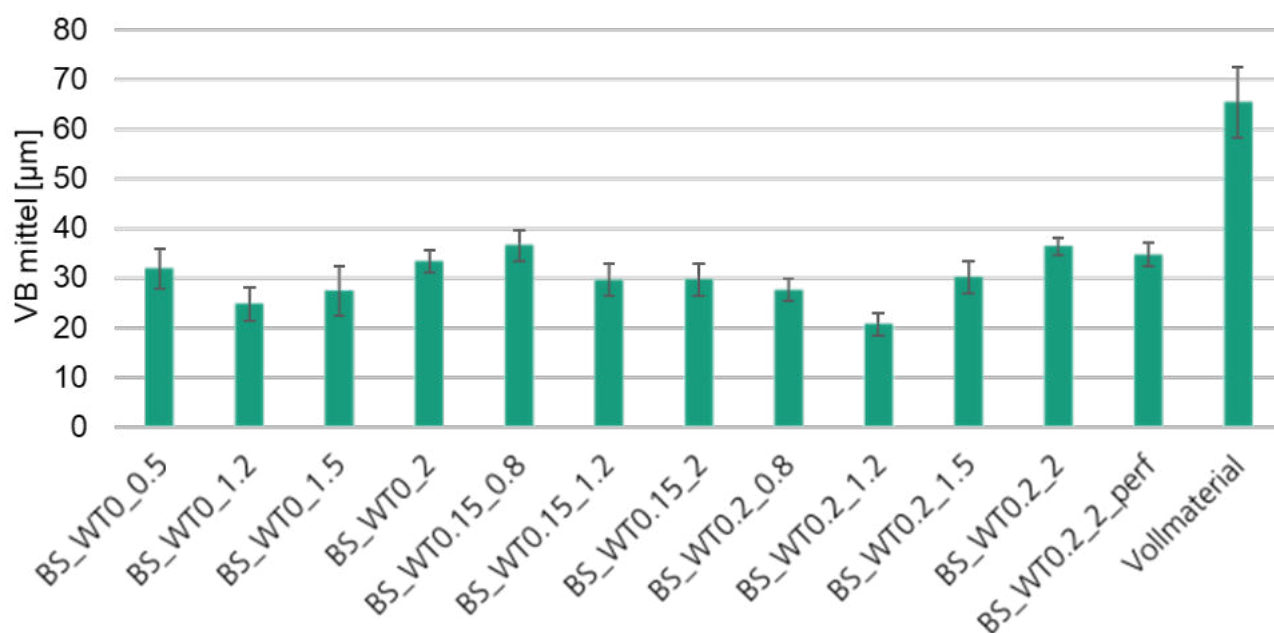


Abbildung 111: Darstellung der Verschleißmarkenbreite (VB) für die Variation der Supportstrukturen im Vergleich zum Vollmaterial

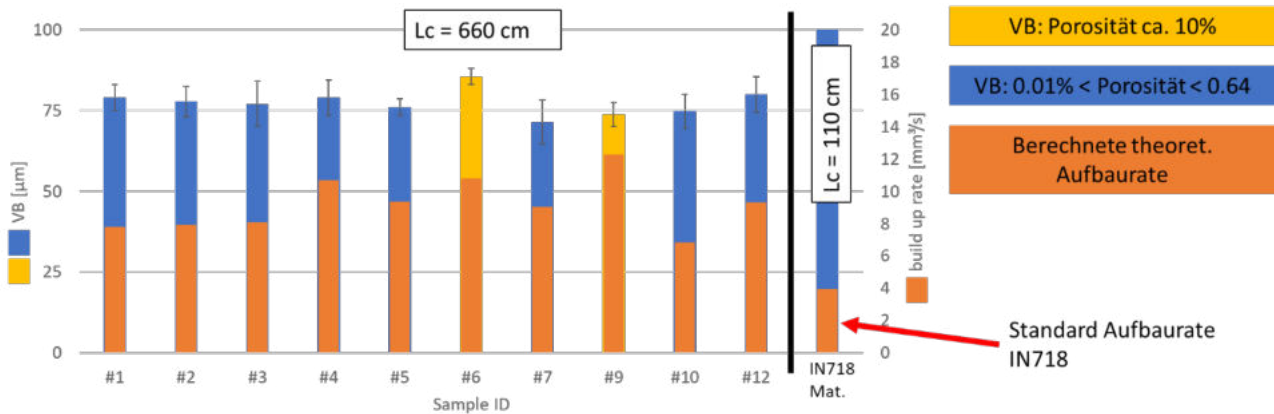


Abbildung 112: Darstellung der Verschleissmarkenbreite (VB) für verschiedene Kombinationen der Supportstrukturen und deren Porositätslevels sowie Aufbaureaten bei einer Schnittlänge 660cm (Lc)

Die Ergebnisse sind insofern sehr vielversprechend, als dass sich eine Probe ohne größeren Optimierungsaufwand mit den in NX CAM generierten vergleichsweise einfachen Werkzeugbahnen einfach und prozesssicher entfernen ließen. Eine weitere Probe ließ sich zwar bearbeiten, führte jedoch zu einigen Prozessabbrüchen aufgrund duktiler Verformungen der Supportstrukturen und die dritte Supportvariation ließ sich nicht bearbeiten. Ursache hierfür war die zu starke Anbindung der Supportfragmente in Verbindung mit der begrenzten Schlagenergie, die der verwendete Druckluftmeißel aufbringen konnte.

Meißeln, Teilergebnisse ModuleWorks

Meißeln wird zur automatisierten Bearbeitung von Steinoberflächen bereits eingesetzt. Recherchen ergaben jedoch, dass die Anwendung für klassische industrielle Produktionen bisher noch nicht in Angriff genommen worden ist. Durch die erfolgte Anwendung auf Steinen ist bekannt, dass die robotische Bearbeitung von Oberflächen durch einen Meißel umsetzbar ist. Bei der Steinbearbeitung hinterlässt jeder Meißelschlag einen Stich auf der Oberfläche. Dieser Effekt ist für additive Nachbearbeitungsprozesse nicht erwünscht. Daher ergaben sich zu der CAM-Planung für das Meißeln mehrere Teilbedarfe, darunter die Generierung einer Bahnplanung, die NC Verifikation, die Kollisionsprüfung und die Werkzeugposition.

Die Grundlage der Entwicklung war die Annahme, dass die CAM-Planungen für das Fräsen so angepasst werden können, dass hoch zuverlässige, auf dem Stand der Technik basierende CAM-Technologien zum Meißeln entwickelt werden können. Ziel war es, Algorithmen vorzustellen, die das automatisierte Entfernen von Stützstrukturen durch robotisches Meißeln ermöglichen. Die Ergebnisse bieten Einblicke in die zugrundeliegenden mechanischen Eigenschaften der Stützstrukturentfernung durch Aufprallkräfte beim Meißeln.

Zunächst war es nötig, die Positionierung des Meißels anzupassen. Technisch ähnelt der entwickelte Bahnplanungsalgorithmus zum Meißeln den allgemeinen Bahnplanungsalgorithmen zum 5-Achs Fräsen. Die

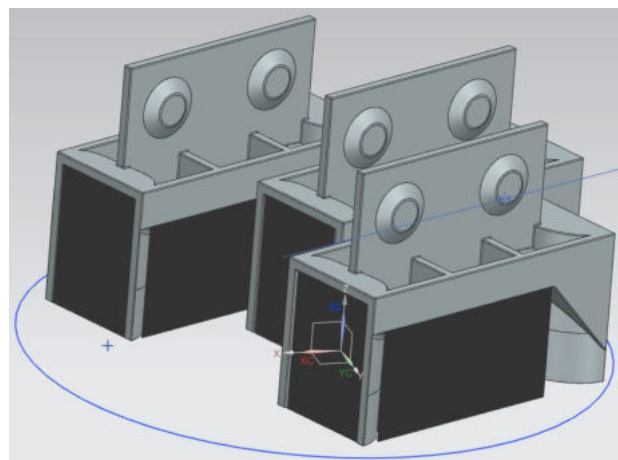


Abbildung 113: Drei Probenkörper für automatisiertes Meißeln in NX AM Modul Umgebung

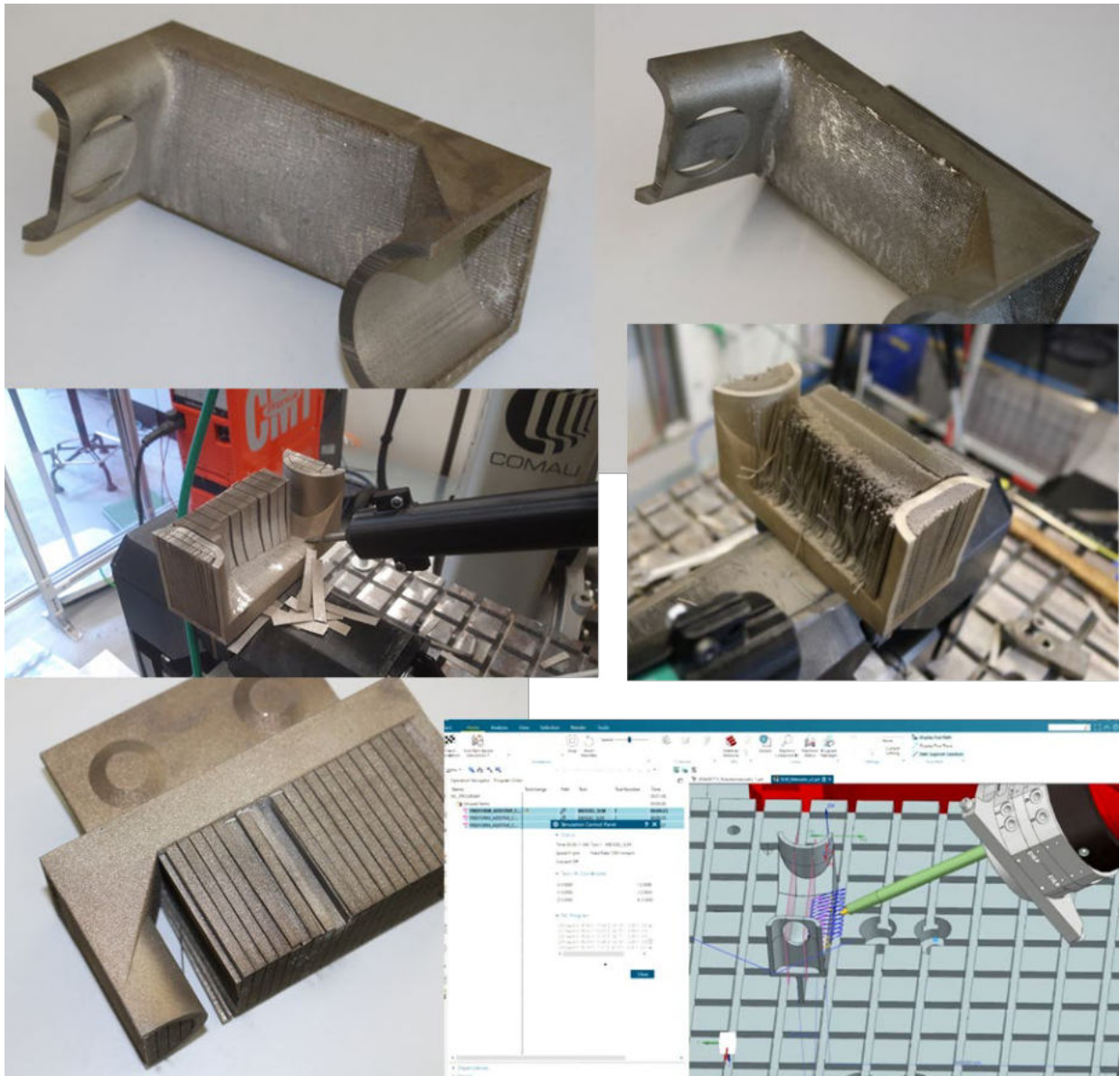


Abbildung 114: Darstellung der Probekörper mit entfernten Supportstrukturen (oben), Entfernung der Stützstrukturen während des Eingriffs (Mitte links) und unvollständige Entfernung (Mitte rechts) sowie Demonstrator vor der Supportentfernung (rechts unten) und Darstellung von Meißel mit Roboter in der CAM Umgebung

wichtigste Unterscheidung ist jedoch, dass der Meißel nicht rotationssymmetrisch ist und daher eine sechste Achse hinzugefügt werden muss. Das lokale Koordinatensystem, welches die Werkzeugpositionen festlegt, hat seinen Ursprung auf einem Punkt der Werkstückoberfläche. Der Normalvektor n und der Vorschubrichtungsvektor f verlaufen orthogonal. Der dritte Vektor, das Kreuzprodukt beider, ist $n \times f$ (Abbildung 115). Es ist hervorzuheben, dass die Schneidfläche des Meißels nur richtig, d.h. senkrecht zur Vorschubrichtung, ausgerichtet ist, wenn eine 6-

Achsen-Kinematik ausgewählt wird. Mit 5-Achs-Kinematiken ist es nicht möglich, die Schneidfläche des Meißels zu steuern. Der Drehwinkel ist relativ zum Normalvektor der Oberfläche n (90° Neigungswinkel) und muss darauf angelegt werden, dass ein minimaler Abstandswinkel zwischen der Rückseite des Meißels und der bearbeiteten Oberfläche entsteht. Es ist jedoch möglich, den Winkel zur Bearbeitung von konkaven Flächen oder zur Kollisionsvermeidung zu verändern.

Die Schneidfläche des Meißels kann zur bearbeiteten Fläche hin ausgerichtet werden. Dabei ist es nicht

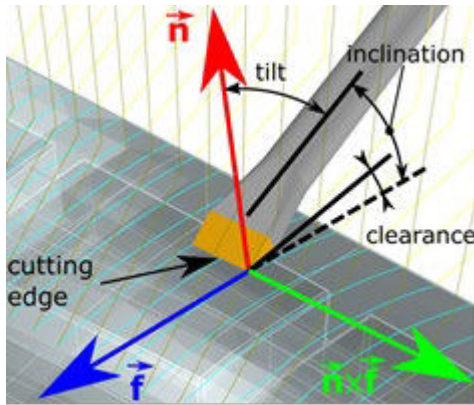


Abbildung 115: Koordinatensystem des Meißels

zwingend notwendig, dass der Meißel die bearbeitete Fläche berührt. Die Schneidfläche kann über der Oberfläche so orientiert werden, dass Furchen in konkaven Regionen vermieden werden und keine Spuren der Meißelbearbeitung auf der Oberfläche entstehen. Zur Kollisionsvermeidung ist es notwendig, zu verhindern, dass der Meißel gegen die Oberfläche stößt. Daher sollte das Werkzeug bei konkaven Flächen von der Bearbeitungsoberfläche entlang des Normalvektors „weggerückt“ werden (Abbildung 116 illustriert die Werkzeugpositionen und die jeweiligen Orientierungen).

Sofern eine Furche in der Ausgangsposition ist, wie in der Abbildung 116a, wird die Werkzeuggeometrie virtuell in die Richtung $-n$ bewegt, bis das Werkzeug die Oberfläche berührt, wie in Abbildung 116b zu sehen. Anschließend werden die Position des Meißels und die Orientierung iterativ mit 1° Schritten verändert, um den richtigen Abstandswinkel sicherzustellen. Zusätzlich zur Überprüfung auf Furchen wird auf mögliche Kollisionen geprüft, um Zusammenstöße der Werkstückgeometrie und des Meißelschafts zu vermeiden. Zur Erstellung einer Position, die weder Furchen noch Kollisionen verursacht, wird die Form des Meißels verwendet.

Bei der Bahnplanung ist zwischen flachen Oberflächen und Freiformflächen zu unterscheiden. Während flache Oberflächen mit klassischen Bahnplanungen, wie Zick-Zack-Bahnen, gemeißelt werden können, ist das Meißeln von Freiformflächen schwierig. Nur geodätische Bahnplanungen können Überschneidungen

der bereits bearbeiteten Flächen vermeiden und minimieren ineffiziente Maschinennutzungen. Geodätische Bahnplanungen erstellen eine Reihe von gleich weit entfernten Oberflächenlinien. Abbildung 117 zeigt ein Beispiel für eine geodätische Bahnplanung. Außerdem sind Bahnplanungen zum Ansetzen und Zurückziehen sowie Bewegungen in der Luft abgebildet. Die Erstellung von geodätischen Bahnen erfordert eine Startkurve, die als Bezugsgröße verwendet wird, um daraus folgende, gleich weit entfernte Kurven zu erstellen, die sich wie Wellen im Wasser ausbreiten.

Die Erstellung eines Bahnplans erfolgt durch die Berechnung von mehreren Punkten auf der bearbeiteten Fläche, die anschließend die Grundlage vom lokalen Koordinatensystem bilden, um kollisionsfreie Werkzeugpositionen zu finden. Obwohl die CAM-Umgebung mit CAD-Daten des Werkstücks und der Stützstrukturen ausgestattet ist, wird in der Bahnplanung das Volumen dieser Stützstrukturen nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz vereinfacht und beschleunigt die Berechnung. Es wäre zu zeitintensiv, die veränderlichen Volumina der Stützstrukturen einzuberechnen. Aufgrund unvollständiger Informationen während der Bahnplanung ist die CAM-Simulation der Bahnplanung besonders wichtig. Zudem sind Annahmen über mögliche Hindernisse im Prozess sehr wahrscheinlich falsch, da die Bahnplanung das Zerfallen der Stützstrukturen nicht berücksichtigt. Die verbleibenden Stützen können daher mit dem Meißel, der Halterung oder dem Roboter kollidieren. Um Schäden am Werkstück und den Gerätschaften zu vermeiden, ist die entwickelte CAM-Simulation in der Lage, eine volumetrische NC-Prüfung durchzuführen, die die Ablösung der Stützen nachahmt. Die existierende ModuleWorks Simulation, basierend auf einem tri-dexel Datenmodell, wurde durch eine Funktion erweitert, welche unterschiedlich kleine Volumina unabhängig vom Kernvolumen erkennen kann. Die NC-Überprüfung verfügt zudem über eine zusätzliche Bedingung, um kleine Teile nach jeder Simulation zu eliminieren.

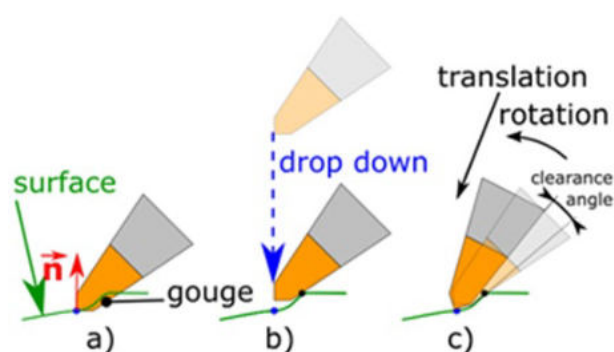


Abbildung 116: Position des Meißels

Zur experimentellen Validierung der entwickelten CAM-Strategie wurde ein COMAU NJ130 Roboter mit einem pneumatischen Meißel ausgestattet. Dabei wurde versucht, Lamellenstützstrukturen, Balkenstützstrukturen und Schachbrettstützstrukturen zu entfernen. Mit einem Meißel einer Breite von 6 mm, einem Seitenwinkel von 10° und bei einem Luftdruck bis zu 8 bar mit einem Oberflächenwinkel von 30° und einem Vorschub von 350 mm/min wurden die Entwicklungen experimentell validiert. Aufgrund der unzureichenden Länge des Meißels wurde die Oberfläche des Werkstücks in zwei Arbeitsdurchgängen bearbeitet, weil die Hälfte der Oberfläche von einer Seite bearbeitet werden musste, während die andere Hälfte von der gegenüberliegenden Seite bearbeitet werden musste. Die Bearbeitung von Lamellenstützstrukturen lief problemfrei ab, wohingegen das Meißeln der Balken vergleichsweise schlechter abschneidet. Die meisten Balken bogen, bevor diese durch den

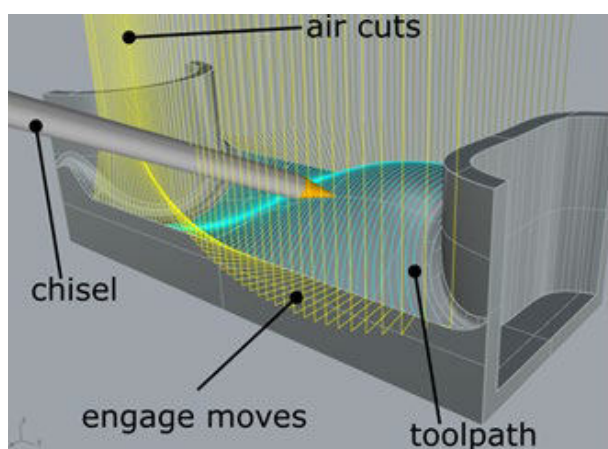


Abbildung 117: Geodätische Bahnplanung zur Bearbeitung von Freiformflächen

Prozess entfernt worden sind. Die Entfernung von Schachbrettstützstrukturen wurde kurz nach dem Beginn gestoppt. Der Meißel war nicht in der Lage auch nur einen einzigen Balken zu entfernen. Vermutlich liegt dies daran, dass die Strukturen zu stark sind und so den Schnittkräften entgegenwirken. Zusätzlich werden die Säulen in den vorderen Reihen durch die Säulen in den hinteren Reihen gestützt, sodass das Schneiden nicht möglich ist. Die Bearbeitungszeit für das Meißeln (Zeit für die Ausführung des NC-Codes) betrug rund 9 Minuten, was um etwa 20-30 % schneller ist als das manuelle Meißeln.

Trockeneisstrahlen, Teilergebnisse toolcraft AG

Die Technologie des Trockeneisstrahlen wird vorwiegend eingesetzt um groß- und kleinflächige Bereiche wie z. B. Spritzgussformen, Komponenten oder Maschinen zu reinigen. Es handelt sich um ein Druckluftstrahlverfahren, bei dem als Strahlmittel festes Kohlenstoffdioxid, sogenanntes Trockeneis, mit einer Temperatur von rund -79°C eingesetzt wird. Der tiefe Temperaturgradient lässt lokale Verschmutzungen auf einer Fläche versprühen. Prallen zusätzlich Eispartikel auf, führt dies zur Sublimierung des Kohlenstoffdioxids. Durch den Phasenübergang von fest zu gasförmig wird Energie durch Expansion frei, mit Impulswirkung auf die zu bearbeitende Fläche. Zudem werden die Eispartikel mit einer kinetischen Energie auf die Oberfläche geführt, die ebenfalls einen Kraftimpuls auslösen. Genau dieser Kraftimpuls bei niedrigen Temperaturen besitzt eine hohe Relevanz für das Entfernen von Stützkonturen von additiv gefertigten Bauteilen. Vor allem bei Konturen in innenliegenden Kanälen oder Hinterschneidungen, wo eine schlechte manuelle und automatisierte Zugänglichkeit werkzeuggeführt besteht, gewinnt das Verfahren an Relevanz. Aufgrund dessen wurde bei der toolcraft AG eine Demonstratorzelle wie in Abbildung 22 entwickelt und aufgebaut. Vorversuche haben gezeigt, dass mit der Wahl geeigneter Einstellungen von Prozessparameter wie Druck, Volumenstrom, Kornfraktion der Partikel; der Hardwarekomponenten wie

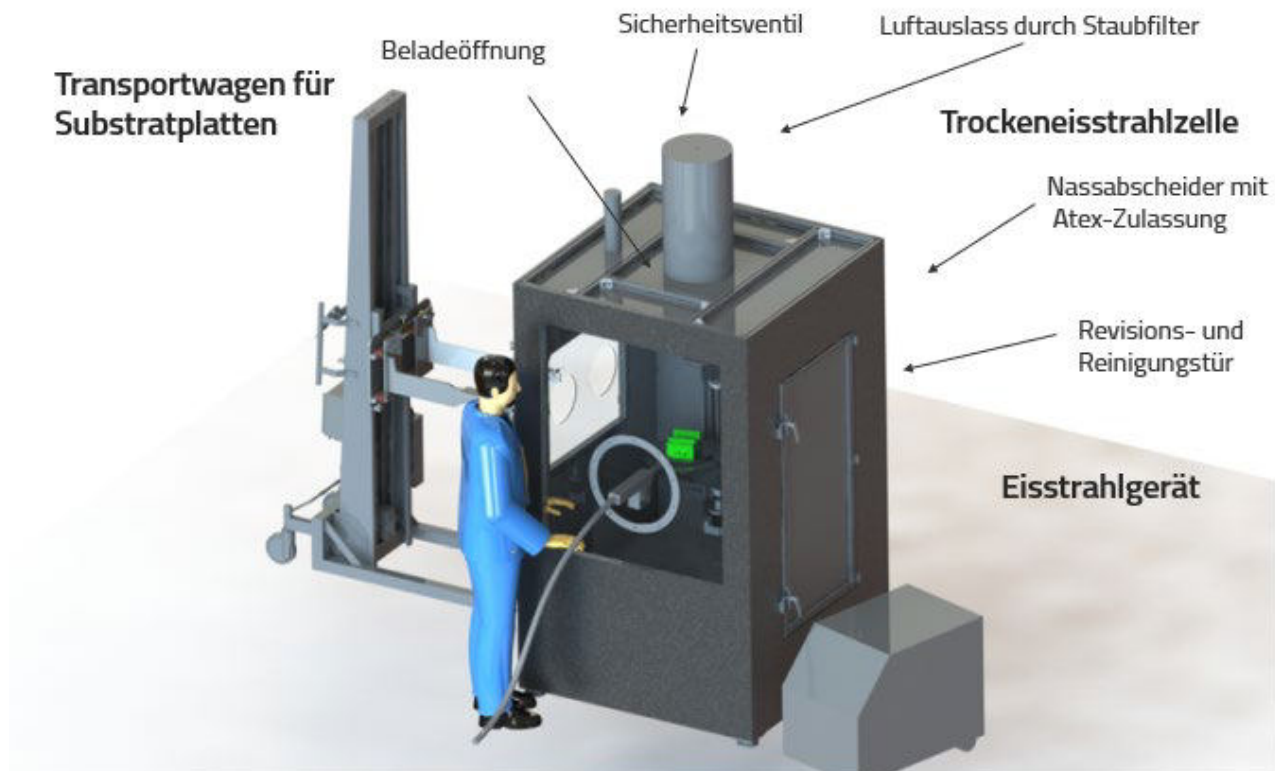


Abbildung 118: Eisstrahleinheit für das Entfernen von Stützkonturen

das Eisstrahlgerät, der Kompressor, Art und Geometrie der Düse, Spannstrategien und die Prozessführung der benetzten Austrittsfläche des Fluids der Düse zur Anbindung der Stützkontur an das Substrat, manuell oder robotergeführt, ein hohes Potential besteht, aber auch weiterhin ein enormer Entwicklungsbedarf.

Ein Fokus bei den Vorversuchen lag auf einer zentrischen Strahlführung, sodass der Kraftimpuls und die Expansion durch die Phasenumwandlung fest zu gasförmig lokal an die Sollbruchstelle der Stützkontur gerichtet werden.

12.2 Kosteneffiziente Referenzierungskonzepte

Lokale und globale Referenzierung

Die mechanische Nachbearbeitung muss an definierten Positionen auf dem Bauteil erfolgen. Zwar lässt sich dies mittels sehr genauer Aufspannungen erreichen, aber dabei wären die Abweichungen von Bauteil zu Bauteil zu tolerieren. Alternativ ist es durch Erfassung der Ist-Situation softwaretechnisch möglich, Lage-Korrekturen der Bearbeitungsprozesse bei deutlich reduziertem Vorrichtungsaufwand umzusetzen.

In IDEA erfolgt die Ausrichtung der Bauteile mit erweiterten BestFit-Methoden, die sich an die Anwendungsfälle anpassen lassen. Durch Berücksichtigung der von der Vorrichtung/Aufgabe vorgegebenen Bewegungseinschränkungen geht diese Ausrichtungsmethode deutlich über NC-integrierte Möglichkeiten hinaus.

Die maschinen-integrierte taktile Messung von Bauteilen zu Kontrollzwecken, oder zur Ermittlung von Lage/Orientierung ist eine bewährte und zuverlässige Methode. Die Verfahren liefern punktweise Informationen, deren Anzahl jedoch durch die relativ langen Messzeiten von ca. 2-3 s pro Messpunkt limitiert sind. Im Gegensatz dazu liefern optische Messverfahren sehr viele Informationen mit hoher Frequenz. Diese Messungen erfolgen jedoch meist nicht direkt in den Bearbeitungsmaschinen.

Es wird untersucht, ob die sehr detaillierten Informationen zu einem Bauteil – resultierend aus optischen Messungen an anderer Stelle der Prozesskette – durch einzelne Messungen in der Maschine für die Nachbearbeitung verfügbar gemacht/erschlossen werden können.

Die Abbildung 119 skizziert die Aufgabe „Entfernung der Finne und Erzeugung eines sanften Übergangs vom bearbeiteten in den unbearbeiteten Bereich“, die zur Überprüfung der erarbeiteten Ansätze dient.

Die optische Messung des Bauteils erfolgt vor der Nachbearbeitung an anderer Stelle der Prozesskette. Die Daten liegen in einem eigenen Koordinatensystem (K1) vor, welches sich sowohl vom CAD-Koordinatensystem als auch von der Situation in der Maschine unterscheiden kann.

Vor der Bearbeitung wird die Lage des Bauteils in der Maschine durch Messung einzelner Punkte erfasst (K2).

Die auch im Projekt untersuchte Methode ICP (iterative closest point) ermöglicht, taktile Messdaten und optische erfasste Messungen in Übereinstimmung zu bringen.

Basierend auf den taktilen Daten erfolgt die Bestimmung der Lage des Bauteils bezogen auf die CAD-Darstellung. Die daraus resultierende Transformation kann nachfolgend auf die Scan- und Messdaten angewendet werden so dass alle weiteren Berechnungen im Koordinatensystem des Bauteils erfolgen können.

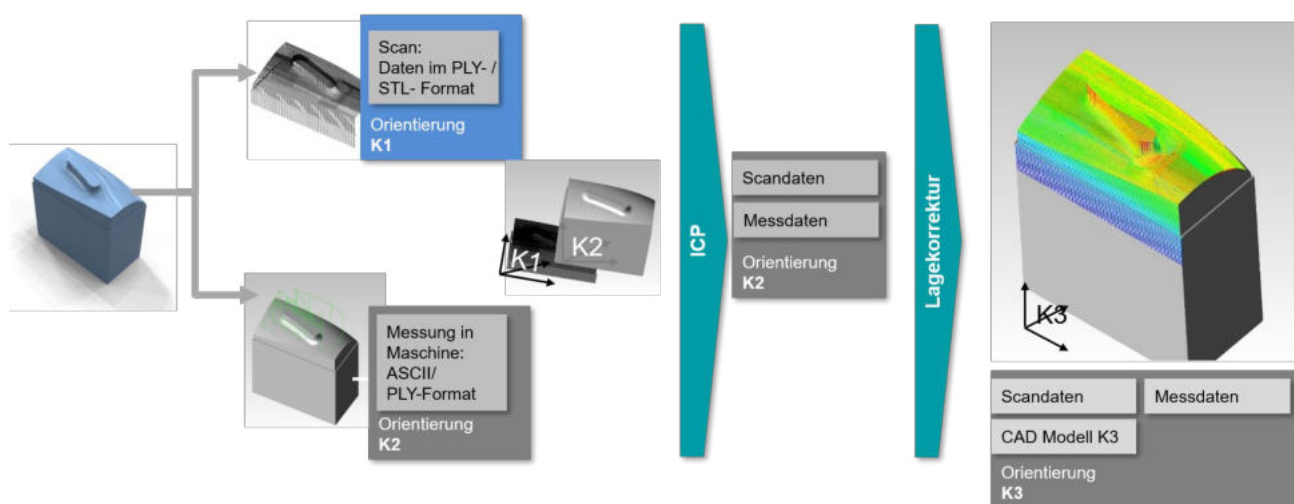


Abbildung 119: Prinzip der Referenzierung mittels ICP-Algorithmus

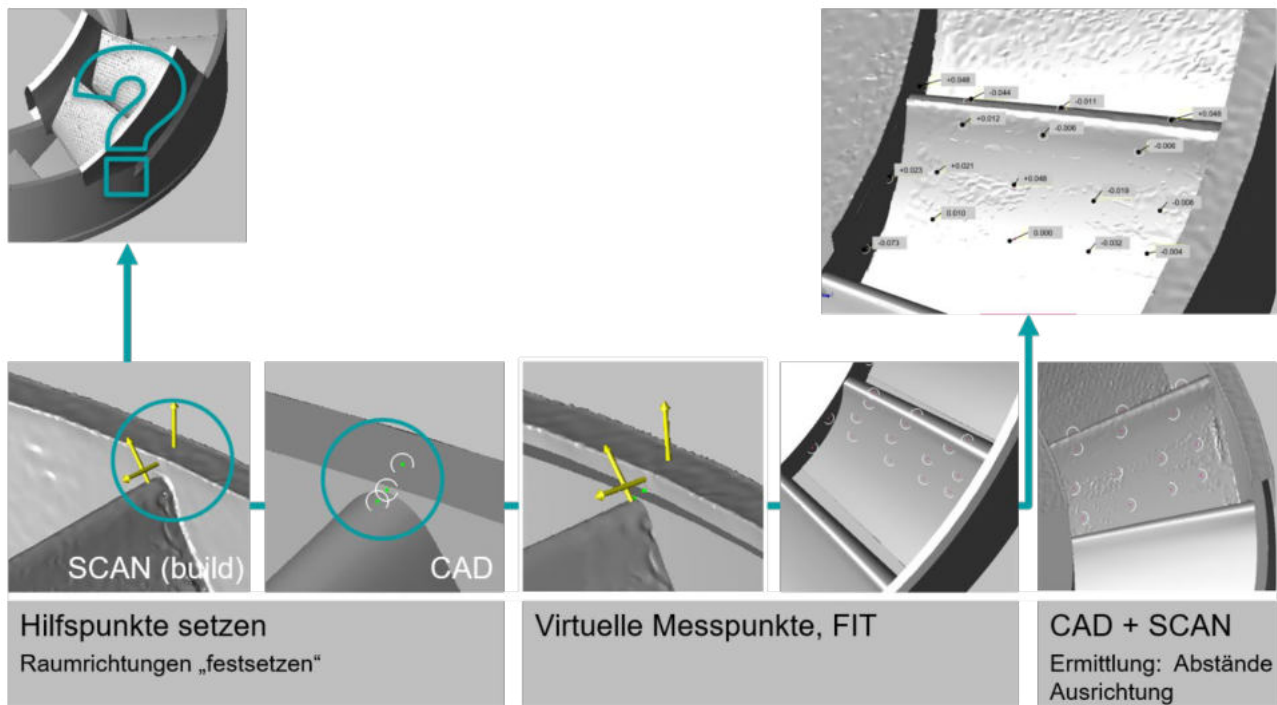


Abbildung 120 Prinzip der Referenzierung mit manuell gesetzten Hilfspunkten

Auf die gezeigte Weise lassen sich die sehr detaillierten optischen Messdaten innerhalb der Nachbearbeitung zur Verbesserung der Ergebnisse bei gleichzeitiger Reduktion der Messzeiten verwenden.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die ICP Methode bei weit auseinanderliegenden Datensätzen an Grenzen stößt. Für solche Fälle ist eine andere Strategie erarbeitet worden, die auf manuell gesetzten Hilfspunkte basiert.

Abbildung 120 zeigt wie bei dieser Referenzierungsmethode korrespondierende Punkte innerhalb des optisch erfassten Scan-Datensatzes und auf dem CAD-Modell gesetzt werden. Analog einer klassischen Ausrichtung sollten dabei alle Raumrichtungen abgedeckt sein. Die nach der Grobausrichtung verbliebenen Unterschiede lassen sich dann durch eine nachgelagerte Feinausrichtung nochmals reduzieren. Diese minimiert die Unterschiede zwischen Soll-Positionen – definiert auf dem CAD – und den entsprechenden Punkten des Scan Datensatzes. Die daraus resultierende Ausrichtung findet dann bei allen weiteren Prozessschritten Verwendung.

12.3 Optimierung der Postprozesskette

12.3.1 Adaptive NC-Bahnplanung

Der als *adaptive Bearbeitung* bezeichnete Fertigungs-Ansatz kann einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Postprozesskette liefern. Der Grundgedanke besteht darin, vorgegebene Bearbeitungsstrategien basierend auf aktuellen Messdaten an die reale Situation der einzelnen Bauteile anzupassen.

Basis der Projektarbeit ist hier die BCT Software OpenARMS.

Zunächst erfolgt der Import des Soll-Zustands des Bauteils (nominale Geometrie) und der darauf definierten NC-Bearbeitung (nominale Technologie). Die individuelle Bauteil-Geometrie fließt in Form von Messdaten/Scans in die Berechnungen ein. Wie Abbildung 121 darstellt, verbindet die Software eine geplante/(nominale) Bearbeitung mit der real vorgefundenen Geometrie des jeweiligen Bauteils.

Durch eine als *Adaption* bezeichnete Anpassung überträgt OpenARMS die nominalen NC-Programme auf die individuelle Bauteilform, ohne hierbei Änderungen an der Technologie vorzunehmen. Die Ausgabe besteht in einem geometrisch angepassten, adaptierten NC-Programm. Die Software lässt sich

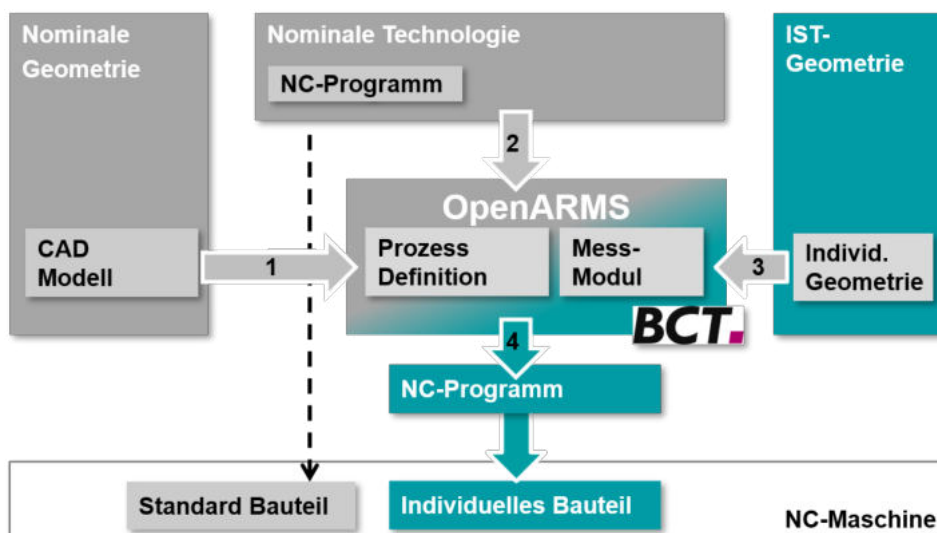


Abbildung 121: Prinzip: Adaptive Bearbeitung mit OpenARMS (by BCT)

mit der Steuerung der NC-Maschine verbinden und ermöglicht dadurch einen automatisierten Ablauf.

Für die Nachbearbeitung AM gefertigter Bauteile bedeutet dies, dass alle Bearbeitungen auf Basis der Soll-Geometrie definiert werden können. Anschließend wird festgelegt, ob eine Anpassung an Lage und Orientierung, oder eine Adaption der Programme an die Gegebenheiten des individuellen Bauteils erfolgen soll.

Letzteres ermöglicht z.B. die Entfernung nicht mehr benötigter Elemente ohne sichtbaren Absatz zwischen bearbeitetem und nicht bearbeitetem Bereich. Im obigen Fall muss eine Haltelasche entfernt werden, die zwar zur Bearbeitung des Bauteils hilfreich ist, im Endprodukt jedoch nicht enthalten sein soll.

Gemäß dem Konzept wird die Entfernung auf Basis des CAD-Modells geplant, NC-Programme werden erstellt.

Innerhalb der Maschine wird der Bereich um das Element erfasst. Dies kann durch Messung einer Serie von Punkten, oder wie oben beschrieben, über Import eines Scans erfolgen. Die Lage wird immer taktil gemessen.

Die Adaption interpretiert das vorgegebene NC-Programm, analysiert die geometrischen Bedingungen zwischen Fräser und Bauteil im nominalen Zustand und überträgt dies unter Berücksichtigung der Messwerte auf das reale Bauteil. Für jedes Bauteil entsteht dann ein eigenes NC-Programm für die automatische Bearbeitung.

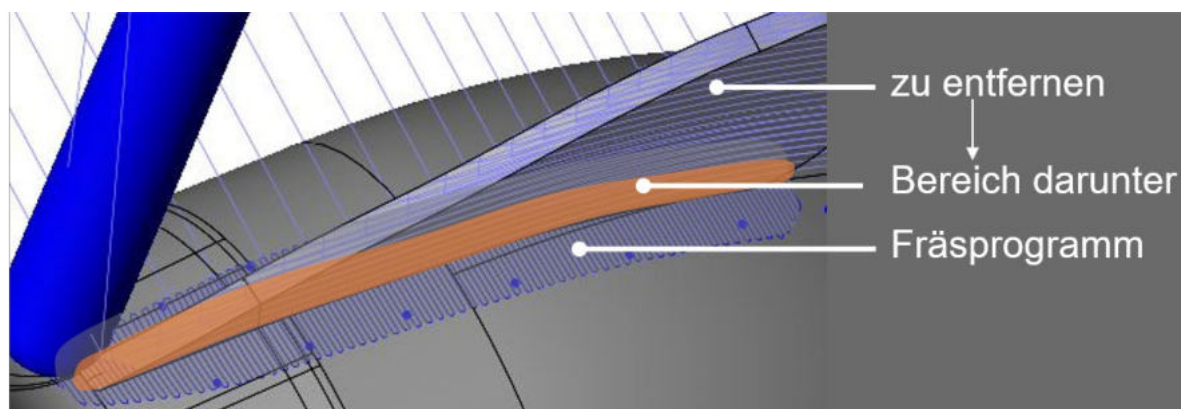


Abbildung 122: Entfernung nicht benötigter Elemente in der Bahnsimulation

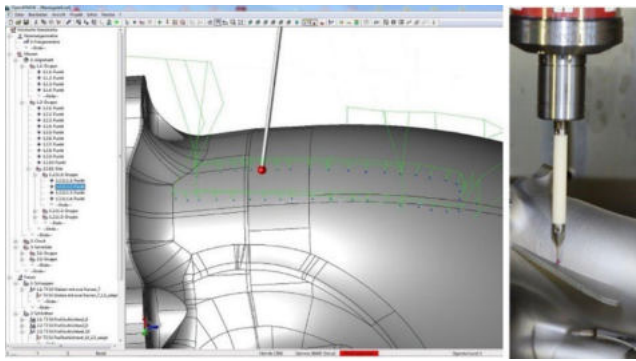


Abbildung 123: Messprogramm taktilen Messen, Messung in der Maschine

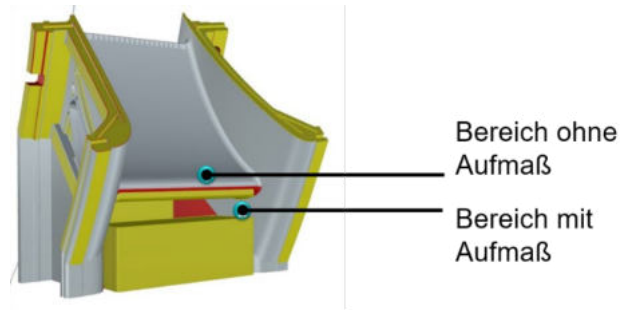


Abbildung 125: Demonstrationsbauteil im Projekt (Siemens Energy)

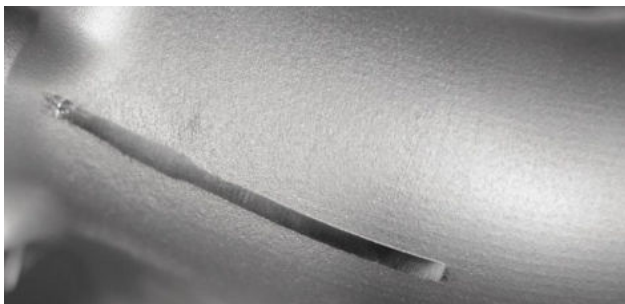


Abbildung 124: Entfernung mit Sicherheits-Aufmaß

Die entsprechenden Versuche wurden sowohl bei BCT als auch bei Toolcraft durchgeführt und zeigen, dass eine automatisierte Entfernung mit minimalem Aufmaß möglich ist.

Eine ähnliche Aufgabenstellung ergibt sich bei der Bearbeitung von Bereichen die zur Anbindungen von

Stützkonturen mit einem Sicherheitsaufmaß gedruckt werden. Dies soll Beschädigungen des Bauteils bei der manuellen Entfernung verhindern.

Eine entsprechende Anwendung im Projekt ist die Fertigbearbeitung eines Leitschaufelsegments (Nozzle Guide Vane – NGV). Die Bearbeitung umfasst den Bereich der Eintrittskante und die Bearbeitung der Ausrundungen (Übergang Seitenflächen in Schauffelfläche). Die Bearbeitung muss das nun nicht mehr benötigte Aufmaß reduzieren und den darunterliegenden Bereich der Schauffelfläche in den Bereich, der ohne Aufmaß gedruckt worden ist, Übergangslos einarbeiten (blenden). Etwaige leicht Formänderungen sind aufzunehmen und bei der Anpassung der NC Programme zu berücksichtigen.

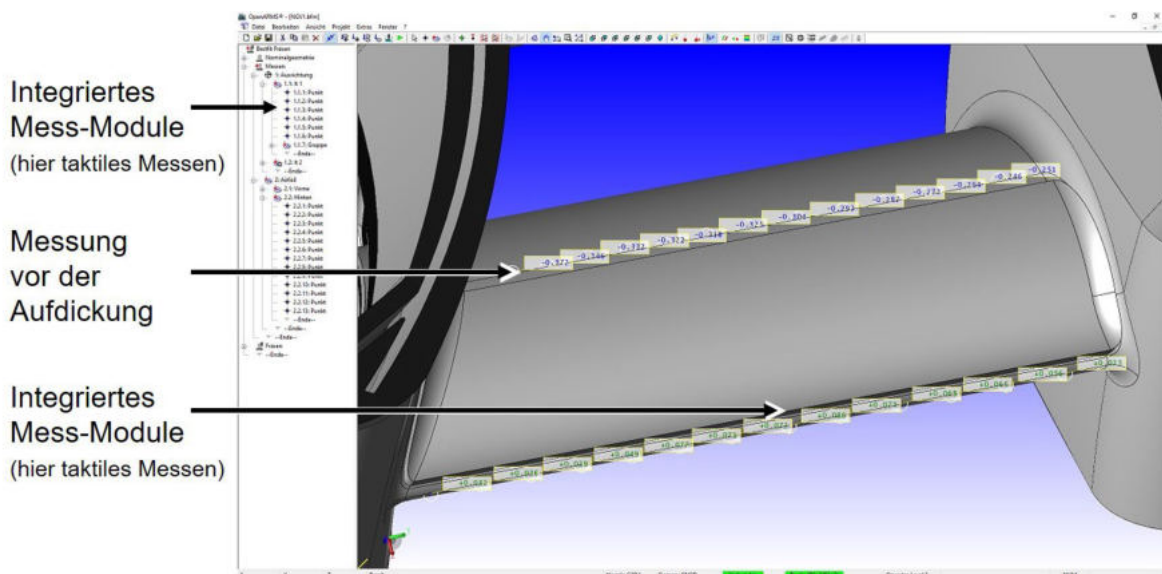


Abbildung 126: Messung in OpenARMS im Randbereich der Aufdickung

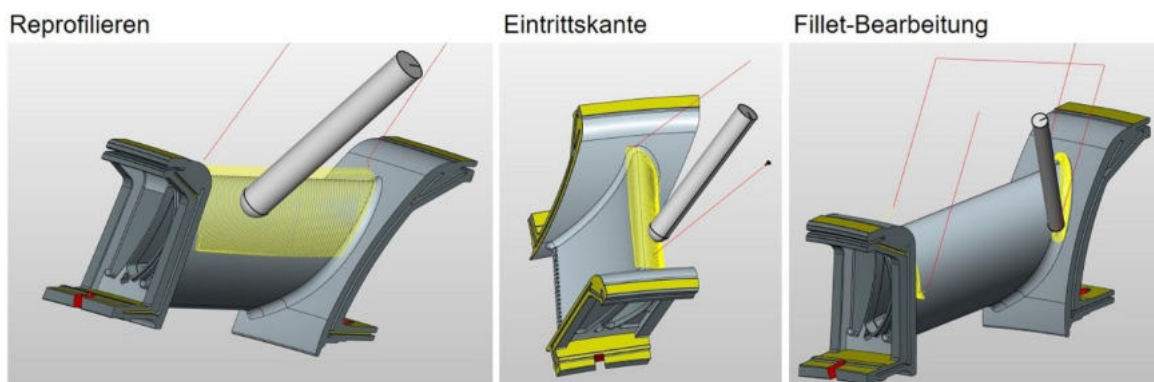


Abbildung 127: Bearbeitungsaufgabe mit Bahnsimulation

Auch in diesem Fall wird die aktuelle Lage innerhalb der NC-Maschine taktil erfasst. Zusätzlich stehen Daten aus einem externen optischen Scan zur Verfügung. Damit sind Informationen über Lage und geometrische Ausprägung des Segments für eine Anpassung der Bearbeitungen verfügbar.

Nach der Bestimmung von Lage und Orientierung der NGV im Arbeitsraum der Maschine erfolgt die Messung des jeweiligen Bauteils im Rand-Bereich der Aufdickung, nicht aber auf der Aufdickung selbst. Die Messpunkte umschließen die Aufdickung, mit dem Ziel, möglichst viele Informationen über die Gestalt des Bauteils in diesem Bereich zu bekommen.

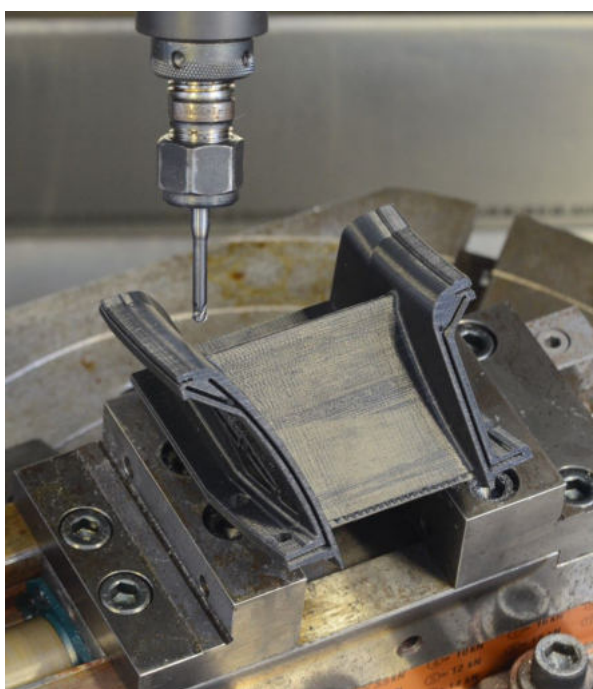


Abbildung 128: NGV Bearbeitung bei BCT

Durch die entwickelte Softwarelösung kann eine gleichmäßige Verteilung etwaiger Aufmaße oder Formabweichungen im Bereich der Aufdickung erreicht werden. Die OpenARMS-idea Software erstellt mit den gemessenen Werten eine strukturierte Anordnung von Aufmaß-Informationen, auf die sich die spätere Anpassung der Fräsprogramme bezieht.

Die Bearbeitung eines ersten Kunststoff-Modells auf einer Hermle C30 Maschine ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Anschließend erfolgten Tests an dem Siemens Energy Demonstrator.

12.3.2 Finishing Verfahren

Die Nach- und Fertigbearbeitung von dünnwandigen AM-Bauteilen stellt besonders hohe Anforderungen an die auszuwählenden Verfahren.

Es ist obligatorisch, dass möglichst wenige Bauteilschwingungen induziert werden und nur geringe Bearbeitungskräfte auftreten.

Um eine Auswahl an geeigneten Prozessen zu erhalten, wurde das Fraunhofer IPT mit einer Analyse beauftragt. Ziel war es, Prozesse aufzulisten, die eine hohe Technologiereife aufweisen und einfach in bestehende Werkzeugmaschinen zu integrieren sind. Die zusammengefassten Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 7 abgebildet. Zur Bewertung der Prozesse wurde der „Nutzwert“ eingeführt. In diesen Wert fließen diverse Kennzahlen aus den Kategorien „Qualität“, „Integrierbarkeit“ und „Automatisierbarkeit“ ein.

Tabelle 7: Fertigungstechnologien zur Nacharbeit
(Quelle: Fraunhofer IPT)

Technologien	Technologiereife [0-1]	Nutzwert [0-100%]	Integrierbarkeit in WZM [0-1]
Maschinenintegriertes Polieren	0,75	82%	1
Squishing	0,5	80%	1
Koordinatenschleifen	1	77%	1
Laserpolieren	0,5	76%	1
Oberflächenhämmern	0,75	76%	1
Fräsen	1	75%	1
Laserablation	0,75	74%	1
Drehen	1	71%	1

Da der Prozess „Koordinatenschleifen“ die höchste Kombination aus Technologiereife, Nutzwert und Integrierbarkeit aufweist, wurde das Verfahren zur weiteren Untersuchung ausgewählt.

Zur näheren Evaluierung dieses Verfahrens zur Fertigbearbeitung von AM-Bauteilen wurde eine Versuchsreihe an einem additiv gebauten „Vane-Cluster“ Bauteil geplant (siehe Abbildung 129).

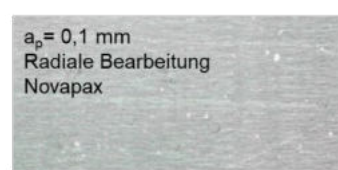
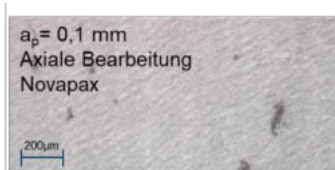
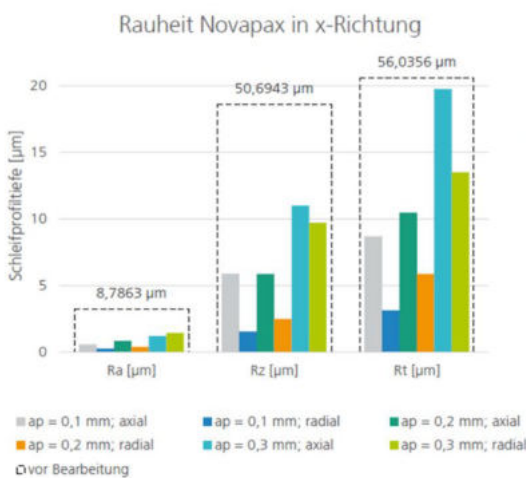
Die Versuchsdurchführung sollte nun eine grundlegende Aussage über die Machbarkeit einer Oberflä-



Abbildung 129: Versuchsbauteil „Vane-Cluster“ (Foto: Fraunhofer IPT)

chenfertigbearbeitung von additiv gebauten Werkstücken mit dem Prozess Koordinatenschleifen ermöglichen. Dazu wurden Analogieversuche an einer Flachprobe durchgeführt. Zum Einsatz kamen galvanisch gebundene Schleifstifte mit Diamantkorn sowie gummigebundene Schleifstifte mit Korund. Neben der Werkzeugart wurden die Bearbeitungsparameter (Bahnabstand, Drehzahl, Werkzeugorientierung, Anpresskraft und Vorschub) variiert, um ein eine hohe Oberflächenbeschaffenheit nach der Bearbeitung zu erreichen.

Jede Flachprobe wurde mit drei verschiedenen Bahnabständen bearbeitet. Anschließend wurden die Oberflächenrauheit sowie die mittleren Höhen bestimmt. Die besten Ergebnisse stellten sich bei der Verwendung von Korund-Schleifstiften ein, die mit einem Bahnabstand von $a_p = 0,1 \text{ mm}$ eingesetzt wurden. Die Bearbeitungsrichtung war radial. Wie in



$Ra_{best} = 0,2711 \text{ µm}$
 $Rz_{best} = 1,5546 \text{ µm}$
 $Rt_{best} = 3,1395 \text{ µm}$

Abbildung 130: Auswertung der Ergebnisse mit Korund-Schleifstiften (Ergebnisse vom Fraunhofer IPT)

Abbildung 130 dargestellt, ließen sich Ra-Werte von $0,27 \mu\text{m}$ erreichen.

Ausgehend von den Erkenntnissen aus den Versuchen an den Flachproben, erfolgte eine elementare Prozessauslegung an dem in Abbildung 129 gezeigtem Vane-Cluster. Dazu wurde das Bauteil in einer, von der Firma Innoclamp GmbH entworfenen, Spannvorrichtung befestigt. Durch dieses Spannsystem sollte eine möglichst flexible Bearbeitung ermöglicht werden. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 131 dargestellt.

Auf Basis der 3D-Modelle der Vorrichtung, der Werkzeuge und des Bauteils erfolgte eine CAM-Programmierung inklusive einer Kollisionskontrolle.

Um eine kollisionsfreie Bearbeitung zu ermöglichen wurden eine sogenannte „Zig-Zag“-Strategie mit reduzierten Achsbewegungen gewählt. Laut Simulation ist es möglich, Saug- und Druckseite in einer Aufspannung zu bearbeiten. In der Versuchsreihe wurde nur die Saugseite der Schaufeln bearbeitet.

Die Parameter und Werkzeuge aus den Flachprobenversuchen wurden an den einzelnen Schaufeln der Vane-Cluster getestet. Die Oberflächen der bearbeiteten Schaufeln wurden anschließend gemessen.

Die besten Ergebnisse wurden weiterhin mit Korund-Schleifstiften erreicht. Um die Bearbeitungszeit zu senken, wurde der Bahnabstand jedoch auf $a_p = 0,2 \text{ mm}$ erhöht.

Zur weiteren Optimierung des Prozesses wurde eine zweistufige Bearbeitungsstrategie erprobt. Diese beruhte auf einer Vorbearbeitung mittels Diamantkorn-Werkzeugen und einer Nacharbeit mittels Korund-Werkzeugen. Mittels dieser Kombination ließen sich die besten Ergebnisse erzielen.

Fazit

Die maschinenintegrierte Feinbearbeitung mit Schleifstiften ist grundlegend durchführbar. Dabei lieferte ein zweistufiger Prozess die besten Ergebnisse. Es stellt sich heraus, dass Werkzeuge mit galvanisch

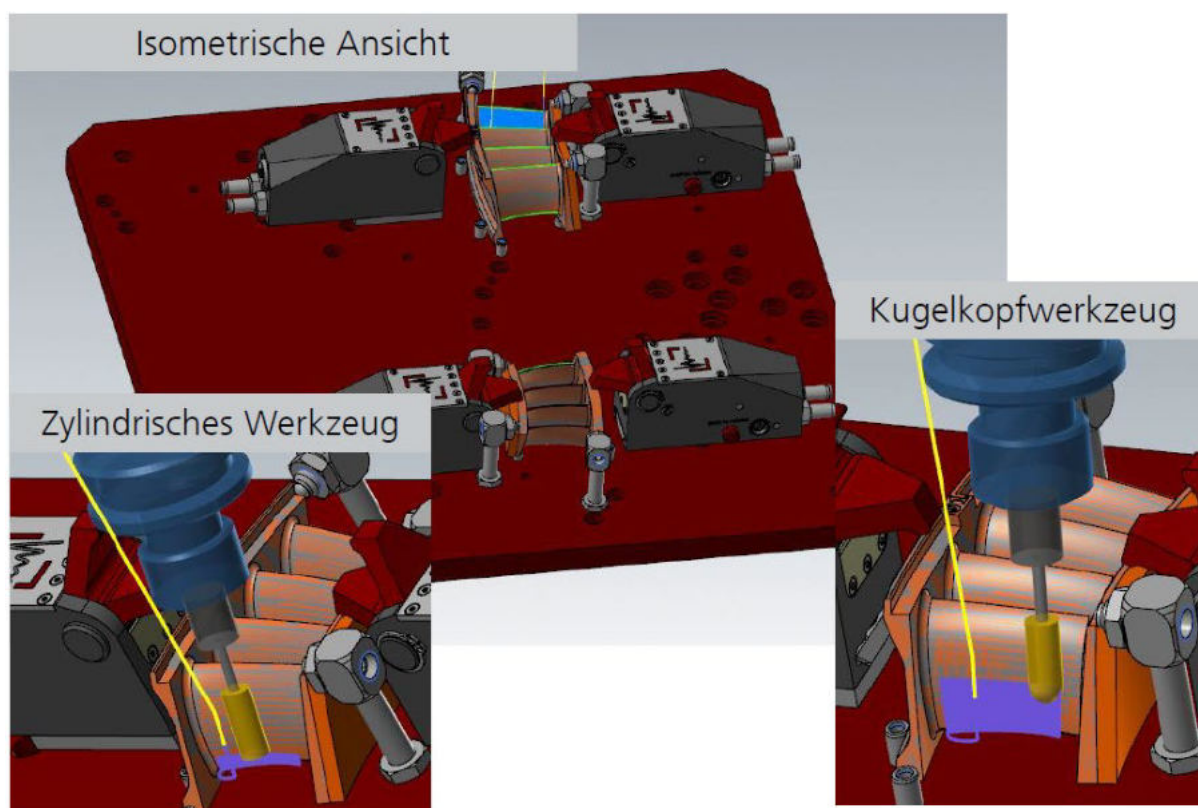


Abbildung 131: Versuchsaufbau zur Bearbeitung der Vane-Cluster (Spannsystem: Innoclamp GmbH / Abbildungen: Fraunhofer IPT)

gebundenem Diamantkorn hohe Standzeiten aufweisen. Gummigebundene Korund-Werkzeuge zeichnen sich durch hohe Oberflächengüten und geringe Zeitspanvolumina aus und sollten daher für den letzten Bearbeitungsschritt genutzt werden.

12.4 Messen auf der Werkzeugmaschine

Um ein vollumfängliches Verständnis für die Einflussfaktoren der einzelnen Prozessschritte in der Nachbearbeitungskette zu schaffen, wurden Demonstratorbauteile zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Fertigungs-Prozesskette gemessen. Durch optische Messungen der Geometrie der Bauteile auf der Bauplattform direkt nach dem Drucken, der getrennten Bauteile und der Bauteile nach der Entfernung der Stützstrukturen, konnten zu erwartende Verformungen aufgrund von im Druckprozess eingebrachten Eigenspannung während der folgenden Prozessschritte untersucht werden. Diese Informationen können für die weitere Produktentwicklung genutzt werden, um das benötigte Aufmaß auf die Bauteilgeometrie optimal einzustellen und dadurch die Fertigung eines toleranzkonformen Produkts mit minimalem Aufwand und Materialverbrauch durch die notwendigen Nachbearbeitungsschritte zu ermöglichen. Eine Möglichkeit den Aufwand durch nachgelagerte Fertigungsschritte und die Qualifizierung der Bauteile zu reduzieren, stellt eine kombinierte Durchführung dieser Arbeitsschritte dar. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen zur optischen Messung von auf einer Werkzeugmaschine eingespannten Bauteilen mittels eines Streifenlichtscanners durchgeführt (Abbildung 133). Diese Kombination kann in einer laufenden Produktion mehrere Vorteile bieten. Durch die Verwendung der zusätzlichen Rotationsachse des Dreh-Schwenktisches in der Werkzeugmaschine gegenüber dem Drehtisch des Streifenlichtscanners

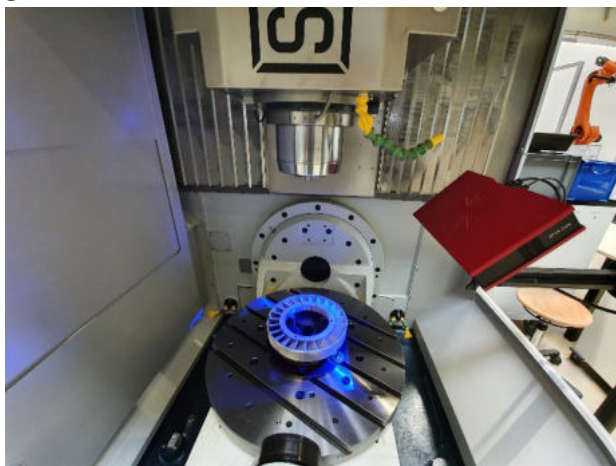


Abbildung 133: Optische Messung in der Einspannung der Werkzeugmaschine

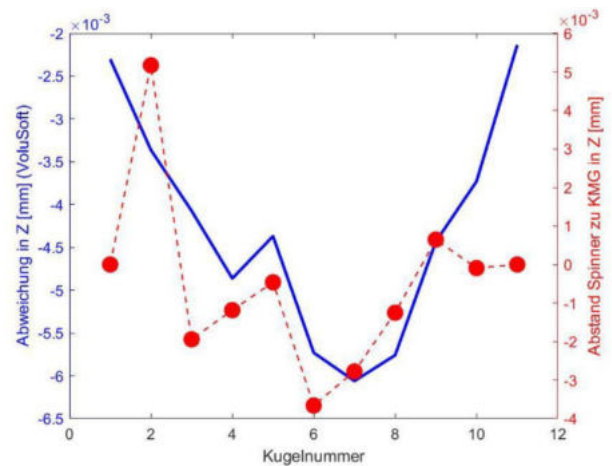


Abbildung 132: Vergleich der Simulation von Positionseffern einer Werkzeugmaschine (blau) mit Messwerten einer taktilen Antastung (rot)

konnten die manuellen Schritte zur Einstellung der Streifenlichtscanner-Blickwinkeln reduziert werden. Weiterhin ermöglicht die kombinierte Messung eine direkte Überführung der Messergebnisse des optischen Scans in das Koordinatensystem der Werkzeugmaschine, dies reduziert den Aufwand und mögliche Unsicherheiten, welche bei der Referenzierung der Messergebnisse nach einem Umspannen des Bauteils in ein neues Referenzkoordinatensystem entstehen. Eine weitere Möglichkeit stellt das taktile Messen von Bauteilen mithilfe eines Tasters in der Werkzeugaufnahme der Werkzeugmaschine selbst dar. Während Werkzeugmaschinen eine deutlich geringere Positioniergenauigkeit als Koordinatenmessgeräte aufweisen, kann durch eine Kalibrierung und anschließende steuerungsseitige Kompensation der zuvor erhobenen geometrischen Fehler die Positionierungsunsicherheit bei der Antastung reduziert werden. Durch die Kompensation dieser volumetrischen Fehler sowie Überwachung der thermischen Fehlerbeiträge werden Messungen auf der Werkzeugmaschine ermöglicht, welche die Qualifizierung von qualitätsrelevanten Merkmalen an Bauteilgeometrien direkt im Anschluss an den Bearbeitungsprozess erlauben. Um dieses Konzept zu erproben, wurden taktile Messungen auf einer Spinner™ U630 Werkzeugmaschine qualifiziert. Für diese Untersuchung wurde ein Kugelbalken, bestehend aus 10 keramischen Hochpräzisionskugeln, angebracht auf einem Profil aus Faserver-

bundkunststoff verwendet. Die Ergebnisse der Messung wurden mit den Ergebnissen einer Simulation der Positionsfehler verglichen (Abbildung 132).

Zur Validierung der Messwerte wurden des Weiteren Referenzmessungen mit einem Koordinatenmessgerät durchgeführt. Während noch Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Messwerten auftreten, konnte gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse den Fehler in der realen Werkzeugmaschine in erster Näherung abbilden können.

13 Digitale Prozesskette

In diesem Kapitel werden Ergebnisse vorgestellt, die wichtige Beiträge für eine durchgängige digitale AM-Prozesskette liefern. Dies umfasst unter anderem den MES-Einsatz im Kontext der AM-Fertigung bei toolcraft, die digitale Fabriksimulation mittels Tecnomatix Plant Simulation sowie ein Konzept zur prozesskettenübergreifenden Datenintegration.

13.1 MES-Einsatz in der Additiven Fertigung

Zur Digitalisierung des AM-Shopfloors bei der toolcraft AG galt es, ein Manufacturing Execution System (MES) dort erstmalig einzuführen. In ersten Workshops wurden zusammen mit Siemens die Rahmenbedingungen evaluiert. Nachdem sichergestellt wurde, dass die notwendige IT-Infrastruktur vorhanden ist, wurde das MES-System „Opcenter Execution Discrete“ installiert. Anschließend war es erforderlich das System entsprechend zu konfigurieren und an die Gegebenheiten anzupassen. Hierfür wurden Informationen über die Prozesse in der additiven Fertigung gesammelt und ein Additive-Manufacturing-Standardprozess definiert.

Dieser Standardprozess setzt sich aus mehreren Teilprozessen zusammen und umfasst alle Schritte, die im Bereich AM durchgeführt werden. Dazu gehören unter anderem die Maschinenvorbereitung bzw. der Rüstvorgang, der Bauprozess an sich, der Bauzylinderausbau, das Entpulvern und Ermitteln des Restpulvers und die Endreinigung der Anlage. Die einzelnen Schritte wurden durch genaue Arbeitsanweisungen präzisiert. Auf Basis der gesammelten Informationen wurde der Rüstvorgang als erster Anwendungsfall detailliert konfiguriert, ein Beispielnutzer erstellt und die Umsetzung des MES-Systems in der Fabrikhalle geplant. Der Rüstvorgang wurde als Schritt innerhalb des Standardprozesses „Additive Fertigung“ abgebildet und enthält Arbeitsanweisungen für den Zylinderaus- und Einbau sowie für die Maschineneinrichtung und -reinigung. Es erfolgten mehrere Testläufe des MES-Systems auf der VM (Virtuellen Maschine) bezüglich des Rüstvorgangs

und eine entsprechende Anpassung des Systems an die Ergebnisse.

Die ausführliche Konfiguration und Erprobung des MES-Systems findet vorerst an einer TRUMPF TP3000 AM-Maschine statt.

Anschließend wurden weitere Informationen über diese Maschine eingeholt, beispielsweise über entsprechende Arbeitsanweisungen und die Produktionslandschaft. Basierend darauf wurde die komplette physische Produktionslandschaft digital im MES-System abgebildet. Alle notwendigen Arbeitsanweisungen wurden vollständig definiert. Somit können Arbeitsanweisungen von Mitarbeitern in der Fertigung über das MES-System während der Laufzeit aufgerufen und abgearbeitet werden. Für eine bessere Visualisierung wurden die Arbeitsanweisungen in Textform und Bildern beschrieben. Zukünftig sollen auch Animationen oder 3D-Modelle für eine weitere Verbesserung der Visualisierung und damit Arbeitserleichterung für die Mitarbeiter implementiert werden können. Auf diese Weise werden Prozessschritte standardisiert ausgeführt, kontrolliert und Fehler vermieden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Arbeitsanweisungen in das MES-System zu hinterlegen.

Nachdem die Standardprozesse und Arbeitsanweisungen definiert und eingestellt wurden, war das Ziel, alle weiteren relevanten Entitäten zu konfigurieren. Dazu gehören unter anderem das Pulvermanagement, das Substratplattenhandling und das Auftragsmanagement.

Beim Pulvermanagement ist es wichtig, dass der Pulverzyklus nachverfolgt und das Gewicht der einzelnen Pulvermengen möglichst exakt bestimmt werden kann. Diese Daten werden benötigt, um das verbrauchte Pulver beziehungsweise das Restpulver zu

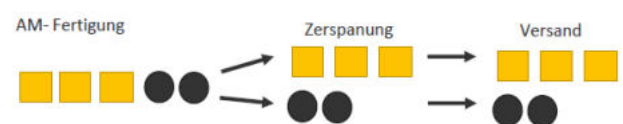


Abbildung 134: Darstellung von mehreren Aufträgen/Bauteilen (gelb und schwarz) während eines Druckvorgangs

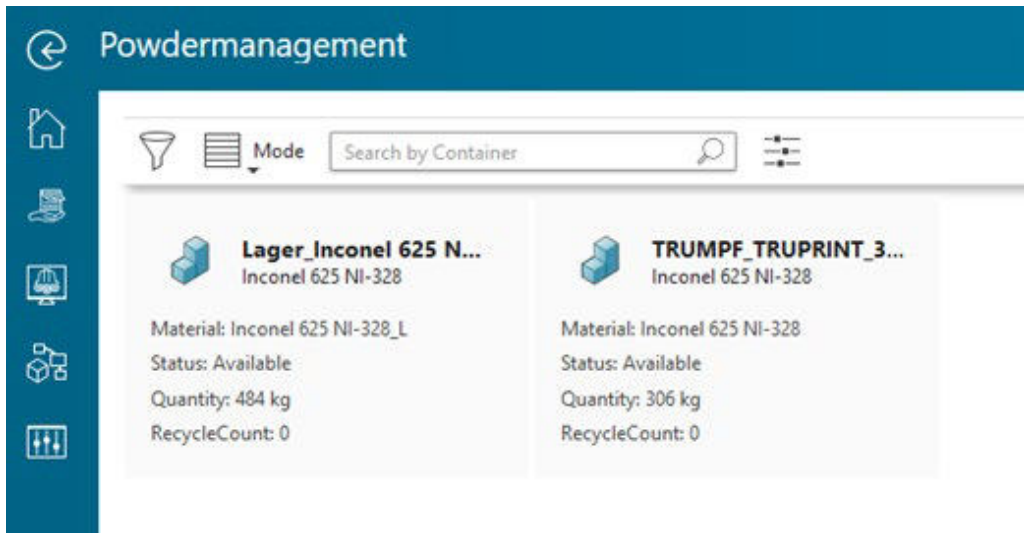


Abbildung 135: Darstellung der Übersichtsseite des Pulvermanagements im MES

ermitteln. Dafür bietet das MES System bereits ein eigenes Statusmodell für Pulver an, mit dessen Hilfe der Pulverprozess abgebildet werden kann. Außerdem soll die Häufigkeit der Wiegepunkte des Pulvers möglichst gering sein. Auch Sonderfälle beim Pulverhandling sollen beachtet und das Pulvermanagement zur Laufzeit integriert werden können.

Bei der ersten Konfiguration der Prozesse gab es noch Abweichungen zwischen den Anforderungen von toolcraft und den Konfigurationsmöglichkeiten des MES. Um Customizing-Aufwände zu vermeiden, wurden diese Anforderungen aufgenommen und so abgestimmt, dass nach einem Softwareupdate eine bessere Konfiguration im MES System möglich war. Besonders die Funktionalitäten für die Integration des Pulverprozesses und die Möglichkeit, mehrere Kundenaufträge zusammen in einem Druckvorgang

zu produzieren (vgl. Abbildung 134), wurden deutlich erweitert.

Ebenfalls wurde die Systemlandschaft bei der toolcraft AG aufgenommen und der Datenaustausch mit den Schnittstellen aufgezeigt, wie in Abbildung 137 dargestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt war, herauszufinden, welche Schnittstellen das MES-System mit anderer Software respektive anderen Systemen hat und wie diese gestaltet werden können. Dazu gehörte unter anderem das Identifizieren der Arbeitsabläufe im ERP-System, welche Daten übergeben werden müssen, wie der Datenrücklauf vom MES zum ERP ist und wie die Schnittstelle konfiguriert werden sollte. Die Schnittstelle kann web- oder filebasiert ausgelegt

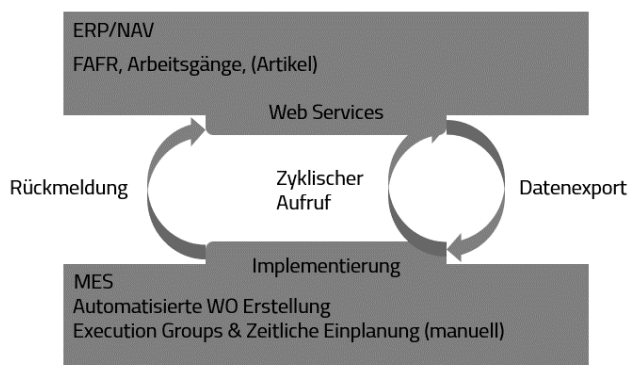


Abbildung 136: Datenaustausch zwischen ERP und MES über einen Web Service

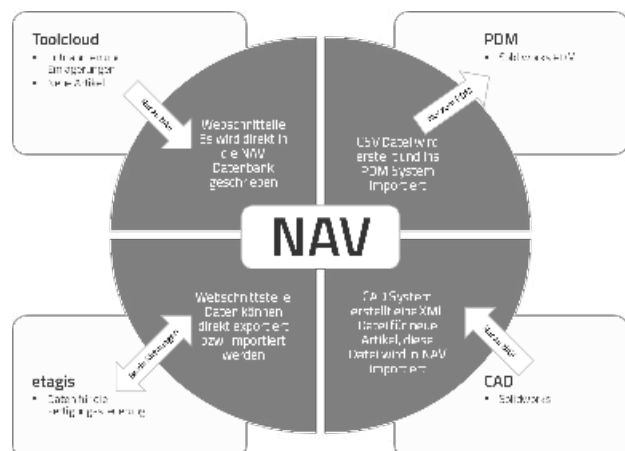


Abbildung 137: Systemlandschaft mit Datenaustausch und Schnittstellen zum ERP-System (NAV)

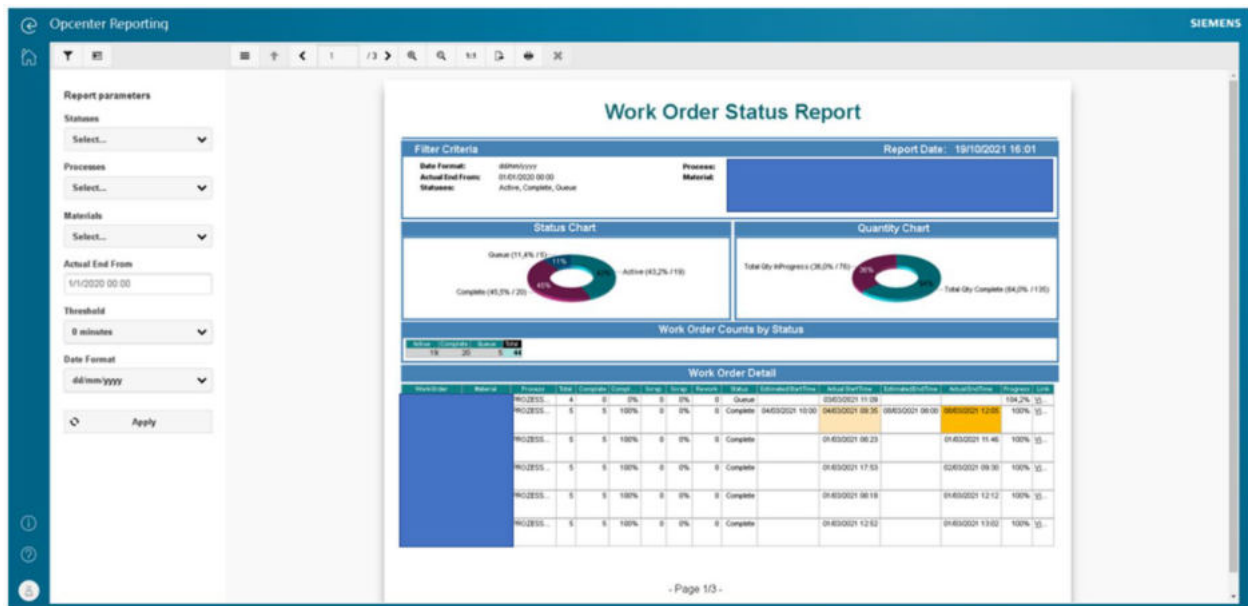


Abbildung 138: Ansicht des Reporting Tools innerhalb des MES

werden. Abbildung 136 stellt die Variante der web-basierten Schnittstelle dar.

Mit dem Ziel das Pulvermanagement bei der Firma toolcraft optimal abzubilden, wurde in Zusammenarbeit mit Siemens eine zusätzliche Lösung für das MES entwickelt. Auf Grundlage vorhandener Funktionen bezüglich des Pulvermanagements wurde eine weitere Seite implementiert (siehe Abbildung 135), welche die wichtigsten Funktionen (Mischen und Recycling des Pulvers) in zentralisierter und übersichtlicher Form zur Verfügung stellt. Dadurch wird zum einen die Nutzererfahrung und Handhabung der Funktionen verbessert und zum anderen lässt sich anhand der zur Laufzeit integrierten Wiegestationen der tatsächliche Pulververbrauch eines Baujobs errechnen. Auf Grundlage des genauen Verbrauchs wird dem Maschinenführer eine Empfehlung für die potenziell nachfüllbare Neupulvermenge gegeben. Diese basiert zusätzlich auf der vorher definierten maximalen Füllmenge eines Containers bzw. der Vorratszylinder einer Anlage.

Eine weitere Funktion, um die Fertigungsabläufe bei toolcraft mit dem MES abbilden zu können, sind die so genannten *Execution Groups*. Diese dienen dem Zweck, eine Gruppierung unterschiedlicher Fertigungsaufträge (= *Work Order*) auf einer gleichzeitig genutzten Ressource darzustellen. In der additiven

Fertigung kann so abgebildet werden, dass mehrere Bauteile unterschiedlicher Fertigungsaufträge in einem Baujob produziert werden. Nach dem eigentlichen Bauprozess können die Fertigungsaufträge und Bauteile wieder separat betrachtet und weiterverarbeitet werden.

Um manuell erfasste bzw. automatisch generierte Daten sinnvoll zu verarbeiten, wurde ein zusätzliches Werkzeug zur Berichtserstellung eingesetzt. Diese Softwarekomponente des Opcenters bietet die Möglichkeit, verschiedene Datenquellen wie einen Microsoft SQL-Server einzubinden, die dort vorhandenen Tabellen weiterzuverwenden und individuelle Berichte zu definieren. Um einen internen Anwendungsfall abzubilden, wurde hierfür eine Verbindung zur MES Datenbank hergestellt und entsprechend den inhaltlichen Anforderungen ein spezifischer SQL-View erstellt. Auf Grundlage dieser voraggregierten Daten wurde ein Bericht (Reporting Tool) erstellt, wie beispielsweise in Abbildung 138 dargestellt, der abhängig vom ausgewählten Fertigungsauftrag, alle für das Dokument wichtigen Informationen konsolidiert. Zusätzlich lassen sich die Berichte in die gängigen Dateiformate exportieren.

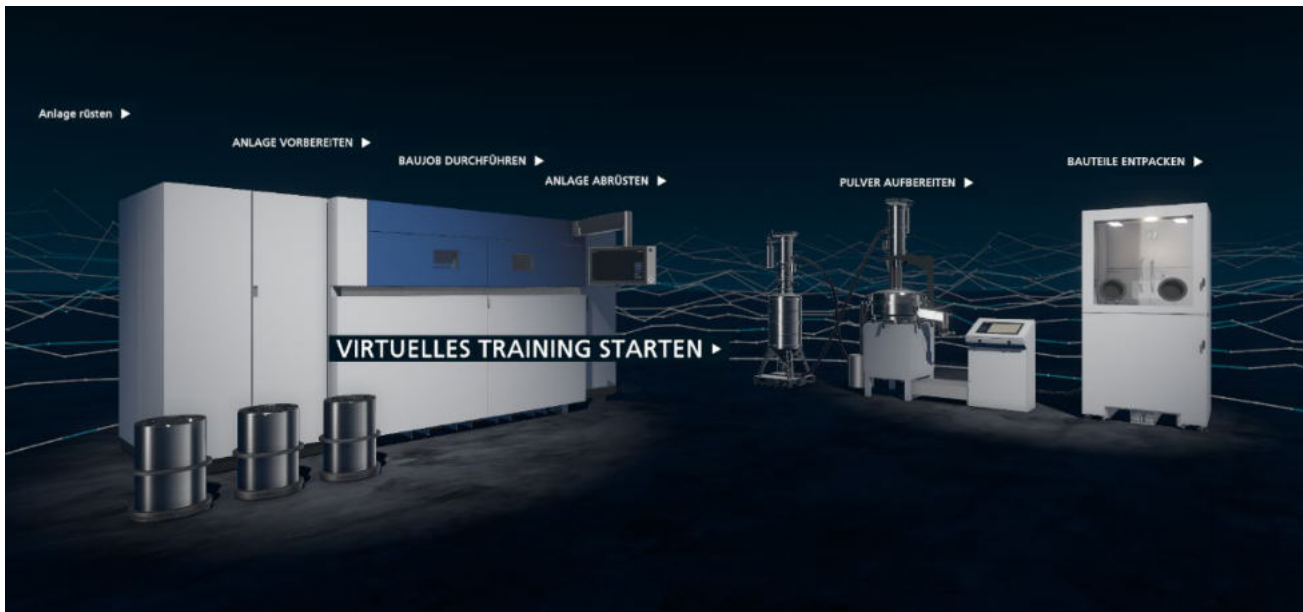


Abbildung 139: Ausschnitt der digitalisierten Anlagen einer AM-Prozesskette

13.2 Virtuelle Trainings

Die Erschaffung einer digitalen AM-Prozesskette für digitale Firmenrundgänge, Trainings (Desktop, Virtual Reality - VR) und als Verknüpfung im MES-System, die für digitale Arbeitsanweisungen für den Operator an der Anlage nützlich sein könnte, steht in diesem Abschnitt im Fokus. Abbildung 139 zeigt einen kleinen Ausschnitt der virtuell abgebildeten Anlagen einer AM-Prozesskette.

3D Modellierung der Anlagen

Um die vollständige Produktionskette der Additiven Fertigung abbilden zu können, wurden die Anlagen wie AM-Maschine, Entpackstation und Entpulverungsstation, mobile Saugereinheit, Siebstationen, Wärmeöfen, Draht- und Sägemaschinen, Fräs- und Drehzentrum und Automatisierung für die Qualitätssicherung mittels optischer und taktiler Messeinheiten, teilweise mit den Herstellern und dem Unterauftragnehmer modelliert. Fehlende Baugruppen in den vorhandenen Modellen der Anlagen wurden teilweise durch toolcraft skizziert, modelliert und für eine Implementierung in das CAD-Modell implementiert. Daraufhin wurden die Anlagen vollständig nach den Bedarfen modelliert und im Front End der Plattform VisHow-App implementiert. Gleichzeitig wurde mit der Konzeptionierung und Erstellung der User Trainings

begonnen. Somit konnten die fehlenden Elemente der Anlagen zur Modellierung identifiziert werden. In Abbildung 140 ist ein Modell einer Entpackstation dargestellt.

Erstellen von Trainings

Die Trainings wurden bei toolcraft schrittweise mit dem Fachbereich Additive Fertigung konzeptioniert. In Abbildung 141 wird der Rüstvorgang einer TruPrint3000 dargestellt, der einen Reinigungsprozess der Innenfläche der Tür zum Bauraum mit einer mobilen Saugereinheit beinhaltet. Das Training wird als Desktop-Version mit interaktiven Schritten im virtuellen Raum mit dem Schulungsteilnehmer durchgeführt. Die markierte, runde Fläche kennzeichnet den Arbeitsbereich, der gereinigt werden muss. Zusätzlich wird der Schulungsteilnehmer durch eine eingeblen-dete Arbeitsanweisung unterstützt.

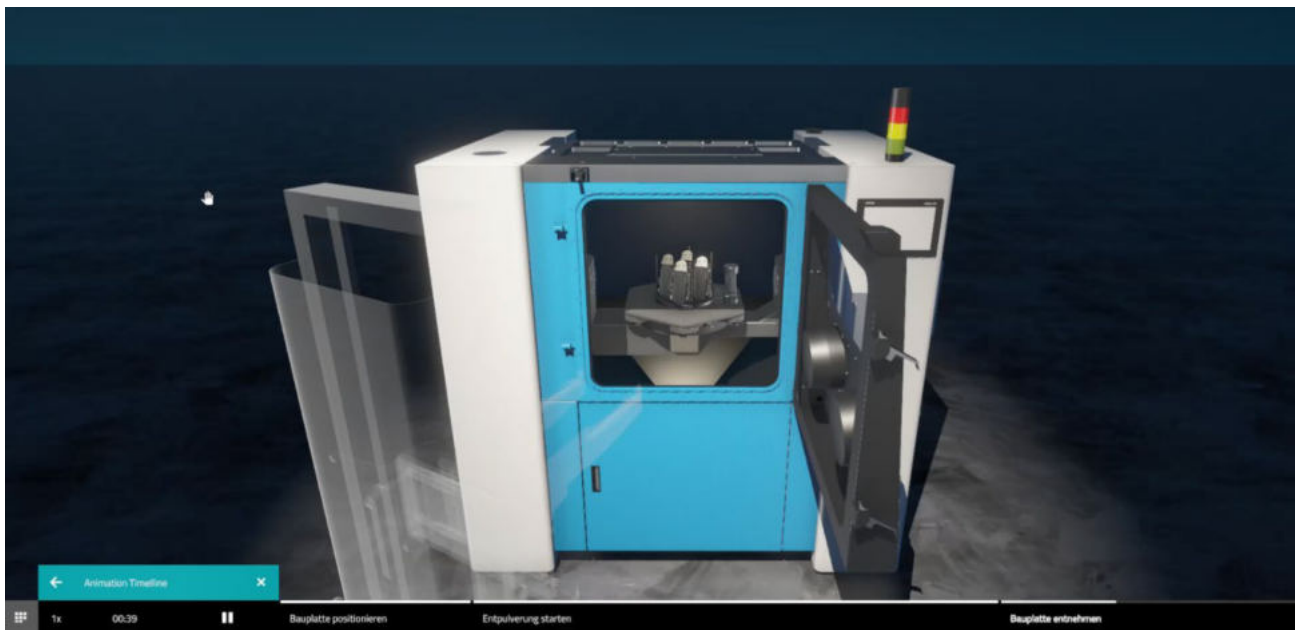


Abbildung 140: Digitales 3D-Modell einer Entpulverungsstation



Abbildung 141: VR-Version des Reinigungsprozesses einer AM-Anlage



Abbildung 142: Überlagerung von 3D-Layout und aufgezeichneter Punktwolke in der Draufsicht (links) sowie in der virtuellen 3D-Begehung

13.3 Fabriksimulationstudien

Im Rahmen des Projekts wurde auf Basis von Siemens Tecnomatix Plant Simulation ein digitaler Zwilling der Produktion der Pilotlinie bei toolcraft und einer Vision der „Fabrik der Zukunft“ im Jahre 2030 entwickelt.

Plant Simulation ist eine diskrete Eventsimulation zur Analyse und Optimierung von Materialflüssen. Sie wird bevorzugt für beispielsweise Maschinenauslastungen, Logistik und Mitarbeiteranforderungen eingesetzt.

Zu Beginn des Projekts wurde die Pilotlinie bei toolcraft in Plant Simulation abgebildet. Eine zentrale

Rolle spielte hier die Integration der Prozessketten der IDEA Demonstratoren in das Simulationsmodell. Als Grundlage wurde das durch das Fraunhofer IPT aufgenommene Prozessschaubild verwendet und alle darin abgebildeten Prozessschritte, vom Produktionsstart bis zum Versand der Teile, im Modell hinterlegt.

Des Weiteren erfolgte zur Validierung des vorhandenen 3D-Layouts, die Aufnahme einer Punktwolke der bestehenden Pilotlinie. Diese Punktwolke konnte in das Simulationsmodell integriert werden,

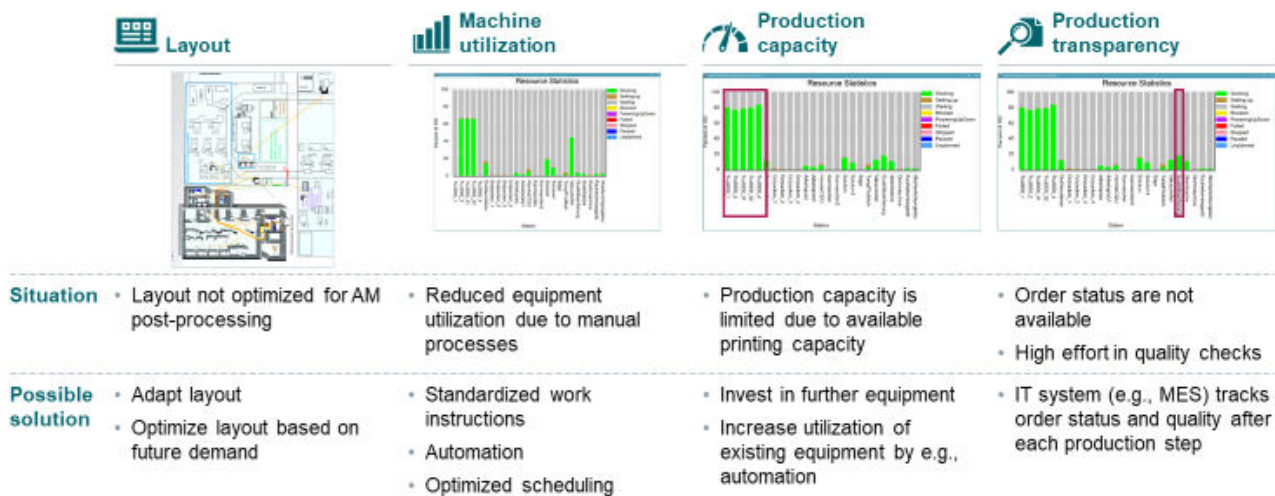


Abbildung 143: Simulativ identifizierte Optimierungspotenziale

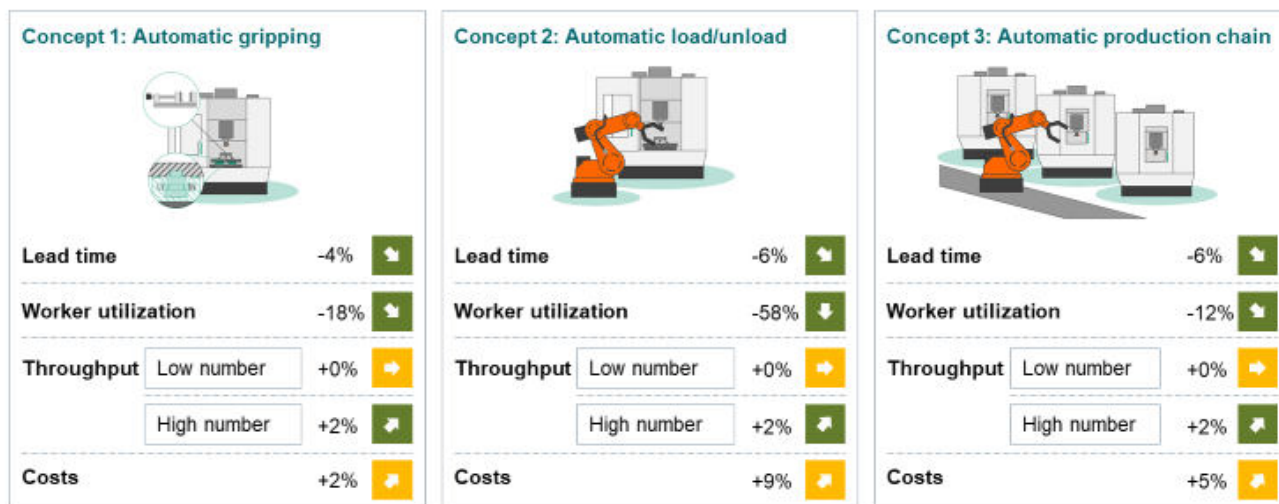


Abbildung 144: Simulierte Auswirkungen von Automatisierungskonzepten auf verschiedene Zielparameter

wodurch sichergestellt wurde, dass alle Maschinenpositionen und Störkonturen im Modell der Realität entsprechen (vgl. Abbildung 142).

Auf dieser Basis erfolgte im ersten Schritt eine Analyse der bestehenden Linie, die zur Identifikation von Verbesserungspotentialen diente. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass durch eine Optimierung des Layouts, eine Standardisierung von Arbeitsabläufen und eine Verbesserung der Transparenz innerhalb der Produktion, erhebliche Produktivitätssteigerungen zu erwarten sind (vgl. Abbildung 143).

Diese Ergebnisse dienten als Grundlage für die in AP9 entwickelten Automatisierungslösungen, welche anschließend im Rahmen der Simulation verglichen und bewertet wurden (vgl. Abbildung 144).

Auf Basis des bestehenden digitalen Zwillings der Produktion der Pilotlinie bei der toolcraft AG und Informationen der Projektpartner wurde anschließend ein Konzept für die Fabrik der Zukunft für die IDEA Demonstratoren entwickelt und in Plant Simulation abgebildet (vgl. Abbildung 145).

Die Anforderungen an diese Fabrik wurden im Rahmen von Interviews mit den Projektpartnern ermittelt. Zusätzlich wurden alle im Rahmen von IDEA entwickelten Konzepte und Entwicklungen in die Simulation integriert.

Auf diese Weise wurde bewertet, ob die gesetzten Projektziele für die IDEA Demonstratoren erreichbar sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ziele erreicht und auch übertroffen werden können, wenn alle Entwicklungen tatsächlich umgesetzt werden (vgl. Abbildung 146). Lediglich eine quantitative Bewertung der

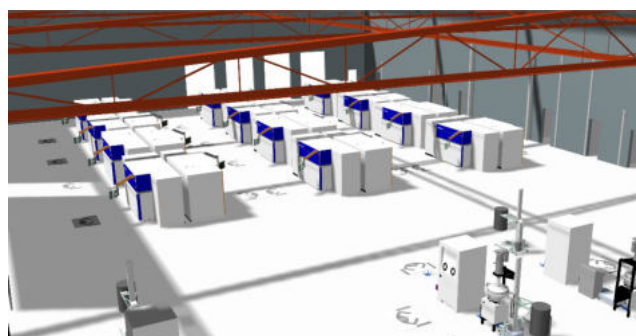
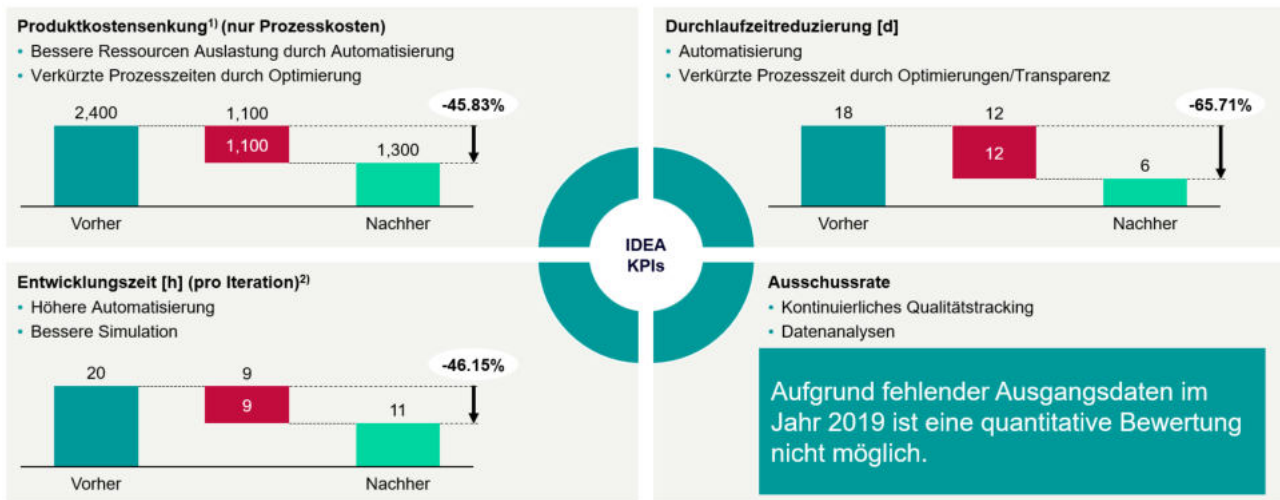


Abbildung 145: 3D-Ansicht zweier virtueller Hallenlayouts, welche im Zuge der Simulation „Fabrik der Zukunft“ genutzt werden



1) Optimierungen von Materialkosten wurden nicht betrachtet 2) Bei mehreren Iterationen verbessert sich der Anteil proportional

Abbildung 146: Durch die Simulation ermittelte Potentiale zur Verbesserung der IDEA KPIs

Qualitätsverbesserungen war nicht möglich, da aufgrund fehlender Ausgangsdaten, keine Auswertung möglich war. Hauptgründe für das Erreichen der Ziele sind die Verwendung von Automatisierungslösungen im Hardware- und Softwarebereich, die Verkürzung der Prozesszeiten durch Optimierungen vorhandener Prozesse, das Sammeln von Daten zur Analyse der Prozesse und das kontinuierliche Überwachen von Prozessparametern.

13.4 Konzept zur übergreifenden Datenintegration

In einem weiteren Arbeitspaket wurde untersucht, wie sich die verschiedenen digitalen Artefakte, welche entlang der gesamten Prozesskette entstehen oder benötigt werden, miteinander in Verbindung bringen, also digital integrieren lassen. Dazu fand eingehend eine Analyse und Systematisierung möglicher Prozessschritte entlang der L-PBF-Kette statt, deren Ziel die Identifikation von informationstechnischen Abhängigkeiten untereinander, sowie der zugehörigen Softwaretools bzw. Softwaresysteme war. Anschließend wurde ein Zielsystemzustand erarbeitet, der eine prozesskettenübergreifende Integration darstellt [16]. Ein fortwährend weiterentwickelter Software-Prototyp dient der Validierung der entwickelten Konzepte. Im Folgenden werden Erkenntnisse der

Prozesskettenanalyse beschrieben sowie das abgeleitete Integrationskonzept erläutert.

13.4.1 Prozesskettenanalyse

Prozessschritte und IT-Systeme

Die L-PBF-Prozesskette lässt sich zunächst in die primäre und sekundäre Kette unterteilen. Erstere besteht dabei aus dem Pre-Prozess, dem eigentlichen Bauprozess und dem Post-Prozess. In der sekundären Kette sind das Pulverhandling, die Substrathandhabung und -aufbereitung sowie die Maschinenvorbereitung einzugliedern.

Im Pre-Processing kommen Software-Tools zum Einsatz, die sich den Bereichen CAD, CAM und CAE zuordnen lassen (vgl. Abschnitt 4.1). Je nach konkreter Ausprägung der Tools können die Tätigkeiten Design und Reverse Engineering, Bauteilsimulation, Baujobvorbereitung und -simulation integriert in einem Tool oder fragmentiert über verschiedene Tools durchgeführt werden. Ergänzend können im Pre-Processing Datensätze in Produktmanagementsystemen (PDM) respektive Produktlebenszyklus-Managementssystemen (PLM) erzeugt und erfasst werden. Mit dem Transfer der maschinenspezifischen Baujobdaten beginnt der eigentliche Bauprozess. Je nach Installation und Parametrierung werden verschiedene Prozessdaten, wie Sensorzeitreihen oder

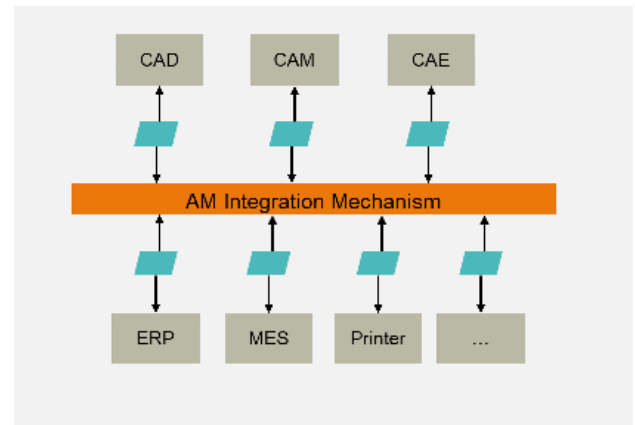
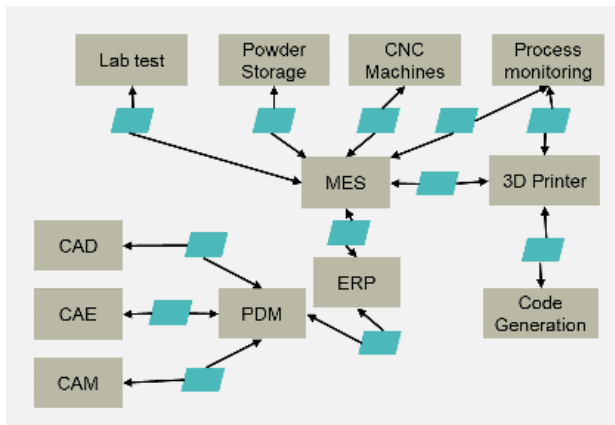


Abbildung 147: Direkte Schnittstellen (links) sowie deren Reduktion durch Entkopplung mittels indirekter Schnittstellen und einer AM Middleware (rechts)

schichtweise Bilddaten durch entsprechende Monitoringsysteme erzeugt und aufgenommen. Die Speicherung erfolgt in der Regel auf der Maschinenhardware oder dem dedizierten externen Monitoringsystem. Schon während eines Bauvorgangs oder im Nachgang ist aus Speicherplatzgründen das Auslagern auf externe Datenträger oder lokale respektive externe cloud-basierte Lösungen zweckmäßig. Ein Manufacturing Execution System ermöglicht eine systematische Aussteuerung und Überwachung des Shopfloors, sowohl hinsichtlich des Bauprozesses, wie auch des anschließenden Post-Prozess (vgl. erneut Abschnitt 13.1).

Die Schritte der sekundären Prozesskette bereiten den Bauprozess vor oder sind diesem nachgelagert. Ihre Aussteuerung und Erfassung kann erneut durch ein MES geleistet werden. Eine Übersicht der skizzierten IT-Systeme findet sich in Abbildung 149.

Als Randbedingung für die Aufgabe der Datenintegration werden die entsprechenden Datenquellen sowohl als autonom sowie auch heterogen angenommen. Autonomie impliziert dabei, dass die Struktur der verfügbaren Daten in weiten Teilen nicht durch den Integrator beeinflussbar ist, sondern inhärent durch das konkrete verwendete System vorgegeben ist. Heterogenität bedeutet, dass die implizite oder explizite Semantik der Daten zwischen verschiedenen Systemen unterschiedlich bzw. nicht vereinheitlicht ist.

Direkte vs. Indirekte Schnittstellen

Das Ziel einer prozesskettenübergreifenden Datenintegration ist es, die IT-Systeme entlang der Kette für einen multilateralen Austausch zu befähigen. Aufgrund des schnellen Wandels von sowohl der Funktionalität der Einzelsysteme, als auch der spezifischen Einsatzszenarien der Systeme bei den Anwendern ist eine möglichst lose Kopplung bei der Integration anzustreben. Dies führt auf die Gegenüberstellung der beiden konzeptionellen Möglichkeiten von direkten und indirekten Schnittstellen zwischen den Systemen (vgl. Abbildung 147). Häufig lässt sich in der Praxis die Nutzung direkter Schnittstellen beobachten, beispielsweise bei der Kopplung eines CAD mit einem PDM-System oder der Erzeugung von maschinenspezifischen Baujobdaten durch eine dedizierte Software. Mit zunehmender Anzahl an Systemteilnehmern kann der Einsatz indirekter Schnittstellen vorteilhaft sein. Im Gegensatz zu direkten Schnittstellen ist die Skalierung bei steigender Komponentenanzahl linear und im Idealfall wird mit jedem neuen IT-Systemteilnehmer nur eine neue Schnittstelle notwendig. Diese Entkopplung durch indirekte Schnittstellen passt besonders mit dem Integrationsmuster „Messaging“ zusammen, welches im nächsten Abschnitt abgegrenzt wird.

Integration basierend auf Patterns

In Anlehnung an Hohpe und Woolf [17] lassen sich mindestens vier verschiedene Mechanismen der Anwendungsintegration unterscheiden: Gemeinsame Dateien, gemeinsame Datenbanken, Remote Procedure Calls (RPC) sowie Messaging. Diese lassen sich einerseits für die Systematisierung bestehender Integrationsansätze entlang der Prozesskette nutzen, als auch andererseits, um die Zielarchitektur zu beschreiben (vgl. Abschnitt 13.4.2).

Aktuell findet im Bereich des Pre-Processings vor allem eine dateibasierte Integration statt. Das historisch etablierte, jedoch äußerst minimalistische STL-Format ist dabei für das Weiterreichen wichtiger Design- als auch Metadaten ungeeignet. Andere Ansätze versuchen dieses Defizit zu beheben, sind aber auf die dateibasierte Integration beschränkt (QiF, JT, 3MF, AMF).

Für eine Datenintegration vom Pre-Processing über den Bauprozess bis zum Post-Processing hinaus wurde also ein alternatives Konzept erarbeitet, welches die zuvor skizzierten Mechanismen, insbesondere das Messaging, berücksichtigt und in Abschnitt 13.4.2 erörtert wird.

Warehousing vs. Virtual Integration

Ein weiterer Aspekt, welcher bei der übergreifenden Datenintegration zu berücksichtigen ist, betrifft den Zugriff auf die Datenbasis. Hier kann auf einem kontinuierlichen Spektrum zwischen dem Warehousing sowie der virtuellen Integration unterschieden werden. Beim Paradigma des Warehousings werden Daten aus den Quellsystemen durch Kopieren extrahiert und dann der neuen Datenbasis zugeführt. Bei der virtuellen Integration verbleiben Daten in den Quellsystemen und werden „on demand“ dynamisch abgefragt und aufbereitet. Das Warehousing hat den Vorteil der schnellen Abfragen auf die vereinheitlichte Datenbasis, jedoch den Nachteil, dass Daten proaktiv kopiert und transformiert werden müssen („extract-transform-load“, ETL). Die virtuelle Integration wiederum vermeidet das Kopieren durch bedarfsgesteuerte Abfragen zur Laufzeit, nimmt dabei jedoch er-

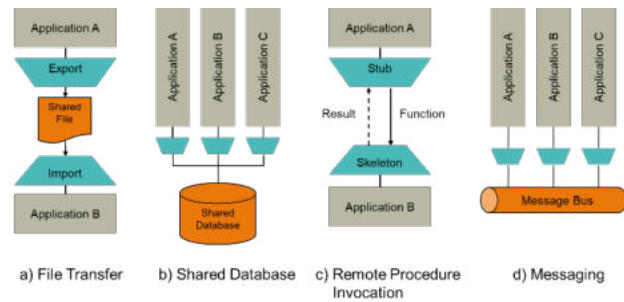


Abbildung 148: Vier Mechanismen der Anwendungsintegration

höhte Antwortzeiten sowie die Komplexität der Mediation und Übersetzung der Anfragen an sich in Kauf. In der Praxis sind Ansätze zu entwickeln, die von beiden Paradigmen Gebrauch machen, um einen optimalen Kompromiss aus Datenmenge, Abfragekomplexität und Systemantwortzeit zu erhalten. Eine pauschal optimale Lösung existiert nicht, sondern muss für die jeweiligen Gegebenheiten des Anwendungsfalls bzw. -umfelds entwickelt werden.

13.4.2 Integrationskonzept

Um eine ganzheitliche Datenintegration zu ermöglichen, bietet sich ein Ansatz an, der im Kern auf einer Middleware beruht, die die Paradigmen der indirekten Schnittstellen sowie der Entkopplung durch Messaging umsetzt. Darüber hinaus kann die Integration heterogener Daten durch die Nutzung von Knowledge Graphs bewerkstelligt werden [18]. Die folgenden Ausführungen werden in Abbildung 149 schematisch dargestellt.

Zunächst wird davon ausgegangen, dass die spezialisierten Systeme (CAx, MES, usw.), welche aktuell den fragmentierten digitalen Teil der Prozesskette bilden, auch bei der digital integrierten Prozesskette Anwendung finden. Zu jedem dieser Systeme gilt es, eine dedizierte Schnittstelle zu konfigurieren oder zu implementieren. Im prototypischen Aufbau, welcher im Kern aus einer Webanwendung auf Basis von node.js besteht, wurden hier ausschließlich web-basierte Schnittstellen implementiert. Je nach angebundenem System muss es einen Mechanismus geben, um veränderliche Datenpunkte aktuell zu halten. Eine Kombination aus initialem Abgleich und anschließendem

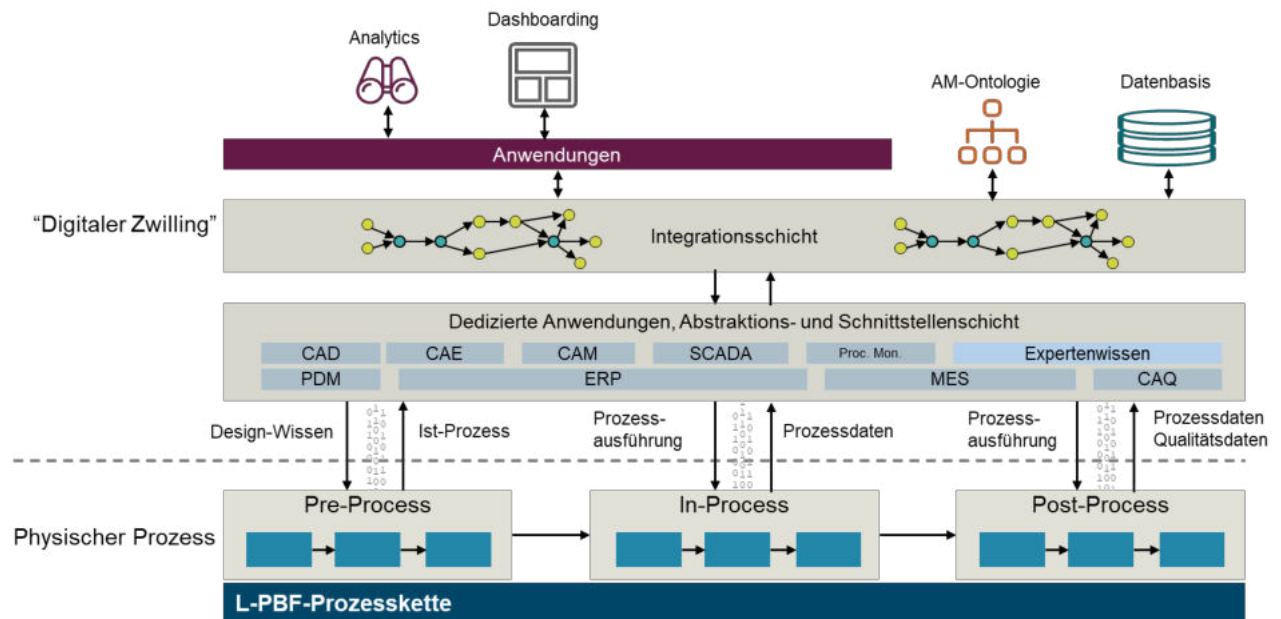


Abbildung 149: Grundsätzlicher Ansatz zur prozesskettenübergreifenden Datenintegration

„Delta-Change“, bei dem nur Änderungen seit der letzten Synchronisation aus dem jeweiligen System übertragen werden, erweist sich als zweckmäßig für Systeme, die eine REST API zur Anfrage ihrer Instanzdaten anbieten. Auf diese Weise wurde das PLM-System Teamcenter mittels des Linked Data Framework angebunden.

Als Alternative bietet sich der Einsatz eines Messaging-Tools an, insofern die Quellapplikation die freie Implementierung einer Schnittstelle erlaubt. So wurde für den Prototypen Messaging mit Apache Kafka implementiert und die CAx-Anwendung NX über ein eigens in NXOpen geschriebenes Plug-in angebunden.

Nachdem Instanzdaten aus ihren Quellsystem ausgelesen bzw. gesendet sind, werden sie einer gemeinsamen Datenbasis zugeführt. Diese ist im Prototypen durch die Graphdatenbank respektive den „Triple Store“ Apache Jena Fuseki realisiert. Um ferner den Instanzdaten eine vereinheitlichte Semantik zu geben, werden sie mit einer übergeordneten Ontologie verknüpft. Diese wird ebenfalls in einem dedizierten Graphen in derselben Datenbank abgelegt.

Um die integrierte Datenbasis zur weiteren Nutzung anzubieten, werden einem Endanwender verschiedene Ansichten präsentiert, bei der verfügbare Daten in Form von Tabellen, Graphen oder Diagrammen

aufbereitet werden. Ferner kann die entwickelte Anwendung zukünftig dazu dienen, eine Kontextualisierung für andere Systeme der Prozesskette zur Verfügung zu stellen. Dies ist für die Verknüpfung der Entitäten Bauteil, Baujob, Fertigungsauftrag und Kundenauftrag in Kombination mit deren Verteilung auf PLM, MES und ERP besonders relevant.

Fazit

Im Rahmen der prototypischen Implementierung zeigt sich, dass eine prozesskettenübergreifende Datenintegration durch Knowledge Graphen geeignet ist, um eine gemeinsame Datenbasis im Kontext der additiven Fertigung bereitzustellen. Zukünftige Arbeiten werden sich mit der Ankopplung weiterer Softwaresysteme auseinandersetzen. Neben der Bereitstellung verschiedener Datenvisualisierung für den Endanwender wird ein weiterer Fokus auf der Realisierung ausgehender Schnittstellen sein, welche andere Systeme dazu befähigen, eine Anreicherung bzw. Kontextualisierung anfallender Daten vorzunehmen.

14 Pilotlinie

Mit Hilfe der Pilotlinie sollen Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen zur Erreichung der Ziele erarbeitet und anhand der Demonstratoren abgebildet werden.

Maßgabe für die Pilotlinie ist die Validierung der gesetzten Ziele:

- Reduktion der Entwicklungszeit um 50%
- Reduktion der Durchlaufzeit um 50%
- Reduktion der Bauteilkosten um 50%
- Reduktion der Qualitätskosten um 50%

In den nachfolgenden Abschnitten werden ausgewählte Aspekte aus Planung und Realisierung dargestellt.

14.1 Konzeption und Planung der Pilotlinie

Die Pilotlinie selbst wird in einer produktionsnahen Umgebung bei Siemens Energy – vom Produktdesign bis zum fertigen Endprodukt – entwickelt und aufgebaut. Daraus ergeben sich diverse Randbedingungen, die es bei der Planung zu beachten gilt. So ist die vorgegebene IT-Landschaft mit Softwaresystemen wie ERP und MES als fix anzusehen. Das bedeutet, dass



Abbildung 150: Pilotliniennutzungsfläche bei Siemens Energy im September 2019

Anpassungen nicht beliebig konfiguriert werden können, sondern Anforderungen an die Gegebenheiten angepasst werden müssen.

Mit Start des IDEA-Projekts wurden auch die Planungen der Pilotlinie am Standort Huttenstrasse begonnen. Dazu wurde die zur Verfügung gestellte Nutzungsfläche für die Pilotlinie im September 2019, rund 3 Monate nach Projektstart, übernommen, vgl. Abbildung 150. In einem weiteren Schritt wurde die Planung der Infrastruktur mit allen Medienversorgungen, wie Wasser, Kühlwasser, Strom und Schutzgas gestartet sowie die notwendige IT Infrastruktur analysiert.

Die Planung erfolgte iterativ entlang der Prozesskette, wobei die einzelnen Prozessschritte und die entsprechenden Maschinen zugeordnet wurden, um die Anzahl der benötigten Anschlüsse und auch die Positionierung festzulegen. Die Anordnung wurde

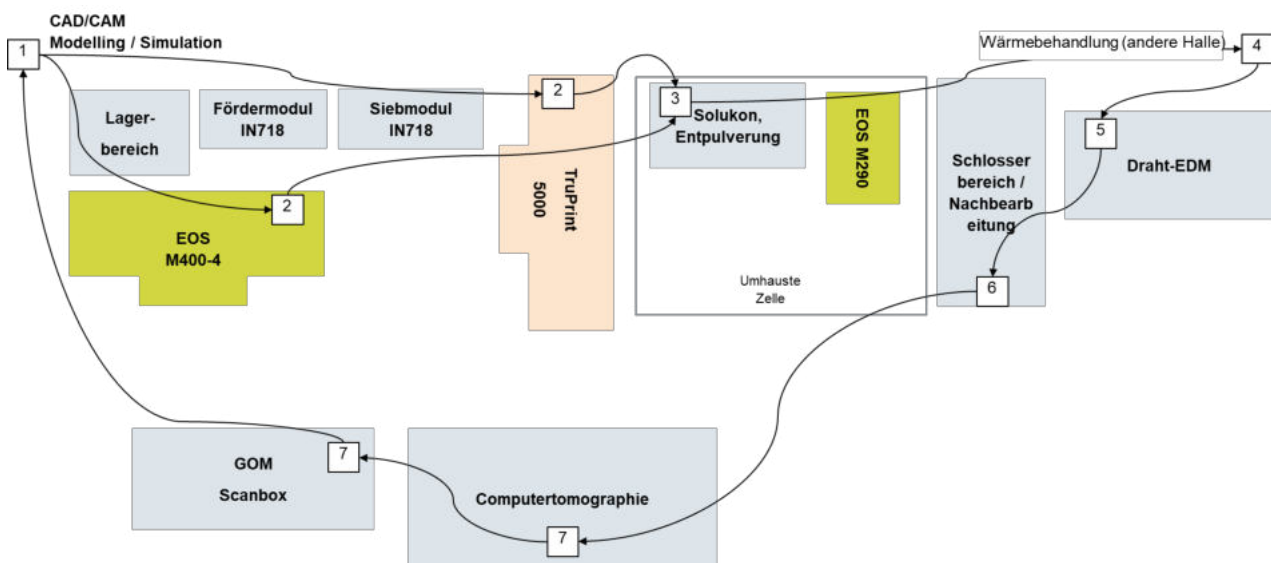


Abbildung 151: Layoutentwurf der Pilotlinie mit Zuordnung des Prozesskettenablaufs



Abbildung 152: Pilotlinie bei der Eröffnung

unter Berücksichtigung weiterer Faktoren wie Arbeitssicherheit (EHS) und der möglichst direkten Anbindung des vertikalen Pulverprozessflusses realisiert. In Abbildung 151 sind die einzelnen Schritte entlang der Prozesskette dargestellt. Es ist unter anderem ersichtlich, dass die AM-Anlage EOS M290 mitsamt der Entpulverung Solukon S 800 räumlich abgetrennt wurde, um Pulverkontaminationen und Exposition der Mitarbeiter zu minimieren. Darüber hinaus wurde die Wärmebehandlung am Standort entsprechend eingebunden, jedoch nicht physisch innerhalb der Pilotlinie platziert. Die nach der Wärmebehandlung folgenden Schritte der mechanischen Bearbeitung mittels Drahterodieren können im Nachgang durch entsprechende Qualitätskontrollen mit digitalem CT-Scanner und optischer Dimensionskontrolle (GOM-Scanner) abgeschlossen werden.

Die Pilotlinie wurde entsprechend den Anforderungen ausgestaltet und ab Jahresbeginn 2020 erste Maschinen und in Betrieb genommen und genutzt. Vollständig betrieben wurde die Pilotlinie ab Spätsommer 2022, vgl. Abbildung 152.

14.2 Installation der physischen und digitalen Infrastruktur

Ein zentraler Aspekt der Konzeption der Pilotlinie war die Verknüpfung der digitalen und physischen Umgebung: Daraus ergibt sich Forderung der digitalen Anbindung der Maschinen an die entsprechenden Datenquellen und Speicherlösungen. Ziel dieser Indust-

rialisierung ist sowohl eine entsprechende Produktionsplanung von Menschen und Maschinen mittels MES, als auch dessen Nutzung als Schnittstelle zur Rückmeldung- und Statusmitteilung von manuellen Arbeitsschritten sowie Maschinenzuständen.

Einen weiteren Aspekt bilden sowohl die zu erwartenden Datenmengen der 3D CAD-Modelle und der daraus abgeleiteten CAM-Daten im Bereich von einstelligen Gigabyte Datengröße, vgl. Abbildung 162, als auch die gesammelten Maschinendaten wie Pulverbett- und Schmelzbaddaten, die kontinuierlich über eine Bauzeit von mehreren Tagen und mit einer Frequenzbreite von 100 bis 0,1Hz anfallen.

Weitere Maßgabe ist außerdem der durchgängige Datenfluss zwischen Anlagen verschiedener Hersteller und der Aspekt der Anforderungen der Cybersicherheit, wie bspw. die Trennung von Netzwerken.

Zu Beginn wurde die Ist-Analyse der Anforderungen und Schnittstellen an ein AM-spezifisches MES System erhoben welches ein Anforderungsprofil für die Pilotlinie resultierte. Dieses Profil konnte im Lauf der Projektlaufzeit nicht vollumfänglich umgesetzt werden, da die Änderungen gewisser Randbedingungen wie beispielweise einer Schnittstelle, bzw. Anbindung an ein definiertes ERP System nicht ohne größere Aufwände möglich waren. Als Konsequenz wurden gewissen Aufgaben mittels kleinerer Anwendungsapplikationen digital abgebildet, wie beispielsweise das Pulvermanagement.

Im Zuge des Projektes gelang es, die AM-Maschinen digital einzubinden, wobei insbesondere die Echtzeit-

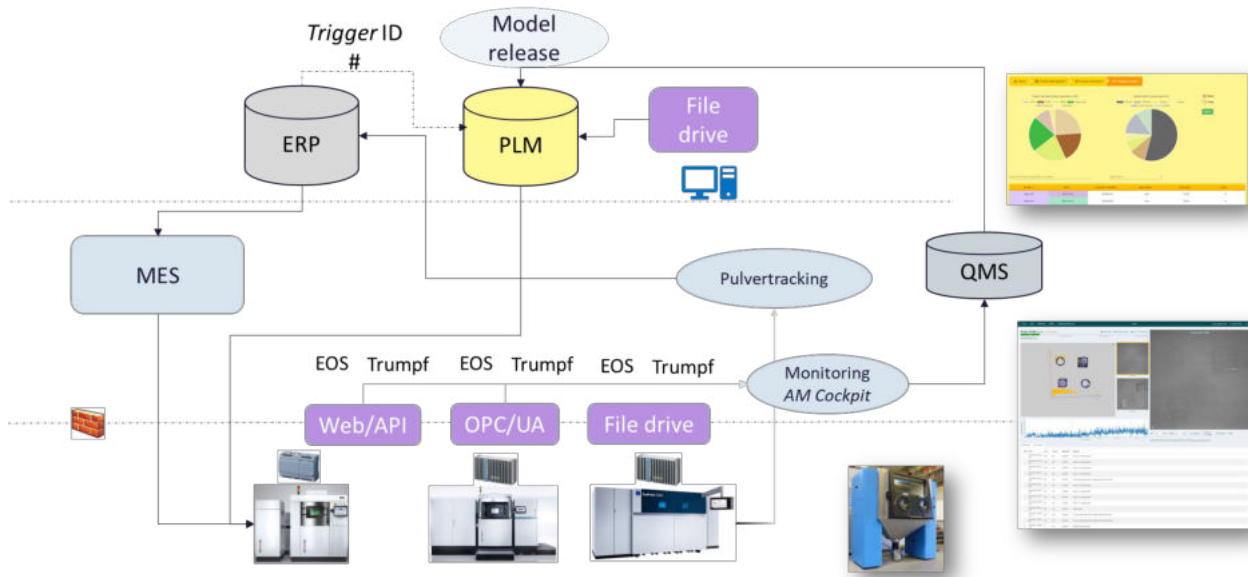


Abbildung 153: Digitale Infrastruktur der Pilotlinie Berlin

zustandsüberwachung der AM-Anlagen mit Sensoren und Pulverbettanalyse zu einem erheblichen Mehrwert führt. Die Rückmeldung über Prozessabweichungen ermöglicht es, konkrete Handlungen, wie Überprüfung der Maschine oder Korrektur des 3D CAD-Modells, zu veranlassen.

Die in der Pilotlinie verfügbaren Maschinen und Ausrüstung, vgl. Abbildung 153 und Abbildung 155, ermöglichte es die Ergebnisse zu erarbeiten, zu validieren und zu verknüpfen. So hat die Kombination eines digitalen CT-Scanners mit einem Streifenlichtscanner in der Pilotlinie ihren Nutzen demonstriert, um beispielsweise die Bauteilverformungen von Bausimulationen zu validieren oder die Sensitivität der Prozessmonitoring-Lösungen zu validieren.

Mit Hilfe der Pilotlinie konnten die gesetzten Ziele erreicht werden und sie hat wichtige Impulse für die Industrialisierung der additiven Fertigung geliefert.

Die Beiträge der einzelnen Arbeitspakete zur Zielerreichung lassen sich nicht immer eindeutig zuordnen. Dennoch sind bestimmte Aspekte hervorzuheben (vgl. Abbildung 154): Die Reduktion der Entwicklungszeit beispielsweise wird maßgeblich durch die Simulation des AM-Prozesses und der Ableitung der resultierenden Verformungen des Bauteils beschleunigt,

da die physischen Iterationen (AM-Design, AM-Prozess, Wärmebehandlung, Postprozesse) auf Grund der Vorhersagequalität entfallen können.

Die Produktkosten konnten gesenkt werden, da nachgewiesen wurde, dass der Einsatz von Multi-Lasern an einem Bauteil zu keinerlei Reduktion der mechanischen Eigenschaften führt. Parallel konnten Aufwände zur Maschinenwartung und -charakterisierung angepasst werden, was eine höhere Anlagenverfügbarkeit ermöglicht und in Folge dessen zu geringeren Produktkosten führt.

Die Qualitätskosten konnten beispielweise dadurch gesenkt werden, dass durch die Prozessüberwachung Abweichungen bereits während des AM Prozesses erkannt wurden und entsprechende Maßnahmen, wie Kalibration der Anlage, ohne Verzug initiiert

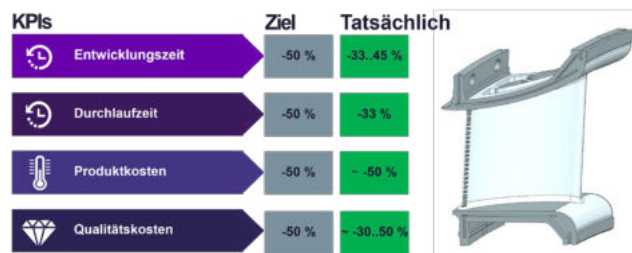


Abbildung 154: Übersicht der Zielerreichung am Beispiel des Demonstratorbauteils

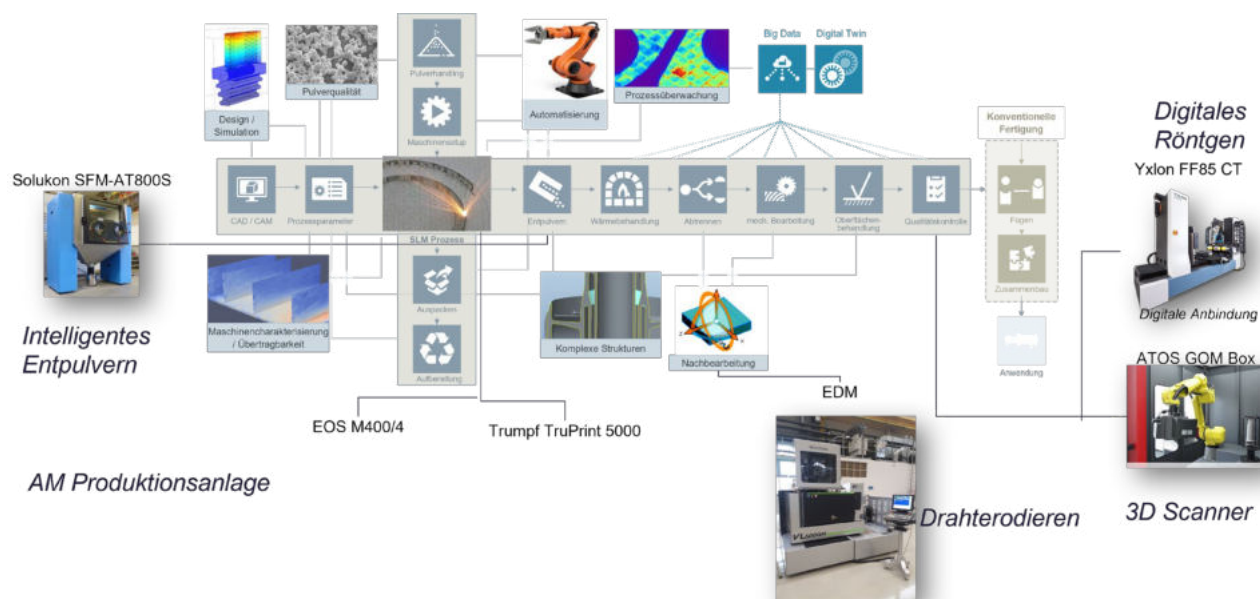


Abbildung 155: Maschinenpark entlang der Prozesskette in der Pilotlinie

werden konnten. Dies steht im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, wie einem zeitlich stark verzögerten Informationsrückfluss mittels nachgeschalteter zerstörungsfreier Prüfverfahren nach bereits durchlaufenen Prozessschritten wie Wärmebehandlung und mechanischer Nachbearbeitung wie Stützstruktur-entfernung.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass das Konzept der Pilotlinie mit der räumlichen Nähe und Konzentration von vielfältigem Know-how und Maschinen als zielführend anzusehen ist, um die Komplexität der Industrialisierung mit allen Chancen und Risiken zu begreifen.

15 Literatur

1. Hill MR, Nelson DV (1995) The inherent strain method for residual stress determination and its application to a long welded joint
2. Mendricky R (2016) DETERMINATION OF MEASUREMENT ACCURACY OF OPTICAL 3D SCANNERS. *MM SJ* 2016:1565–1572. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_12_2016183
3. VDI/VDE (2008) VDI/VDE 2634 Blatt 3 - Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten
4. Geiger K, Sauerbier C, Montavon B et al. (2022) Model based view planning for the robot-guided automation of optical 3D digitization based on a variable mesh resolution processing approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*:095440542211371. <https://doi.org/10.1177/09544054221137147>
5. Berns K (ed) (2018) *Commercial Vehicle Technology 2018: Proceedings of the 5th Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2018)*. Springer Vieweg, Berlin, Germany
6. Demmer A (2014) *Proceedings / DDMC 2014, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, March 12-13, 2014, Berlin*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart
7. Schmidt M, Spieth H, Bauer J et al. (2017) *100 Betriebe für Ressourceneffizienz Band 1: Praxisbeispiele aus der produzierenden Wirtschaft*, 1st edn. Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg
8. Horstkotte R, Heinrich F, Prümmer M et al. (2021) Generation and evaluation of automation concepts of additive process chains with Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). *Procedia CIRP* 96:97–102. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.059>
9. Frohm J (2008) Levels of automation in production systems. *Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola, ny ser., nr. 2736*. Chalmers University of Technology, Göteborg
10. Horstkotte R, Bruning B, Prümmer M et al. (2021) *Determination Of The Level Of Automation For Additive Manufacturing Process Chains*. Hannover : publish-Ing
11. VDI (1990) *VDI-Richtlinie 2860 - Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole*
12. Schuh G, Schmidt C (2014) *Produktionsmanagement*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
13. Lotter B, Deuse J, Lotter E (2016) *Die Primäre Produktion*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
14. Takeda H (2004) *LCIA - Low Cost Intelligent Automation: Produktivitätsvorteile durch Einfachautomatisierung*, 1. Auflage. *mi-Wirtschaftsbuch*, München
15. Saaty TL (1990) How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48:9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
16. Sjarov M, Ceriani N, Lechler T et al. (2021) Building Blocks for Digitally Integrated Process Chains in PBF-Based Additive Manufacturing. In: Behrens B-A, Brosius A, Hintze W et al. (eds) *Production at the leading edge of technology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 368–377
17. Hohpe G, Woolf B (2015) *Enterprise integration patterns: Designing, building and deploying messaging solutions*, 19th print. The Addison-Wesley signature series. Addison-Wesley, Boston
18. Sjarov M, Franke J (2022) Towards Knowledge Graphs for Industrial End-To-End Data Integration: Technologies, Architectures and Potentials. In: Behrens B-A, Brosius A, Drossel W-G et al. (eds) *Production at the Leading Edge of Technology*. Springer International Publishing, Cham, pp 545–553