

# AIRBUS AEROSTRUCTURES

Art des Dokuments: LuFo V.3 Abschlussbericht

Verfasser: Dipl.-Ing. Matthias Radny

Titel: diAMpro - digitale und selbstadaptierende Additive Manufacturing Prozesskette

Datum: 23.06.2023

Berichtsumfang: 77 Seiten

<b>AIRBUS AEROSTRUCTURES</b>		<b>Kennblatt</b>
Title: diAMpro - digitale und selbstadaptierende Additive Manufacturing Prozesskette		
Zuwendungsgeber:	<b>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK</b>	
Verbundbezeichnung:	LuFo V.3 diAMpro	
Förderkennzeichen:	20W1714A	
Vorhaben:	diAMpro	
Vertragsdatum:	31.07.2018	
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2018 – 31.07.2022	
Verlängerung des Vorhabens:	01.08.2022 – 31.01.2023	

Der Inhalt dieser Unterlage ist geistiges Eigentum der Airbus Aerostructures GmbH. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des BMWK gefördert. Außerhalb der Regelungen des Zuwendungsbescheides ist eine Weitergabe an Dritte sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts an Dritte nicht gestattet, soweit nicht vorher schriftlich von der Airbus Aerostructures GmbH zugestanden. Zu widerhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmuster-Eintragung vorbehalten.

The content of this document is the intellectual property of Airbus Aerostructures GmbH. The responsibility for the content of this publication rests with the author.

The project which forms the basis for this report is endorsed and funded by the BMWK. Apart from the user rights contained in the notification concerning the allocation of funds, copying of this document, and disclosure to third parties and the use of the contents thereof, are forbidden without prior written consent by Airbus Aerostructures GmbH. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.

**Zuwendungsempfänger:** Airbus Aerostructures GmbH

Dok-Nr.:

Datum: 23.06.2023

Verfasser: Dipl.-Ing. Matthias Radny

Projekt-Struktur-Plan-Nr.: T-X-00000077/

**Zusammenfassung:**

In dem LuFo V.3 Projekt diAMpro wurde die Digitalisierung der Prozesskette einer Additiven Fertigung vom Entwurf bis zur Fertigung untersucht. Dazu wurde auf Basis eines Value-Stream-Mapping ein digitaler Zwilling der Abläufe im Entwurf, der Fertigung und der Qualitätssicherung entworfen und zur Analyse und Optimierung der Prozesse verwendet. Im weiteren wurden verschiedene Ansätze zur Datenhaltung und Datenbereitstellung untersucht und exemplarisch umgesetzt und getestet. Eine wichtige Anforderung war dabei, so weit es möglich war auf bestehende System des Ecosystems der Entwicklung und der Fertigung aufzusetzen.

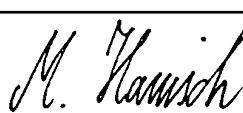
Die in diAMpro erarbeiteten Fertigungs- und Qualitätssicherungskonzepte sowie Prozesse wurde in einer reale Testzelle im Technologiezentrum Varel getestet und verifiziert.

Neben dem digitalen Zwilling der AM Fabrik wurden Methoden zur Simulation der Fertigungsprozesse sowie zur Vorhersage und Optimierung der Produktionskosten auf der Basis deterministischer Methoden und moderner neuronaler Netzwerke (KI) entwickelt und validiert.

Für den Entwurf und die Optimierung von AM gerechten Bauteilen wurden generative Designalgorithmen und Workflowmodelle entworfen, welche den manuellen Aufwand im Design und Nachweis reduzieren und mittels Modell-Basierten Entwicklungsansatz (MBE) die Daten Kontinuität in die Fertigung sicherstellen sollen.

Das Projekt diAMpro ist ein Leuchtturm Projekt, bei dem die Verwertung der Ergebnisse auf andere Entwicklungs- und Fertigungsbereiche stets im Auge behalten wurde.

Stichworte: (Suchbegriffe)	LuFo V.3, diAMpro, Additive Fertigung, Additive Manufacturing, Premium AEROTEC, Airbus Aerostructures, Digitalisierung, Prozesssimulation, AM Design, AM Prozesskette, Materialfluss, Qualitätssicherung	Empfehlung der Fachabteilung zur Archivierung unter „Know-how“ Aspekten (unabhängig von vertraglichen Vereinbarungen): <b>10 Jahre</b>
----------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	Projektleitung	Co-Projektleitung	HO Research & Technology
Abteilung	KIR	KIR	KIR
Name	Matthias Radny	Martin Hanisch	Markus Feiler
Datum	23.06.2023	23.06.2023	23.06.2023
Unterschrift			

## Inhaltsverzeichnis

<b>I Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
I.1 Aufgabenstellung	5
I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
I.3 Planung und Ablauf	6
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
<b>II Ergebnisbericht - Erzielte Ergebnisse</b>	<b>12</b>
II.1 HAP1 Steuerung- der Prozesskette	12
II.1.a Ausgangssituation und Zielsetzung	12
II.1.b Lösungsweg	13
II.1.c HAP1 Ergebnisse	14
II.1.d Zusammenfassung	23
Zusammenfassend werden die Arbeitsschritte des HAP1 in chronologischer Reihenfolge nochmals dargestellt.	23
II.2 HAP2 - Materialfluss	25
II.2.a Ausgangssituation und Zielsetzung	25
II.2.b Lösungsweg	25
II.2.c HAP2 Ergebnisse	26
II.2.c.1 AP2.1 Automatisierte Pulverprozeesierung	26
II.2.c.2 AP 2.2 Automatisierte Handhabungssysteme für Bauteile	28
II.2.c.3 AP2.3 Untersuchungen in der realen AM Testzelle	29
II.2.d Zusammenfassung	31
II.3 HAP3 - Qualitätssicherung	33
II.3.a Ausgangssituation und Zielsetzung	33
II.3.b Lösungsweg	34
II.3.c Ergebnisse	35
II.3.d Zusammenfassung	39
II.4 HAP4 - Simulation	41
II.4.a Ausgangssituation und Zielsetzung	41
II.4.b Lösungsweg	42
II.4.c Ergebnisse	44
II.4.c.1 AP4.1 ALM Prozessmodell	44
II.4.c.2 AP4.2 Wärmebehandlung/HIP-Prozessmodell	48
II.4.c.3 AP4.3 Simulation ALM-Nachbearbeitung	48
II.4.c.4 AP4.4 Durchgängiges ALM-Prozesskettenmodell	54
II.4.d Zusammenfassung	54

II.5 HAP5 - AM Design	56
II.5.a Ausgangssituation und Zielsetzung	56
II.5.b Lösungsweg	57
II.5.c Ergebnisse	58
II.5.c.1 AP5.1 - Automatisiertes Bauteil Design	58
II.5.c.2 AP5.2 - Automatisierte AM Vorbereitung	64
II.5.c.3 AP5.3 - Globale AM Bauteilloptimierung	68
II.5.d Zusammenfassung	72
II.6 Voraussichtlicher Nutzen	73
HAP1 - Steuerung AM Prozesskette	73
HAP2 - Materialfluss	73
HAP3 - Qualitätssicherung	74
HAP4 - Prozesssimulation	74
HAP5 - Automatisiertes AM Design	75
II.7 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten	76
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge und studentische Arbeiten	76
<b>III Referenz</b>	<b>77</b>
III.1 Verwendete Abkürzungen	77
III.2 Literatur	77

# I Zusammenfassung

## I.1 Aufgabenstellung

Im Fokus des LuFo V.3 Verbundvorhaben "diAMpro" stand die digitale Vernetzung und Automatisierung der Prozesskette einer Additiven Fertigung im Pulverbett Verfahren, wie es bei der Premium AEROTEC Industry (PAI, ehemals PAG) und der Airbus Aerostructures (ASA, ehemals PAG) Anwendung findet.

Dabei mussten das Zusammenspiel und die Datenströme zwischen den einzelnen Gwerken in der horizontalen Wertschöpfungskette erfasst und sichtbar gemacht werden.

Des Weiteren mussten die Einzelprozesse der vertikalen Wertschöpfungsketten im Entwurf, Fertigung und Qualitätssicherung auf Ihre Effizienz und Digitalisierbarkeit bzw. Automatisierbarkeit geprüft und ggf. entsprechend angepasst werden.

Die in den einzelnen Gwerken gewonnenen Daten wurden zur Validierung und Verifizierung von verschiedenen Konzepte und Simulationen vor allem in den Bereichen der Fertigungsplanung und Fertigungsvorbereitung sowie in der Fertigungsvorhersage verwendet.

Abbildung 0.1 zeigt dabei den schematischen Zusammenhang der einzelnen Gwerke, die idealerweise über einen gemeinsamen, datenbank- und werkzeugagnostischen "Data-Backbone" kommunizieren können.

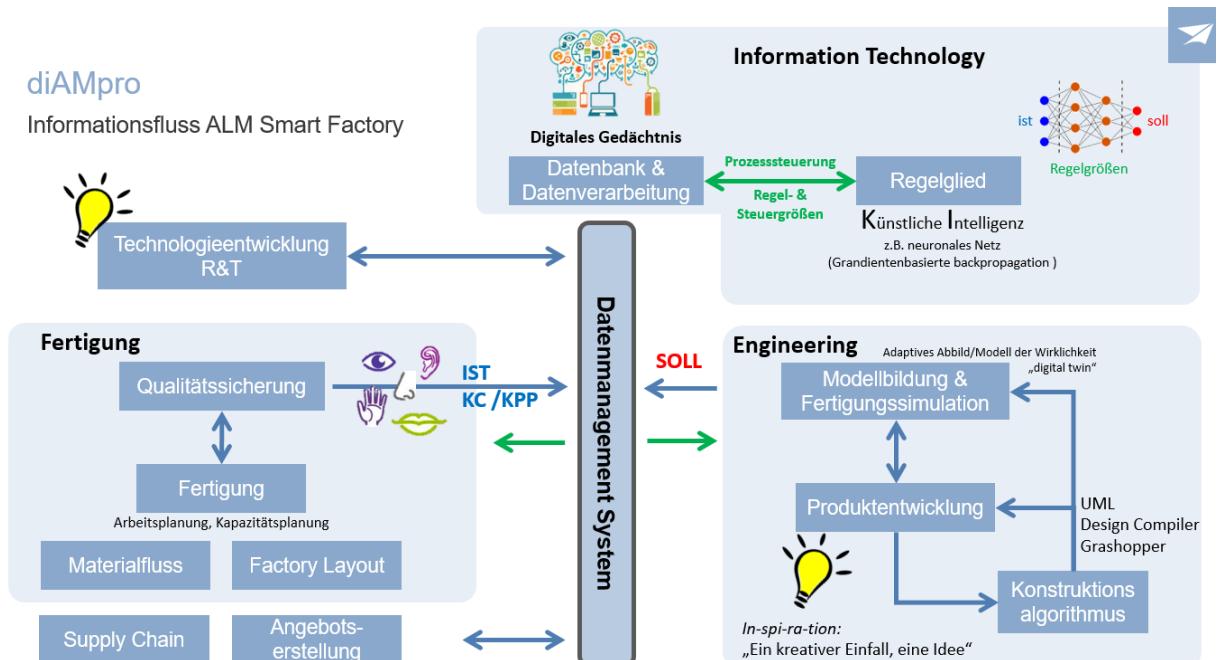


Abbildung 0.1 - Grundschema der AM-SMART Factory

## I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Premium AEROTEC hat mit Abschluss des LuFo V.2 Teilprojekt "ALM2AIR" die Prozesskette für den metallischen 3D-Druck für Titanbauteile im Pulverbett Verfahren soweit stabilisiert, dass Bauteile in Einzelqualifikation erfolgreich gefertigt und in Kleinserie auf die A350XWB gebracht werden konnten. Später wurden, begleitet von einem umfassenden Testprogramm, die Prozessparameter zur Herstellung von Titan-Bauteilen allgemein qualifiziert und zur Serienanwendung in der zivilen Luftfahrt gebracht.

Zu diesem Zeitpunkt war die Premium AEROTEC das weltweit erste Unternehmen, welches nach AIRBUS Prozess Standards (AIPS / AIMS) luftfahrtzugelassene Bauteile herstellen konnte und über die allgemeine Prozessqualifikation ausliefern durfte.

Im Folgenden wurde entschieden, die Fertigungskapazitäten des Werkes Varel zu erhöhen, um die Serienproduktion der A350XWB und A400M vollständig zu bedienen und nachfolgend auf das A320 Programm auszuweiten.

Dafür mussten die Prozesse der bisher auf Einzelteilqualifikation ausgelegten Produktion neu bewertet und hinsichtlich einer durchgängigen Vernetzung und Automatisierung untersucht werden.

Ziel war es, die Abläufe in Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätssicherung Datentechnisch eng zu vernetzen, um eine kontinuierliche Datendurchgängigkeit zu schaffen, die eine effiziente Entwicklung und robust skalierbare Serienproduktion über alle Flugzeugprogramme hinweg zulässt.

Zu diesem Zeitpunkt waren Themen wie künstliche Intelligenz, Enterprise Data Management, Manufacturing Execution System für 3D-Druck, Zentrale Pulverförderung, Data Analytics und Computer Vision, Model based Engineering und Data-Driven-Design zwar theoretisch in Diskussion, aber zum Großteil noch nicht in der Praxis untersucht oder in der Serienproduktion umgesetzt.

Das Projekt "diAMpro" wurde ins Leben gerufen, um in der digitalen Transformation des 3D-Drucks und in praktischer Anwendung eben diese Themen zu erschließen und für weite Bereiche des Unternehmens nutzbar zu machen.

"diAMpro" wurde daher als Leuchtturmprojekt Bereichsübergreifend mit jeweiligen Schwerpunkten in der Fertigung, Qualitätssicherung, dem Engineering und der IT konzipiert.

## I.3 Planung und Ablauf

Ziel des Vorhabens "diAMpro" war die digitale Transformation und Automatisierung des AM-Produktions- und Produktentwicklungsprozesses.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden das Projekt thematisch in fünf Hauptarbeitspakete gegliedert.

Die Projektstruktur ist in der folgenden Abbildung 0.2 dargestellt. Als Industriepartner in der Rolle des Verbundführers hat sich die PAG/PAI/ASA in alle Arbeitspakete eingebracht.

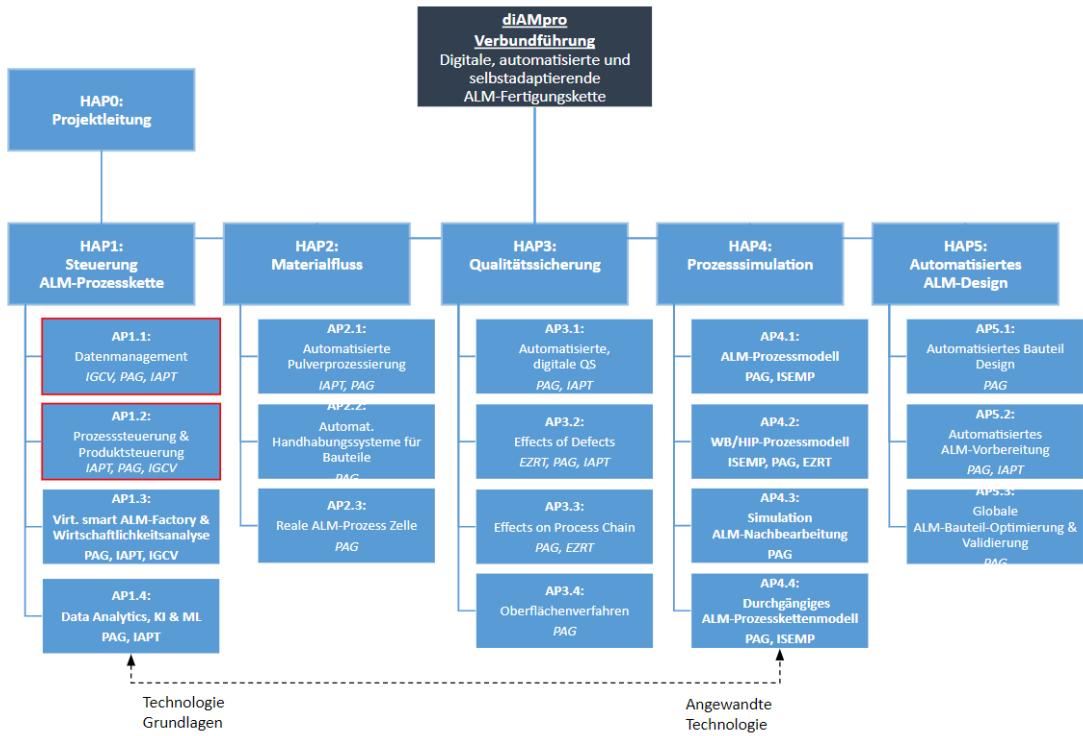


Abbildung 0.2 - Projektstrukturplan "diAMpro"

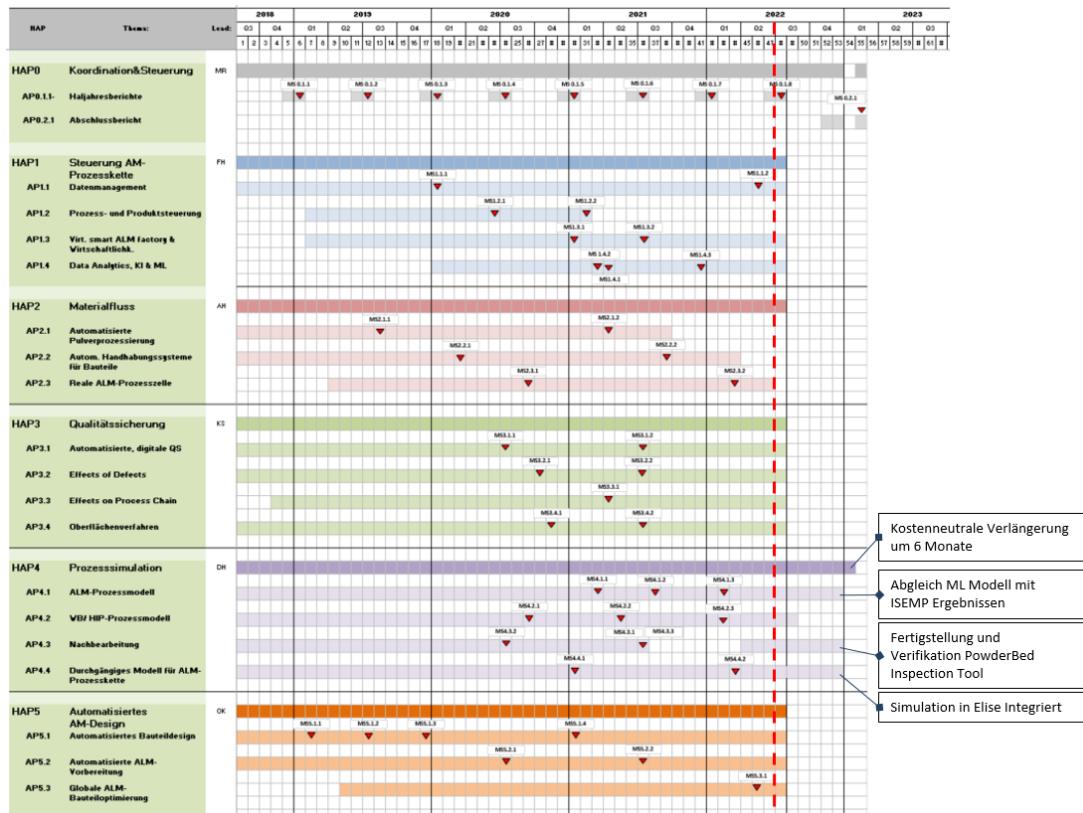


Abbildung 0.3 - Meilensteinplanung "diAMpro"

## I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der wissenschaftliche Stand wurde zu Beginn des Vorhabens in verschiedene Themen untergliedert. Der aktuelle Stand wird entsprechend der Projektstruktur im Folgenden kurz beschrieben:

### **HAP1: Steuerung der AM Prozesskette**

Entlang der Gewerke in der horizontalen Wertschöpfungskette fallen eine Vielzahl von Daten an, die zu Beginn des Projektes in lokalen Datensilos für Bereiche außerhalb der jeweiligen vertikalen Prozesskette nicht oder nur schwer verfügbar gemacht werden können. Entsprechend waren übergreifende Datenanalysen zur Prozessoptimierung oder die Etablierung automatisierter Feedbackschleifen aus der Fertigung nur schwer abzubilden.

Mit den in HAP1 erzielten Ergebnissen konnte der Fertigungsprozess in einem digitalen Schatten abgebildet, analysiert und optimiert werden. Es wurden weiterhin Fähigkeiten entwickelt, analog vorliegende Dokumente zu digitalisieren und automatisiert in die Datenbanksysteme einzuspielen und so zentral verfügbar zu machen.

Zur Steuerung der Produkte und des Materialfluss wurde der Prototyp des *"Additive Manufacturing Production Control System"* (AMP) entwickelt, im laufenden Betrieb getestet und zur finalen Ausarbeitung an das Industrialisierungsteam übergeben. Mit dieser Datengrundlage kann der metallische 3D-Druck in das Manufacturing Execution System (MES) des Werks integriert werden.

Für die im 3D-Druck bisher als Laufzettel in Papierform realisierten Bauteiltaschen und Bauteilakten wurden in *diAMpro* verschiedene digitale Konzepte auf Umsetzbarkeit und Anwenderfreundlichkeit untersucht. Auf Basis der Jira-Plattform wurde in enger Zusammenarbeit mit der Fertigung die für alle sichtbare und nachvollziehbare digitale Bauteiltasche und digitale Bauteilakte realisiert, welche die bisherigen Laufzettel im 3D-Druck zum heutigen Stand nun gänzlich ersetzt.

### **HAP2: Materialfluss**

Zu Beginn des Projektes waren die Einflussparameter zur automatischen Handhabung größerer Mengen an Titan- und Aluminiumpulver weitestgehend unbekannt. Ebenso war ein automatisierter Bauteiltransport, das automatische Rüsten, Erkennen und automatisiertes Handhaben von Bauteilen nur theoretisch beschrieben.

Im Verlauf des Projekts *diAMpro* wurden diese Fragestellungen in HAP2 praktisch untersucht und weiterentwickelt. Die Auswirkungen einer zentralen Pulverförderung auf das Alterungsverhalten des Pulvers konnten repräsentativ geklärt werden und in ein industrialisierbares Konzept überführt werden.

Zu automatischen Rüstung und Transport durch die Prozesskette wurde ein Handhabungsendeffektor weiterentwickelt, mit kapazitiven und optischen Sensoren ausgestattet und sukzessive in verschiedenen Störzenarien auf Funktionalität getestet und modifiziert. Zusätzlich wurde ein Nullpunktspannsystem verbunden mit einem eindeutigen Data-Matrix-Code eingeführt und in der realen AM-Testzelle praktisch getestet und validiert. Mit dem Ende von "*diAMpro*" konnte die technische Machbarkeit einer vollautomatisierten über einen zentralen Leitstand gesteuerten Fertigungsablauf vom Rüsten des Druckers, Wärmebehandlung, Vermessung und Abtrennung von der Bauplatte sowie funktionierende Parameter zum "Direkt Wieder Aufdruck" ohne zerspanende Nachbehandlung der Substratplatten praktisch demonstriert werden.

**HAP3: Automatische Qualitätssicherung**

Zwar befassten sich viele, zu Projektstart vorliegende wissenschaftliche Studien mit dem Zusammenhang von Prozessparametern und der resultierenden mechanischen Eigenschaften und Qualität des entstehenden Werkstoffes, die Wirkungsweise der Fertigungsparameter auf metallurgische Fehler und deren Auswirkung auf die Wiederverwendbarkeit der gefertigten Bauteile und eine ggf. notwendige Umsteuerung in der Prozesskette war bis dato noch nicht ausreichend beschrieben worden. Die Qualität der Bauteile wurde entsprechend erst am Ende der Fertigungskette geprüft und als gut oder als Ausschuss geschrieben.

Darüber Hinaus wurden in erlangung an praktischen Erfahrungen und Tests während der Qualifikation des metallischen 3D-Druck für Luftfahrtanwendungen strenge Auflagen zur Oberflächenqualität von insbesondere Fatigue-Belasteter Bauteil gemacht, die eine wirtschaftliche Fertigung solcher Anwendungen aufgrund der Notwendigkeit einer umfassenden zerspanender Nacharbeit stark einschränken.

Um eine Qualitätssicherung entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu etablieren, wurden in "diAMpro" verschiedene Verfahren entwickelt und auf Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit getestet. Dafür wurden die wichtigsten Prozessparameter (KPP) beschrieben und mittels dafür eingeführter Prozessüberwachungssysteme digital erfasst und ausgewertet. Stand der Technik ist heute z.B. die Verwendung eines Scan Field Monitor auf einem rotierenden System, um vor der Fertigung die Richtigkeit der Maschinenparameter zu verifizieren. Ebenso wurde die Frage beantwortet, wie sich Fehler innerhalb der Prozesskette auswirken, wieder ausheilen, bzw. verstärken.

Heute ist in der additiven Fertigung in Varel ein Qualitätsregelkreis entlang der Fertigungskette etabliert, der aus den wissenschaftlichen Erkenntnissen von "diAMpro" abgeleitet, validiert und im Nachgang industrialisiert werden konnte.

Aus den Untersuchungen zur Oberflächengüte konnte der Zusammenhang zwischen Rauhigkeit und Lebensdauer abgeleitet werden. Da taktile Messverfahren aufgrund der teilweise sehr rauen und örtlich unterschiedlich ausgeprägten Oberflächen nicht einsetzbar sind, wurde als Nebenprodukt dieser Untersuchung ein optisches Messverfahren und eine dazugehörige Methode zur statischen Auswertung entwickelt und im PAG Strukturlabor zur Anwendung gebracht.

**HAP4: Simulation**

Sowohl die numerische als auch KI gestützte Simulation von Effekten während der Fertigungs- und Nachbehandlungsprozesse waren zu Beginn des Projektes "diAMpro" nur vereinzelt vorhanden und nicht mit realen Prozessdaten validiert oder verifiziert.

Nach heutigem Stand lässt sich vor allem das Verzugsverhalten der Bauteile im Aufbauprozess deterministisch sehr gut vorhersagen und auf nicht optimale Design Features, Nesting oder Druckparameter zurückführen. Auch die Anwendung von neuronalen Netzwerken, die mit Trainingsdaten aus dem Betrieb stetig trainiert und getestet werden, verspricht zunehmend akkurate Ergebnisse in der Vorhersage.

**HAP5: Automatisiertes AM Design**

Zu Beginn des Projektes wurden Entwurf, Nachweis und spätere Anpassung an Fertigungstechnische Besonderheiten durch die jeweiligen Bereiche weitestgehend sequentiell betrieben. Der Informationsaustausch erfolgte überwiegend Dokumentenbasiert per Bericht oder Zeichnung bzw. mündlich in Arbeitsmeetings. Dies hatte zur Folge, dass Fehler oder notwendige

Änderungen teilweise erst spät in der Entwurfsphase sichtbar wurden und damit teuer bis nicht mehr änderbar waren.

Im Projekt diAMPro konnten die Vorteile eines rein modellbasierten Entwicklungsprozess erprobt und validiert werden.

Aktuelle Projekte überführen den erreichten Wissensstand auf breiter Front in den operativen Entwicklungsbetrieb bei der Airbus Aerostructures GmbH.

Die Vorteile der ebenfalls untersuchten graphenbasierter Entwurfssprachen konnten noch nicht zur technischen Reife und damit zur Umsetzung gebracht werden. Das große Potential der zentralen Modellbeschreibung mittels einer generischen Entwurfssprache wurde jedoch erkannt. In dem anstehenden LuFo-VI.3 Projekt "AMoBaCoD" wird daher mit einem Industriepartner auf diesem Gebiet weiter geforscht werden.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt diAMpro wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Verbundpartnern durchgeführt:

- Fraunhofer Institut für Gießerei-, Composites- und Verfahrenstechnik (IGCV),
- Fraunhofer Institut für Röntgentechnik (EZRT),
- Fraunhofer Institut für Additive Produktionstechnologie (IAPT)
- Airbus Stiftungslehrstuhl für integrative Simulation, Materialentwicklung und Prozesse (ISEMP)

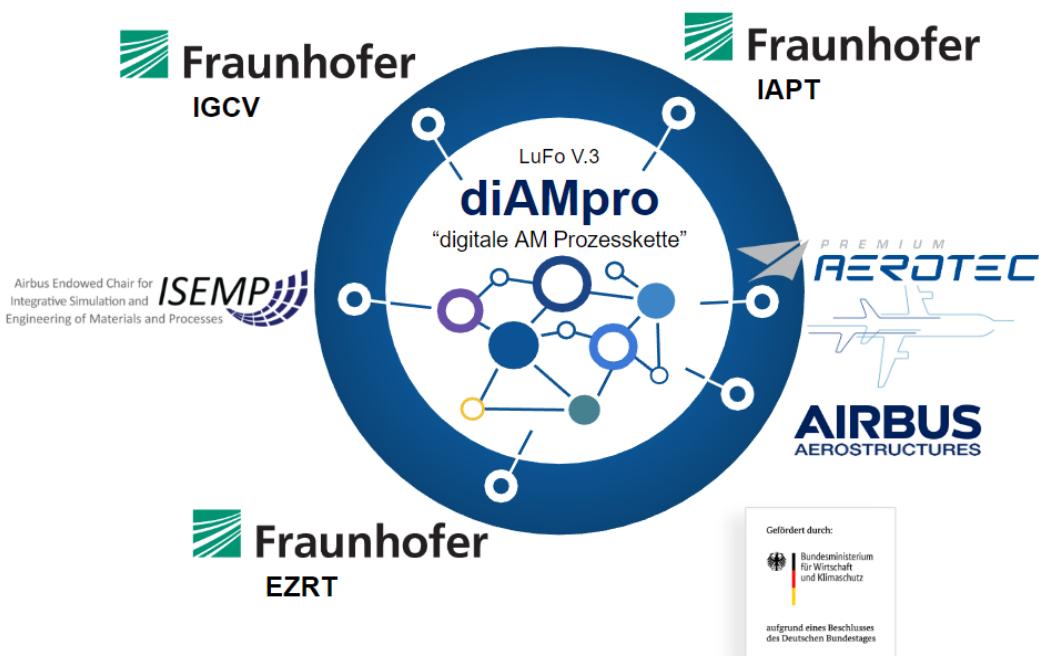


Abbildung 0.3 - diAMpro Verbundpartner

Im Juli 2022 wurde die 100% Airbus Tochter Premium AEROTEC GmbH einer Restrukturierung unterzogen, wobei das Engineering, das R&T Programm und die IT in die neu gegründete Airbus Aerostructures GmbH übergingen und das Werk Varel der Premium Industry GmbH (ebenfalls eine 100% Airbus Tochter) zugeschlagen wurde.

Im Unterauftrag war das PAG Tochterunternehmen APWORKS GmbH in München bei der Entwicklung der KI Themen in HAP1.4 und Prozesssimulation HAP4 umfassend beteiligt.

Im Bereich der semantische Datenbanktechnologie und Entwicklung einer spezifischen Ontologie für Nachweisberichte wurde intensiv mit dem Unternehmen Synergeticon GmbH in Hamburg zusammengearbeitet.

Bei der Entwicklung der Design Algorithmen wurde das Projekt von der Firma Synera GmbH (ehemals ELISE) aus Bremen unterstützt. Die Rhino-Grasshopper Umgebung wurde im zweiten Teil des Projektes durch die Synera Low-Code Plattform ersetzt, welche zunächst über Forschungs-Lizenzen direkt von Synera bezogen, und später über das Partnerprogramm von Altair Engineering für das Projekt kostenneutral lizenziert wurde.

## II Ergebnisbericht - Erzielte Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die in den jeweiligen Haupt-Arbeitspaketen (HAP) erzielten Ergebnisse des Vorhabens zusammengefasst. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Detaillierungsgrad aufgrund von Firmen-Know-How gelegentlich abstrakt gehalten und auf die jeweiligen Zwischenberichte verwiesen werden muss.

### II.1 HAP1 Steuerung- der Prozesskette

Projektleitung: Klaus Zeché (bis 2021), Maureen Harms, Lisa v. Lienen

Autoren: Thorsten Pape, Klaus Zeché, Maureen Harms, Lisa v. Lienen, Matthias Radny

Datum: Januar 2023

AP1.1 Datenmanagement

Arbeitspakete: AP1.2 Prozess- und Produktsteuerung

AP1.3 Virtuelle AM Smart Factory und Wirtschaftlichkeit

AP1.4 Data Analytics, KI & ML

#### II.1.a Ausgangssituation und Zielsetzung

Entlang der horizontalen Wertschöpfungskette fallen eine Vielzahl von Daten an, die zu Beginn des Projektes in lokalen Datensilos für Bereiche außerhalb der jeweiligen vertikalen Prozesskette nicht oder nur schwer verfügbar gemacht werden konnten, bzw. mit hohem manuellen Aufwand in zentrale Datenbanken wie z.B. SAP eingepflegt wurden. Entsprechend waren übergreifende Datenanalysen zur Prozessoptimierung sowie Feedbackschleifen aus der Fertigung nur eingeschränkt möglich.

Das Hauptarbeitspaket 1 beschäftigte sich daher mit der schematischen Beschreibung und Modellierung des Industriellen Systems sowie der darauf aufbauenden Konzeption eines Systems zur Erhebung und Analyse produkt- und prozessbezogener Daten und Informationen zur Steuerung der Prozesskette.

HAP1 gliedert sich in vier Arbeitspakete mit folgenden spezifischen Zielsetzungen:

#### **AP1.1 Datenmanagement**

Darstellung der Prozesskette, Wert- und Datenströme und Nutzbarmachung der anfallenden Informationen entlang der Prozesskette.

#### **AP1.2 Prozess- und Produktsteuerung**

Analyse der technischen und kommerziellen Möglichkeiten zur Anpassung der Prozesskette und Definition der dazu notwendigen Daten. Konzeption Validierung von geeigneten Steuerungswerkzeugen zur späteren Verwertung.

#### **AP1.3 Virtuelle SMART Factory & Wirtschaftlichkeitsanalyse**

Aufbau und Validierung eines virtuellen Schattens des Prozessmodells zur Analyse und Vorhersage von Produktionskosten und Durchlaufzeiten auf Basis real erhobener Prozessdaten in Produktentwicklung und Fertigung.

**AP1.4 Data Analytics, KI & ML Methoden**

Aufbau von technologischen Grundlagen und Aufbereitung von Prozessdaten zum Training spezifischer neuronaler Netze für verschiedene Anwendungen z.B. der Verzugsvorhersage während des Druckprozess.

**II.1.b Lösungsweg**

Aufgrund der aufeinander aufbauenden Arbeitspakete wurde zunächst chronologisch und mit fortschreitendem Projekt parallel an den jeweiligen Aufgaben gearbeitet.

In den Arbeitspaketen wurde die Klärung folgender Fragestellungen aufeinander aufbauend geplant und bearbeitet:

- Aufnahme der Abläufe, Datenströme und verwendeten Werkzeuge entlang der horizontalen und vertikalen Prozesskette
- Nutzbarmachung und Strukturierung der gewonnenen Daten zur Analyse, flexiblen Anpassung und effizienten und teilweise automatisierten Steuerung der Prozesskette und Produkt- und Materialfluss.
- Untersuchung von übergeordneten und datenbankagnostischen Daten-Managementkonzepten in einer bestehenden Datenbank-Landschaft z.B. in Form einer semantischen Datenbank
- Untersuchung zur Digitalisierung von anfallender Dokumentation auf dem Shopfloor und Testlabors zur Integration in das Datenbanksystem
- Untersuchung und Entwicklung eines Kontrollsystems zur zentralen Steuerung Flüsse in der Fertigungskette
- Aufbau des virtuellen Modells (digitaler Schatten) der AM-Fabrik in einer allgemein beschreibenden Modellierungssprache (UML)
- Zuordnung zeitlicher und monetärer Parameter zur anschließenden Durchführung von Wirtschaftlichkeits- und Prozessanalysen und Bereitstellung eines Werkzeug zur Berechnung der voraussichtlichen Fertigungskosten in Abhängigkeit der Bauteilspezifikation
- Entwicklung der Grundlagen zur KI-gestützten Analyse von Prozessparametern und Bilddaten mittels neuronaler Netze und maschinellem Lernen.

Auf die in HAP1 gewonnenen Erkenntnisse aufbauend wurden in den nachfolgenden HAPs die Arbeitsabläufe entsprechend der modellierten Prozesskette validiert und ggf. weiter angepasst und optimiert.

## II.1.c HAP1 Ergebnisse

Aufgrund der engen Verflechtung der formulierten Fragestellungen der drei Arbeitspakete, werden die erzielten Ergebnisse von AP1.1, AP1.2, AP1.3 und AP1.4 in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt und nachfolgend beschrieben.

Jede Veränderung beginnt zum Einen mit der Definition der Vision und eines konkreten Ziels und zum Anderen mit einer möglichst detaillierten Analyse der aktuellen Ausgangssituation.

Dabei ist es oftmals sehr einfach, die Vision eines idealen SOLL-Zustandes in einem oder mehreren Zielen zu definieren. Die exakte Erfassung des IST-Zustandes (Value-Stream-Mapping) ist in der Regel mit einem großen zeitlichen Aufwand verbunden, besonders dann, wenn viele Akteure und bereits lange etablierte Prozessschritte eines gut ausbalancierten Systems von der Transformation "betroffen" sind. Um ein ganzheitliches Bild aus den verschiedenen Perspektiven der Stakeholder zu schaffen und in nachhaltige Lösungen für alle zu konvergieren, ist dieser Schritt aber unerlässlich.

Daher wurde in AP1.1 im ersten Schritt zunächst der Ist-Zustand, nach erfolgter Prozessqualifikation zunächst grob erfasst, mit den Gewerken verifiziert und in verschiedene Themen Cluster unterteilt. Sobald der grundlegende Ablaufplan (Abb.1.1) erfasst und das aktuelle IST mit dem aktuellen SOLL der Prozessvorschriften abgeglichen war, wurde ein detailliertes Value-Stream-Mapping durchgeführt und aus verschiedenen Perspektiven immer weiter aufgegliedert, bis sich ein umfassendes Bild der Arbeitsabläufe und deren Vernetzung, der dafür verwendeten Werkzeuge, Datenformate und Datenbanken ergab. Die Ergebnisse wurden in detaillierten Ablaufdiagrammen abgebildet und die verschiedenen Perspektiven in ein funktionelles UML/SYSPML Gesamtmodell abgebildet. Dieses Modell dient fortan als digitaler Zwilling der AM-Fabrik in Varel, mit dessen Hilfe erweiterte Analysen und alternative Konzepte aufgebaut, getestet und validiert werden. In der weiteren Verwertung wird dieses Modell als Teil des Industriellen Gesamtsystems der ASA durch die entsprechende Fachgruppe in das ARIS System überführt.

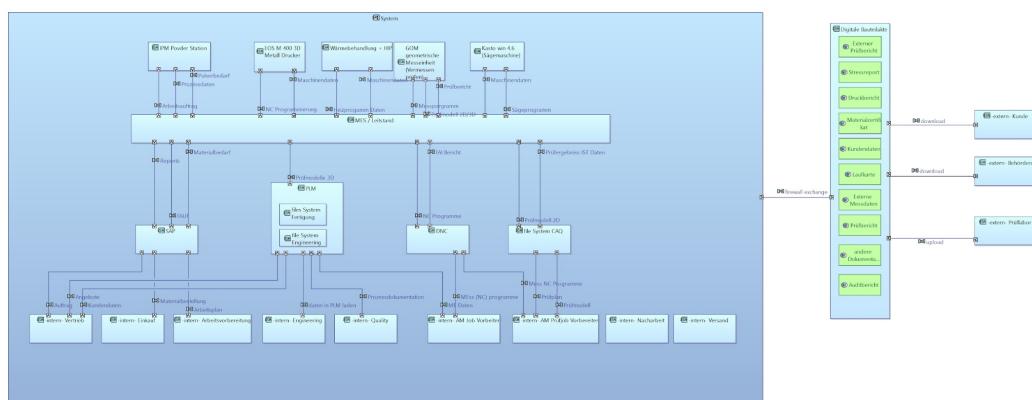


Abbildung 1.0 - Exemplarisches Beispiel digitaler Zwilling in Form eines SYSPML Modells

Im Ergebnis wurden insgesamt 41 Teilprozesse identifiziert und in die Themencluster Engineering/Entwicklung, Fertigungsvorbereitung, Fertigung und Nachbearbeitung eingesortiert. Der Qualitätssicherung wurde als Querschnittsthema kein eigener Cluster zugeordnet, sondern in den jeweiligen Arbeitsabläufen zentral verankert.

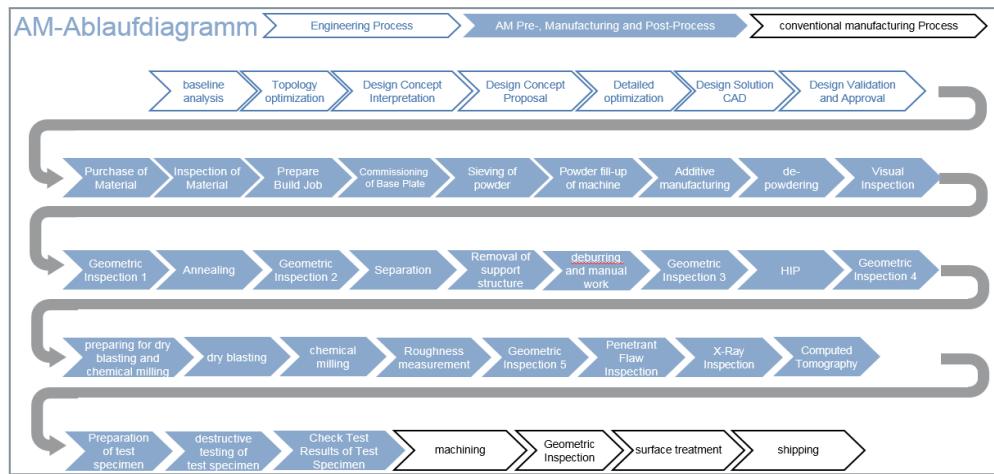


Abbildung 1.1 - Wesentliche Arbeitsschritte in der AM Prozesskette

In der Datenstromanalyse wurden Medienbrüche entlang des Datenstroms identifiziert, die zum einen auf inkompatible Datenformate als auch auf papierbasierte Vorgänge zurückzuführen sind. Um für den zukünftigen SOLL-Zustand die identifizierten Medienbrüche zu schließen und eine ganzheitliche Daten Kontinuität herzustellen wurden mit den verschiedenen Stakeholdern Interviews geführt und ein Anforderungskatalog (BRD) mit über 80 User Stories erarbeitet. Im Kern konnten aus den Benutzeranforderung wiederum die wichtigsten Handlungsfelder (Abb. 1.2) für HAP1 herausgearbeitet werden. Nicht überraschend war die einstimmige Forderung nach mehr Datenkontinuität, wohingegen AM spezifische Lücken im aktuellen PLM System erst durch die aktive Befragung der Endbenutzer detailliert zu Tage traten.

- Herstellung von Daten Kontinuität im Fertigungs- und Entwicklungsprozess (Enterprise Data Management System, PLM System, Model based Definition)
- Vernetzung und Analysefähigkeit von Daten, die im Engineering erzeugt, verarbeitet und in die Fertigungskette weitergegeben werden. ( Semantische Datenbanksysteme)
- Analyse und Navigationsfähigkeit durch alle Prozesse (Process Mining / Process Navigation)
- Automatisierung von Arbeitsabläufen in der Konstruktion und in der Fertigungssteuerung. (Low Code Workflow Modellierung, digitalisierung von Bauteiltaschen und Bauteilakten)

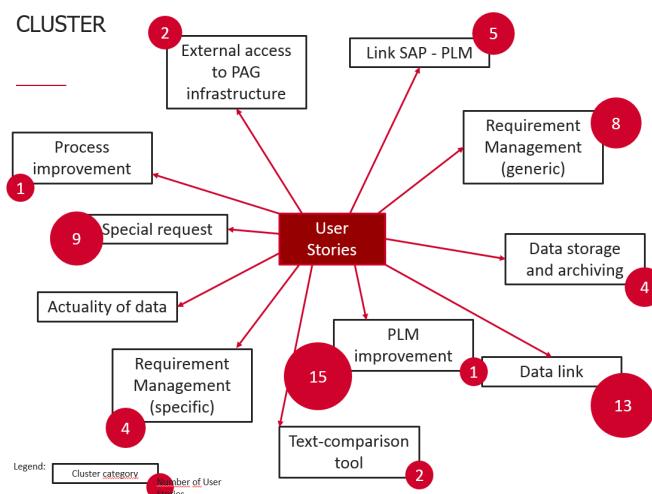


Abbildung 1.2 - Handlungsfelder aus Stakeholder Interviews

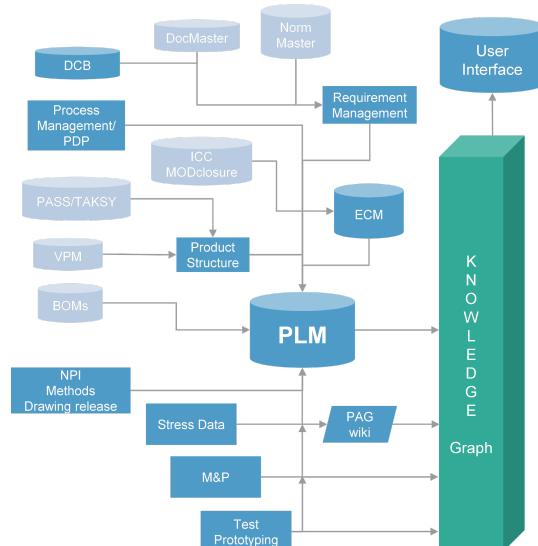
Zur Herstellung einer durchgängigen Datenstruktur, welche den Informationsaustausch zwischen den Gewerken in der Fertigung, als auch zwischen Fertigung und Konstruktion erleichtern, und ein echtes Co-Development ermöglichen soll wurden verschiedene Ansätze auf Leistungsfähigkeit und Umsetzbarkeit geprüft. Dabei wurde schnell klar, dass verfügbare kommerzielle Systeme zwar mit ausgereiften Rollen und Berechtigungskonzepten in der Benutzerverwaltung punkten können, aber aufgrund proprietärer Datenformate und dadurch entstehenden Datenbrüchen teilweise schlecht integrierbar sind, bzw. sehr teure Anpassungen gekauft werden müssen. Damit einhergehend zeigt sich ein weitreichender Verlust in der (Daten) Autonomie und Prozesshoheit des OEM, gerade in Verbindung mit speziellen Werkzeugen von Drittanbietern. Ob sich die monolithischen Geschäftsmodelle mancher kommerziellen Anbieter in einer sich zunehmend modularisierten Industrie, und dem Plattform Gedanken als Mittel der Wahl zu echtem Werkzeugagnostischen Co-Development weiter erfolgreich halten können, wird angezweifelt und bleibt mindestens abzuwarten.

Um mit "diAMpro" kompatibel zur aktuellen Datenstruktur der PAG/ASA zu bleiben, wurden im Folgenden zwei Ansätze verfolgt und prototypisch umgesetzt.

- Aufbau einer durchgängigen Datenstruktur und Verwaltung von Metadaten im existierenden PLM System zur verbesserten Kollaboration zwischen Entwicklung, Konstruktionsberatung und Auftragswesen mittels Model Based Definition Ansatz (MBD).
- Aufbau einer semantischen Datenbank am Beispiel von Stress Dossiers zur Validierung der Leistungsfähigkeit und Funktionalität dieser Technologie hinsichtlich der Integration beliebiger Datenstrukturen auf Metaebene und Verwendung als übergeordnetes Datenmanagementsystem.

### Übergeordnete Graphdatenbank / Knowledge Graph Technologie

Ein vielversprechender Ansatz eines skalierbaren Enterprise Data Management (EDM) Systems stellt die Knowledge-Graph-Technologie dar. Der übergeordnete Layer einer semantischen Meta-Datenbank zur transparenten Verwaltung eines (weit) verteilten Daten-Ablagesystems (Abb.1.3) bietet hohe Flexibilität gegenüber Veränderungen im System und erlaubt den parallelen und dezentralen Aufbau von Verwaltungsstrukturen.



**Abbildung 1.3 - Schematisches Schaubild einer gewachsenen verteilten Datenbank Landschaft mit einem Knowledgegraph als zentralen Meta-Data Layer.**

Um eine Graphdatenbank exemplarisch aufzubauen, wurde als Use-Case zunächst die Abbildung von Nachweisdokumenten (Stress Dossiers) in einer Graphdatenbank verfolgt, da hier bereits einheitlich strukturierte Dokumente vorliegen.

Der Aufbau der Anwendung (Abb. 1.4) erfolgte in mehreren Schritten.

1. Aufrufen der im PDF Format Vorliegenden Dokumente in der entsprechenden Datenbank
2. Überführung des Dokumenteninhalte in plain Text mit Python Dask
3. Definition und Auslesen von Schlüsselwörtern mittels einer RegEx (Regular Expression) Methode
4. Zwischenspeicherung der Temporären Metadaten in einer Mongo Datenbank
5. Definition der Übergeordneten Ontologie und Semantik des Nachweisdokument
6. Mapping der Schlüsselwörter in Objekte
7. Verbindung der Objekte über die semantischen Kanten
8. Definition der Suchanfragen im Knowledge Graph in der Query Sprache Cypher
9. Implementierung eines einfachen open Source Chatbot

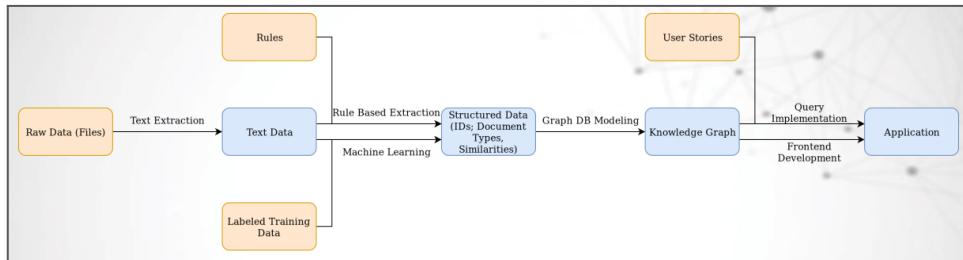


Abbildung 1.4 - Ablauf zur Erzeugung der Metadaten aus einem strukturierten Dokument und Überführung in eine Ontologie

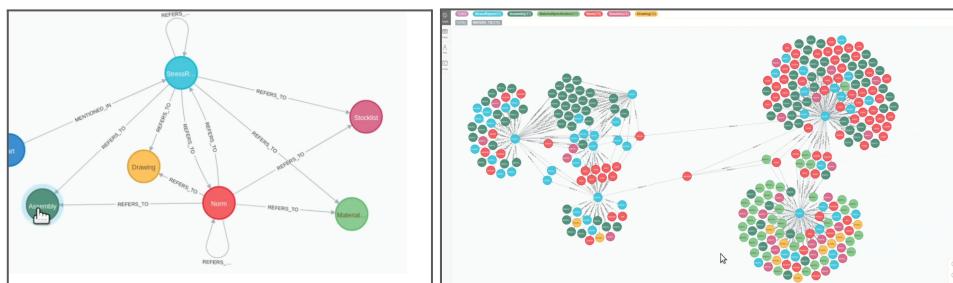


Abbildung 1.5 - Links: Ontologie des Dokuments, Rechts: Sich ergebender Knowledgegraph mehrerer über die Suchabfrage gefilterter Dokumente

Der hier untersuchte Usecase hat gezeigt, dass Metadaten vorhandene Dokumente und Datenstrukturen automatisiert abgeleitet und in einer semantischen Datenbank organisiert werden können. Ein wichtiger Achtungspunkt, der zunächst nicht Teil der Untersuchung war, ist hierbei frühzeitig die Data Governance des Unternehmens einzubinden und Regularien hinsichtlich Geheimhaltung und Datenethik (besonders bei personalisierten Datensätzen) zwingend zu berücksichtigen.

### Steuerung des Workflow

Im Rahmen des Workflowmanagement in der Fertigungskette (Vertrieb, AV, ME und Fertigung) wurden verschiedene Werkzeuge auf ihre Eignung hinsichtlich Skalierbarkeit, Durchgängigkeit und Verfügbarkeit untersucht und für einen PoC ausgewählt.

Die Anforderungen an eine im Projektzeitraum umsetzbare Lösung für das Workflowmanagement wurden dabei wie folgt definiert:

- Einheitlicher Datenbasis
- Benutzerverwaltung & Rollenkonzept
- Workflow Modellierung
- Sichtbarkeit des Arbeitsfortschritt
- Anwenderfreundlichkeit

- Dashboard Funktionalität
- **Verfügbarkeit**
- **Kurze Einarbeitungszeit**

(Aufgrund darin abgebildeter Firmeninterner und Personenbezogener Daten muss an dieser Stelle auf eine Abbildung des Systems verzichtet werden)

Für die kollaborative Steuerung der Bereiche Vertrieb, Arbeitsvorbereitung und Fertigung wurde als beste Lösung die bei der PAG für das IT Demand Management bereits verfügbare Plattform Atlassian Jira ausgewählt. Die spezifischen Arbeitsaufträge werden im System durch ein Vordefiniertes Template als digitale Bauteiltasche durch folge des Fortschrittslogik gesteuert:

- *Input Queue* = Freigegeben zur Bearbeitung
- *In Process* = In Bearbeitung
- *Kunden Aktion* = Waiting for Action / Order, Ordered, Lost
- *Done* = Aufgabe erledigt bzw. Bestellung eingegangen/ abgelehnt

Mit der Einführung der digitalen Bauteiltasche konnten folgende Problemstellungen erfolgreich gelöst werden:

- Rollendefinition
- Identifikation von Arbeitsinhalten
- Standardisierung von Vorlagen
- AdHoc Darstellung der Arbeitsschritte und ihres jeweiligen Status
- Sichtbarkeit über Abteilungsgrenzen
- Nachverfolgbarkeit durch autom. Erfassung der Historie jedes Vorgangs
- Sichere und Zusammengefasste Verwaltung relevanter Informationen
- Live Sicht über Arbeitsvorrat und Fertigstellungsgrad jeder Rolle und Aktion

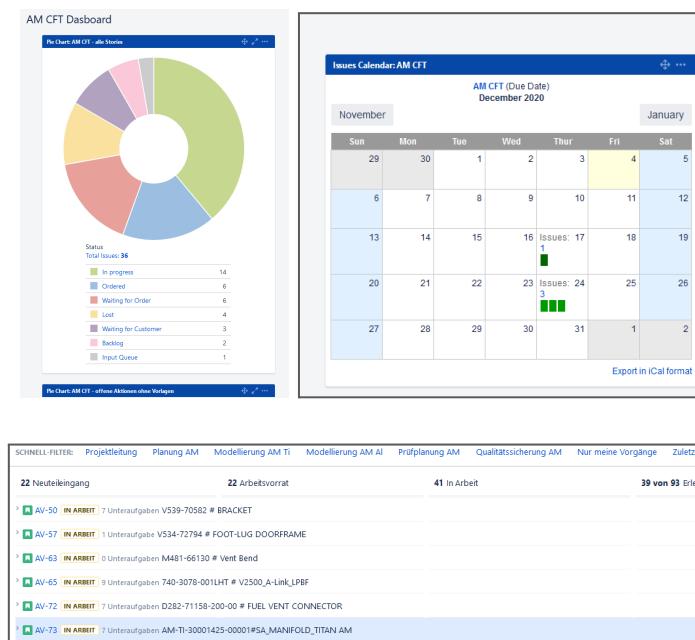


Abbildung 1.6 - Dashboard zur Übersicht und Status der Arbeitsaufträge

Zur durchgängigen Kollaboration zwischen Entwicklung und Konstruktionsberatung (Manufacturing Engineering) wurde als Grundlage zur Verwaltung von Kundendaten und Prozessdokumentation ein

Konzept für das existierende PLM (Windchill) System vorgestellt. Dabei war es wichtig, Zulassungsrelevante und damit archivierungspflichtige Daten wie z.B. die Fertigungsprotokolle und Maschinendaten aus der Fertigung automatisch zu erfassen und in die bauteilbezogene digitale Bauteilakte im PLM System einzupflegen. Hierfür wurde der Prototyp des AM-DNC Systems (Abb. 1.7) entwickelt und im Betrieb getestet.

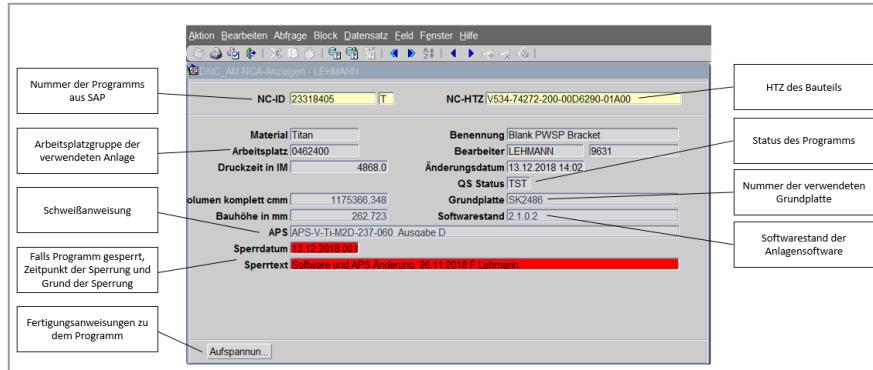


Abbildung 1.7 - Benutzeroberfläche AM-DNC System (Prototyp)

Die Verwaltung und Verteilung der Metadaten kann dabei über das bereits vorgestellte Konzept eines übergeordneten EDM Systems realisiert werden.

#### Wirtschaftlichkeitsanalyse

Mit der Einführung des Workflowmanagement und dem Ablaufdiagramm konnte im nächsten Schritt ein Berechnungsmodell entwickelt werden, welches die Durchlaufzeit der Aufträge erfassen kann und ins Verhältnis zur gefertigten Anzahl setzt. Die Basisversion des Kostenmodells wurde im Folgenden noch um eine Schnittstelle erweitert, welche die realen Laufzeiten der Systeme mit den angenommenen Werten vergleicht und ggf. justiert. Um die Genauigkeit der Laufzeitvorhersage zu erhöhen, wurden ebenfalls die unterschiedlichen Bauhöhen pro angesteuerten Laser als Parameter erfasst und an einer EOS M400-4 Anlage verifiziert. Die Vorhersagegenauigkeit der realen Produktionskosten liegt aktuell in einem Bereich von +- 8%

#### Virtuelle AM Factory und Additive Manufacturing Control System

Nachdem die Grundlage zur Datenerfassung und dem Workflowmanagement gelegt waren, wurde am Feinplanungstool zur Steuerung und Optimierung der Stillstandzeiten der Produktionskette gearbeitet. Als Ergebnis wurde das Additive Manufacturing Control System (AMP) vorgestellt.

Aus der Ausleitung der Planungsdaten kann damit die Arbeitsplatzauslastung detailliert dargestellt und durch die Arbeitsvorbereitung optimiert und priorisiert werden (Abb. 1.8)

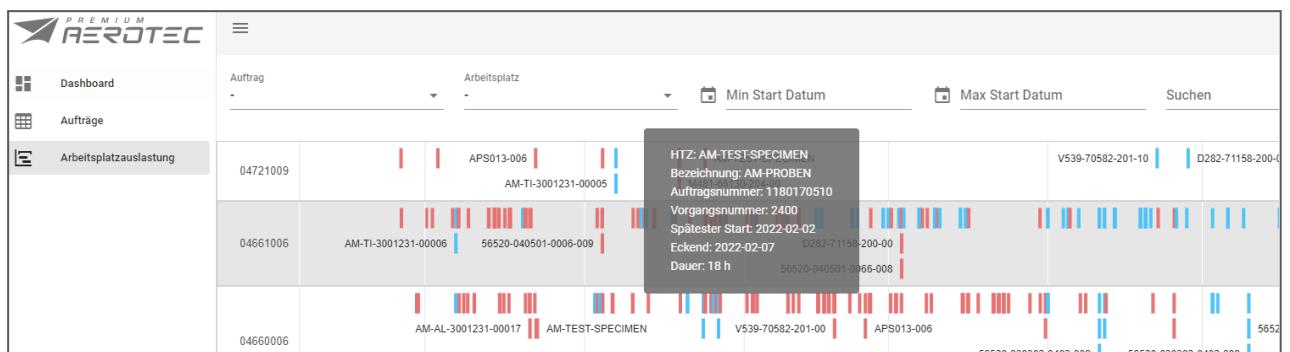


Abbildung 1.8: AMP Oberfläche - Arbeitsplatzauslastung der Gewerke

Die Daten werden vom AMP aus dem PAG SAP System ausgeleitet, gefiltert und in sehr kurzen Zeitintervallen aktualisiert. Daten zu bereits ausgelösten Fertigungsaufträgen (FAUF) sowie den Planaufträgen (PLAUF) werden ausgewertet.

Zeitgleich wurde die digitale Bauteiltasche mit der Darstellung von Informationen zum Materialfluss von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen (RHB) erweitert, um diese ebenfalls in das Feinplanungstool weiterzureichen.

Im letzten Schritt wurden die Informationen aus den beschriebenen spezifischen System im Varel Auftragsmanagementsystem (VAM) als Gesamtübersicht (Abb.1.9) zusammengefasst.

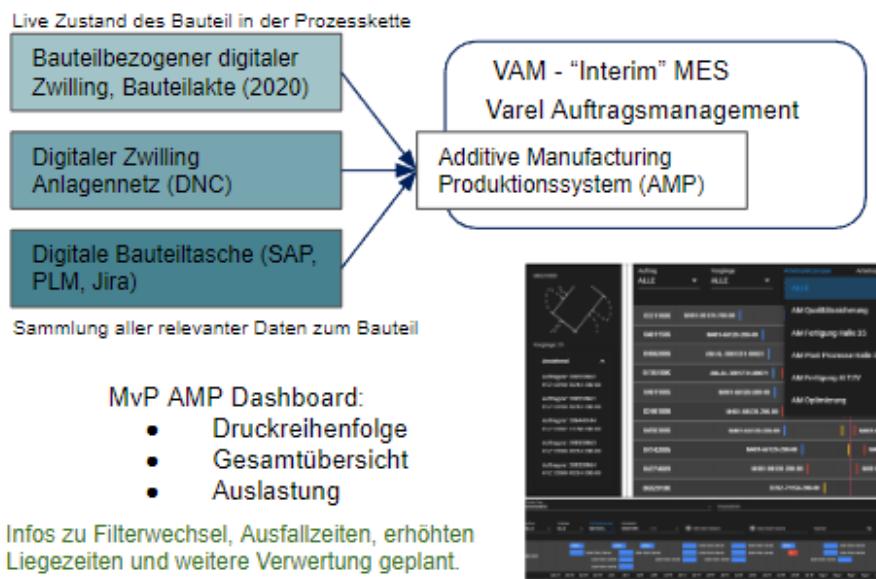
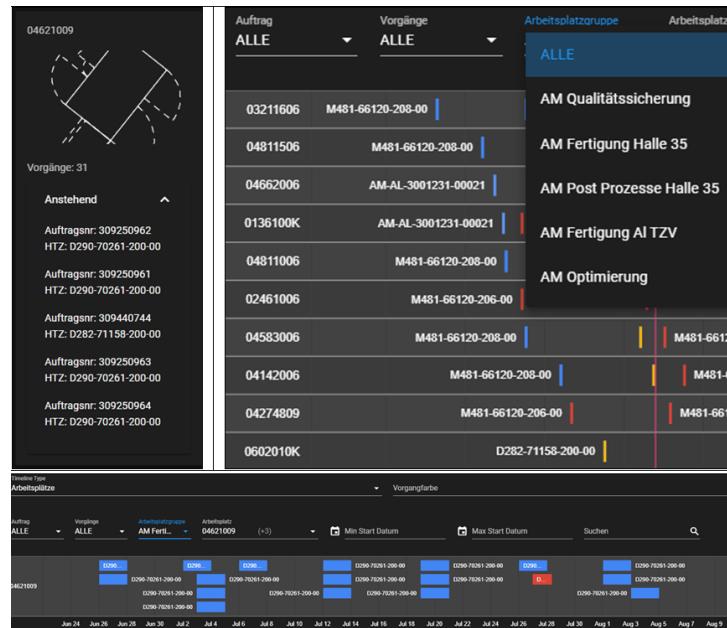


Abbildung 1.9 - VAM / Varel 3D-Druck Auftragsmanagement

### Automatische Digitalisierung von Prüfberichten (PoC)

Speziell auf dem Shopfloor gibt es immer wieder Antritte, Checklisten und Bauteil- bzw. Baugruppenspezifische Dokumentation von Anfang an digital zu führen. Ein gängiger Ansatz der Papierlosen Fertigung ist die Einführung und Verwendung von Tablets. Dabei stellt sich oftmals heraus, dass Papier in den Abläufen des Shopfloors einfacher und effizienter zu handhaben ist.

Um die Vorteile beider Welten (Papier- und Papierlos) zu nutzen, wurde daher ein Ansatz getestet, bei dem mittels Texterkennung und einem Machine Learning Algorithmus Dokumente automatisch digitalisiert und in die jeweiligen Datenbanksysteme eingespielt werden können.

Mit dem Ziel, den manuellen Aufwand sowie potentielle Fehlerquellen bei der Übertragung von Daten auf Papier ins SAP System zu reduzieren, wurde dieser Ansatz an der automatisierten Digitalisierung von Prüfberichten durchgespielt.

Die Anforderungen an eine entsprechende Applikation wurden dabei wie folgt definiert:

- Drag&Drop Frontend
- Prüfdarstellung Original und ausgelesenen Scan
- Korrekturmöglichkeit
- Auslesen von Fließtext und Tabellen
- Testphase abgeschlossen
- Dateninterface SAP Prototyp vorhanden

Die zugrundeliegende Architektur des Systems (Abb. 1.10) wurde in Zusammenarbeit mit APWORKS erarbeitet und umgesetzt.

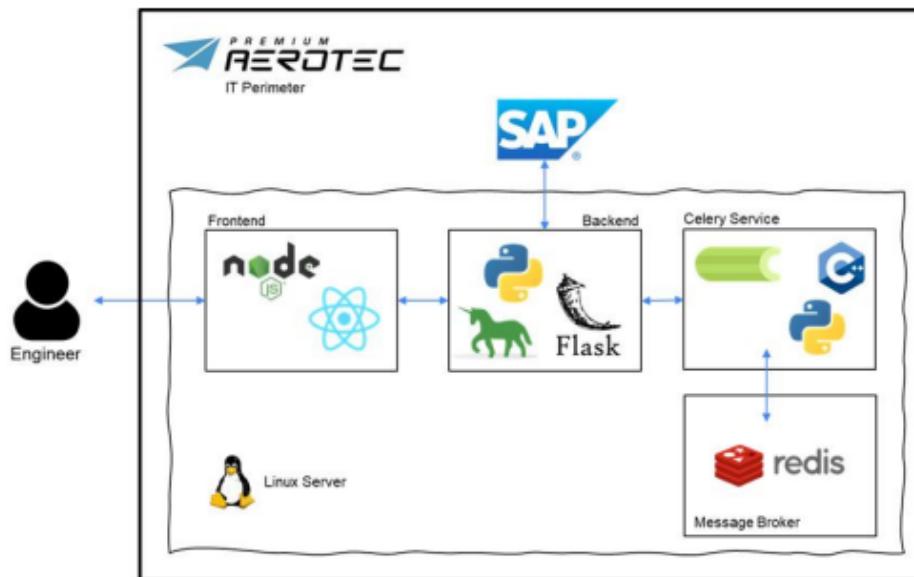


Abbildung 1.10 - Einlesen und Speichern von Information aus Prüfberichten

Eine wichtige Anforderung ist dabei, dass die erfassten Daten manuell geprüft und ggf. korrigiert werden können. Dafür wurde eine entsprechende Benutzeroberfläche (Abb.1.11) entwickelt und mit Beteiligung der Endbenutzer auf Anwendbarkeit getestet.

Report 1  
1154442027\_PI21495079.pdf  
Supplier: BKW

[View](#) [Edit](#)

[Detail](#) [Submit](#)

Test 1 - Undefined

Test 2 - Undefined

Test 3 - Undefined

Test 4 - Undefined

	Belastungsgrad Load factor	Eindrucklage Location of Indentation	EW_1	EW_2	EW_3	MW	
Soll / Required						>= 55	
ID: 612-BH1-1	HBW 2,5/62,5	Oberfläche / surface	105	105	105	105	

	Belastungsgrad Load factor	Eindrucklage Location of Indentation	EW.3	
Soll / Required				>= 55
ID: 612-BH1-1	HBW 2,5/62,5	Oberfläche / surface	105	105

Abbildung 1.11 - Benutzeroberfläche Prüfbericht Anwendung

Mit diesem Ansatz konnte der Aufwand bei der Überführung papierbasierter Informationen signifikant gesenkt werden. Ein weiterer Vorteil ist die deutliche Reduktion von benötigten Datenspeicher, weil anstatt der Dokumente nur mehr die darin enthaltenen Daten direkt in den Datenbanktabellen abgelegt werden und damit auch maschinenlesbar und somit sehr einfach weiterverarbeitbar sind.

Eine Übertragung dieses Konzepts soll in weiterer Verwertung geprüft werden.

## II.1.d Zusammenfassung

Zusammenfassend werden die Arbeitsschritte des HAP1 in chronologischer Reihenfolge nochmals dargestellt.

Jahr	Ergebnis
2018-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ablaufdiagramm der aktuellen AM Prozesskette</li> <li>• Erstellung eines Katalogs mit den technischen und funktionalen Anforderungen an die digitale AM Prozesskette</li> <li>• Systemdiagramm der berührten IT Systeme</li> </ul>
2019-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung eines Lösungskonzepts für den Bereich Engineering und dessen zukünftige prozessuale Datenverwaltung</li> <li>• Identifikation der wesentlichen Anforderungen</li> <li>• Aufbau und Testvorbereitung eines Knowledge Graph</li> </ul>

2019-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtung der am Markt verfügbaren Software Tools und IT-Systeme, in Verbindung mit den vorhandenen PAG Systemen, auf ihre Eignung zur Implementierung als „Digitales Rückgrat“</li> <li>• Entwicklung, Aufbau und erste Validierungsschritte der Technologie Knowledge Graph</li> </ul>
2020-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufbau und Inbetriebnahme einer durchgängigen digitalen Prozesskette</li> <li>• Entwicklung der digitalen Bauteiltasche</li> <li>• Ermittlung von Einflussfaktoren für die Baujob Auslegung</li> </ul>
2020-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weiterentwicklung der durchgängigen digitalen Prozesskette</li> <li>• Weiterentwicklung der digitalen Bauteiltasche</li> <li>• Aufbau eines virtuellen digitalen Zwilling</li> </ul>
2021-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toolentwicklung zur Verwaltung von Prüfdaten</li> <li>• Digitale Bauteiltasche: Datenbestimmung für effiziente Steuerung der Prozesskette</li> <li>• Virtueller digitaler Zwilling der Fabrik: Erweiterung des Anlagen Netzwerks um weitere Maschinen</li> </ul>
2021-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erster Prototyp eines Tools für Verwaltung von Prüfdaten</li> <li>• Virtueller digitaler Zwilling der Fabrik: Entwicklung eines Feinplanungstools zur optimierten Steuerung und Einteilung der Arbeiten an den unterschiedlichen Gewerken entlang der AM-Prozesskette</li> </ul>
2022-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenmanagement Konzept für papierlose Fertigung über PLM Windchill (alternative MES)</li> <li>• Arbeitsplan Generator Prototyp</li> <li>• SAP Prüfdaten Verwaltung</li> <li>• Feinplanungstool Datenaufbereitung (APM)</li> </ul>
2022-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AMP System in VAM integriert</li> <li>• UML/SYML Ablaufmodell der AM Factory zur Prozesssimulation und als Grundlage zur weiteren Verwertung im ARIS Projekt der Airbus Aerostructure GmbH</li> </ul>

## II.2 HAP2 - Materialfluss

Projektleitung:	Alexander Hemmen
Autoren:	Alexander Hemmen
Datum:	Juni 2021
	AP2.1 Automatisierte Pulver Prozessierung
Arbeitspakete:	AP2.2 Automatisierte Handhabungssysteme
	AP2.3 Reale AM Prozess Zelle

### II.2.a Ausgangssituation und Zielsetzung

Das Hauptarbeitspaket 2 beschäftigte sich mit der experimentellen Untersuchung der Material- und Produktströme innerhalb der AM-Fabrik und der anschließenden Validierung der Konzepte.

Das Hauptarbeitspaket selbst gliedert sich in drei Unterarbeitspakete, in denen die Klärung folgender Fragestellungen aufgeplant und bearbeitet wurden:

#### AP2.1. Automatisierte Pulverprozessierung

Konzeptionierung und Erprobung notwendiger Anlagenkomponenten einer zentralen Pulverförderung zur Erarbeitung einer skalierbaren Lösung für eine automatisierte Pulverprozessierung.

#### AP2.2 Automatisierte Handhabungssysteme für Bauteile

Entwicklung und Erprobung von Lösungen für die automatisierte Handhabung von filigranen und endkonturnahen AM-Bauteilen.

#### AP2.3 Reale AM Prozesskette

Aufbau und Test einer repräsentativen Demonstrator AM-Prozess Zelle mit den wesentlichen Teilschritten inklusive der Pre- und Post-Prozesse sowie Verknüpfung der Einzelprozesse in einer AM-Zelle.

### II.2.b Lösungsweg

In den Arbeitspaketen wurde die Klärung folgender Fragestellungen aufeinander aufbauend geplant und bearbeitet:

- Zusammenspiel verschiedener Anlagenkomponenten einer automatisierten zentralen Pulverförderung zur realisierung einer flexibel skalierbaren Serienproduktion
- Zeitliche Auswirkungen der Förderanlage auf die Pulver Qualität und zeitliche Auswirkungen der Pulverförderung auf die Förderanlage (Teststrecke)
- Automatische Handhabung von filigranen und Endkonturnahen Bauteilen
- Automatische Bauteil Separation mit möglichst wenig Aufwand in der Wiederaufbereitung der Substratplatten bzw. Direkt-Wieder-Aufdruck, ohne Aufbereitung
- Automatisches Rüsten der Anlagen z.B. durch Einführung von Nullpunkt Spannsystemen
- Praktische Demonstration und Validierung der entwickelten Automatisierungskonzepte in der AM-Prozess Zelle Varel
- Konzepte zur automatischen Support Entfernung

## II.2.c HAP2 Ergebnisse

### II.2.c.1 AP2.1 Automatisierte Pulverprozeesierung

Für Titan und Aluminium Werkstoffe wurden verschiedene Varianten zur Pulverförderung unter Berücksichtigung der Prozessvorgaben aus der Luftfahrt erarbeitet und hinsichtlich deren Eignung, Qualität sowie Effektivität untersucht.

Im Technikum der Firma IB Verfahrens- und Anlagentechnik wurde eine Teststrecke für einen repräsentativen Pulver Kreislauf aufgebaut und 3.000 Pulverförderversuche für Aluminium sowie 3.000 Pulverförderversuche für Titan durchgeführt.

Gemäß der Pulver Spezifikation ergibt sich für die Partikelgrößenverteilung eine untere zulässige Grenze von  $D_{10}>20 \mu\text{m}$ . Die nach den Förderversuchen ermittelten  $D_{10}$  und  $D_{90}$  Messwerte sind in der folgenden Abbildung bezüglich der entsprechenden Grenzwerte aufgetragen.

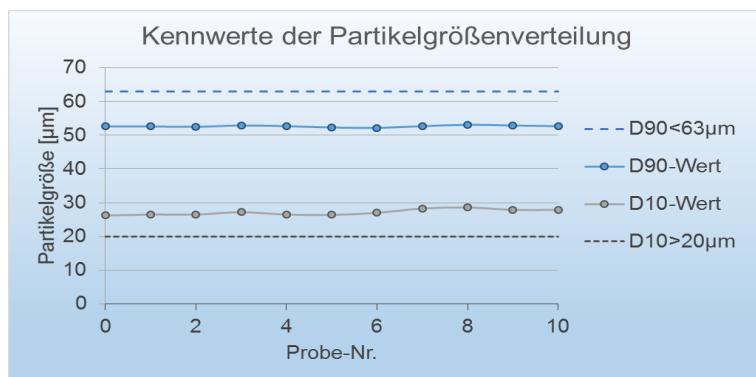


Abbildung 2.1.1: Kennwerte der Partikelgrößenverteilung

Der obere Grenzwert wird von den ermittelten  $D_{90}$ -Messwerten mit Werten  $<54 \mu\text{m}$  unterschritten. Die ermittelten  $D_{10}$  Messwerte liegen mit Werten  $> 26 \mu\text{m}$  oberhalb des unteren Grenzwertes. Somit liegen die beiden charakteristischen Kennwerte der Partikelgrößenverteilung gemäß der Pulver Spezifikation immer innerhalb der zulässigen Grenzen im Bereich von  $20 \mu\text{m}$  bis  $63 \mu\text{m}$ .

Analysen bzgl. der registrierten Verfärbungen des geförderten Pulvers infolge ansteigender Förderzyklen ergaben, dass die Oberflächenveränderung der Partikel in Folge der Kreisförderung den Reflexionsgrad des einfallenden Lichtes ändert und so der Grund für die Farbänderung ist. In der folgenden Abbildung ist der Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit von Neu- zu Altpulver deutlich zu erkennen.

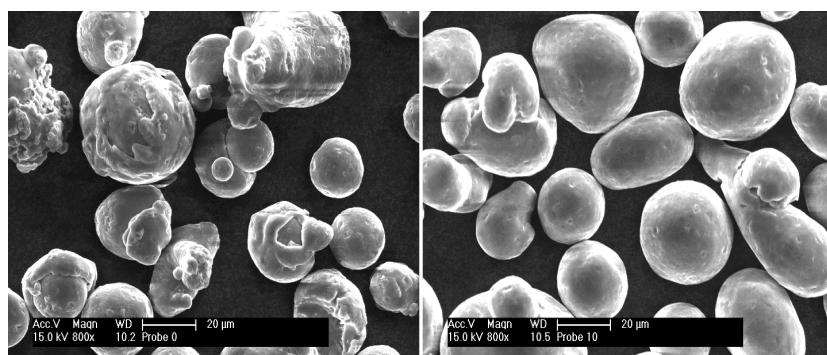


Abbildung 2.1.2: REM-Aufnahmen der Pulverpartikel aus den Langzeitförderversuchen (links Neupulver und rechts nach 1000 Förderzyklen)

Durch die durchgeführten Auswertungen der Pulverpartikelformänderungen bezogen auf die Zyklenanzahl wurden Vorgaben für ein optimales Zumischungsverhältnis von Neu- zu Altpulver abgeleitet. Mit diesen können jetzt Inhomogenitäten des Fördergutes durch sich ändernde Fließfähigkeiten automatisiert ausgeglichen werden und Störungen im Pulverstrom vermieden werden.

Bei den durchgeführten Prozessierungsversuchen auf den industriellen Versuchsanlagen wurden bei Titanpulver eine höhere Abnutzungsscheinungen und größere Herausforderungen bzgl. der maximalen Pulverförderhöhe erwartet. Dies hat sich jedoch nicht bestätigt.

Parallel zu den Laboruntersuchungen wurden die Förder- und Steuerelemente einer zweiten industriellen zentralen Pulverversorgungsanlage für Aluminiumpulver demontiert, analysiert und hinsichtlich Verschleißerscheinungen untersucht. Nach einem Einsatzzeitraum von zwei Jahren waren auch hier keine merklichen Abnutzungsscheinungen im Rohrleitungssystem, den Weichen oder an den Ventilen zu erkennen.

Die nachstehende Abbildung zeigt das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema [R&I] von den durchgeführten Prozessierungsversuchen mit installierter Steuerung.

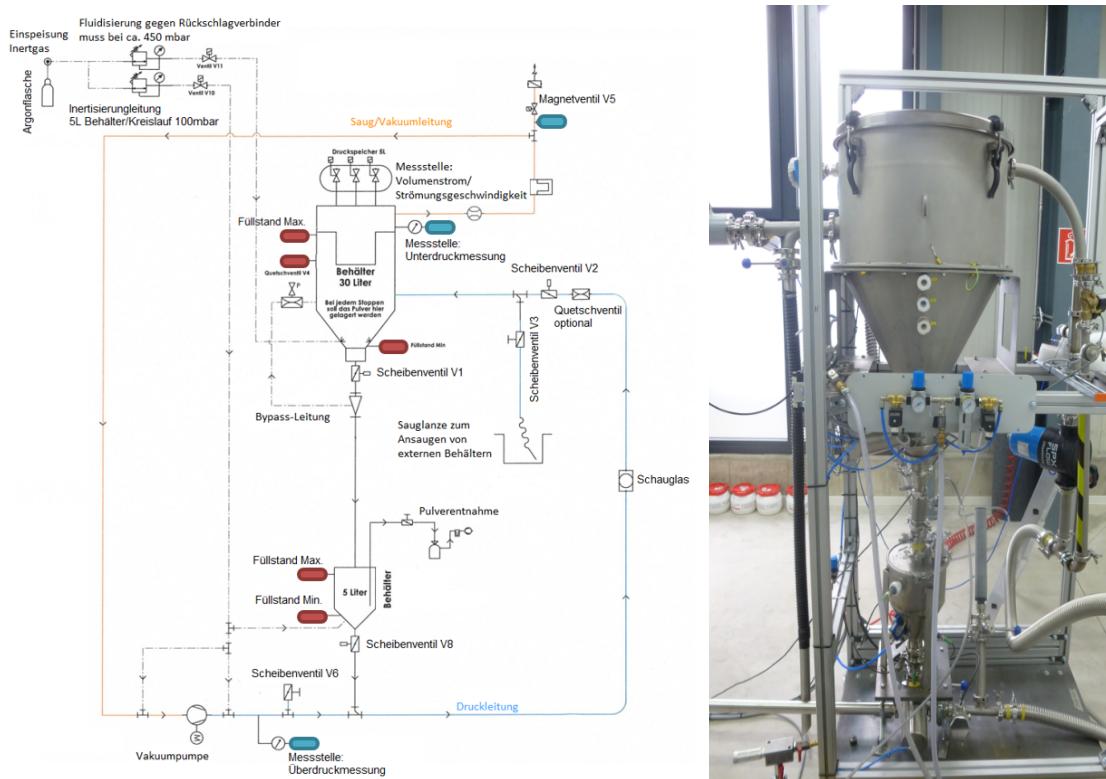


Abbildung HAP2.1.3 R&I-Fließschema (links) und realer Versuchsaufbau zur automatisierten Pulverförderung mit zusätzlichen Druckluft-Turbinenvibrator (rechts)

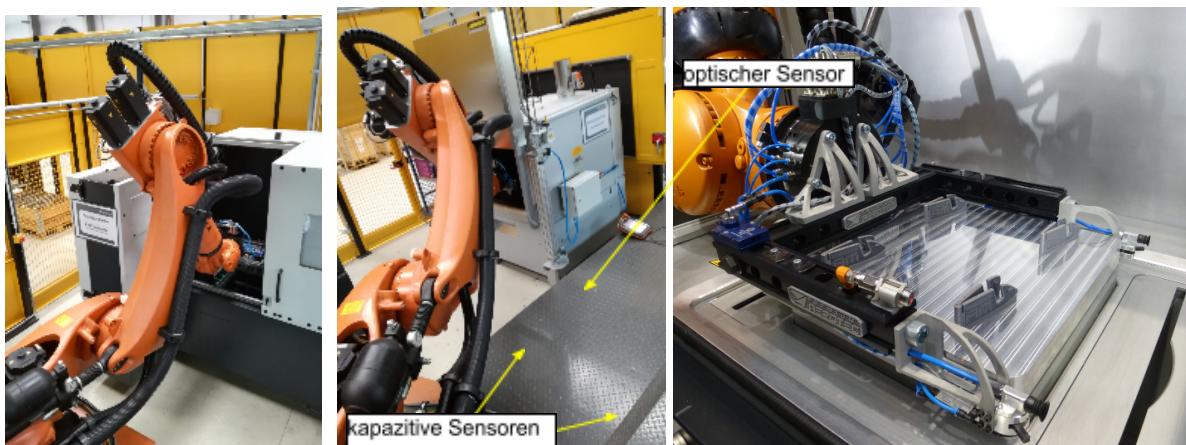
Diese gesammelten Erkenntnisse sowie der durchgeführte Vergleich zu alternativen Pulverfördersystemen lassen den Schluss zu, dass die Lösung zur optimalen Pulverförderung gefunden werden konnte. Des Weiteren konnten die notwendigen Positionen sowie Sensorarten für eine prozesssichere Pulver-Prozessierung identifiziert, erprobt und schließlich dokumentiert werden.

## II.2.c.2 AP 2.2 Automatisierte Handhabungssysteme für Bauteile

Zur Durchführung von Versuchen zur automatischen Handhabung von Bauteilen in der Fertigungskette wurde ein Handhabungsendeffektor entwickelt und gefertigt, welcher mittels kapazitiver Sensoren eine sichere Zustandserkennung (beladen ja/nein) detektiert sowie durch optische Distanzsensoren der geplante Zielfahrweg auf mögliche Störgegenstände absucht.

In einer automatisierten Versuchsreihe über einen Zeitraum >500h wurde der Endeffektor sukzessive in unterschiedlichen Störszenarien auf Funktionalität geprüft und modifiziert. Die erreichte Prozesssicherheit konnte verifiziert werden, so dass das Funktionsprinzip zur optimalen Handhabung im nächsten Schritt industriell verwertet werden kann.

Die folgenden Abbildungen zeigen den entwickelten Handhabungsendeffektor in seiner letzten Ausbaustufe in Aktion am Wärmebehandlungsofen und der Nachbehandlung.



**Abbildung 2.2.1: Automatisiertes Rüsten mittels Handhabung Endeffektor mit ausgewählter Sensorik**

Das in AP2.1 gesetzte Ziel der Automatisierung der Handhabungssysteme konnte in der realen Prozesszelle auf der Testfläche am TZV in Varel validiert und erfolgreich abgeschlossen werden.

Die wesentlichen Erkenntnisse wurden in einem Lastenheft für die automatisierte AM-Fertigung dokumentiert.

In der derzeitigen Additiven Fertigung für Titanbauteile wurde bisher noch kein einheitliches Positionier- und Spannsystem der Bauplatten eingesetzt. Die im Prozess auftretenden Spannungen und Temperaturunterschiede sind für aktuell verfügbare Spannsysteme noch zu hoch.

Um auftretende Effekte zur Auslegung eines Spannsystems analysieren zu können, wurden spezielle Cantilever-Prüfkörper erstellt, gedruckt und optisch dreidimensional vermessen. Die Messdaten wurden anschließend mittels Skript automatisiert ausgewertet. Mit den erzeugten Daten wurde anschließend eine FEM-Simulation kalibriert, mit der die Verformungen und auftretenden Kräfte während des Aufheizprozesses an der Substratplatte innerhalb des Druckraumes nun im Voraus berechnet werden können.

Mit dem übergeordneten Ziel, die digital generierten Daten aus dem vorhergehenden Arbeitsgang für den Nachfolgeprozess der additiven Titanfertigung, durch Herstellen der ähnlichen Ausgangsbedingungen, noch vielfältiger und intelligenter nutzen zu können, wurde ein neues Positioniersystem entwickelt und getestet. Mit diesem neuen System wurde die Reproduzierbarkeit und Formtreue der Bauteile erhöht und

gleichzeitig die Fertigungstoleranzen halbiert (Abb.2.2.3) sowie der Positionsinformationserhalt für die Folgeprozesse sichergestellt.

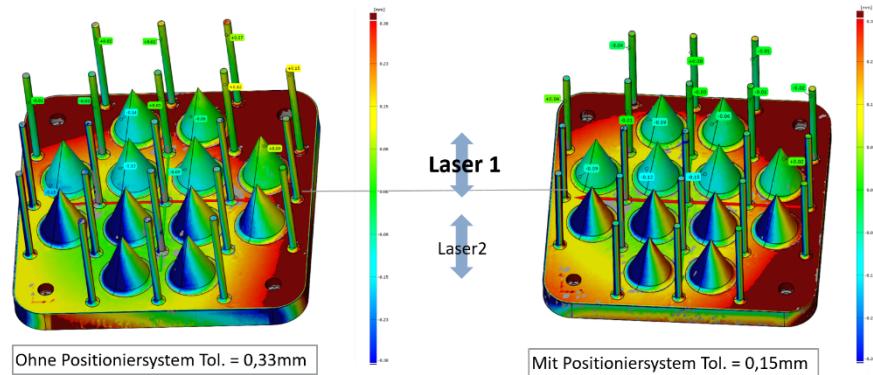


Abbildung 2.2.3: Reduzierte Fertigungstoleranzen durch innovatives HT-Positioniersystem

Die digital generierten Daten aus dem jeweiligen Arbeitsgang können nun ganzheitlich für den Nachfolgeprozess genutzt werden, da die Positionsinformation nun dauerhaft aufgenommen und einem spezifischen Bauteil zugeordnet werden kann.

Des Weiteren wurde die Programmierung der Bauteilseparation entsprechend angepasst, so dass durch Selbstregelung die Schnittparameter entsprechend Bauteildicke und Anzahl von der Säge selbstständig automatisiert nachgestellt werden.

Die erzeugten Separationsschnittflächen wurden mit einem automatisierten optischen System vermessen, mittels erstellten Skript ausgewertet und zur Verifizierung von Justierversuchen verwendet.

Nach dem Sägeschritt verlieren die abgetrennten Bauteile derzeit noch ihre bis dahin eindeutig definierte Position, fallen in einen Auffangbehälter und werden so zu Schüttgut. Diesbezüglich wurden Konzepte, welche die Positionsinformation der Bauteile nach der Separierung bewahren, detailliert ausgearbeitet.

Die derzeitige Positionierung der Substratplatten sowie die Lage der Bauteile in Abhängigkeit zur Drahtführung in der EDM-Anlage führten zu sich wiederholenden Prozessunterbrechungen des automatisierten Schnittprozesses. Hierfür wurde eine speziell für den AM-Serienprozess entwickelte EDM-Anlage mit innovativen Positionier- und Schneidkonzept näher untersucht und anhand definierter Titan-Testplatten auf automatisierte Selbstregelung geprüft. Verfärbungen am Bauteil und ein Verlaufen des Drahtes in die Substratplatte führten zu dem Schluss, dass noch weitreichende Anpassungen notwendig sind. Diesbezüglich wurden Lösungsvorschläge erarbeitet, welche in einer zukünftigen Ausbaustufe der Anlage umgesetzt werden [diAMpro-Technischer\_Z-Bericht-HAP2\_Z8].

### II.2.c.3 AP2.3 Untersuchungen in der realen AM Testzelle

Die Auslegung der AM-Zelle wurde innerhalb des Berichtszeitraumes abgeschlossen und die geplanten Maschinen für die additive Fertigung, inklusive der automatisierten Komponenten in dem Post-Processing-Bereich, wurden in einer Versuchszelle (Abb. 2.3.1) am TZV aufgestellt.

Ein vollautomatisierter Ablauf beginnend von der Aufnahme einer Substratplatte aus dem Bereitstellungsmagazin, der additiven Bauteilgenerierung und Pulverentfernung, sowie QS, Wärmebehandlung und schließlich Bauteilseparierung, wurden in einem geschlossenen, realen Ablauf demonstriert.

Die Anlagen sind in den übergeordneten Leitstand eingebunden und können von dort ihre Aufträge erhalten. Einzelprozessschritte sind über den Leitstand aufruf- und initialisierbar und mehrere komplett automatisierte Abläufe wurden erfolgreich absolviert. Die Sicherheitszelle im Post-Processing-Bereich wurde fertiggestellt und mittels vordefinierter Testszenarien auf Funktionalität im Störfall geprüft. Die automatisierte Abarbeitung von Fertigungsaufträgen wurde erfolgreich getestet und demonstriert.



**Abbildung 2.3.1: Verknüpfung der Einzelprozesse in einer Zelle und Funktionstest / rechts 3D Vermessung**

Das erarbeitete durchgängige Nullpunktspannsystem wurde in die AM-Prozesskette integriert, so dass die Fläche der Grundplatte nun zu 100% nutzbar ist.

Die Identifikation der Baujobs erfolgt nun automatisiert über applizierte DataMatrix-Codes an den Grundplatten, welche über den Scanner am Endeffektor ausgelesen und an den Leitstand übertragen werden.

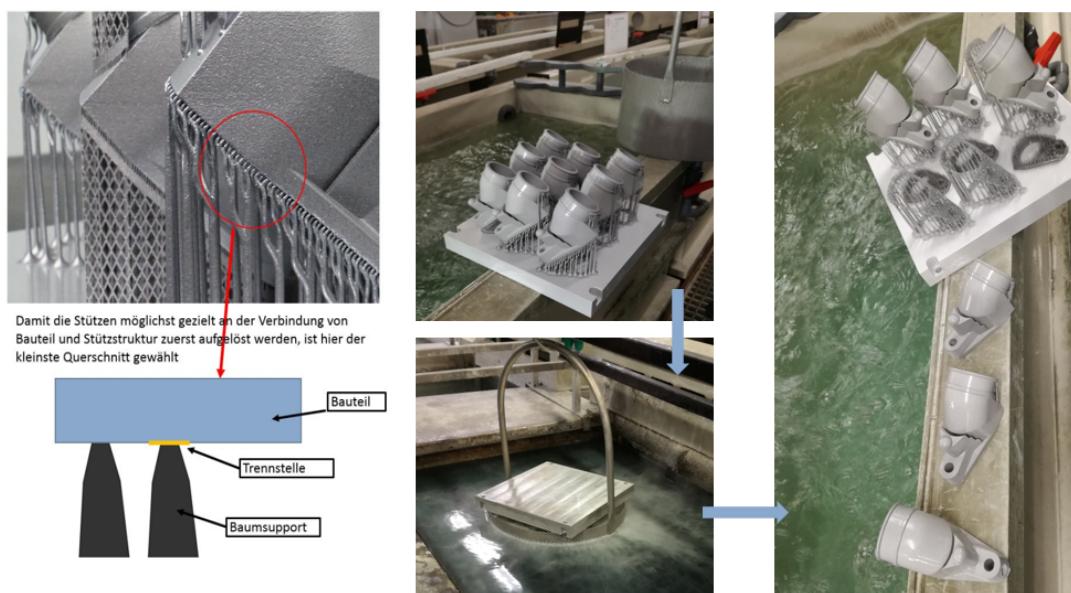
Die Prozessdaten aus der additiven Versuchsanlage zur automatisierten additiven Fertigung werden gesammelt und in entsprechenden Datenbanken vom Leitstand bereitgestellt.

Bezüglich des Reinigungsergebnisses wurden erste Versuche zur Verbesserung und Erfassung der Qualität der Zwischen- und Endreinigung mit unterschiedlichen Verfahren (Ultraschall, Vibrationsreinigung, Trockeneisstrahlen,...) durchgeführt. Das jeweilige Reinigungsergebnis wurde entsprechend analysiert und bewertet. Darüber hinaus wurde ein System zum automatisierten Strahlen von AM-Bauteilen auf der Grundplatte untersucht. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass Pulveranhäufungen an den Bauteilloberflächen damit sehr gut entfernt werden können, der Prozess reproduzierbar ist und somit für eine Serienfertigung geeignet ist. In enger Abstimmung mit HAP5 (automatisiertem Design) wurde die automatisierte Erzeugung von geeigneter Supportgeometrie erarbeitet, welche die Qualität des Reinigungsergebnis nochmal verbessern konnte.

Bei der automatisierten Separation der Titanbauteilen von der Grundplatte können durch zykluszeitoptimierung Schnittparameter sehr heiße Späne entstehen, welche einen Metallbrand in der Anlage auslösen könnten. Diesbezüglich wurden automatisierte Löschsysteme konzeptionell untersucht, welches selbstständig den Gefahrenbereich überwacht und gegebenenfalls autonom auslöst. Die Möglichkeit zur Einbindung dieses Systems in den automatisierten Ablauf sowie Auswertung der

aufgenommenen Temperaturdaten wurde geprüft. Die erarbeitete Lösung steht zur Implementierung bereit [diAMpro-HJB-2-2019-HAP2].

Bei den additiven Pulverbettverfahren sind überwiegend Supportstrukturen notwendig, welche das Bauteil während des Aufbauprozess in Position halten und auch die Wärme aus dem Schmelzprozess abführen. Metallische Supportstrukturen mussten bisher noch in einem manuellen Arbeitsgang abgebrochen werden. Diesbezüglich wurde ein alternativer Lösungsansatz erarbeitet und getestet. Durch Ätzprozesse, die bei dem Prozessschritt des chemischen Fräsen durchgeführt werden, können auch die Supportstrukturen "automatisiert" getrennt werden. Die feingliedrigen Gitterstrukturen fallen ab, verbleiben im Bad und lösen sich dann vollständig in diesem auf. Durch die Kombination von Baumsupportstrukturen mit der chemischen Oberflächenbehandlung wurde dieser Prozessschritt weiter optimiert. AM-Bauteile können jetzt mit spitz zulaufenden automatisiert generierten Baumsupports additive gefertigt werden. Die folgenden Abbildungen (Abb. 2.3.2) zeigen diesen prinzipiellen Ablauf.



**Abbildung 3.3.2: Support Entfernung während des chemischen Fräsen**

Im Ätzbad werden die optimierten Verbindungsstellen dann soweit geschwächt, dass die Supportstrukturen von den Bauteilen einfach zu lösen sind.

Hierzu wurden Testszenarien definiert und entsprechende Probekörper additiv gefertigt [diAMpro-Technischer\_Z-Bericht-HAP2\_Z8].

## II.2.d Zusammenfassung

Im Rahmen von AP2.1 wurden eine Teststrecke für Pulver Kreislauf funktionsfähig aufgebaut und umfassende Kenntnisse über die Einflussgrößen der automatisierten Förderung und Lagerung auf das Metallpulver (Alu und Titan) entwickelt. Zudem wurde die Lösung zur optimalen Pulverförderung gefunden.

In AP2.2 wurden Lösungen für die automatisierte Handhabung von filigranen und endkonturnahen AM-Bauteilen gefunden und die Automatisierung der Handhabungssysteme abgeschlossen. Für die Bauteil Separation wurden neben der Entwicklung optimierter Schnittparameter innovative Anbindung

Geometrien erforscht, welche einen reduzierten Bandverlauf herbeiführen. Es wurden Direktaufdruckversuche für AM-Aluminium erfolgreich durchgeführt sowie Voruntersuchungen für AM-Titan bzgl. notwendiger Ebenheit der Substratplatten abgeschlossen. Diese führten zur Aufweitung der aktuell geforderten Toleranzen für die Substratplattenaufbereitung. Ein Hochtemperatur-Nullpunktspannungsstystem für AM Alu wurde erfolgreich getestet und auf einem 3D-Drucker (Typ M400) umgesetzt. Das automatisierte Rüsten wurde anhand unterschiedlicher Maschinentypen erfolgreich demonstriert.

In AP2.3 konnte die Auslegung einer AM-Zelle abgeschlossen sowie die Verknüpfung der Einzelprozesse in einer AM-Zelle erfolgreich demonstriert werden. Außerdem wurde die Support Entfernung mittels Chem.-Fräsen optimiert, wodurch Fertigungsschritte minimiert, Kosten sowie Durchlaufzeiten reduziert und das Risiko von Rissbildungen gegenüber einer manuellen Support Entfernung vermieden werden. Erste weiterführende Untersuchungen zur Parameterfindung bzgl. optimaler Trennstellen-Ast-Geometrie für automatisiert generierte Supportstrukturen konnten zudem erfolgreich abgeschlossen werden. Eine innovative smarte Netzwerkstruktur wurde im Roboter Versuchsfeld installiert, wodurch eine Bereitstellung einer funktionstüchtigen automatisierten Prozess Zelle für zukünftige Forschungsprojekte (AGR33D, VerticalE2E,...) möglich ist.

## II.3 HAP3 - Qualitätssicherung

Projektleitung: Dr. Kai Schimanski  
Autoren: Thorsten Schröder, Dr. Matthias Lange  
Datum: Dezember 2021  
Arbeitspakete: AP3.1 Automatisierte, digitale QS  
AP3.2 Effects of Defects  
AP3.3 Effects on Process Chain

### II.3.a Ausgangssituation und Zielsetzung

Aufgrund der engen Verflechtung der formulierten Fragestellungen der drei Arbeitspakete, werden die erzielten Ergebnisse von AP3.1, AP3.2 und AP3.3 in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt und nachfolgend beschrieben.

Zu Beginn des Vorhabens *diAMpro* stand die Additive Fertigung im Pulverbett-Verfahren für TiV64 kurz vor der Einführung in die Serienfertigung für Luftfahrtanwendungen. Im Rahmen des vorangegangenen LuFo Vorhabens *ALM2Air* wurden die entsprechenden Zusammenhänge der Einzelprozesse erarbeitet.

Währenddessen hat sich gezeigt, dass die Wechselwirkungen der Prozesse nicht ganzheitlich verstanden sind und dass nachhaltige Konzepte für die Qualitätssicherung von additiv gefertigten Bauteilen fehlen. So war u.a. Stand der Technik, dass die Qualität der Bauteile erst am Ende der Wertschöpfungskette überprüft wird.

Materialfehler führen zum Großteil zum Ausschuss. Neben den verlorenen Produktionskosten kommt der zeitliche Verzug in der Fertigung erschwerend dazu. Als Ergebnis von *ALM2Air* wurde u.a. die konsequente Überprüfung der wichtigsten Prozessparameter (KPP) vor dem Start des AM-Prozesses eingeführt, um die Wahrscheinlichkeit von Materialfehlern zu reduzieren. In dessen Konsequenz konnte bereits eine signifikante Reduzierung der Streuungen in den Materialkennwerten erreicht werden, was die Notwendigkeit der anfänglichen Überprüfung unterstreicht. Diese Prüfschritte erfolgten bislang noch manuell und haben damit einen Einfluss auf die Standzeiten der einzumessenden Maschine. Zudem werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen handschriftlich dokumentiert.

Das Digitalisieren der handschriftlichen Dokumente erfolgt ebenfalls durch manuelle Eingabe langer Zahlenreihen. Für eine frühzeitige Erkennung von schleichenden Verschlechterungen der KPP und Reduktion der Standzeiten ist die Automatisierung der digitalen Erfassung der KPP-Ergebnisse von hoher Bedeutung, da z.B. Wartungsintervalle der AM-Anlagen gezielter eingesteuert werden können. Im Rahmen von *diAMpro* sollte daher eine Lösung erarbeitet werden, die eine digitale Erfassung der KPP-Werte ermöglicht und in der Folge eine historische Auswertung der Daten erlaubt.

Neben der Erstinspektion der KPP besteht die Möglichkeit, baubegleitende Prozessüberwachungssysteme online zu aktivieren. Hierzu zählen z.B. das sogenannte „QM Coating“, welches den Pulveraufzug mittels Bildaufnahmen überwacht oder „QM-Melt Pool“, welches Thermographieaufnahmen während der Belichtung von jeder Schicht anfertigt.

In beiden Fällen erfolgt eine manuelle Auswertung der Daten. Bei dem System QM-Coating kommt erschwerend hinzu, dass die Auswertung bislang nur über die manuelle Sichtung der Einzelbilder (pro Schicht) erfolgen kann. Daher wird dieses System derzeit nur genutzt, um bei der Ursachenermittlung

von Ungänzen, die bei der NDT-Prüfung am Ende der Prozesskette festgestellt worden sind, zu unterstützen. Die Möglichkeiten der Systeme hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für eine kontinuierliche Qualitätskontrolle wurden im Rahmen von diAMpro überprüft und validiert.

Neben dem eigentlichen AM-Prozess sollte im Rahmen von dem Vorhaben diAMpro auch die Frage beantwortet werden, inwieweit Fehler aus dem AM-Prozess in der nachfolgenden Prozesskette beeinflusst werden

Auf Basis aller Untersuchungsergebnisse sollte am Ende ein Qualitätsregelkreis abgeleitet und erprobt werden, der gegenüber dem heutigen Stand einen wirtschaftlichen Vorteil bietet:

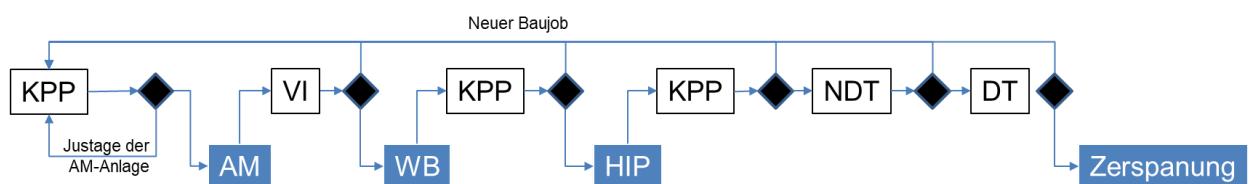


Abbildung 1.1: Vereinfachter Qualitätsregelkreis in der AM-Fertigung zu Beginn des Vorhabens

### II.3.b Lösungsweg

In **HAP3** wurden verschiedene Konzept zur Qualitätssicherung entlang der Fertigungskette entwickelt, geprüft und in einen Qualitätsregelkreis gebracht.

Das Hauptarbeitspaket selbst gliedert sich in vier Unterarbeitspakete, in denen die Klärung folgender Fragestellungen aufgeplant und bearbeitet wurden:

- Erfassung und Beschreibung der generellen Sicherheit der Einzelprozesse in der Prozesskette und Ermittlung der Schwankungsbreite von Prozessgrößen
- Erarbeitung eines Konzept zur digitalen Überwachung von Schlüsselparametern (KPP) und zur Analyse der Einflüsse auf die Bauteil-Performance und die Auswirkung nachgelagerter Prozessschritte auf die finale Bauteilqualität. (Heilungsprozesse)
- Untersuchung des Einfluss von (Ausführungs-) Fehlern in der Prozesskette und die Auswirkung auf die Bauteilqualität in den jeweils nachgelagerten Prozessschritten
- Online Prozessüberwachung zur frühzeitigen Erkennung von Abweichungen und Fehlern und deren Bewertung aufgrund den vorhandenen Testdaten der vorhergegangenen Untersuchungen.
- Zusammenführung der entwickelten Einzelkonzepte zu einem ganzheitlichen Regelkreis

Die formulierten Ziele sind in Abbildung 2.2 als schematischer Lösungsweg dargestellt. Die darin links gezeigten Fragestellungen wurden überschneiden und z.T. zeitgleich bearbeitet.

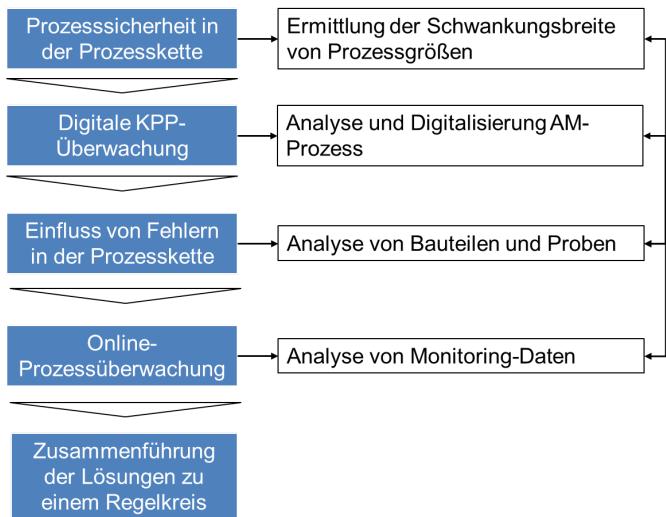


Abbildung H3-2: Lösungswege von den Arbeitspaketen AP3.1, AP3.2 und AP3.3

Grundlage aller Punkte waren die vorhandenen Daten aus dem Projekt *ALM2Air* sowie der zu dem Zeitpunkt angelaufenen Serienfertigung. Darüber hinaus sind Versuche im Rahmen von *diAMpro* mit Veränderungen der Prozessparameter erfolgt.

Auf Basis dieser Daten wurde die Prozesssicherheit innerhalb der Prozesskette mit dem Ziel ermittelt, die jeweiligen Streubreiten und die relevant beeinflussenden Prozesse herauszuarbeiten. Parallel wurde untersucht, mit welchen Mitteln die Schlüsselparameter (KPP) digital erfasst werden können. Die vorliegenden Daten wurden hierbei genutzt, um einen Katalog der Fehler zu erstellen, die in der Prozesskette beobachtet wurden. Dabei sollten auch Wechselwirkungen zwischen Prozessen identifiziert werden. Hierzu zählen ebenfalls vorliegende Daten der existierenden Prozessüberwachungssysteme. Diese wurde hinsichtlich ihrer Qualität und Korrelation zu Fehlerarten und Größen analysiert.

### II.3.c Ergebnisse

#### Stabilität der Einzelprozesse und in der Prozesskette

In der Endphase von *ALM2Air*, was gleichzeitig die Anfangsphase von *diAMpro* war, wurde der Einfluss von Prozessveränderungen des HIP-Prozesses untersucht [STE20]. Es stellte sich dabei heraus, dass Materialeigenschaften erst dann maßgeblich verändert werden, wenn die Prozessparameter so signifikant verändert wurden, dass sie selbst nicht mehr den Vorgaben der Luftfahrtvorschriften entsprechen.

Die Variationen der Prozessparameter und die daraus resultierenden Streubreiten wurden in [EWE19] für den Werkstoff „Scalmalloy“ sowie in [KRE20] für das in der Luftfahrt eingesetzte Ti-6Al-4V ermittelt. Die Streubreiten der einzelnen Potentiale sind gemessen an deren Variationsbreite gering, dies ist für beide Werkstoffe erfolgt.

Obwohl grundlegende Randbedingungen wie Wärmeleitfähigkeit, Korngröße oder Schichtstärke eine andere sind, zeigt sich in den Auswertungen, dass die Veränderung der Parameter: Schichtstärke,

Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurabstand, Streifen Überlapp und Fokuslage auch bei Veränderungen die teilweise über die zulässigen Grenzen der aktuellen Vorschriften gehen, mechanische Eigenschaften erzeugen die wieder innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

Zur Verdeutlichung der komplizierten Zusammenhänge zwischen Parametern und Einflussgrößen auf die Qualität des Ergebnisses und der Stabilität der Prozesskette wurde ein entsprechendes Fischgrätendiagramm erarbeitet. Die dargestellten Einflussfaktoren haben je nach Prozessschritt einen stärkeren oder minderen Einfluss.

In verschiedenen Tests wurde nachgewiesen, dass z.B. die Bauteilpositionierung einen erheblichen Einfluss auf die Detektion der Schmelzbadgröße und Strahlungsintensität hat. Die Ergebnisse resultieren aus dem QM-System: QM-Meltpool (Concept Laser) sowie aus praktischen Versuchen. Eine Detektion der Veränderung in den Parametern ist erkennbar, jedoch fehlt ein Beweis in den mechanischen Kennwerten, da diese nur sehr gering variieren bei Proben mit gleichem eingestellten Prozessparameter an unterschiedlichen Stellen im Bauraum.

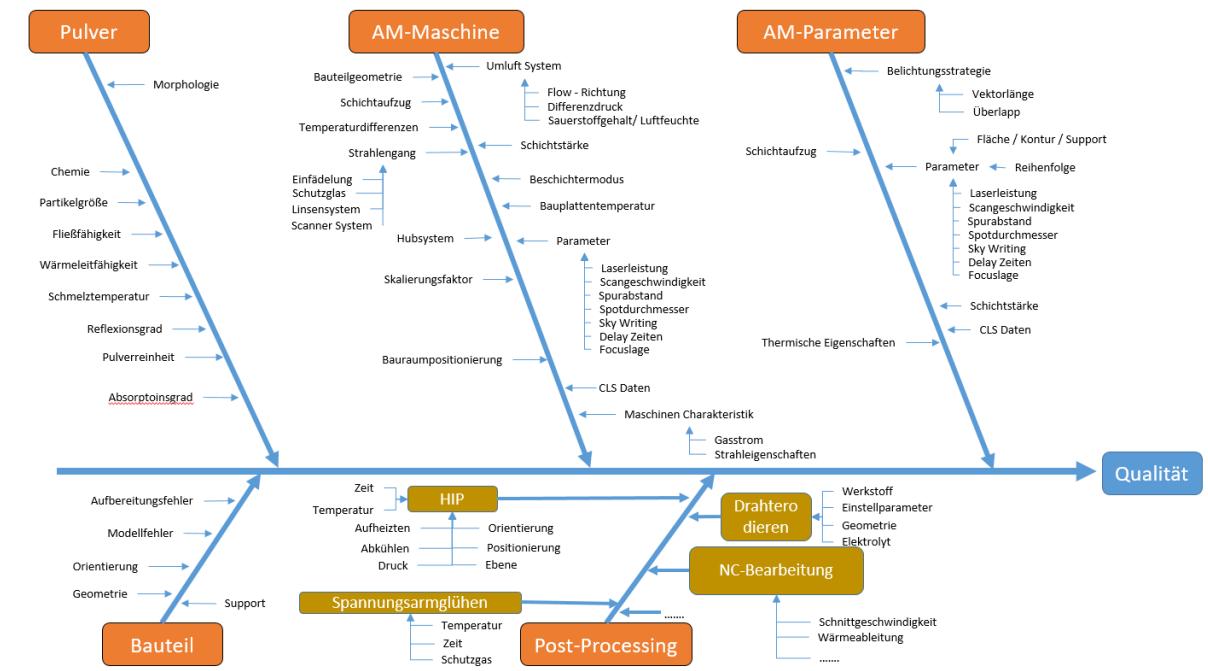


Abbildung: Fischgrätendiagramm, Einflussfaktoren auf die Qualität

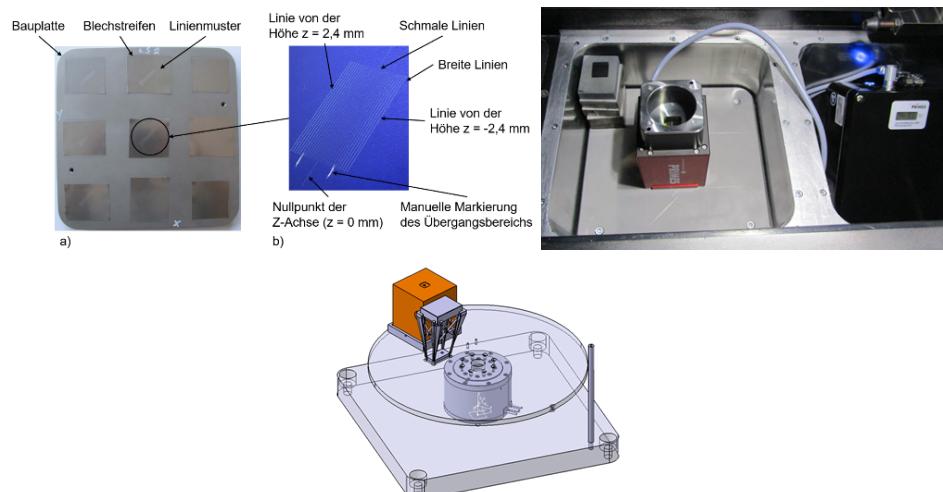
Die Ermittlung der Schmelzbadgröße und Strahlungsintensität hat gezeigt, dass weitere KPPs einen Einfluss haben müssen. Daher sind zur Betrachtung weitere AM-Parameter herangezogen und deren digitale Erfassung teilautomatisiert worden.

### Teilautomatisierte, digitalisierte Überwachung der AM-Prozessparameter / Regelkreis

Vor Einführung des Scanfield Monitors (SFM) erfolgte die Überwachung der KPPs weitestgehend in einem analogen Verfahren. In diesem werden Vektoren und Linien auf eloxierte Bleche mit dem Laser aufgebracht und im Nachgang manuell optisch bewertet und ausgemessen. Die realen Prozessparameter konnten mit diesem Verfahren nicht gemessen werden, da die Versuchsträger auf dem realen Leistungsniveau der Anlage zerstört würden.

Der SFM ist in der Lage, einzelne Vektoren unter realen Prozessbedingungen zu messen. Die Funktionsweise sowie der Vergleich zu analogen Messungen ist in [SEI20] untersucht und dargestellt.

In verschiedenen Versuchsreihen wurde nachgewiesen, dass die geforderten Messungen der Schlüsselparameter Scangeschwindigkeit, Spodurchmesser, Spurabstand, Positionsgenauigkeit, Wiederholgenauigkeit sowie eine Kaustik-Messung digital mit dem SFM in der gewünschten Genauigkeit innerhalb des realen Prozessfenster erfasst werden können.



**Abbildung 4:** links: Analoges Verfahren zur KPP Messung ohne SFM; rechts: Messaufbau mit SFM

Darüber hinaus ist es möglich, Delay-Zeiten und Messungen zweier Lasersysteme direkt miteinander zu vergleichen.

Dabei haben Versuche ergeben, dass zur korrekten Vermessung der KPP eine „Vorheizung“ des Strahlenganges notwendig ist. Hierzu sind Vektoren auf einen Körper belichtet worden, bevor die Messung erfolgt.

Zur Ergänzung einer Messung an einer Position in der AM-Maschine ist in *diAMpro* eine Rundachse für den SFM entwickelt worden, die autark Messungen an verschiedenen Stellen im Bauraum durchführen kann. Die Auslösung der Drehbewegung erfolgt über einen Impuls des Laser der AM-Maschine. Speziell für diese Erweiterung des SFM Systems wurden in *diAMpro* Messmuster erzeugt, um eine effiziente und einfache Datenauswertung mit anschließender digitaler Speicherung zu ermöglichen.

Eine direkte Verknüpfung mit der Maschinensteuerung und damit ein geschlossener Regelkreis zwischen Qualitätsmessung und Maschine konnte im Rahmen von *diAMpro* nicht realisiert werden, da seitens des Maschinenherstellers keine autorisierte Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden konnte.

Aber auch ohne den angestrebten geschlossenen Regelkreis zur Selbstdaption der Maschine wurde durch die Automatisierung und digitale Datenerfassung der Messergebnisse eine deutliche Reduktion der Messzeit zur KPP-Ermittlung erreicht. Zudem konnte eine wesentliche Verbreiterung des Informationsgehaltes der Datenwerte und Datenqualität nachgewiesen werden. Die Konsequente Datenerhebung bietet nun die Möglichkeit, Langzeit-Vergleichsmessungen für Maschinenwartungen zu erstellen und ggf. auch für Predictive Maintenance zu verwenden. Für zukünftige Beschaffungen wird geprüft, inwiefern sich potentielle Lieferanten bei der Bereitstellung offener Schnittstellen kooperativ zeigen.

### Fehler entlang der Prozesskette

Die Ergebnisse aus der Prozessqualifikation vom Ti-6Al-4V und die Variation der KPP-Parameter haben gezeigt, dass der gesamten AM-Prozess grundlegend stabil ist. Untersuchungen mit Fehlerindikatoren bei Proben, die nur einer WB unterzogen wurden, sind nicht im repräsentativen Umfang durchgeführt worden, da die bewusste Indikation von Fehlern, die zum einen detektierbar und auch mechanisch erfassbar sind, sich als schwierig gestaltet.

Nach Versuchen mit dünnen Stäbchen als Versuchsaufbau, in denen ein Fehler eingebracht, aber keine Fehlstellen ermittelt werden konnten, ist die Strategie zur Erzeugung repräsentativer Fehler auf stehende Zugproben angepasst worden.

Hierbei sind zwei Fehlermodi hierbei untersucht worden. Zum Einen sogenannte „Fehlstellen“, an denen die Proben nicht belichtet wurden, zum anderen „Doppelbelichtungen“, an denen der Laser zweimal über die provozierte Fehlerstelle verfahren ist.

Die Fehler sind außermittig innerhalb der Zugproben positioniert, um eine Sollbruchstelle außerhalb der ansonsten zu erwartenden Bruchposition zu erzeugen. Zudem wurden die Fehlstellen von einer Fehlerschichthöhe auf zehn gesteigert worden. Die Kantenlänge der Fehler hat die Dimension von 2x2mm als Quadrat, oder eine entsprechende Kreisfläche.

Eine Wärmebehandlung nach AM dient zum Spannungsabbau, der vom Schweißprozess ausgehenden inneren Materialspannungen.

Verschiedene QM-Systeme sind zur Detektion verwendet worden. Ergebnisse sind in [EWE19] und [NOR18] beschrieben. Bei der Fehlerart „Fehlstelle“ sind die Zugproben nach mehr als 3 Fehlerschichten an der Sollbruchstelle gerissen, bis zu dieser Fehlerschichtstärke war die Dehnung in den Zugproben größer als 10%. Erst nach mehr als 3 Fehlerschichten ist eine deutliche Reduzierung um mindestens 30% in der Dehnung festzustellen.

Die Zugfestigkeit und Dehngrenze sind bis zu einer Fehlerhöhe von 6 Schichten unauffällig. Bei den Doppelbelichtungen zeigt sich ein ähnliches Erscheinungsbild jedoch erst ab 8 Fehlerschichten, sind die Proben an der Sollbruchstelle gerissen. Das Kriterium der Dehnung der Probe hat sich in Bezug auf die Fehlerdetektion als wichtigstes herausgestellt.

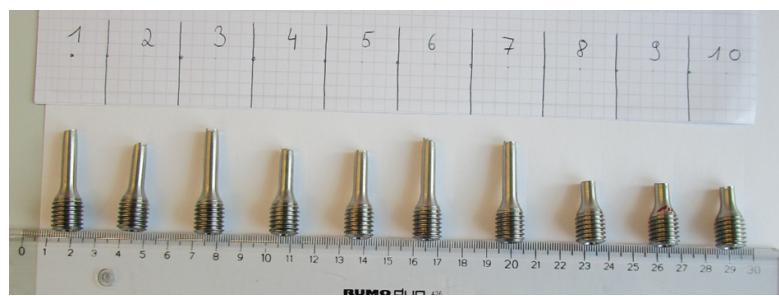


Abbildung 5: Zugproben, definierter Bruch nach 8 Schichten bei Doppelbelichtungen

Eine Vermutung, weshalb in den zuvor erwähnten Stäben keine Fehler zu erkennen waren, liegt in den Abständen der Belichtungszeiten zwischen den Schichten. Bei den Zugproben waren die Zeiten zwischen den Belichtungen um dem Faktor 3,8 größer, wodurch die Proben mehr Zeit zum Abkühlen hatten.

Versuche haben gezeigt, dass eine Größenabhängigkeit der Fehler in Korrelation der Belichtungszeit vorliegt. Da ein Versagen der Proben erst mit einer Fehlerhöhe von 3 Schichten eingetreten ist, konnte die Detektionsgrenze für die Prozessüberwachung somit definiert werden.

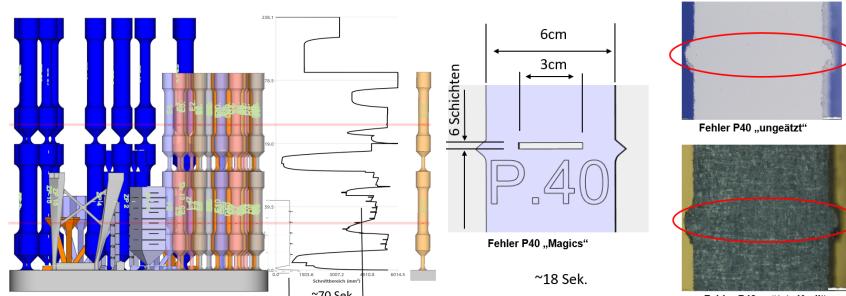


Abbildung: Belichtungsabstände & Fehlergröße

Das Kriterium der Höhe von minimal 3 Fehlerschichten bestätigt sich bei Rotation des Fehlers um 45° bzw. 90° bezogen zur Bauplattform. Beim Neigen der Probe wird aufgrund der Geometrie die Anzahl von 3 Fehlerschichten überschritten, somit ist ein Fehler wieder erkennbar. Es wurde versucht, mit einer angepassten Wärmebehandlungs Strategie die Fehler zu regenerieren, das bisherige Fehlerkriterium von 3 Schichten konnte jedoch nicht verbessert werden.

### Prozessüberwachung

Im Rahmen von *diAMpro* sind verschiedene QM-Systeme zur Erkennung zum Einsatz gekommen, teilweise wurden hierbei externe Partner beteiligt. Generell wird zwischen Onlinesystemen wie Meltpool und Powderbed-Systemen sowie nachgelagerten Verfahren, X-Ray oder CT, unterschieden.

Jedes System hat unterschiedliche Eignungen bezogen auf die Fehlerentdeckung, Ergebnisse sind im [Berichtsnummer 0000086895, Zwischenbericht 1-2021] dargestellt. Das größte Potential zeigt sich derzeit bei Powderbed-Systemen, da die Fehler im Prozess in einer Schichtstärke erfasst und ggf. auf eine fehlerhafte Situation reagiert werden kann. Eine visionäre Einsatzmöglichkeit für ein solches System ist der Ersatz des X-Ray oder CT-Scan. Versuche mit definierten Fehlern haben bereits gezeigt, dass die Sensitivität bei diesen Systemen mit einer entsprechenden Auflösung hohes Potential bieten. Die automatische Auswertung setzt aber Systeme mit einer DeepLearning Methode voraus, die mit neuer Hardware gekoppelt werden muss siehe [Berichtsnummer 0000086895, Zwischenbericht 1-2021]. Eine Lösung für ein echtzeitfähiges System, das alle geforderten Fehlergrößen nach derzeit gültiger Vorschrift erfassen kann, ist für weitere Analyse wegweisend.

### II.3.d Zusammenfassung

Die Erarbeitung des Lösungsweges der drei Arbeitstakte hat gezeigt, dass die Preisstabilität unter Veränderung der KPPs bei unterschiedlichen Werkstoffen innerhalb der gesetzten Grenzen sehr gut ist. Auch die systematische Analyse des HIP-Prozesses konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Mit der digitalen Erfassung und Verarbeitung von realen Prozessparametern ist Neuland betreten worden, und mit dem Einsatz eines intern modifizierten SFM Systems der Firma Primes ist eine systematische Auswertung und Archivierung möglich. Eine definierte Messmethodik ist nun erprobt und speziell auf die anzuwendenden Strategien der einzelnen Vektoren im AM-Prozess angepasst. Hierdurch ist ein

einfacheres, schnelleres und sicheres Überwachen der Qualitätsstandards für die Luftfahrt umsetzbar geworden. Die Implementierung eines Regelkreises, bei dem der Strahlengang aufgrund des SFM korrigiert wird, konnte nicht umgesetzt werden, da seitens des Maschinenherstellers keine Schnittstelle zur Verfügung gestellt wurde. Ein kleiner Regelkreis ist zur Ansteuerung der Drehachse erstellt und getestet, die Positionierung des SFM erfolgt in diesem Fall über Laserimpulse der AM-Maschine. Abhängigkeiten und Sensitivitäten beim Einbringen von definierten Fehlern sind erkannt, maßgeblich sind Größen sowie die Belichtungsfläche und Belichtungsabstände mit einem Basisparameter für den Werkstoff Titan identifiziert. Das Kriterium für eine Fehlerkorrektur von maximal 3 Schichtstärken konnte für einen Belichtungsabstand von < 70 Sekunden ermittelt und mit Zugproben verifiziert werden.

Mit der manuellen, visuellen Kontrolle sind die eingebrachten Fehler der belichteten Flächen erkannt und die Zusammenfassung zu einem Film erprobt. Mit dem menschlichen Auge alleine ist es nicht möglich, in einer Filmzusammenfassung alle Fehler zu detektieren. Eine hochauflösende automatische Erkennung ist zielführend, setzt aber eine DeepLearning oder ein KI-basiertes System voraus. Stichversuche wurden durchgeführt und erscheinen vielversprechend.

## II.4 HAP4 - Simulation

Projektleitung:	Martin Hanisch
Autoren:	Patrick John O'Brien, Martin Hanisch
Datum:	Januar 2023
	AP4.1 AM Prozessmodell
Arbeitspakete:	AP4.2 WB / HIP Prozessmodell AP4.3 Simulation AM Nachbearbeitung AP4.4 Durchgängiges AM Prozesskettenmodell

### II.4.a Ausgangssituation und Zielsetzung

HAP4 hat sich mit der ganzheitlichen Abbildung der Fertigungskette befasst. Der Fokus lag auf der Simulation des eigentlichen Aufbauprozesses (3D-Druck), der nachgelagerten Wärmebehandlung und des Heiß Isostatischen Pressens (HIP-Prozess), der mechanischen Nachbearbeitung zur Erreichung der geforderten Toleranzen und Oberflächengüte, sowie der Abbildung eines durchgängigen Prozesskettenmodells.

Das Hauptarbeitspaket selbst gliedert sich in vier Unterarbeitspakete, in denen die Klärung folgender Fragestellungen aufgeplant und bearbeitet wurden:

- Untersuchung und Validierung deterministischer Simulationsmodelle (u.A. des Verbundpartners ISEMP) sowie die Entwicklung von auf “*machine learning*” basierenden Vorhersage Methoden zur Vorhersage des Bauteilverhaltens während des Aufbauprozess als auch in der nachgelagerten Wärmebehandlung unter hohem Druck (HIP).
- Simulation der zerspanenden Nachbearbeitung und Optimierung der Einspann Situation bzw. der Fräspanparameter zur Erzielung bester Oberflächengüten an Kontaktflächen und fatiguekritischen Bereichen.
- Entwicklung eines Algorithmus und dazugehörige Benutzeroberfläche zur Erkennung von Fehlstellen im Pulveraufzug vor der Belichtung, basierend auf dafür trainierten neuronalen Netzwerke. (Powder Bed Inspection)
- Konzept und Abbildung eines durchgängigen Prozesskettenmodell zur Einbindung in die in HAP5 entwickelte Entwurfskette.

Das HAP4 gliedert sich in folgende Arbeitspakete und Inhalte:

- AP4.1 ALM-Prozessmodell
- AP4.2 Wärmebehandlung/HIP-Prozessmodell
- AP4.3 Simulation ALM-Nachbearbeitung (ab Q3/2021 Powder Bed Inspection Tool)
- AP4.4 Durchgängiges ALM-Prozesskettenmodell

In der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung lag der Fokus von AP4.1 und AP4.2 auf der Simulation mittels Finite Elemente Methode. Es hat sich herausgestellt, dass der Aufwand mit diesem Ansatz sehr hoch ist, zeitaufwendig und durch die Annahme strikt deterministischer Ereignisketten auch oftmals starr und unscharf in Bezug zum realen Ergebnis. Daher wurde mit einem Änderungsantrag [1] ein neuer

Ansatz in das Projekt integriert. Mit Methoden der Mustererkennung mittels Data Analytics und neuronaler Netze wurde untersucht, inwieweit der 3D-Druck und der HIP-Prozess effektiv und nachhaltig auf das Thema Prozesssimulation anwendbar sind. In diesem Zusammenhang gab es auch regelmäßige, konstruktive Austausch Runden mit dem Verbundpartner ISEMP Bremen und APWORKS in München, einem Tochterunternehmen der früheren Premium AEROTEC GmbH.

Das AP4.3 befasste sich bis Mitte 2021 mit der Simulation des Fräsvorgangs als nachgelagerten Prozessschritt nach dem 3D-Druck bzw. HIP-Prozess. Konkret wurden FE-Modelle erstellt, welche die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge von eingespannten Bauteilen für den Fräsvorgang ermitteln. Wie im Zwischenbericht 1-2021 beschrieben, konnten die gewünschten Fortschritte nicht erreicht werden. Als Ursache konnte eine hohe Intensität unterschiedlicher Einflussfaktoren identifiziert werden. Daher hat sich die PAG entschlossen, das Thema nicht weiter zu verfolgen. Als Ersatz wurde das Thema Powder Bed Inspection Tool bearbeitet. Das ist ein Tool zur automatischen Bildverarbeitung und -auswertung des Pulverauftrags im 3D-Drucker. In der Entwicklung inbegriffen waren ein gut bedienbares User-Interface (browserbasiert), die Verwendung einer weitverbreiteten Programmiersprache (Python) und die Validierung des Tools.

Das AP4.4 befasste sich mit dem Zusammenführen der Arbeiten aus AP4.1 und AP4.2 zu einem durchgängigen Prozesskettenmodell. Konkret wurde ein digitaler Dienst entwickelt, welcher aus Frontend, Backend sowie einem Server und Pipelines besteht.

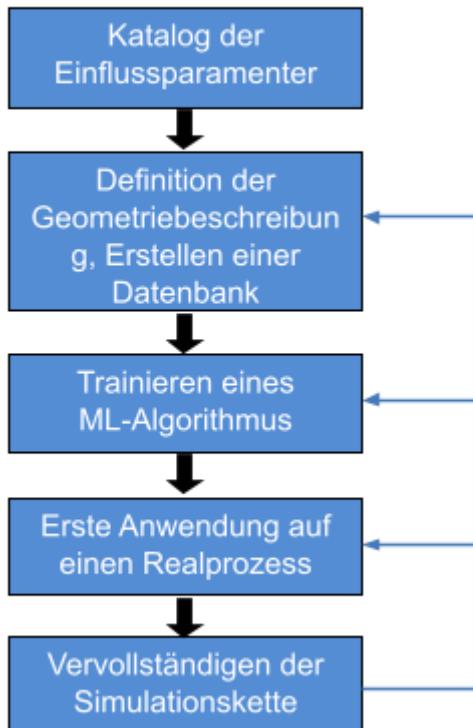
#### **II.4.b Lösungsweg**

Um die definierten Inhalte zu erarbeiten und die übergeordneten Ziele zu erreichen, wurde der nachfolgende Lösungsweg, dargestellt in Abbildung 4.1, verfolgt.

Für AP4.1, AP4.2 und AP4.4 gab es einen gemeinsamen Lösungsweg. Beim Thema Simulation ALM-Nachbearbeitung, AP4.3, gab es einen gesonderten Lösungsweg, da die erarbeiteten Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in das vorhandene Programm NCChip integriert wurden.

Bei beiden dargestellten Lösungswegen gibt es Iterationen zu vorherigen Arbeitsschritten, da bei der Entwicklung Anpassungen zur Verbesserung/Optimierung der Ergebnisse gemacht werden mussten.

AP4.1, AP4.2 &amp; AP4.4



AP4.3

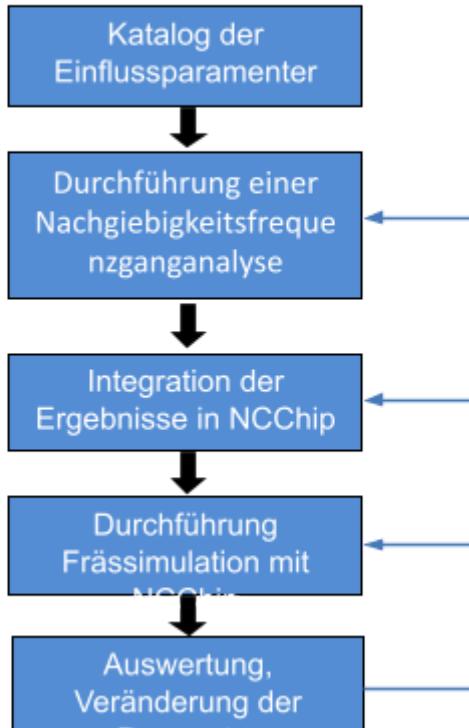


Abbildung 1: Lösungswege von den Arbeitspaketen AP4.1, AP4.2, AP4.3 und AP4.4

### Definierte Meilensteine

Für das HAP4 gab es Meilensteine aus der Verbundbeschreibung und aus der Vorhabenbeschreibung bzw. dem Änderungsantrag [1].

Es konnten alle Meilensteine erreicht werden, bis auf MS4.2.2., MS4.2.3 und MS4.3.3. Bei den beiden Erstgenannten war die Datenlage von gehippten Bauteilen nicht ausreichend.

An der Erreichung des MS4.3.3 wurde nicht weitergearbeitet, da die gewünschten Fortschritte bei der Erzeugung der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge ausgeblieben sind.

Aus Verbund Beschreibung:

- MS4.3 Frässimulation an ALM-Bauteil erprobt
- MS4.4 Überabeparameter definiert

Aus Vorhabenbeschreibung bzw. Änderungsantrag:

- MS4.1.1 Definition der Geometriebeschreibung
- MS4.1.2 Datenbank zum Trainieren eines ML-Algorithmus
- MS4.1.3 Erste Anwendung auf einen Realprozess
- MS4.2.1 Katalog der Einflussparameter
- MS4.2.2 Datenbank zum Trainieren eines ML-Algorithmus
- MS4.2.3 Erste Anwendung auf einen Realprozess
- MS4.3.1 Integration der Bauteilnachgiebigkeit in NCChip

- MS4.3.2 Konzept für Eigenschwingungsanalysen bei Zerspanen
- MS4.3.3 Automatisierung des FE-Prozesses
- MS4.4.1 Konzept erarbeitet für Schnittstellen, um Fertigungssimulationen untereinander zu verknüpfen
- MS4.4.2 Simulationskette vollständig

## II.4.c Ergebnisse

### II.4.c.1 AP4.1 ALM Prozessmodell

Bevor mit dem Machine Learning (ML) Modell begonnen werden konnte, mussten verschiedene Vorarbeiten abgeleistet werden. Hierzu zählen die Identifikation und die Beschreibung der Einflussparameter, die Definition einer ML-Strategie und Recherchearbeiten zu verfügbaren Methoden und Tools.

Für die Identifikation und die Beschreibung der Einflussparameter wurde eine detaillierte Literaturrecherche betrieben, sowie interne Untersuchungen und Schlussfolgerungen aus früheren Projekten reflektiert. Ergebnis war eine Tabelle mit den Einflussparametern und Beschreibungen für die Generierung von Trainingsdaten. Mit dem erarbeiteten Wissen wurde begonnen eine effiziente ML-Strategie zu definieren, welche die unzureichende Anzahl an Daten aus den tatsächlich gedruckten und gescannten Bauteilen durch ein universelles Ersatzmodell kompensiert. Das Ziel des Ersatzmodells ist es, die AM-prozessbedingten Verformungen, welche zu Rissen oder Abbrüchen in der Produktion führen können, vorherzusagen. Die ML-Strategie setzt sich aus verschiedenen Modulen zusammen, welche in Abbildung 4.1.1 bildlich dargestellt sind.

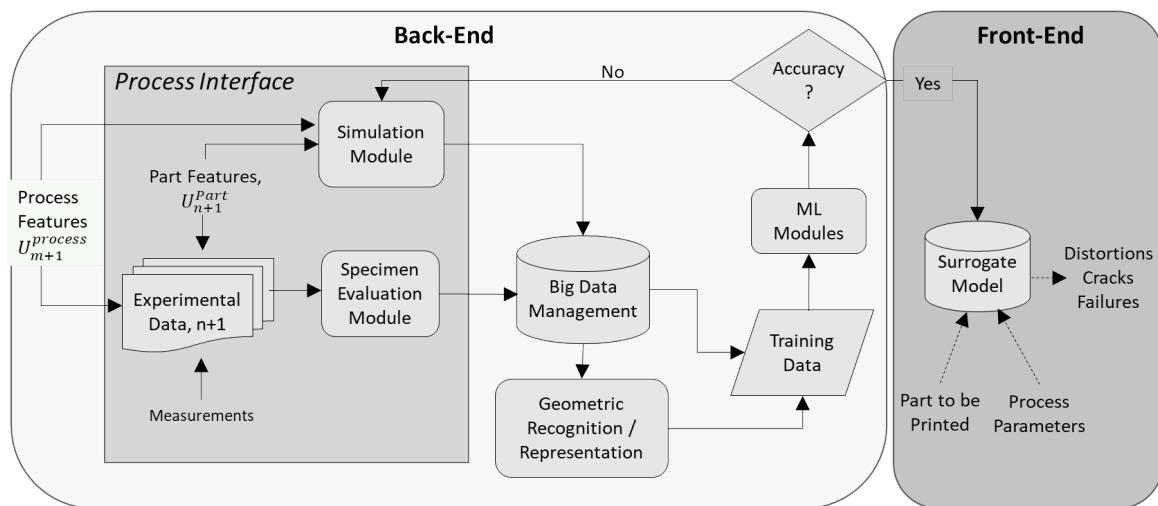


Abbildung 4.1.1: Übersicht der Module innerhalb der ML-Plattform

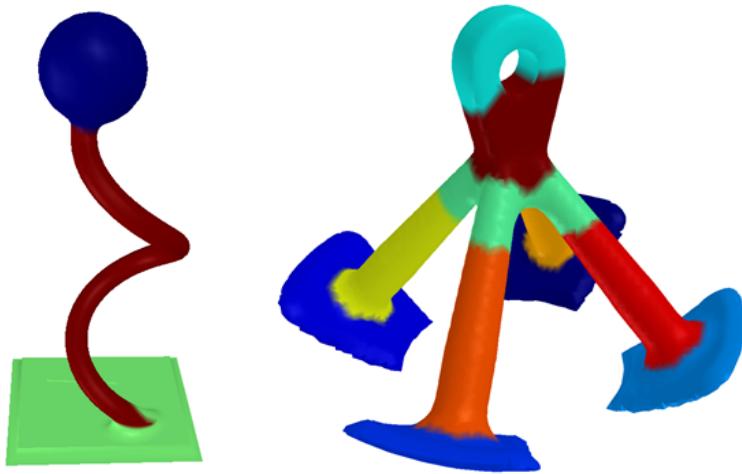
Damit das Machine Learning Modell lauffähig gemacht werden konnte, wurden Trainingsdaten benötigt. Als Input-Daten dienten 3D-Scans von gedruckten Bauteilen, sowie Geometriedaten aus FEM-Simulationen.

Im Zuge dessen wurde das Modul zur Geometrieerkennung entwickelt, welches zum Ziel hatte, geometrische Merkmale zu identifizieren, die ein erhebliches Fehlerrisiko aufweisen oder bei der additiven Fertigung zu Verzügen führen.

Das Geometrieerkennungsmodul unterteilt ein Bauteil in einzelne Regionen, welche klassifiziert werden können. Diese erste Klassifizierung führte zu einem Datensatz, welcher noch unzureichende

Informationen hatte und somit als „*Flache Daten*“ bezeichnet wurde. Im weiteren Verlauf wurden den einzelnen Segmenten weitere Attribute zugeteilt. Dazu zählen die Oberfläche, das Volumen und die Z-Koordinate des Massenschwerpunkts.

Damit wurde erreicht, dass der Informationsgehalt der Input-Daten wesentlich erhöht wurde. Dieser Datensatz wird als „*Verbesserte Daten*“ bezeichnet. Beispiele für die Segmentierung der Bauteilgeometrie sind in Abbildung 4.1.2 zu sehen. Für die weitere Verarbeitung der Geometriedaten wurde das Format für die codierten Geometriedaten festgelegt. Mit C++ Programmen wurde ein robuster Workflow definiert und realisiert.



**Abbildung 4.1.2: Beispiele für die Segmentierung auf der Versuchsgeometrie**

Parallel zum Geometrieerkennungsmodul wurde das Machine-Learning-Modell entwickelt, welches sich aus drei Prozessblöcken zusammensetzt:

- Encoder
- Fully Connected Neural Network (FCN)
- Decoder

Der Encoder reduziert die Dimension der Input-Daten und extrahiert die nützlichen Informationen. Dabei basiert der Encoder auf einem Convolutional Neural Network (CNN).

Der zweite Block, das Fully Connected Neural Network limitiert die Menge an Informationen, welche dem Decoder zugespielt werden. Es fungiert wie ein Trichter und lässt nur eine begrenzte Datenmenge durch. Die Skipping-Verbindungen (horizontale Verbindungen zwischen Encoder und Decoder Blöcken) verbessern die Lernrate und verhindern das Problem der verschwindenden Gradienten.

Der letzte Block, Decoder, erhöht wiederum die Dimension der Input-Daten, um den Output zu rekonstruieren. Das ML-Modell orientiert sich gesamtheitlich an einer U-Netz Architektur, wie sie beispielsweise in [RFB1] beschrieben ist. Die Architektur des entwickelten ML-Modells ist in Abbildung 4.1.3 dargestellt. Um die Wirksamkeit des Modells zu beschreiben wurden folgende zwei Metriken verwendet:

- a) Mittlere Quadratische Abweichung (englisch: mean squared error): Wurde zwischen jeder realen Verformung (aus den 3D-Scans) und der Vorhersage gebildet und über die Gesamtzahl gemittelt. Diese Verlustfunktion wurde über die Trainingszyklen aufgetragen und grafisch dargestellt.
- b) Genauigkeit (englisch: accuracy): Es wurde die reale Verformung (aus den 3D-Scans) mit der Vorhersage aus dem ML-Modell verglichen und in Prozent ausgegeben.

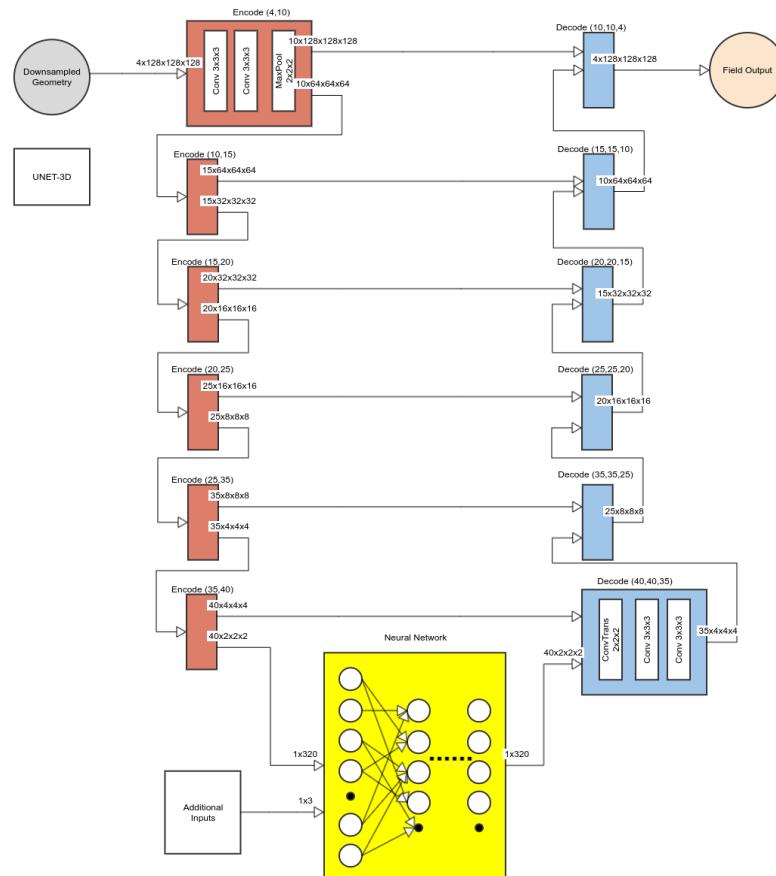


Abbildung 4.1.3: Architektur ML-Modell

Bei den vorhandenen Input-Daten galt es zwischen realen Daten und Simulationsdaten zu unterscheiden. Es wurden Daten von 15 real gedruckten Bauteilen für das ML-Modell genutzt. Neben den realen Daten wurde mit Hilfe der Software Amphyon Simulationsdaten erzeugt. Das heißt, es wurden mit künstlich generierten CAD-Modellen Verzugssimulation durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Software Amphyon waren somit weitere Input-Daten für das ML-Modell.

In der Trainings- und Validierungsphase wurden die definierten Metriken ausgewertet. Die Ergebnisse für unterschiedliche Datensätze (flache Daten und verbesserte Daten) sind in Abbildung 4.1.4 und Abbildung 4.1.5 zu sehen.

Abbildung 4.1.4 zeigt die Verlustfunktion über die Trainings- bzw. Validierungszyklen. Es ist zu sehen, dass die Verlustfunktion mit den verbesserten Input-Daten auf deutlich niedrigere Werte kommt als mit den flachen Input-Daten. In Abbildung 4.1.5 ist die vorhergesagte Verformung über der tatsächlichen Verformung aufgetragen. Wenn die Vorhersage ideal wäre, dann sollten alle Datenpunkte auf einer Geraden mit der Steigung von 1 liegen. Dies ist nicht der Fall. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die verbesserten Input-Daten zu einer Verbesserung Richtung Idealzustand führten.

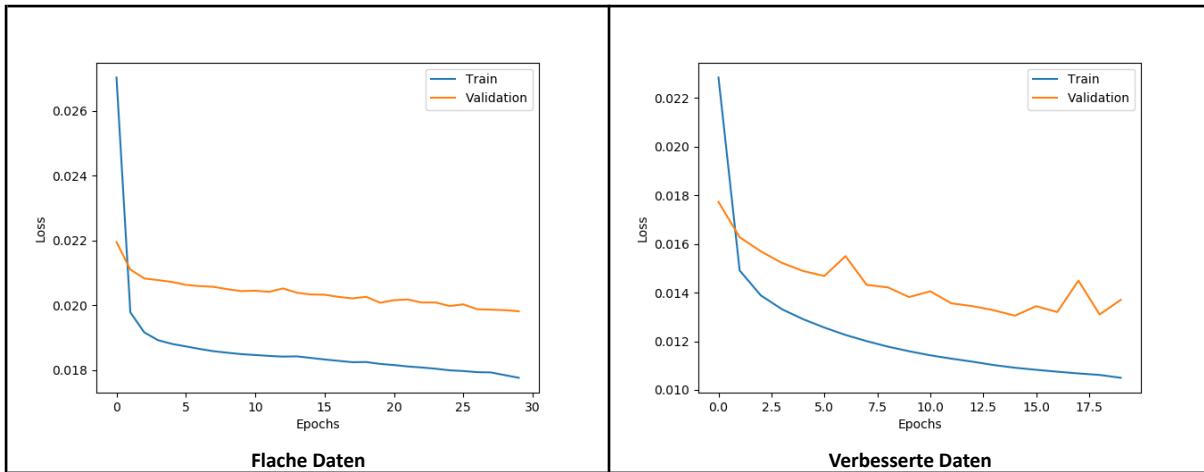


Abbildung 4.1.4: Entwicklung der Verlustfunktion bei flachen Daten gegenüber verbesserten Daten

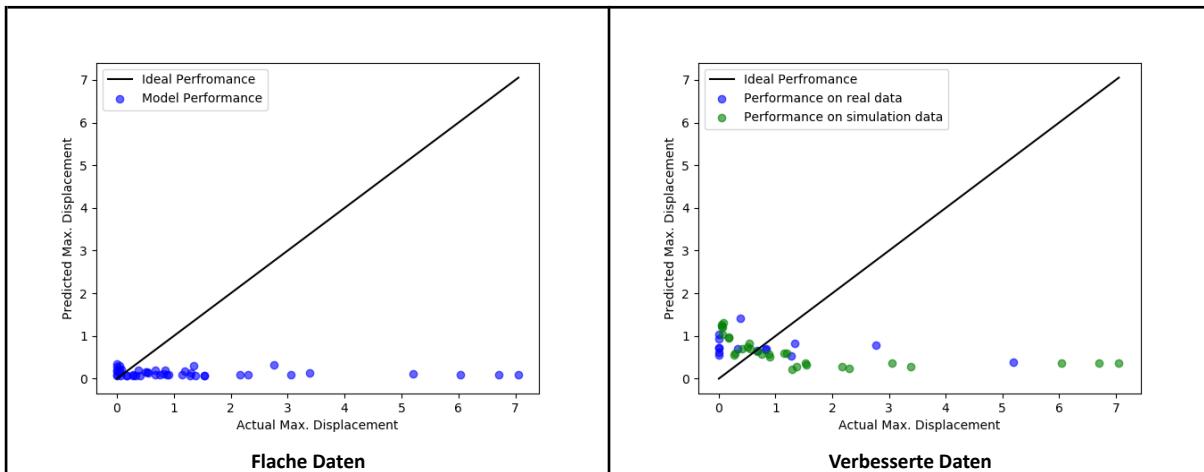


Abbildung 4.1.5: Entwicklung der Vorhersagequalität bei flachen Daten gegenüber verbesserten Daten

Neben der Einführung der *verbesserten Input-Daten* wurden auch die Hyperparameter des ML-Modells optimiert, um ein schnelleres und besseres Lernen zu ermöglichen. Es wurden aus dem Datensatz für Training und Validierung auch Daten mit schlechter Qualität entfernt. Damit konnten die Metriken noch einmal verbessert werden. Mit dem optimierten ML-Modell wurde die maximale Lernrate ermittelt. Das ist derjenige Punkt, bei dem sich die Verlustfunktionen von Trainingsdaten und Validierungsdaten schneiden. Nach 24 Zyklen war dieser Punkt erreicht und die Verlustfunktion lag bei ca. 0,0055.

Im Projekt diAMpro wurde ein Ansatz gefunden, welcher es erlaubt, Verzüge von 3D-gedruckten Bauteilen mit Hilfe eines Machine Learning Modells vorherzusagen. Wesentlicher Vorteil gegenüber einer numerischen Simulation besteht in der Geschwindigkeit. Während FE-Modelle bis zu mehreren Stunden bei der Berechnung der Verzüge benötigen, liegt die Zeit bei einem ML-Modell im Bereich von Sekunden bzw. wenigen Minuten. Bestandteile des Arbeitspakets waren die Datenvorbereitung und –aufbereitung, die Entwicklung der Architektur des Algorithmus sowie dessen Training, Validierung und Testing.

Es konnte aufgezeigt werden, dass der Ansatz grundsätzlich funktioniert und somit ein Proof of Concept (PoC) vorhanden ist. Jedoch waren die quantitativen Ergebnisse noch nicht zufriedenstellend. Daher wurden am Ende des Projekts Achtungspunkte definiert, welche bei einer Weiterentwicklung berücksichtigt werden sollten, um die Vorhersage zu verbessern.

### II.4.c.2 AP4.2 Wärmebehandlung/HIP-Prozessmodell

Das Wärmebehandlung/HIP-Prozessmodell ist dem ALM-Prozessmodell sehr ähnlich. Mit Hilfe eines Machine Learning Algorithmus sollten Verzüge nach der Wärmebehandlung bzw. dem HIP vorhergesagt werden.

Im Gegensatz zum ALM-Prozessmodell war die Datenlage jedoch geringer. Das lag daran, dass bei PAG nicht alle gedruckten Bauteile auch gehipt werden. Weiterhin kam hinzu, dass nicht-bestimmbare Einflussparameter großen Einfluss auf die Verzüge im Realprozess haben. Als Beispiel sei hier die gekrümmten Molybdänplatten im HIP-Ofen genannt. Auf den Molybdänplatten werden die Bauteile für den HIP-Vorgang positioniert. In Abhängigkeit der Position auf der gekrümmten Molybdänplatte können Bauteile mit gleicher Geometrie unterschiedliche Verzüge nach dem HIP-Vorgang aufweisen.

Mit der unzureichenden Datenlage und aufgrund der nicht-bestimmbaren Einflussparameter im Realprozess, wurde Anfang 2021 beschlossen, das Thema Wärmebehandlung/HIP-Prozessmodell zu stoppen. Die Module und Tool-Architektur sind jedoch vorhanden, um das Prozessmodell, bei besserer Datenlage und Eliminierung der nicht-bestimmbaren Einflussparameter, zukünftig wieder aufzugreifen.

### II.4.c.3 AP4.3 Simulation ALM-Nachbearbeitung

Im Modell zur spanenden ALM-Nachbearbeitung sollten Nachgiebigkeitsfrequenzgänge durch Finite-Elemente-Simulationen berechnet werden. Wie in Abbildung 4.3.1 dargestellt, ist der Beschleunigungssensor an einem lokalen Koordinatensystem ausgerichtet.

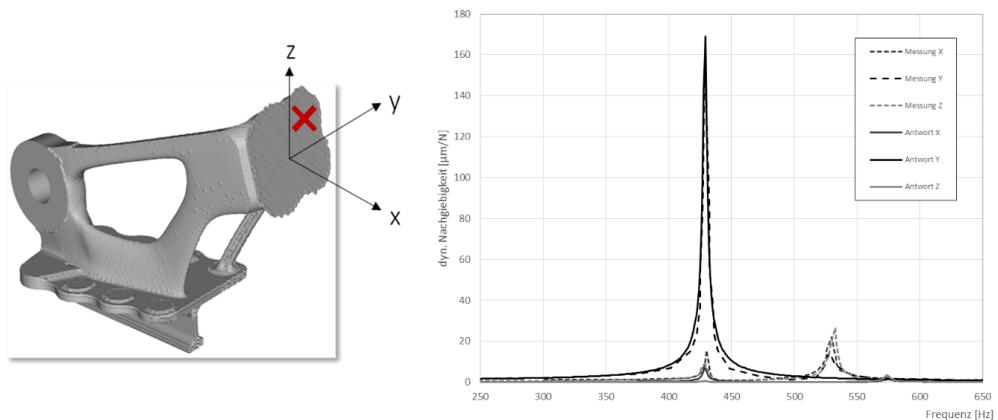
Die Beschleunigungssensoren zeichnen die Effekte des Hammerschlags auf. Diese dienen als Input für die PAG-interne Software NCChip zur Materialabtragssimulation, in welcher die Frästrategie anhand von Stabilitätsdiagrammen optimiert wird. Das Ziel war es die Simulationen teilautomatisiert in die globale Prozesskette zu integrieren.



Abbildung 4.3.1: Experimentelles Setup für die Messung mit der Impulshammer Methode

Gegenstand des Arbeitspakets war eine Reihe an Validierungsfällen sowie Untersuchungen zum Thema der Material- und Strukturdämpfung, welche maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisqualität hat.

Der erste Validierungsfall zeigte eine deutliche Übereinstimmung der Messungen mittels der Impulshammermethode sowie der Ergebnisse aus der Finite-Elemente-Simulation (Abbildung 4.3.2).



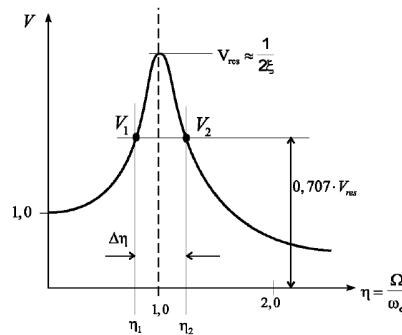
**Abbildung 4.3.2: Vergleich der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge der Simulation und der Messung an definierten Messstellen. Die durchgezogene Linie zeigt das Ergebnis der FE-Simulation und die gestrichelte Linie das Ergebnis der realen Impulshammer Messung**

Dabei lagen detaillierte Messungen vor, welche die Kalibrierung der Dämpfungseigenschaften erleichtern. Zusammen mit der mechanischen Lagerung des Bauteils in der Fräsanlage bestimmt die Dämpfung maßgeblich die Qualität der Frequency Response Function Analysen. Diese Analysemethode betrachtet eine harmonische Last (z.B. an der definierten Messstelle) mit konstanter Kraftamplitude von 1N über ein definiertes Frequenzband. Die Systemantwort wird an einer definierten Stelle aufgezeichnet. Im konkreten Anwendungsfall wird die Verformung in Mikrometern betrachtet. Um die Steifigkeit (N/μm) oder Nachgiebigkeit (μm/N) zu erhalten, wird die Verformung mit der Einheitslast von 1N verrechnet. Aufgetragen über das Frequenzspektrum können die Ergebnisse mit der experimentellen Messung verglichen werden.

Die Dämpfung wurde über das Resonanzschärfe Verfahren ermittelt (Abbildung 9). Dabei besteht folgende Beziehung der Dämpfung:

$$\xi = \frac{\eta_2 - \eta_1}{2}$$

Die Dämpfungsverhältnisse werden grafisch aus den experimentellen Ergebnissen ausgelesen und die Systemdämpfung berechnet. Dieses Ergebnis wird in der Finite-Elemente Simulation als Strukturdämpfung aufgebracht.



**Abbildung 4.3.3: Vergrößerungskurve mit einem Freiheitsgrad bei harmonischer Anregung und konstanter Kraftamplitude**

Die Ermittlung der Dämpfungsparameter, welche für unterschiedliche Eigenschwingungsformen verschieden sein können, lässt sich nur schwer für verschiedene Modelle und Geometrien generalisieren. Für weitere Validierungsfälle wie in Abbildung 4.3.4 musste die Kalibrierung erneut durchgeführt werden.

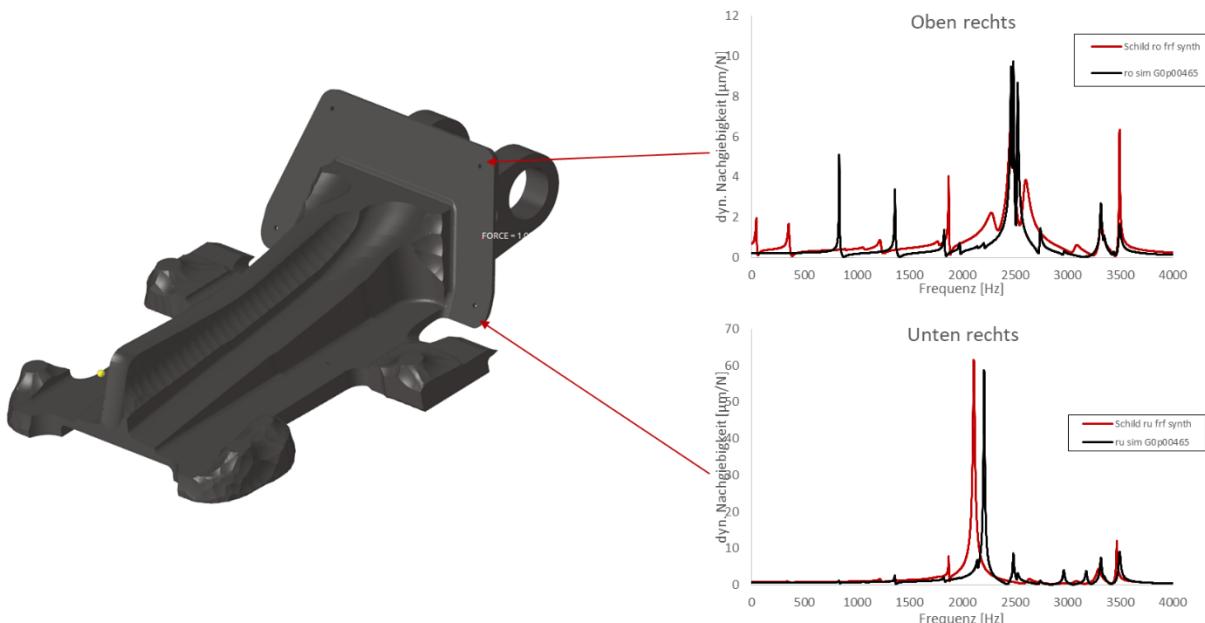


Abbildung 4.3.4: Schlossbeschlag mit Ergebnisvergleich der Impulshammer Methode und der Finite-Elemente Simulation

Das Modell Schlossbeschlag zeigt je nach Messstelle mehrere Resonanzstellen. Die genauen Nachgiebigkeitsfrequenzgänge zu simulieren konnte erneut nur durch einen großen Kalibrierungsaufwand realisiert werden. Dabei bestanden teilweise noch immer relative Fehler zwischen 4,59% und 37,8% bezüglich der Amplitude und relative Fehler von 0,85%-4,64% bei der Lage der Hauptresonanzstellen.

Um Komplexitäten aus der Geometrie zu reduzieren, wurde ein Bauteil geplant, welches aus strukturdynamischer Sicht mehrere Biegebalken mit unterschiedlichen Profilen auf einer Platte darstellt (Abb. 4.3.5).

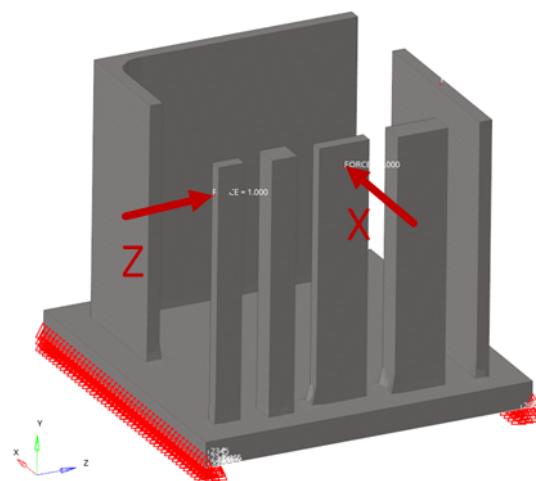


Abbildung 4.3.5: Bei APWORKS entworfenes und produziertes Bauteil

Das Bauteil wurde bei APWORKS entworfen und hergestellt. Die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge wurden bei Premium AEROTEC in Varel gemessen. Bei der Simulation des Bauteils konnte keine ausreichende

Übereinstimmung gefunden werden. Dies liegt an der starken Wechselwirkung der Geometrien und an der nicht numerisch darstellbaren Situation der Einspannung. Die Platte wurde von zwei Seiten in einen gewöhnlichen Schraubstock eingespannt. Hier konnte die Ergebnisqualität ebenfalls durch viele Iterationen verbessert werden. Mit Fokus auf die Automatisierbarkeit des Simulationsprozesses ist dieses Vorgehen jedoch nicht zielführend. Es wurde daher entschieden, die Untersuchungen einzustellen und das Restbudget für die Entwicklung des Powder Bed Inspection Tool umzuwidmen.

In AP4.3 konnten die gewünschten Fortschritte zur Abbildung von Nachgiebigkeit Frequenzgängen in einem FE-Modell nicht erreicht werden. Bei Vergleichen zwischen gemessenen Nachgiebigkeiten an realen Bauteilen und den Ergebnissen aus der Simulation sind immer wieder Diskrepanzen aufgetreten. Dies liegt hauptsächlich an zwei Aspekten:

Zum einen die Unsicherheit bezüglich der mechanischen Lagerung und zum anderen an der Bestimmung der Strukturdämpfung.

Die Dämpfung kann mit Messdaten ermittelt und im FE-Modell kalibriert werden. Somit ist es aber nicht möglich, Vorhersagen zu treffen. Der andere entscheidende Faktor, die mechanische Lagerung, hat einen signifikanten Effekt auf die Lage der Eigenfrequenzen. Das reale System in der FE-Software ist aus genannten Gründen nicht automatisiert nachbildungbar.

Daher hat sich die PAG dazu entschlossen, das Thema nicht weiter zu verfolgen.

### **Powderbed Inspection Tool**

Die Grundgedanke des Powderbed Inspection Tools ist es, in Zusammenarbeit mit HAP3 ein automatisiertes Programm zur Qualitätssicherung zu entwickeln. Bei der additiven Fertigung können innerhalb der Anlagen Bilder des Pulverbettzustandes vor und nach der Beschichtung aufgezeichnet werden.

Unregelmäßigkeiten in diesen Bildern zeigen z.B Fehler in der noch nicht belichteten Schicht an, der möglicherweise zu einem späteren Materialfehler und somit zu einer Schwachstelle des Bauteils werden kann. Idealerweise ist auf dem Bild nur die Pulverschicht zu sehen. Prozessfehler wie Überschmelzen und unzureichende Beschichtung äußern sich auf diesen Bildern (Abb. 4.3.6).



Abbildung 4.3.6: Pulverbettbilder: Normale Beschichtung (links), Freilegung (Mitte), mangelnde Beschichtung (rechts)

Für die Person, welche den Baujob auf Unregelmäßigkeiten untersuchen möchte, bedeutet dies in der Regel die manuelle visuelle Überprüfung tausender Bilder. Das Powderbed Inspection Tool liest die Bilder ein, verarbeitet sie und untersucht die Pixelintensitäten der einzelnen Schichten. In einem Intensitätsplot über die Bauteilhöhe können somit kritische Schichten identifiziert werden (Abb. 4.3.7):

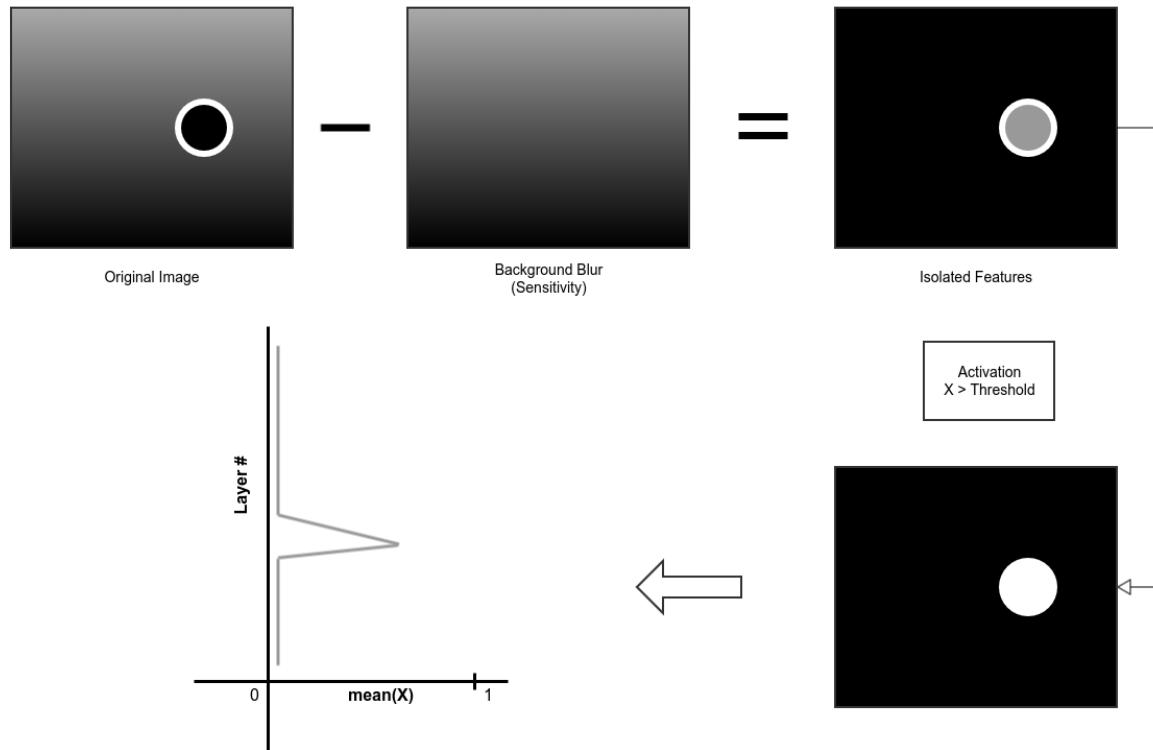


Abbildung 4.3.7: Das Bild durchläuft eine Vorverarbeitung und die Pixelintensitäten werden über die Bauteilhöhe aufgetragen. Liegt ein Defekt vor, ist dieser an einem Sprung im Intensitätsplot zu erkennen.

Die Bildverarbeitung umfasst das Zuschneiden des Bildes sowie eine Normalisierung der Pixelwerte auf den Bereich 0 bis 1. Ein Gaußscher Unschärfefilter wird verwendet, um die graduelle Variation zu extrahieren. Dies wird vom Originalbild subtrahiert, um die scharfen Variationen zu hinterlassen. Ein Schwellenwert wird bestimmt, um eine binäre Codierung des Bildes zu erzeugen, wobei die Pixelwerte entweder 1 (weiß) oder 0 (schwarz) sind. Aus einem solchen Bild können die weißen Pixel gezählt und die Abweichungen quantifiziert werden (Abbildung 4.3.8).

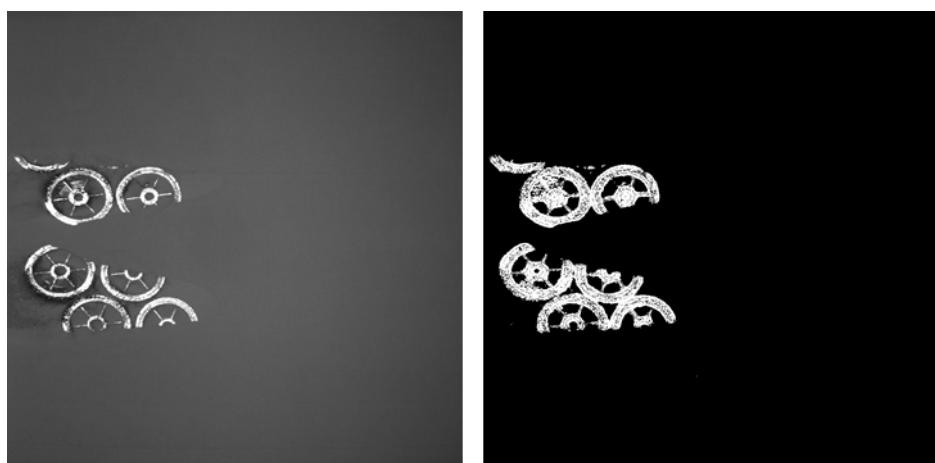


Abbildung 4.3.8: Originalbild nach dem Zuschneiden (links) und das verarbeitete Bild (rechts)

Aus dem Restbild werden zwei unterschiedliche binäre Kodierungen erzeugt. Eine mit einem definierten Schwellenwert und eine andere mit 10 % des gleichen definierten Schwellenwerts. Die erste wird

verwendet, um ein Diagramm des Prozentsatzes weißer Pixel für jede Ebene zu erstellen, die als Feature-Sichtbarkeitsdiagramm bezeichnet wird. Letzteres wird verwendet, um 2D-Projektionen der nachbeschichteten Schichten des Pulverbetts zu erzeugen (Abb. 4.3.9) und (Abb. 4.3.10).

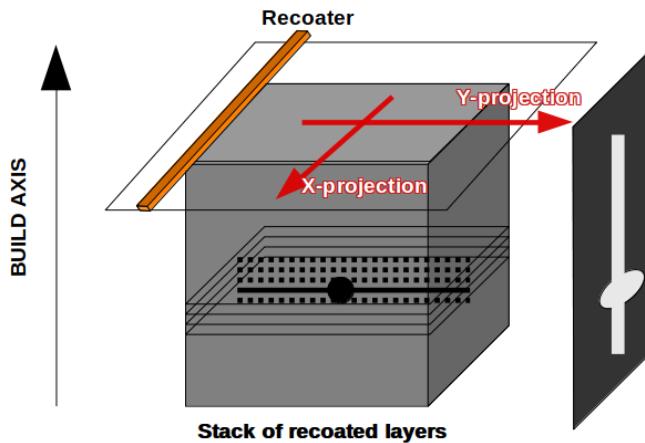


Abbildung 4.3.9: Darstellung der Projektionsgenerierung

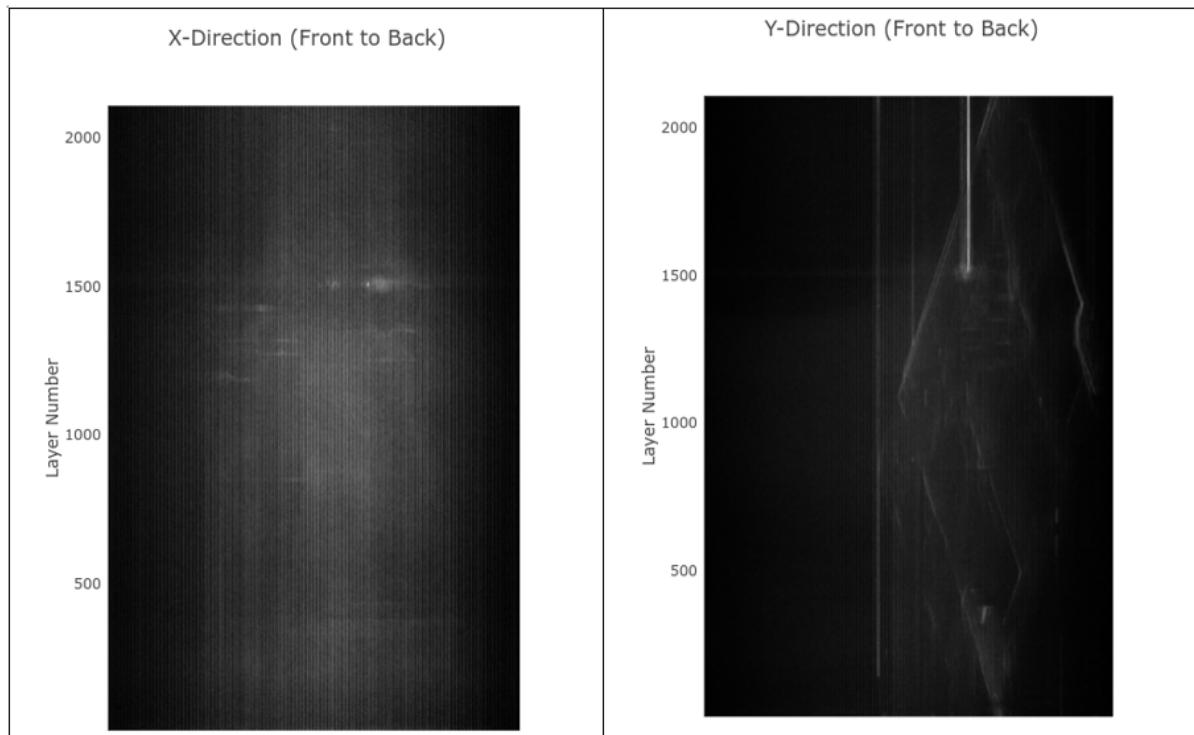


Abbildung 4.3.10: 2D Projektionsplots

Das Powderbed Inspection Tool ist mit einem professionellen Frontend und einer MongoDB Datenbank verbunden und wird Anfang 2023 bei PAG in Varel zu Testzwecken zum Einsatz kommen.

#### II.4.c.4 AP4.4 Durchgängiges ALM-Prozesskettenmodell

Im AP4.4 wurde eine webbasierte Benutzeroberfläche (Abb. 4.4.1) entwickelt, welche auf einem state-of-the-art Softwarestack basiert. Es stellt die Benutzeroberfläche für das Machine Learning Model aus AP4.1 dar. Damit sollen Verzüge und gefährdete Stellen am Bauteil während der additiven Fertigung vorhergesagt und visualisiert werden.

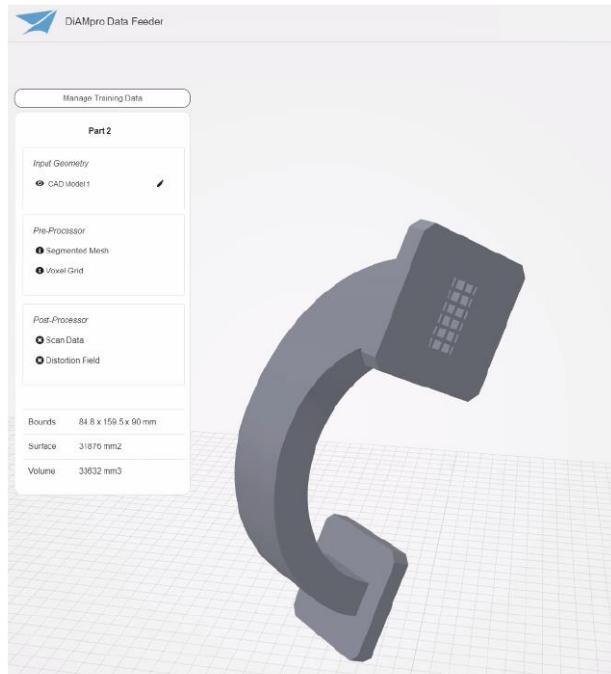


Abbildung 4.4.1: Webbasierte Benutzeroberfläche mit Beispiel Bauteil

Das Backend basiert auf Python sowie C++ Bibliotheken zur effizienten Berechnung der Prozesse und der Integration des ML-Modells. Ebenfalls wurde an dem MERN-Stack Ansatz festgehalten, indem folgende Technologien Einsatz fanden:

- **Mongo** Flexible dokumentenbasierte Open-Source-Datenbank, die als NoSQL-ähnliches System beschrieben wird
- **Express** De-facto-Back-End-Server-Framework für Node, entwickelt für die Entwicklung von Web-Apps/APIs
- **React** JavaScript-Frontend-Bibliothek zum Erstellen dynamischer Benutzeroberflächen, entwickelt von Facebook
- **Node** Open-Source, plattformübergreifende JavaScript-Laufzeitumgebung

#### II.4.d Zusammenfassung

Die Arbeitspakete 4.1 und 4.2 haben zu einem Teilerfolg geführt. Es wurden einzelne Module wie das Geometriekennungsmodul entwickelt, sowie die ML-Architektur aufgebaut. Input-Daten konnten erzeugt und in einer Datenbank für das Training, die Validierung und das Testing des ML-Modells abgelegt werden. Es konnte gezeigt werden, dass das ML-Modell trainiert und optimiert werden kann, jedoch lagen die quantitativen Ergebnisse unter den Erwartungen.

Auch das Arbeitspaket 4.3, Simulation ALM-Nachbearbeitung, hat zu einem Teilerfolg geführt. Mit FE-Modellen konnten erfolgreich Nachgiebigkeitsfrequenzgänge berechnet werden, welche Eingangsgrößen für das Programm NCChip darstellen. Jedoch wurde in mehreren Versuchen festgestellt, dass die Randbedingungen aus der Realität nur mit sehr hohem Aufwand in der Simulation richtig abbildbar sind. Daher wurde das Thema Simulation ALM-Nachbearbeitung durch das Thema Powder Bed Inspection Tool abgelöst. Das Powder Bed Inspection Tool ist als Erfolg zu kennzeichnen, da es als Proof of Concept in der Fertigung Anwendung gefunden hat.

Auch das letzte Arbeitspaket 4.4, ein durchgängiges ALM-Prozesskettenmodell, ist als Erfolg zu werten. Die entwickelte Prozesskette aus Frontend, Backend, verschiedenen Modulen, Pipelines und Servern funktioniert und bietet dem Anwender mit dem browserbasierten Interface eine brauchbare Benutzeroberfläche.

## II.5 HAP5 - AM Design

Projektleitung: Oliver Koch (bis 2021), Sebastian Lück

Autoren: Sebastian Lück, Thomas Wagner

Datum: Oktober 2022

AP5.1 Automatisiertes Bauteil Design

Arbeitspakete: AP5.2 Automatisierte AM Vorbereitung

AP5.3 Globale AM Optimierung

### II.5.a Ausgangssituation und Zielsetzung

In HAP5 wurde die übergeordnete Fragestellung untersucht, wie sich das Potential der additiven Fertigung konstruktiv nutzen lässt, bzw. wie sich der erhöhte Design-Aufwand z.B. gewicht optimaler Formen durch die Automatisierung wiederkehrender Arbeitsschritte wirtschaftlicher abbilden lässt.

Dabei galt es zu beachten, dass der Aufwand im Design und Nachweis besonders filigraner Strukturen oder "organisch" optimierter AM Bauteile den von Standard Bauteilen signifikant übersteigt und der in dieser Bauteilklassie eher geringe Gewichtsvorteil funktionaler AM-Designs oftmals von den höheren Kosten einer längeren Entwicklungszeit negiert wird.

Das Ziel war daher, verschiedene Konzepte zum automatisierten oder semi-automatisierten Design zu untersuchen und zu validieren. Gleichzeitig sollte untersucht werden, inwiefern ein modellbasiertes und datengetriebenes Entwicklungsprozess Mehrwert in der nachgelagerten Fertigungskette, bzw. in der vorgelagerten Angebotsphase schaffen kann.

Das Hauptarbeitspaket selbst gliedert sich in drei Unterarbeitspakete, in denen die Klärung folgender Fragestellungen aufgeplant und bearbeitet wurden:

- Untersuchung von graphenbasierten- oder teilautomatisierter prozessualer Entwurfssprachen an zunächst sehr einfachen Standard Brackets und später komplizierter werdenden Baugruppen und Systemen.
- Untersuchung zur Modellbildung und Automatisierung ganzer Entwurfsabläufen unter Einbindung multiphysikalischer Analysen und Optimierungen für funktionale AM-bauteile z.B. für Hochleistungs-Kühlsysteme für Batteriesysteme oder Wasserstoffanwendungen.
- Spezifische Ableitung und automatisierter Nachweis sehr vieler individuell leicht unterschiedlicher AM-Bauteilen in großen Assemblies mit gekrümmten oder doppelt gekrümmten Anbindungsflächen.
- Entwicklung und Einbindung von spezifischen Aspekten des additiven Herstellungsprozesses, wie die Generierung und Optimierung von Stützstrukturen und optimiertem Nesting schon während des Designprozesses.
- Direkte Einbindung von Kosten- und Verformungsanalysen zur Abschätzung der Wirkung spezifischer Design Features schon während des Entwicklungsprozess, z.B. den Einfluss von Bauteilgeometrie auf die Kosten des nachgelagerten Oberflächen Verfahrens oder Verformungen während des Druckprozess.
- Einbindung verschiedener Optimierungsalgorithmen in den teilautomatisierten Entwurfsprozess
- Validierung der Konzepte und Bereitstellung einer durchgängigen und adaptiven Entwurfskette

### Übersicht der Arbeitspakete sowie Meilensteine

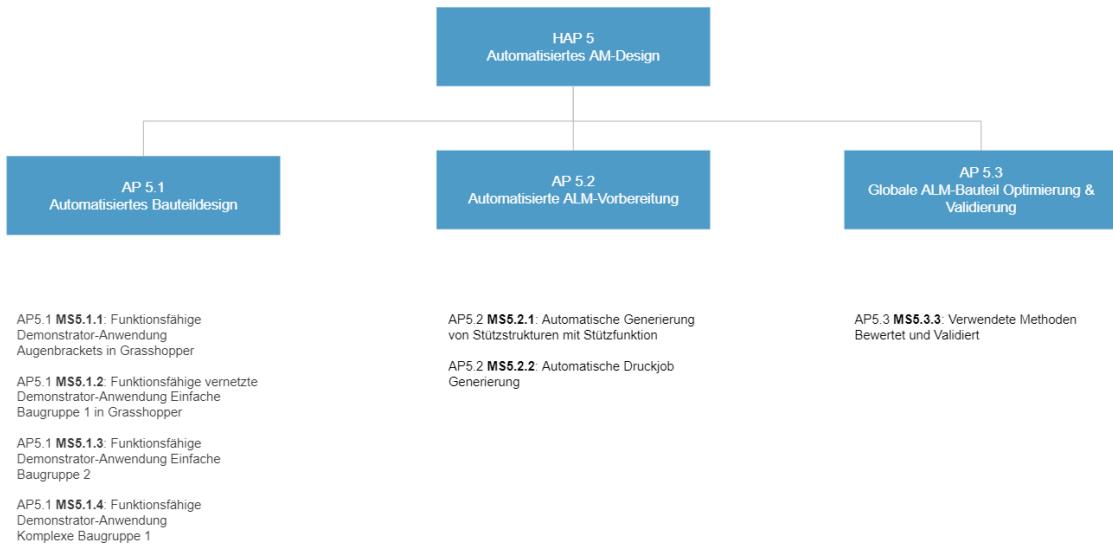


Abbildung 5.0.1 - HAP5 Arbeitspakete und Meilensteine

## II.5.b Lösungsweg

Je komplizierter ein Bauteil Design, desto größer ist der Mehraufwand in der Entwicklung und im Nachweis. Die Annahme "complexity for free" mag daher für die AM-Fertigung teilweise zutreffen, die Konstruktion und Berechnung gewichtsoptimierter "organischer" Strukturen geht in jedem Fall immer mit einem deutlichen Mehraufwand in den klassischen sequentiellen Arbeitsschritten einher:

### Design (AP5.1)

- 1 Konzeptfindung
- 2 Modellbildung CAD (Master)
- 3 Modellbildung FEM
- 4 Festigkeits- u. Steifigkeitsberechnung

### Fertigungsvorbereitung und Fertigung (AP5.2)

- 5 Konstruktionsberatung zur Fertigbarkeit
- 6 Kostenberechnung
- 7 Stützstrukturen
- 8 Oberflächenverfahren

### Anpassung, Optimierung und Nachweis (AP5.3)

- 9 Iterative Anpassung CAD
- 10 Zulassungsnachweis des Bauteils
- 11 Dokumentation

Um sich dem Thema der (semi)Automatisierung eines Datengetriebenen und modellbasierten Designprozess zu nähern wurden folgende Schritte eines Lösungsweges definiert:

- Verstehen der Struktur- und Funktionsprinzipien potentieller Bauteile, die auf Additive Fertigung umgestellt werden können
- Vergleich mit alternativen Fertigungsverfahren und Technologien unter Berücksichtigung der jeweiligen Automatisierungspotentiale in Form von Microservices oder graphen basierte Entwurfssprachen
- Untersuchung der Skalierbarkeit und Integrationsfähigkeit modellbasierter Entwicklungsansätze in das Gesamtprodukt z.B. Seitenschalen
- Integration globaler Optimierungsfähigkeiten, Fertigungsvorbereitung und Fertigungssimulation in die parallelisierte modellbasierte Entwurfskette

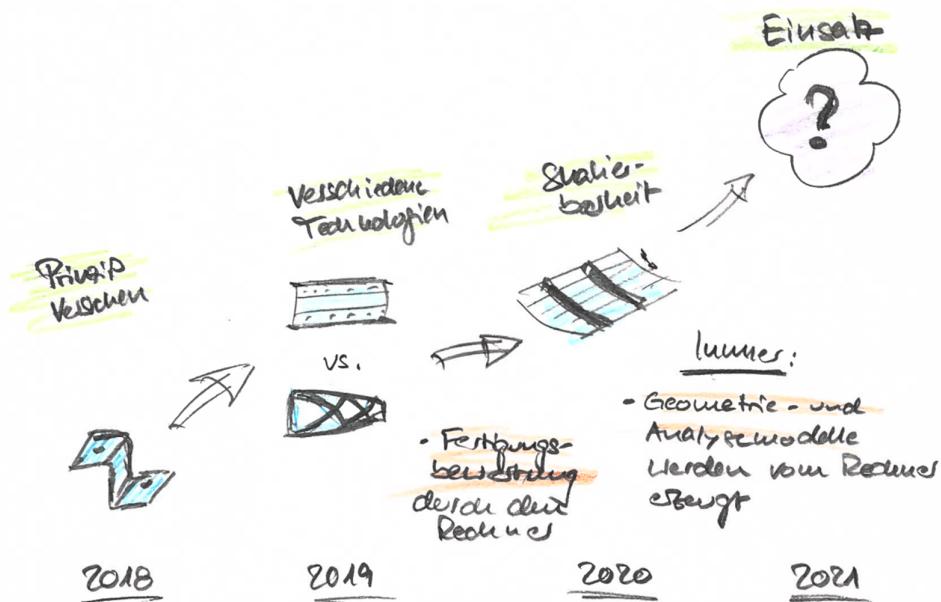


Abbildung 5.0.2: HAP 5 Lösungsweg (Oliver Koch)

## II.5.c Ergebnisse

### II.5.c.1 AP5.1 - Automatisiertes Bauteil Design

In der Ausgangssituation kann die vorherrschende Arbeitsweise zwischen den beteiligten Domänen bei der Entwicklung von Strukturen als sequentiell und dokumentbasiert beschrieben werden.

Die erzeugten Informationen und Daten werden überwiegend in (Text) Dokumenten (Berichte, Tabellen, Bilder) beschrieben und in der Entwicklungskette sequentiell weitergegeben. Werden in späteren Arbeitsschritten Nachbesserungen nötig, werden die Änderungen von der jeweiligen Domäne dokumentiert und wieder zurückgespielt. Dies führt zu vielen sequentiell ablaufenden Iterationen beim Produktentstehungsprozess, was wiederum hohe Kosten verursacht und die Entwicklungszeit verlängert.

Im Arbeitspaket 5.1 wurde daher untersucht, inwiefern sich das Bauteil-Design möglichst umfassend automatisieren und parallelisieren lässt. Eine Grundvoraussetzung dafür ist der Übergang von Dokumentenbasierten- hin zur modellbasierten Arbeitsweise, bei der die jeweils notwendigen Informationen oder Methoden direkt aus den jeweiligen Modellen der Entwicklungskette parallel und maschinenlesbar zur Verfügung gestellt werden können.

Folgende Bestandteile sind hierbei zu berücksichtigen und in einen digitalen Prozess zu fassen:

- Einbindung/Erweiterung von Topologieoptimierung
- Implementierung einer Optimierungsstrategie
- Automatische Erstellung von Topologieoptimierungen
- Ableitung von Gestaltungselementen aus den Ergebnissen einer Topologieoptimierungen einer digitalen Handskizze
- Einbindung von FEM-Berechnungen
- Automatisierung von Pre-Processing
- Automatisierte Interpretation von FEM-Berechnungsergebnissen
- Einbindung von Normteil- und Materialdatenbanken
- Automatisierte Erzeugung eines 3D-Modells mit Metadaten
- Vorbereiten von Festigkeitsnachweisen
- Einbindung von Generativen Entwurfs Algorithmen

Um die Ergebnisse in HAP5 sicherzustellen, wurden verschiedene Meilensteine festgelegt, welche den Projektablauf und deren Ergebnisse definieren. Folgend ist eine Darstellung mit konkreten Verweisen zu entsprechenden Halbjahresberichten als Dokumentation abgebildet. Es sei erwähnt, dass nicht erwähnte Halbjahresberichte inhaltlich Zwischenschritte zu der Zielerreichung der Meilensteine waren:

#### **Meilensteine**

AP 5.1 Automatisiertes Bauteildesign			
Bezeichnung	Konkretes Thema	erwähnt in Halbjahresbericht	Meilenstein erfüllt?
AP5.1 <b>MS5.1.1:</b> Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung Augenbrackets in Grasshopper	FAV-Bracket	2. Halbjahr 2018 (Grundlagen) 1. Halbjahr 2019	Ja
AP5.1 <b>MS5.1.2:</b> Funktionsfähige vernetzte Demonstrator-Anwendung Einfache Baugruppe 1 in Grasshopper	AM-Omega-Halter mit Nieten	2. Halbjahr 2018 (Grundlagen) 2. Halbjahr 2019	Ja
AP5.1 <b>MS5.1.3:</b> Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung Einfache Baugruppe 2	diverse AM-L Halter in Baugruppe Seitenschale	1. Halbjahr 2022	Ja
AP5.1 <b>MS5.1.4:</b> Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung Komplexe Baugruppe 1	Batteriesystem mit AM-Kühlplatten	1. Halbjahr 2021	Ja

### AP5.1 MS 5.1.1: Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung Augenbrackets in Grasshopper

Im zweiten Halbjahresbericht des Jahres 2018 wurden die Grundlagen zur Automatisierung des Bauteils-Design für AM-Strukturen gelegt. Mittels einer Anforderungsliste wurden die wesentlichen Punkte erfasst, welche es zu beachten gilt (1. Systemeingabe, 2. Bauteil-Generierung, 3. Strukturanalyse, 4. Herstellbarkeit, 5. Zeichnungsableitung, 6. Systemausgabe). Des Weiteren wurden Untersuchungen hinsichtlich Entwurfssprachen getätig, welche es ermöglichen, die heutige manuelle Arbeit des Konstrukteurs mittels Algorithmen zu automatisieren. Der Design Compiler 43 bietet ähnlich wie die Software Grasshopper (später Elise) eine programmierbare Oberfläche (Low-Code), welche einzelne Module einer Prozesskette verknüpfbar darstellt. Mariusz Flasinski beschreibt in seiner wissenschaftlichen Abhandlung „*Use of Graph grammars for the description of mechanical parts*“, wie eine graphenbasierte Grammatik zur Beschreibung von mechanischen Teilen erstellt werden kann. Die Formulierung eines repräsentativen Schemas für die automatisierte Konstruktion und die Analyse von Volumenkörpern ist der Schlüssel für die Verbindung von automatisierter Konstruktion und Fertigung. Flasinski beschreibt die Modellierung von Bauteilen, ausgehend von einer Basis-Geometrie mit klar definierten Features z.B. Rechteckplatte, Trapez, Biegeradius, Eckradius, Bohrung.

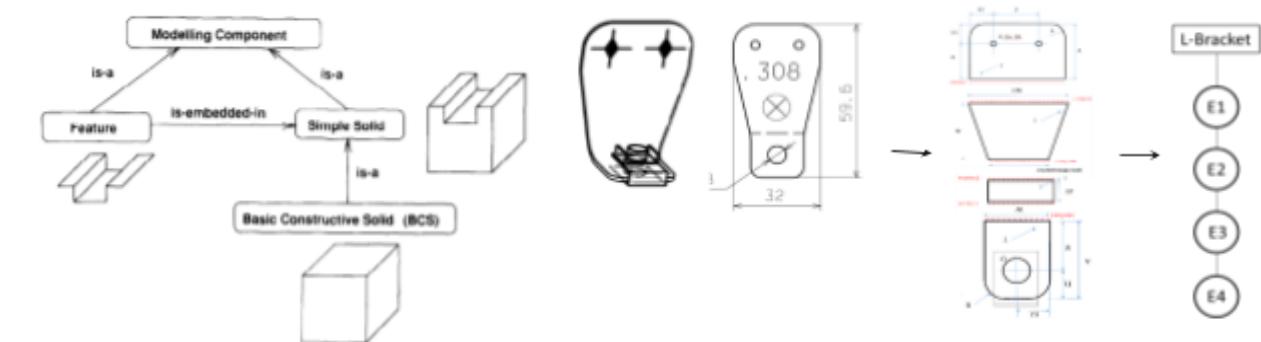
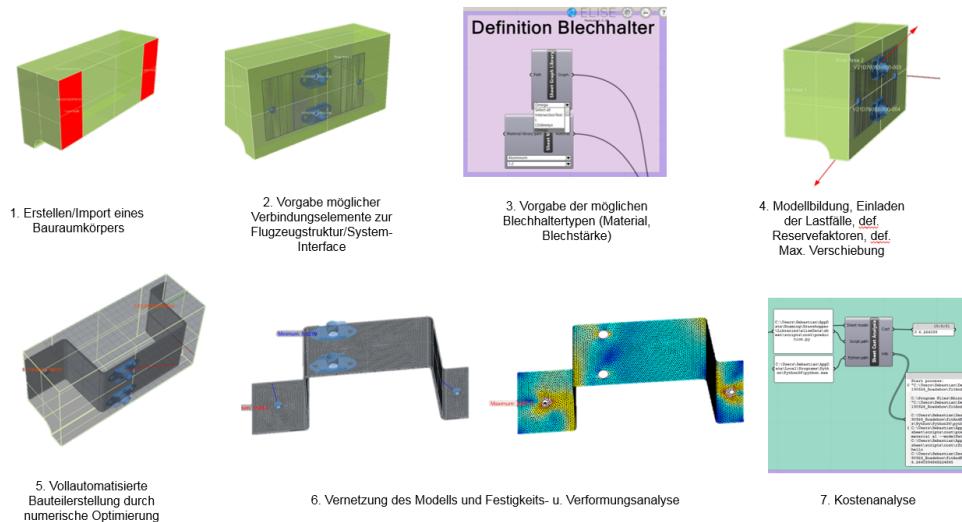


Abbildung 5.1.1: Bauteilmodellierung mittels Features [FLA 18] sowie Design Automatisierung mittels klar definierten Features am Beispiel eines Flugzeugstruktur AM-L-Halters

Flasinski's Ansatz lässt sich sehr gut für einige Features von AM-Bauteilen nutzen, um Bauteilgeometrien graphenbasiert abzuleiten, wie beispielsweise bei klar definierten Geometrien (bspw. AM-Haltern), die nach Airbus Design Prinzipien (RSDP - Reference Structure Design Principles) erstellt werden. Das Design von AM-Strukturen gemäß dem Ansatz „complexity for free“ ist jedoch nicht mittels der Anreichung von Design-Features umsetzbar. Hierbei wurden im Projektzeitraum modellbasierte Workflows aufgebaut, welche unter anderem auf eine klassische Topologieoptimierung zurückgreifen, um daraus dann automatisiert die Lastpfade für das Bauteil abzuleiten (vgl. Abb. 5.1.8).

### AP5.1 MS5.1.2: Funktionsfähige vernetzte Demonstrator-Anwendung Einfache Baugruppe 1 in Grasshopper

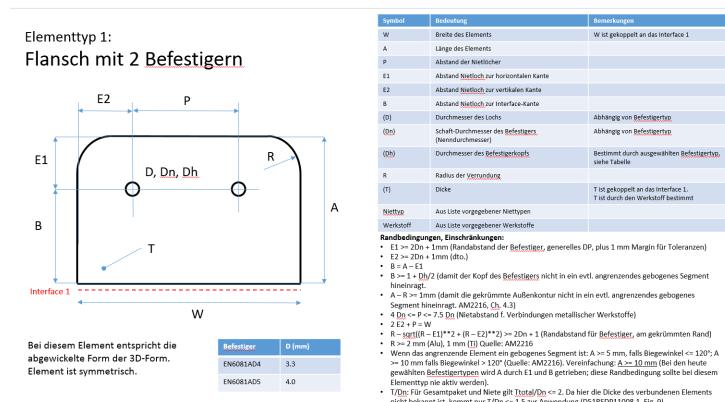
Eine Prozesskette zum automatischen Erstellen von Blechbiegehaltern (die später auf AM umgestellt werden können) inklusive Annietmuttern und Nieten (einfache Baugruppe) wurde in Zusammenarbeit mit der Elise GmbH erfolgreich umgesetzt. Die Prozesskette hat das Niveau eines Technologie-Demonstrators. Für die Implementierung der Prozesskette innerhalb des Premium AEROTEC Engineering sind weitere Ausarbeitungen vonnöten.



**Abbildung 5.1.2: Feature basierter AM-Halter als Baugruppe, inkl. Annietmuttern und Nieten**

Die Umsetzung der vollautomatisierten Erstellung von Omega-Blechbiege-Haltern erfolgt mittels einer Formensprache, welche mit der Programmiersprache C# abgebildet wurde.

Um ein Software-Tool zu erstellen, welches mittels einer numerischen Optimierung die richtige Kontur des Blechbiege-Halters findet, ist es nötig die einzelnen möglichen Formelemente von Blechbiegehaltern detailliert zu beschreiben, damit diese durch Regeln abgebildet werden können. Abbildung 5.1.3 zeigt ein solches Formelement mit seinen möglichen Parametern.



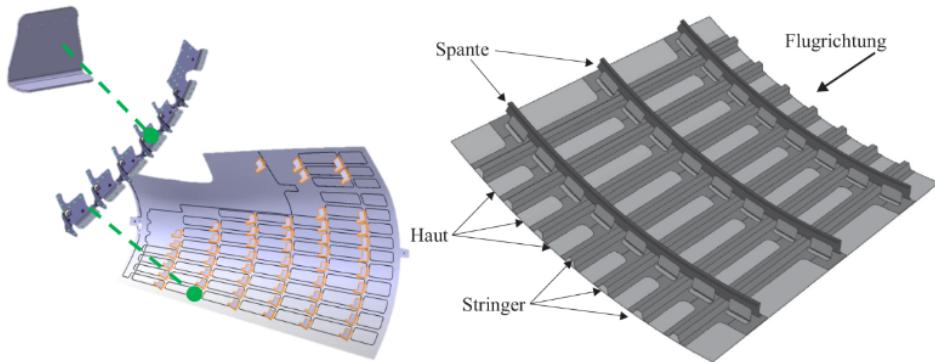
**Abbildung 5.1.3: Elementtyp einer Formensprache und deren Regeln**

Auf dem Niveau einer Machbarkeitsstudie konnten Omega-Blechhalter mit verschiedenen Bauräumen und Lastannahmen erstellt werden. Die automatisch erstellten Halter wurden gemäß der auftretenden Lasten dimensioniert. Niete und Annietmuttern sind an den vorgegebenen Interface-Punkten der Flugzeugstruktur angebunden.

### AP5.1 MS5.1.3: Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung Einfache Baugruppe 2

Die Untersuchungen und Arbeitsergebnisse zeigen auf, dass es möglich ist aus Metadaten der Belastungs- u. Verformungsanalysen der Flugzeugstruktur sowie aus der CAD Master-Geometrie des

Flugzeuge, die Clips vom Typ L für die Verbindung von Stringer und Flugzeughaut zu erstellen. Die heute manuell erstellten Clips können zukünftig automatisiert erstellt werden, da alle benötigten Daten vorhanden sind und die Geometrie der Clips durch die Airbus RSDP (Reference Structure Design Principles) regelbasiert beschrieben werden kann.



**Abbildung 5.1.5: Automatisiertes Erstellen von L-Haltern und deren automatisierte Positionierung auf einer Rumpfsektions-Schale**

Der in Abbildung 5.1.5 schematische Aufbau einer Testschale zeigt, wie die AM-L-Clips für eine ausgewählte Flugzeug-Rumpfschale positioniert sind.

Die von dem Berechnungsingenieur bereitgestellten Metadaten zur Clip-Erstellung (Niet-Anzahl, Breite, Höhe, Dicke, Position) werden mittels Python-Skripte aus der Berechnungsdatenbank ausgelesen. Die Daten zur Positionierung der Clips werden aus der Flugzeug-Master-Geometrie ermittelt.

Die bereitgestellten Daten werden automatisiert in das CAD Werkzeug CATIA eingelesen und die positionsspezifischen Parameter werden einem vordefiniertes Bauteil Template aufgeprägt.

Anschließend werden die erstellten Clips mittels der Positionsdaten in der Baugruppe der Flugzeugrumpf-Schale positioniert.

Final findet im System eine Überprüfung statt, ob die Bauteilerstellung sowie die Bauteilpositionierung funktioniert haben. Dies geschieht über eine Clash-Analyse. Die Ergebnisse weisen auf dem Niveau einer Machbarkeitsstudie erfolgreich nach, dass eine automatisierte Erstellung von diversen Haltern der Flugzeugstruktur möglich ist.

Mit diesem automatisierten Workflow ist es nun möglich, mit unterschiedlichen Technologien (z.B. AM) gefertigte Halter schnell in das Gesamtmodell zu integrieren und für etwaige Trade-Studies zu berechnen.

#### **AP5.1 MS5.1.4: Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung / Komplexe Baugruppe 1**

Zur Erreichung des Meilensteins 5.1.4 war das Ziel die Erstellung einer funktionsfähigen Demonstrator Anwendung einer komplexen Baugruppe. Hierfür wurde zunächst ein Produkt identifiziert, welches als Technologieträger dient. Ausgewählt wurde das Batteriesystem eines elektrisch betriebenen fiktiven Luftfahrzeuges. Ein Batteriesystem erlaubt es, einen multidisziplinären Ansatz für eine komplexe Baugruppe zu wählen. Dieser Ansatz soll mittels modellbasiertem Engineering an einem digitalen

Schatten des Systems umgesetzt werden. Die zur Kühlung und strukturellen Versteifung additiv herzustellenden Kühlplatten sind hierbei ein zentraler Bestandteil des cyber-physicalen Gesamtsystems.

Für den Entwurf der Kühlplatten sind multiphysikalische Aspekte zu den mechanischen Eigenschaften, Fertigungsbedingungen, Strömungsmechanik und Thermodynamik zu berücksichtigen.

Das Ziel war es, alle anfallenden Daten im Entwicklungsprozess miteinander zu verbinden. Das parametrische Design des Batteriesystems ist ein Bestandteil des zu erstellenden Produktentstehungs-Workflows, welcher sich in unterschiedliche Prozessschritte gliedert:

1. Einlesen der Inputdaten (Abb. 5.1.6) als json Datei mit den Design Parametern (Abb. 5.1.7)
2. Verarbeiten der Inputdaten zur Geometrieerstellung
3. Erstellen einer parametrischen Konstruktion
4. Erstellen einer Stückliste mit Bezeichnung, Anzahl und Zuordenbarkeit aller Bauteile
5. Erstellen aller anfallenden 3D Daten als STEP-Datei
6. Export aller zu erstellenden Dateien (Stückliste, 3D Daten) in eine Datenbank

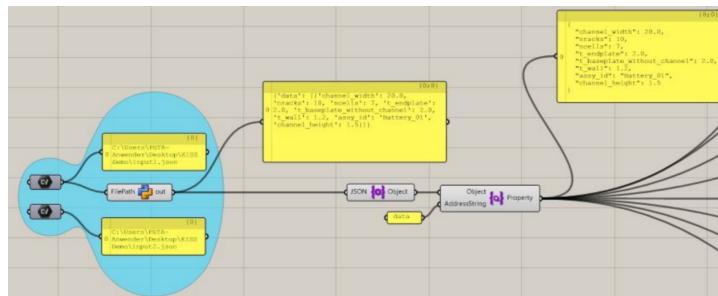


Abbildung 5.1.6: Darstellung des Workflows in Rhino / Grasshopper zum Einlesen des json files

```
C:\Users\PETA-Anwender\Desktop\KISS Demo> input.json >
1  [
2    "data": [
3      {
4        "assy_id": "Battery_01",
5        "nracks": 10,
6        "ncells": 7,
7        "channel_width": 20.0,
8        "channel_height": 1.5,
9        "t_wall": 1.2,
10       "t_baseplate_without_channel": 2.0,
11       "t_endplate": 2.0
12     }
13   ]
14 ]
15 ]
```

Abbildung 5.1.7: Darstellung des json files mit Modellparametern

Nach dem Einlesen der Designparameter, wurde das Batterie-Gesamtsystem erstellt (Abbildung 5.1.7). Die parametrische Konstruktion besitzt die folgenden Eigenschaften

- variable Anzahl der Batteriezellen
- variable Anzahl der Zellen-Module
- variable Geometrien der Kühlplatten (Wandstärken, Querschnitt des Luftkanals)
- variable Geometrien der Gegenplatte sowie der Abschlussplatten
- div. Anbauteile (Ventile, Verschlüsse, Muttern, Schrauben, BMS)

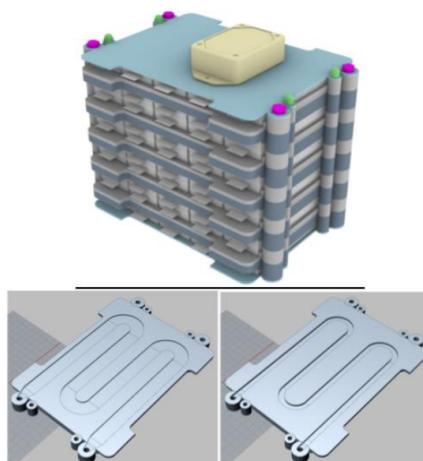


Abbildung 5.1.7: Darstellung des Batterie-Gesamtsystems, sowie der in unterschiedlichen Ausführungen generierten Kühlplatten

Folgende Ergebnisse konnten mit Rhino / Grasshopper als Low-Code Umgebung umgesetzt werden:

- Aufbau eines Batteriesystems als parametrisiertes CAD-Modell mittels Rhino / Grasshopper.
- Es konnten die Anzahl der Batteriezellen, der Zellmodule, sowie die Geometrien der Kühlplatten (Wandstärken, Querschnitt des Luftkanals) parametrisch erstellt werden.

Folgende Aspekte sind mit Rhino / Grasshopper nicht umsetzbar:

- Headless Steuerung

Das automatisierte Variation der Geometrieparameter zur Generierung von unterschiedlichen Konfigurationen per Skriptsprache im “Headless Mode” ist mit Rhino 6 nicht realisierbar

- Ansteuerung per API / Skript (Integration in Datenpipeline)

Eine Ansteuerung per Script (Batch File in der Kommandozeile) ist nur zum Teil möglich. Das Ausführen der Batch Datei, startet Rhino/Grasshopper und lädt die gewünschte Konfiguration, allerdings ist ein ebenfalls automatisches Beenden in Rhino / Grasshopper nicht möglich

Die Arbeiten an den beschriebenen und erfüllten Meilensteinen in HAP 5 zeigen auf, dass datengetriebene Prozessketten für die jeweiligen Problemstellungen des AM-Design aufgebaut werden konnten. Ein (teil)automatisiertes Erstellen von AM-Bauteilen ist möglich, da der Input für die Bauteile immer dieselbe Struktur aufweist (Bauraum als .stp-File, Lasten als Excel File Input). Auch die Bearbeitung von Baugruppen und das damit verbundene Erstellen von vielen AM-Haltern ist realisierbar. Wichtig für die Automatisierung des Design-Prozesses ist eine genaue Beschreibung der Geometrie.

### II.5.c.2 AP5.2 - Automatisierte AM Vorbereitung

Bei der Herstellung von AM-Bauteilen müssen unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden, welche einen entscheidenden Einfluss auf das Endergebnis haben. Hierbei ist eine ganzheitliche Betrachtung der einzelnen und zu automatisierenden Prozessschritte notwendig, um eine rentable und fehlerfreie Generierung zu gewährleisten. Diese ist bisher im Herstellungsprozess von metallischen 3D-Druck Bauteilen nicht gegeben.

AP5.2 untersucht die Möglichkeiten zur automatisierten Bewertung der Herstellbarkeit von AM-Bauteilen. Die für den metallischen 3D-Druck erforderlichen Stützstrukturen (StSt) sind beim Herstellen von Bauteilen notwendig, um ein „absacken“ der bereits erstellten und überhängenden Bauteilbereiche zu verhindern. Für eine effiziente Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums, sollen die Bauteile in ihrer Position verschachtelt (Nesting) und ausgerichtet werden, sodass möglichst viele in einem Herstellprozess unter Berücksichtigung der zu erwartenden Kosten hergestellt werden können. Diese Arbeitsschritte, sowie die anschließende Verzugssimulation, sollen weitestgehend automatisiert und in einer für den Anwender einheitlichen Arbeitsumgebung realisiert werden.

### Meilensteine

AP5.2 – Automatisierte AM-Vorbereitung			
Bezeichnung	Konkretes Thema	erwähnt in Halbjahresbericht	Meilenstein erfüllt?
AP5.2 <b>MS5.2.1</b> Automatische Generierung von Stützstrukturen	Generierung von unterschiedlichen Stützstrukturen in Rhino / Grasshopper und ELISE	1.Halbjahr 2019 1.Halbjahr 2020 2.Halbjahr 2021	JA
AP5.2 <b>MS 5.2</b> Automatische Druckjob Generierung	Automatisches Nesting der Bauteil im vorgegebenen Bauraum. Simulation der Bauteilverzüge und Ermittlung der zu erwartenden Herstellungskosten	2.Halbjahr 2021 1.Halbjahr 2022	JA

Zu Beginn der Arbeiten wurde als Entwicklungsumgebung Rhino/Grasshopper verwendet und unter Zuhilfenahme selbst entwickelter Python Scripts zunächst einfache und später baumartige StSt entwickelt (Abbildung 5.2.1).

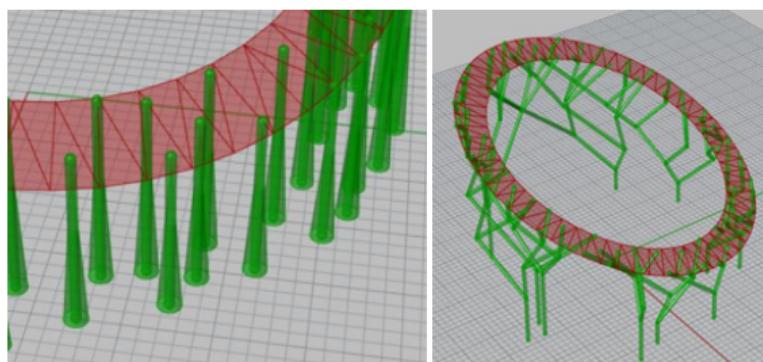


Abbildung 5.2.1: StSt in Rhino/Grasshopper

Im weiteren Projektverlauf zeigten sich, wie in AP5.1 bereits beschrieben, Grenzen in der Anwendung von Rhino6/Grashopper.

Daher wurden die bereits erarbeiteten prototypischen Tools (MicroServices) auf die Low-Code Plattform ELISE der gleichnamigen ELISE GmbH (ab 2023 dann Synera GmbH) übertragen und im weiteren Projektverlauf weiter ausgebaut.

Der Anwender kann das zu bearbeitende Modell direkt in ELISE mittels unterschiedlicher Dateiformate importieren und evtl. Flächenfehler gegebenenfalls automatisch reparieren lassen (Abb. 5.2.2).

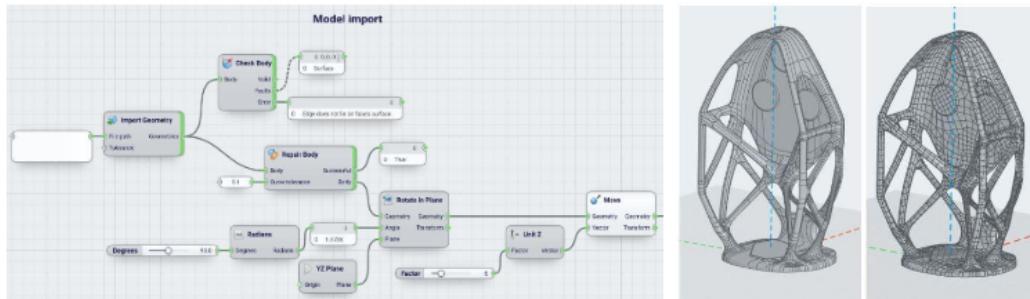


Abbildung 5.2.2: Modell Import in ELISE und Netzdarstellung

Zum automatisierten Anordnen und Ausrichten der Modelle kann eine sog. "Design Exploration" (Abb. 5.2.3) innerhalb des generativen Designprozesses angewandt werden. Anhand einer Rotation des Bauteils wird dieses innerhalb des Bauraums neu positioniert (Abb. 5.2.4) und die zu erwartenden Herstellungskosten ermittelt, welche die geringsten Gesamtkosten darstellen. Als Grundlage dieser Berechnungen und der daraus resultierenden Ergebnisse dient das in Zusammenarbeit mit HAP 1.3 entwickelte Kostenmodell, welches als Microservice in den Workflow eingebunden wird und die für eine Kostenabschätzung notwendigen Daten auswertet.

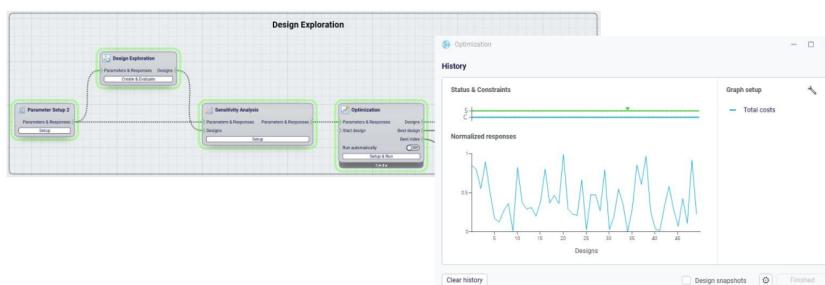


Abbildung 5.2.3: Darstellung der Design Exploration

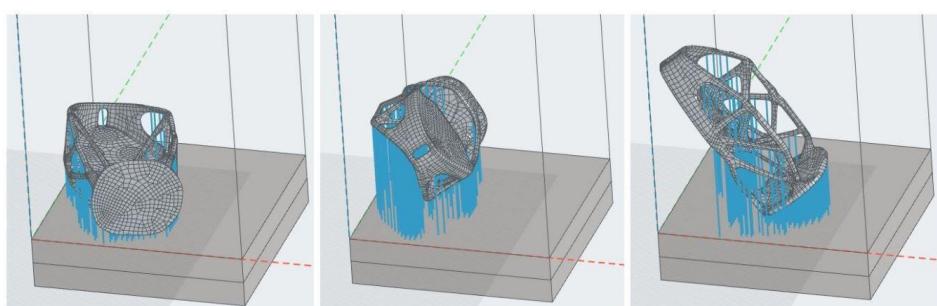


Abbildung 5.2.3: Unterschiedliche Bauteilausrichtungen und Visualisierung mit einfachen StSt

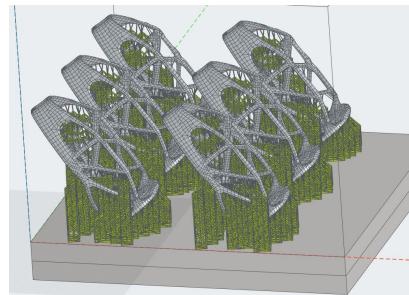


Abbildung 5.2.4: Druckfertiges Nesting mit 6 Bauteilen

Als Endergebnis wird eine Auflistung der anzunehmenden Kosten des Druckjobs zur Verfügung gestellt, welche in unterschiedlichen Formaten wie z.B. Excel, .txt, oder .csv exportiert und zur weiteren Analyse verwendet werden können.

Die Auflistung beinhaltet u.a. die folgenden Werte:

- Gesamtkosten des Druckjobs
- Druckzeit
- Anzahl der Bauteile

Bei einer Neuausrichtung des Bauteils werden die StSt automatisch neu generiert und die Ergebnisse aktualisiert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die zu berechnenden Modelle innerhalb des Workflows auszutauschen. Hierbei werden die Anzahl, die Ausrichtung inkl. der StSt und die Kostenermittlung an die neuen Gegebenheiten angepasst (Abb. 5.2.5).

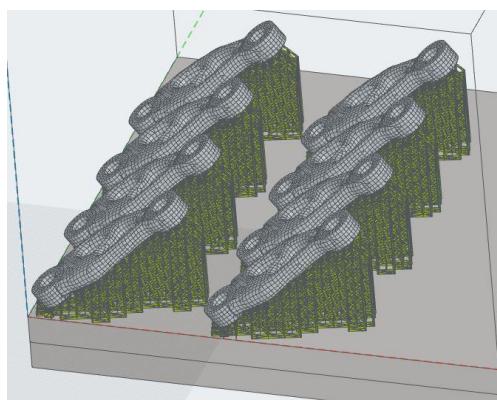


Abbildung 5.2.5: Austausch des Modells mit 8 Bauteilen sowie Neuberechnung der StSt

Zur Berechnung der Verzugssimulation können die Modelldaten an die Amphyon-Module innerhalb des Workflows zur weiteren Berechnung übergeben werden. Dem Anwender stehen unterschiedliche Szenarien zur Berechnung zur Verfügung. Evtl. Änderungen können jederzeit direkt analysiert werden, um ein möglichst den Anforderungen gerechtes Endergebnis zu erhalten. Diese werden für den Anwender grafisch dargestellt. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Abweichungen des simulierten Modells zum Originalmodell anzuzeigen, oder anhand einer Überlagerung beider Modelle die betroffenen Bereiche weitergehend zu analysieren (Abbildung 5.2.6).

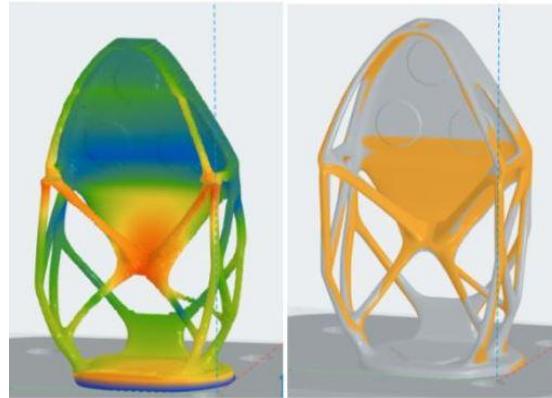


Abbildung 5.2.6: grafische Darstellung der Bauteilverzüge

### Zusammenfassung der Ergebnisse

In den getätigten Untersuchungen wurde aufgezeigt, dass es mit der Verwendung der Software ELISE, dem Add in e-Stage zur Generierung der Stützstrukturen, einer Kostenanalyse, sowie der Einbindung von Amphyon zur Simulationsberechnung ermöglicht wird, dem Anwender eine durchgängige Prozesskette zur automatisierten AM-Vorbereitung zur Verfügung zu stellen.

Der einmalig in ELISE erstellte Workflow kann für unterschiedlichste Bauteile immer wieder angezogen werden und muss nicht jedes mal manuell durchlaufen werden. Dabei können jederzeit im Workflow verwendete Module ausgetauscht oder von der jeweiligen Fachgruppe aktualisiert werden.

Ein Austausch der neu zu berechnenden Modelle bewirkt eine automatische Aktualisierung der zur AM-Vorbereitung notwendigen Ergebnisse. Eine Parallelisierung der Kostenanalyse mit unterschiedlichen Maschinenparametern, ermöglicht außerdem den direkten Vergleich z.B. bei verschiedenen Anordnungen des Bauteils, des Materials oder der verwendeten Maschine.

### II.5.c.3 AP5.3 - Globale AM Bauteiloptimierung

In den Arbeitspaketen 5.1 und 5.2 werden die grundlegenden Funktionalitäten für eine globale ALM Bauteiloptimierung entwickelt. Diese Funktionalitäten werden außerdem zu Demonstrator-Anwendungen zusammengeführt. Die dabei gewählte Herangehensweise zeichnet sich durch eine theoretisch beliebige Skalierbarkeit aus. Diese Skalierbarkeit umfasst unter anderem die Größe, Komplexität und Funktionen eines Bauteils, Anzahl von Subsystemen und Komplexität einer Baugruppe, sowie die Anzahl und Komplexität der verwendeten Analysetools. Rein theoretisch ist die vollständige Auslegung einer Flugzeugkabine [MOT16] über graphenbasierte Entwurfssprachen möglich. Im Rahmen von diAMpro wird allerdings der Fokus auf komplexe Einzelteile und Baugruppen gelegt.

Das Arbeitspaket 5.3 befasst sich mit der Bewertung und Validierung einer entwickelten und automatisierten Prozesskette für AM-Bauteile. Außerdem erfolgt eine Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten und Schwierigkeiten einer skalierten Version. Dies umfasst eine theoretische Auseinandersetzung und Prüfung von Strategien zur globalen „multiobjective“ Bauteiloptimierung, erweiterte Funktionen zu programm internen Entscheidungsvorgängen, welche für eine lernende und selbstadaptierende Konstruktionsumgebung gebraucht werden, die Steuerung über eine vergleichsweise einfach gehaltene Mensch-Maschinen-Schnittstelle als Web-Interface, geeigneten Systemarchitekturen und der durch eine solche Automatisierung bedingten Veränderung der Arbeitsweise, des Arbeitsumfeldes eines Ingenieurs und an die veränderten Beruflichen Anforderungen.

Aus dieser Betrachtung werden die Grundlagen für die Umsetzung durch skalierte Anwendungen abgeleitet und die gewonnenen Erkenntnisse aus diAMpro wirtschaftlich wiederverwertet.

### Meilensteine

AP5.2 – Automatisierte AM-Vorbereitung			
Bezeichnung	Konkretes Thema	erwähnt in Halbjahresbericht	Meilenstein erfüllt?
AP5.3 <b>MS5.3.3:</b> Verwendete Methoden Bewertet und Validiert	FAV Bracket AM-Design & Vorbereitung	1. Halbjahr 2022	ja

Die Grundlagen für die Erstellung einer Prozesskette zum automatisierten AM-Design wurden in Meilenstein **AP5.1 MS 5.1.1: Funktionsfähige Demonstrator-Anwendung Augenbrackets in Grasshopper** gelegt (Halbjahresberichte: 2. Halbjahr 2018 (Grundlagen)1. Halbjahr 2019). Diese Grundlagen wurden gemeinsam mit der Elise GmbH weiterentwickelt. Abbildung 5.3.1 zeigt die erstellte Prozesskette zum automatisierten Erstellen von AM-Bauteilen mit der Bauteileigenschaft “complexity-for-free”. Die wesentlichen Module und damit verbundenen Prozessarbeitsschritte sind mit Überschriften gekennzeichnet.

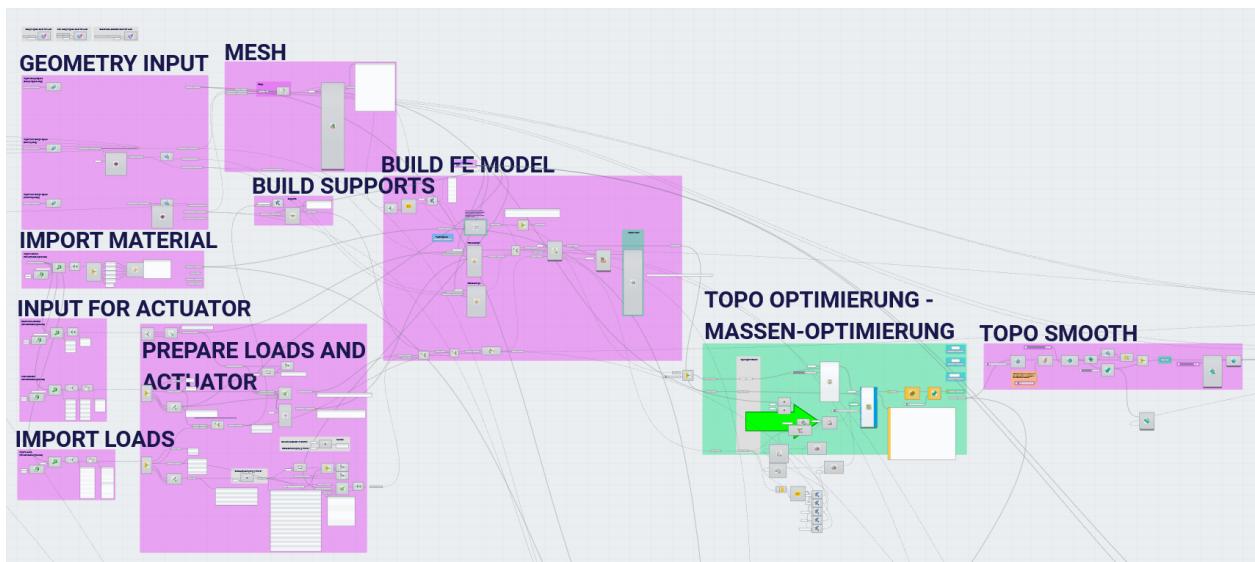
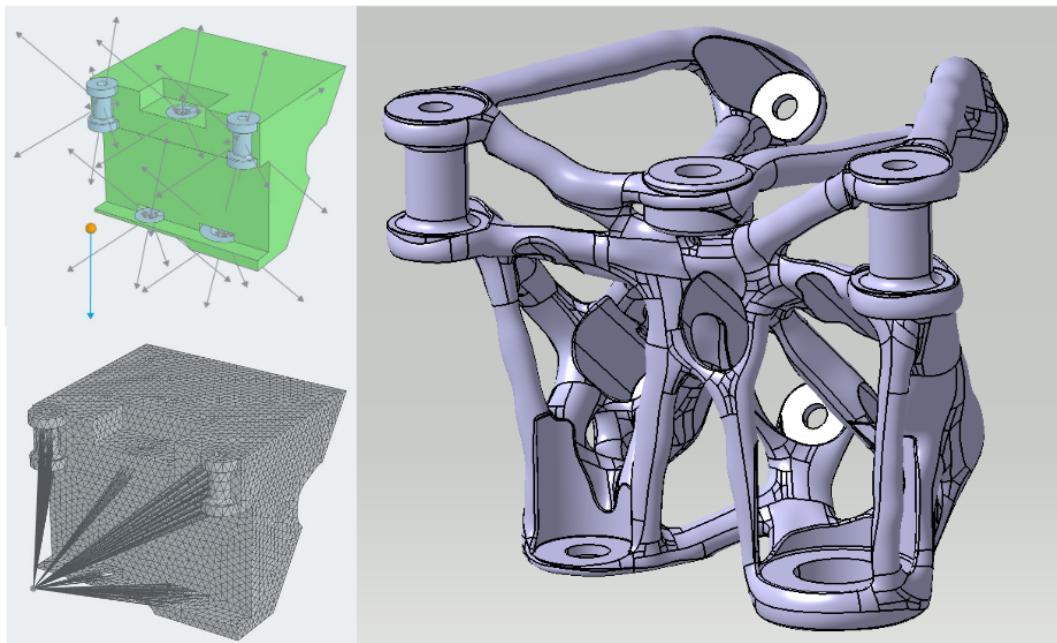


Abbildung 5.3.1: AM automatisierter Design-Prozess in der Elise Low Code Plattform

Abbildung 5.3.2 zeigt die jeweiligen Teilergebnisse der Prozesskette. Das Geometriemodell mit den auftretenden Lastfällen sowie den automatisch vernetzten (Finit-Element Modeling) Geometriekörpern, welche auch als Input für die Topologieoptimierung dienen. Das Ergebnis ist eine geglättete Topologieoptimierung mit verrundeten Kanten unter Berücksichtigung aller Lastfälle, des vorgegebenen Bauraums sowie aller Anschlusspunkte für die Flugzeugstruktur und angrenzende Systeme.



**Abbildung 5.3.2: automatisch vernetzter Bauraum mit allen Lastfällen und die automatisch erstellte AM Bracket als Ergebnis nach dem Ansatz “complexity-for-free”**

Insgesamt bieten datengetriebene Workflows wie in Abbildung 5.3.1 enormes Potential zur Zeitersparnis bei der AM-Bauteilentwicklung. Die Entwicklungszeit kann deutlich, um ca. 60%, reduziert werden. Dies wurde anhand des in Abbildung 5.3.2 dargestellten Bauteils überprüft und validiert.

#### **Erstellung einer durchgängigen Prozesskette zur automatisierten AM-Vorbereitung**

Dieser Workflow beinhaltet alle notwendigen Module, um dem Anwender eine aussagefähige Vorabschätzung zur Verfügung zu stellen. Er besteht aus dem Erstellen bzw. dem Importieren der Bauteile in ELISE, dem Nesting, der Generierung der notwendigen StSt, einer Kostenermittlung sowie der Simulationsberechnung der Bauteilverzüge (Abb. 5.3.3). Die Funktionen der jeweiligen Module wurden bereits in AP5.2 genauer beschrieben. Dieser Bericht bezieht sich auf die Funktionalität des gesamten Workflows.

Folgende bei Airbus kommerziell verfügbare Software wurden in den Workflow integriert.

- ELISE, generative design (ELISE GmbH) (Workflow Plattform)
- e-Stage, Generierung der StSt (Materialise)
- Amphyon, Simulationsberechnung der Bauteilverzüge (Additive Works)
- Excel (Microsoft)

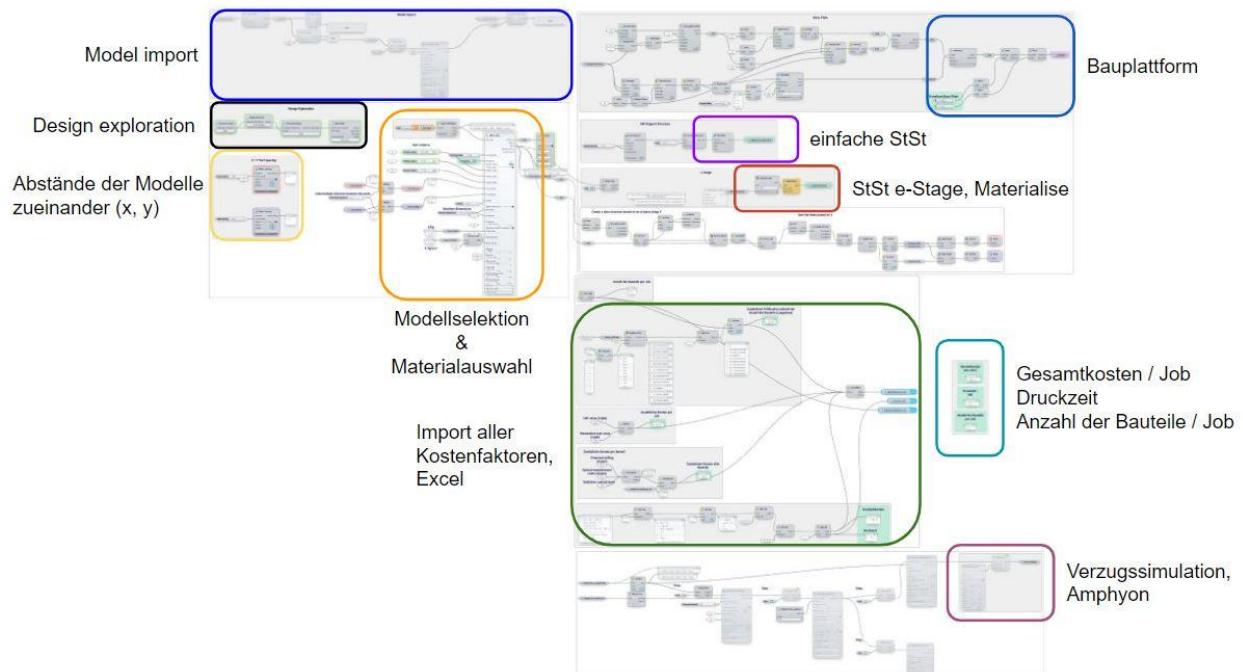


Abbildung 5.3.3: Darstellung des Workflows

Anhand der Kombination von unterschiedlichen Programmen in einer einheitlichen Benutzeroberumgebung und der direkten Einbindung von zusätzlichen Standard-Softwarelösungen wie z.B. Excel, ist die Möglichkeit geschaffen, bisher getrennt voneinander ablaufende Prozessschritte zu bündeln und dem Anwender zur Verfügung zu stellen. Er kann zu jeder Zeit bereits vor der Herstellung der Bauteile die aktuellen Prozessschritte überwachen und gegebenenfalls darauf Einfluss nehmen (Abbildung xxx).

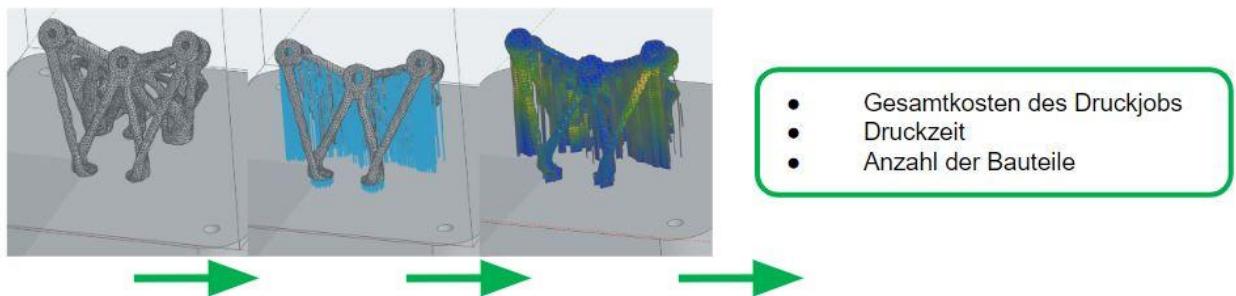


Abbildung 5.3.4: Visualisierung des Modells in unterschiedlichen Prozessschritten

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in AP 5.3 aufgebaute digitale Prozesskette zum AM-Bauteildesign sowie zur AM-Fertigungsvorbereitung ist bereits weit fortgeschritten im Aufbau und der damit verbundenen Einbindung von benötigten Tools (bspw. Altair - Hypermesh - Optistruct - Amphyon, Materialise Magics sowie Eigenentwicklungen). Auch hinsichtlich der Kostenermittlung von AM-Bauteilen wurde bereits mit dem Fachbereich der Premium AEROTEC GmbH in Varel zusammengetragen. Die Software der Elise GmbH "Elise", in der alle Workflows aufgebaut wurden, ist mittlerweile auch nach intensiven Sicherheitsprüfungen bei der Premium AEROTEC GmbH verfügbar. Für den Einsatz im operativen Bereich sind noch Feinheiten in der Designoptimierung durchzuführen, wie bspw. das Verrunden von Bauteilkanten und die Glättung der Bauteilloberfläche (ggf. mit Hexagon Emendate möglich - Elise Plugin). In der Fertigungsvorbereitung sind die Kosten für die jeweiligen Bauteile noch zu konkretisieren

und für eine gute Entscheidungsgrundlage auch Kosten für vergleichbare Technologien wie bspw. Fräsen zu implementieren.

## II.5.d Zusammenfassung

Um datengetriebene Workflows zu erstellen, bedarf es einer passenden Softwarelösung, welche auch die Skalierung des Tools ermöglicht. Die Elise GmbH hat sich während des Projektzeitraums zu einem Start-Up mit einer eigenen Software-Umgebung entwickelt, orientiert an den Bedürfnissen ihrer industriellen Partner. In Zusammenarbeit mit der IT Abteilung der Premium AEROTEC GmbH, ist es gelungen, die in diAMpro gelegten Grundlagen zu verwerten und im operativen Bereich weiterzuentwickeln. Für den breiten Einsatz müssen im Folgenden verschiedene Unternehmensprozesse für die datengetriebene Produktentwicklung weiter angepasst werden und eine validierte Bibliothek von modularen Micro Services aufgebaut und verifiziert werden..

### **Erstellung einer durchgängigen Prozesskette zum automatisierten AM-Design**

Die beschriebenen modularen Prozessketten zeigen, dass es möglich ist, einen digitalen datengetriebenen Prozess zu entwickeln, der alle Anforderungen an das AM-Bauteil-Design beinhaltet und aufgrund des modularen Charakters generisch auch für andere Fertigungstechnologien verwendet werden kann. Es ist möglich, mittels Programmierschnittstellen (API) auch andere kommerzielle Softwarelösungen von Drittanbietern einzubinden. Dadurch lässt sich eine hohe Flexibilität bezüglich Versionierung und Änderungen im Prozessablauf erreichen. Im beschriebenen Beispiel wurden Altair Hypermesh für die Finite-Elemente-Methode eingebunden und Altair Optistruct, um eine Bauteil-Topologieoptimierung durchzuführen. Die beschriebene Lösung bietet großes Potential zur Zeit- und Kostenersparnis beim Entwurf von AM-Bauteilen. Solche digitalen Prozessketten lassen sich unternehmensweit auch auf andere Problemstellungen skaliert anwenden.

### **Erstellung einer durchgängigen Prozesskette zur automatisierten AM-Vorbereitung**

Mit der beschriebenen Lösung wurde aufgezeigt, dass die Bündelung aller bisher separaten Prozesse in einer zentralen Datei, welche für ein frühzeitiges und aussagefähiges Ergebnis notwendig ist, umsetzbar und sinnvoll ist. Durch die Wiederverwendbarkeit des erstellten ELISE-Workflows, bei Bedarf auch nur einzelner modularer Sequenzen, der Kombination mit bereits bestehenden, sowie der Einbindung von unterschiedlichen Softwarelösungen, welche aus dem Workflow heraus angesteuert werden oder direkt in den Arbeitsablauf integriert werden können, ist die Möglichkeit geschaffen, eine durchgängige Prozesskette zur AM-Vorbereitung zu realisieren. Diese Lösung ermöglicht es dem Anwender, seine Tätigkeiten zur AM-Vorbereitung zu automatisieren und bereits zu Beginn der Druckjobauslegung die Faktoren, welche das Endergebnis beeinflussen, frühzeitig zu erkennen und ihnen im Bedarfsfall entgegenzuwirken.

### **Globale Optimierung und Validierung**

Die Ergebnisse der aufgebauten Prozesskette zum Bauteil-Design wurden am FAV-Bracket validiert. Es ist gelungen, mittels der Prozesskette ein zum aktuellen Entwurf vergleichbares Design zu erzeugen. Mittels der in der digitalen Prozesskette integrierten Strukturoptimierers wurde das Gewicht des Bauteils nochmals reduziert. Die für Titan maximal zulässigen Verformungen und Spannungen wurden über alle Lastfälle eingehalten. Anhand einer Design Exploration, welche als Optimierungsziel die geringsten Herstellungskosten hatte, konnte der Prozess zur AM-Vorbereitung im Bereich der Bauteilanordnung auf der Bauplattform, um einen weiteren wichtigen Prozessschritt erweitert werden. Auf diese Weise können diverse Parameter aus dem AM-Design oder der AM-Vorbereitung in einem vorgegebenen Grenzbereich optimiert werden.

## II.6 Voraussichtlicher Nutzen

Im Folgenden werden für die einzelnen Arbeitspakete die wichtigsten Ergebnisse, deren Nutzen und Verwertung tabellarisch dargestellt.

### HAP1 - Steuerung AM Prozesskette

Ergebnis	Referenz	Verwertung
1.1 Dokumentenmanagement	Zwischenbericht 2-2020	Erarbeitung Datenmanagement Konzept und Einführung PLM
1.1 Prüfberichte auslesen und übertragen	Zwischenbericht 2-2021	In Zusammenarbeit mit APWORKS, automatisiertes Auslesen von Prüfergebnissen und Übertragung ins SAP
1.2 Digitale Bauteil Tasche	Zwischenbericht 2-2020	Abteilungsübergreifendes Arbeiten, Etablierung von neuen Bauteilen in der Abteilung inkl. Informationsspeicherung
1.2 RHB Überwachung	Zwischenbericht 1-2022	Digitales Pulver Management
1.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse	Zwischenbericht 2-2021	Überarbeitung und Optimierung AM Kalkulation und Durchlaufzeiten
1.3 Feinplanungstool	Zwischenbericht 2-2021	Informationsbereitstellung für VAM-Varel, im Mai 2022 etabliert. Erarbeitung AMP

### HAP2 - Materialfluss

Verwertungsziel	Referenz	Verwertung und Nutzen
2.1 Effekte durch automatische Pulverförderung		In Abteilung POVT5>> Regeln zum Pulvermischverhältniss zur Einführung automatisierter zentrale Förderanlagen verifiziert und in interner Spezifikation dokumentiert
2.2 Wiederaufdruck von Plangesägten Al-Platten	Zwischenbericht 5-2020	In Abteilung POVT5 >> Für ersten Bauteile bereits nutzbar >> Validierungsversuche müssen noch nachgezogen werden
2.2 Notwendige Ebenheit der Substratplatten gesenkt	Zwischenbericht 9-2020	In Abteilung POVT5 >> Arbeitsanweisung wird entsprechend angepasst
2.3 Data Matrix für Bauteile und Femis	Zwischenbericht 02-2019	In Abteilung POVT1 für Sorten Mix in Lang-Eco-Tower EWO 80 Spannmittel
2.3	Zwischenbericht 08-2020	In Kombination mit Baumsupportstrukturen für AM-Titan und AM-Alu bei POVT5

Support Entfernung mittels Chem.-Fräsen		
--------------------------------------------	--	--

### HAP3 - Qualitätssicherung

Ergebnis	Referenz	Verwertung
Analyse Coating-Bilder	Zwischenbericht 01-2021	Erstellen von Filmsequenzen aus Coating Bildern zur schnellen Baujobkontrolle. Potential zur Prozessketten-Änderung zusätzlich erkannt.
SFM zur KPP Überprüfung	Zwischenbericht 01-2021	Digitale „Kontrolle“ von realen KPPs unter Verwendung einer Drehachse, an verschiedenen Stellen im Bauraum sind jetzt in der Fertigung möglich
Auswertung der mechanischen Eigenschaften von Zugproben	Zwischenbericht 07 / 2021	Bei Zugversuchen hat sich in der Dehnung eine signifikante, in Teilen sprunghafte Änderung gezeigt, die in eindeutigem Zusammenhang zu den eingebrachten Fehlern steht.
Vergleich unterschiedlicher Systeme zur Detektion von Fehlern	Zwischenbericht 01-2021	Analyse der Sensitivität ermittelt, strategische Entscheidungsvorlage zur Systemauswahl
Einfluss Stabilität der KPP auf Eigenschaften von AlMgSc / Ti-6Al-4V	Zwischenbericht 01-2020 / Zwischenbericht 01-2019	Prozessfenster sind ermittelt, Parametervariationen und Intervalle haben auf die Dichte jeweils den größten Einfluss. Produktivitätssteigerungen sind mit einer Veränderung der Parameter oder Parameter Kombinationen bei einem stabilen Prozessfenster möglich.
Belichtungszeit vs. Belichtungsfläche	Zwischenbericht 02-2020	Ein Einfluss auf die Entstehung von Fehlern durch Unterschiede in der Belichtungszeit sowie der Größe der Belichtungsfläche ist festgestellt
Detektion der Schwankungsbreiten im HIP-Prozess	Zwischenbericht 01-2019	Systemantworten nach dem HIP-Prozess bei Veränderung der KPP-Parameter sind bestimmt

### HAP4 - Prozesssimulation

Ergebnis	Referenz	Verwertung
Geometrieerkennungsmodul	Zwischenbericht 2-2020	Übertragbar auf Projekte, bei welchen Bauteile in Segmente (design features) unterteilt werden müssen
ML-Architektur (U-Net)	Zwischenbericht 2-2020	Übertragbar auf neuronale Netze, bei welchen hochdimensionale Daten, wie 3D-Geometrien, verarbeitet werden müssen
Browser Basiertes User Interface	Zwischenbericht 1-2021	Typischer Web-Service mit Frontend, Backend, Jenkins Server und Pipelines kann für andere Anwendungen, wie z.B. Tools für Kostenanalyse, einfach modifiziert werden

Powder Bed Inspection Tool	Zwischenbericht 2-2021	Anwendung des Tools erfolgt als Proof of Concept bei den Aluminium 3D-Druckern am PAG Standort Varel
----------------------------	---------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------

### HAP5 - Automatisiertes AM Design

Ergebnis	Referenz	Verwertung / Nutzen
Demonstrator Anwendung FAV-Bracket	2. Halbjahr 2018 (Grundlagen) 1. Halbjahr 2019	Proof of Concept automatisiertes AM Design durch datengetriebene modellbasierte Workflows in einer LowCode Umgebung.
Demonstrator Anwendung Einfache Baugruppe 2 L-Clip Seitenschale	1. Halbjahr 2022	Nachweis der Machbarkeit (PoC) zum automatisierten Erstellen sowie automatisierten Positionieren von diversen Clip Typen mittels Micro-Services welche zu einem datengetriebenen Workflow verschaltet werden. Eingabe des PoC als Zukunftsprojekt des Engineerings.
Funktionsfähige Demonstrator Anwendung komplizierter Baugruppen Batteriesystem mit AM Kühlplatten	1. Halbjahr 2021	Nachweis der Machbarkeit (PoC) von komplexen geometrischen Systemen mittels Low Code Workflows und ersten modellbasierten Konstruktionsprozessen (Einbindung von bspw. Requirements-Engineering sowie Modellierungs- und Simulationsumgebungen für bspw. Thermodynamik). Bekanntmachung von einer modellbasierten Arbeitsweise im Engineering. Grundlage für den LuFo Antrag des Projektes AMoBaCoD
Automatische Generierung von Stützstrukturen	1.Halbjahr 2019 1.Halbjahr 2020 2.Halbjahr 2021	Erstellung von unterschiedlichen Stützstrukturen in der AM-Vorbereitung. Durch die Visualisierung kann der Anwender die für seinen Anwendungsfall geeignete auswählen. Diese Auswahl betrifft die Form der Stützstrukturen sowie die Position in Abhängigkeit zur Bauteilausrichtung. Geplante Nutzung der Erkenntnisse und Low-Code Workflows in der AM Vorbereitung im Werk Varel.
Automatische Druckjob Generierung	2.Halbjahr 2021 1.Halbjahr 2022	Erstellung einer Kostenschätzung für AM-Bauteile inkl. Nesting, der Generierung der notwendigen Stützstrukturen sowie einer Verzugssimulation innerhalb eines Workflows. Dadurch ist ein frühzeitiges Erkennen von evtl. Störfaktoren und Kostentreibern bereits vor der Herstellung der Bauteile möglich. Geplante Nutzung der Erkenntnisse und Low-Code Workflows in der AM Vorbereitung im Werk Varel.

## **II.7 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten**

Weitere Projektergebnisse können in den Abschlussberichten der genannten Projektpartner eingesehen werden.

Die Anwendung künstlicher Intelligenz durchdringt auf breiter Front die Industrie. Ein noch ausstehender signifikanter Fortschritt auf diesem Gebiet liegt in der Klärung der Zulassungsfähigkeit von durch künstliche Intelligenz erzeugter Ergebnisse (Nachvollziehbare KI).

Die großen Datenbankanbieter z.B. SAP oder AWS bieten in ihren neuen Lösungen mittlerweile Funktionalitäten zum Aufbau semantisch verknüpfter Datenbankverzeichnisse als Leistungsstarke Ergänzung zu den klassischen relationalen Datenbanksystemen

Darüber hinaus wurden keine signifikanten Fortschritte bei Dritten auf den im Vorhaben betrachteten Gebieten identifiziert.

## **II.8 Veröffentlichungen, Vorträge und studentische Arbeiten**

### **Studentische Arbeiten**

Norda, M.; Prozessüberwachung für mittels Selective Laser Melting (SLM) additiv gefertigte Luftfahrtkomponenten aus Ti6Al4V, Master-Thesis, (2018), S.70-82, Hochschule Emden/Leer

Ewen, S.; Einflussanalyse zur Schwankungsbreite im additiven Scalmalloy-Druck unter Variation definierter Schlüsselparameter, Master-Thesis, (2019), S.51-97, Hochschule Emden/Leer

Lüers, L.; Untersuchung zum Einfluss der Prozessparameter des HIP-Verfahrens auf die Werkstoffeigenschaften von lasergesinterten TiAl6V4, Bachelor-Thesis, (2019), S.34-42, Jade Hochschule Wilhelmshaven

Seifert, H.; Untersuchung zum Einfluss der Prozessparameter des HIP-Verfahrens auf die Werkstoffeigenschaften von lasergesinterten TiAl6V4, Master-Thesis, (2020), S.39-73, Jade Hochschule Wilhelmshaven

Schnibbe, J.; Prozessstabilität des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens von TiAl6V4 in der Luftfahrtbranche unter Betrachtung der Key-Prozessparameter, Bachelor-Thesis, (2019), S.50-58, Hochschule Bremerhaven

Grove, Marius, Design und Optimierung einer Entwurfssprache für eine Spant-Kupplung im Flugzeugbau, Bachelor Thesis, Hochschule Bremen, 2020

Azinheiro Ribeiro, Matilde, Multidisziplinäre Optimierung von Batterie-Komponenten für elektrische Flugzeuge, Bachelor Thesis, technische Hochschule Regensburg, 2020

## III Referenz

### III.1 Verwendete Abkürzungen

AIMS	Airbus Material Specification
AIPS	Airbus Process Specification
AM (ALM)	Additive (Layer) Manufacturing
AMoBaCoD	Applied Model Based CoDevelopment (ASA LuFo VI.3 Projekt)
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface
ASA	Airbus Aerostructures GmbH (Nachfolgeorganisation der früheren PAG)
BMS	Batteriemanagementsystem
BRD	Business Requirements Dossier
CSV	Comma Separated Values (Dateiformat)
CT	Computertomographie
DT	Zerstörende Werkstoffprüfung
ELISE	3D-Software der Elise GmbH (heute SYNERA GmbH)
e-Stage	Software zur automatisierten Generierung von Stützstrukturen
HAP	Haupt-Arbeitspaket
HIP	Heiß-Iosostatisches Pressen
HJB	Halbjahresbericht
JSON	JavaScript Object Notation (Dateiformat)
KPP	Key Performance Parameter / Schlüsselparameter
MS	Meilenstein
NDT	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
QS	Qualitätssicherung
SFM	Scan Field Monitor
STEP	STandard for the Exchange of Product model data (Dateiformat)
StSt	Stützstrukturen
TXT	Textdatei
VI	Visuelle Prüfung
WB	Wärmebehandlung
X-Ray	Röntgen Untersuchung

### III.2 Literatur

- [HEA10] Hemmen, A.: *Herausforderung einer automatisierten Prozesskette*. Arbeitskreis Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie 19.05.2021 in München
- [HEA11] Hemmen, A.: Automatische Generierung von Supportstrukturen. Zeitschrift INSITE Varel, Ausgabe 03 / Dezember 2020
- [LEG10] Leibach, G.: *Entwicklung von industrialisierbaren Lösungsansätzen für die automatisierte Pulverprozessierung in einer additiven Fertigungsline*. Master-Thesis Jade Hochschule 21.06.2019
- [CAP10] Caspari, P.: *Analyse und Optimierung des Pulverentfernungsergebnisses für den Post-Processing Bereich einer vollautomatisierten additiven Fertigungsline*. Bachelor-Thesis TU Ilmenau 10.09.2019

- [STE20] Stelling, O.; Maywald, K.: *Einfluss der Prozessführung während des heißisostatischen Pressens auf Eigenschaften und Mikrostruktur von additiv gefertigten TiAl6V4*. HTM - Journal of Heat Treatment and Materials 75, (2020) 1, S. 35-47
- [NOR18] Norda, M.; *Prozessüberwachung für mittels Selective Laser Melting (SLM) additiv gefertigte Luftfahrtkomponenten aus Ti6Al4V*, Master-Thesis, (2018), S.70-82, Hochschule Emden/Leer
- [EWE19] Ewen, S.; *Einflussanalyse zur Schwankungsbreite im additiven Scalmalloy-Druck unter Variation definierter Schlüsselparame*ter, Master-Thesis, (2019), S.51-97, Hochschule Emden/Leer
- [LÜE19] Lüers, L.; *Untersuchung zum Einfluss der Prozessparameter des HIP-Verfahrens auf die Werkstoffeigenschaften von lasergesintertem TiAl6V4*, Bachelor-Thesis, (2019), S.34-42, Jade Hochschule Wilhelmshaven
- [SEI20] Seifert, H..; *Digitale Erfassung von Prozessparametern für die Additive Fertigung*, Master-Thesis, (2020), S.39-42; S.65-70, Jade Hochschule Wilhelmshaven
- [SNI19] Schnibbe, J..; *Prozessstabilität des pulverbett basierten Laserstrahl schmelzens von TiAl6V4 in der Luftfahrtbranche unter Betrachtung der Key-Prozessparameter*, Bachelor-Thesis, (2019), S.50-58
- [KRE20] Krey, K..; *Einfluss von Prozess-Parameter-Variation auf das Fehlerbild von Ti-6Al-4V in der Additiven Fertigung*, Master-Thesis, (2020), S.96-104, Universität Bremen
- [FLA18] Flasinski, M.; *Use of graph grammars for the description of mechanical parts*, Computer-Aided Design Volume 27 Number 6 June 1995
- [MOT16] Motzer; Dissertation: Entwurf und Auslegung von Flugzeugkabinen, 2016
- [AN1] Änderungsantrag im Projekt diAMpro zur Implementierung der Themen Data Analytics, Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen, 2019
- [RFB1] Ronneberger, Fischer, Brox, U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Segmentation. MICCAI, Springer, 2015