

Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft  
insbesondere für KMU und Handwerk – **ForCYCLE II**

## Abschlussbericht

*Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Einsatz von verwendungsortnahen  
3D-Drucktechnologien – REV3D*

### Projektleiter und durchführende Hochschule

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kunze  
Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm  
Institute for Logistics, Risk- and Resource Management (ILR)  
Wileystraße 1, 89231 Neu-Ulm  
Tel. 0731/9762-1418  
E-Mail: [oliver.kunze@hnu.de](mailto:oliver.kunze@hnu.de)

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp  
Universität Augsburg  
Lehrstuhl für Ingenieurinformatik mit Schwerpunkt Produktionsinformatik  
Am Technologiezentrum 8, 86159 Augsburg  
Tel. 0821/598-69310  
E-Mail: [johannes.schilp@informatik.uni-augsburg.de](mailto:johannes.schilp@informatik.uni-augsburg.de)

### Projektmitarbeiter und -mitarbeiterinnen

Prof. Dr. Oliver Kunze (HNU)  
Prof. Dr. Johannes Schilp (UA)  
Fabian Frommer (HNU)  
Fabio Oettl (UA)

### Kooperationspartner

ABC Tautenhahn GmbH  
Danziger Straße 20, D-89250 Senden

Datadruck GmbH  
Leibier Weg 8, 89278 Nersingen

Honold Service Logistik GmbH  
Ernst-Abbe-Str. 5-7 89231 Neu-Ulm

---

Industrie- und Handelskammer Schwaben  
Edisonallee 7, 89231 Neu-Ulm

Ingenics AG  
Schillerstraße 1/15, 89077 Ulm

IWL AG  
Hörvelsinger Weg 62/1, 89081 Ulm

Logistik Cluster Schwaben e.V.(LCS)  
Stettenstraße 1, 86150 Augsburg

Pro3D GmbH  
Charlottenstr. 65, 10117 Berlin

### **Projektlaufzeit**

01.Juli 2019 bis 31.Dezember 2021

Neu-Ulm, Dezember 2021



**HNU**  
Hochschule Neu-Ulm  
University of Applied Sciences

**UA**  
Universität  
Augsburg  
University

---

## **Abstract (Kurzzusammenfassung)**

Im Projekt REV3D wird die Erhöhung der Ressourceneffizienz durch den Einsatz von verwendungsortnahen 3D-Druck-Technologien untersucht. Insbesondere sollen dabei die ökologischen Potentiale des 3D-Drucks (zum Beispiel in Logistik und Produktion) erforscht werden. Neben den ökologischen Potentialen wird außerdem untersucht wie KMU beim Einstieg in die Nutzung von 3D-Druck-Technologien (insbesondere im Hinblick auf das Technologieauswahl-, Geschäftsmodell-, Nachhaltigkeits-, Weiterbildungs- und Integrations-problem) unterstützt werden können.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract (Kurzzusammenfassung)</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Planung und Ablauf der Arbeiten</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse</b> .....	<b>8</b>
<b>4 Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse und Darstellung der Kooperation mit Wirtschaftspartnern</b> .....	<b>23</b>
<b>5 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts</b> .....	<b>24</b>
<b>6 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund</b> .....	<b>25</b>
6.1 Zusammenarbeit mit Wissenschaftspartnern .....	25
6.2 Zusammenarbeit mit Wirtschaftspartner .....	25
6.3 Zusammenarbeit im Projektverbund .....	25
<b>7 Zusammenfassung</b> .....	<b>26</b>
<b>8 Ausblick</b> .....	<b>27</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>28</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>29</b>
Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis.....	29
Anlage 2: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft .....	30
Anlage 3: Flussdiagramm Prozesskette .....	31
Anlage 4: Qualitätsrelevante Parameter entlang der Prozesskette .....	32

---

# 1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung

3D-Druck oder auch Additive Manufacturing (AM) ist eine potentiell disruptive Technologiefamilie. Das weltweite Marktpotential von 3D-Druck wird nach Wohlers (2017) für 2018 mit 9,464 Mrd. US\$ und für 2022 bereits mit 26,187 Mrd. US\$ veranschlagt. Eine neuere Studie von PWC<sup>1</sup> im Jahr 2018 schätzt das weltweite Marktpotential von 3D-Druck etwas konservativer für 2030 mit 22,6 Mrd € bei durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten zwischen 13% und 23%. Gleichzeitig hat 3D-Druck ein hohes ökologisches Potential. Nach Gebler et al. (2014) zeigt 3D Druck das Potential, bis 2025 Kosten um 170-593 Mrd. US\$, das gesamte Primärenergieangebot um 2,54-9,30 EJ und die CO<sub>2</sub> Emissionen um 130,5-525,5 Mt zu reduzieren.

Die Nutzung von diesen neuartigen Technologien bietet potenzielle ökonomische und ökologische Vorteile insbesondere in Bezug auf die Ressourceneffizienz. Der Einstieg in solche Technologien sowie der Nutzung werden jedoch Problemstellungen auf:

- **Technologieauswahlproblem**  
Die Vielfalt der verschiedenen Drucktechnologien macht es KMUs schwer, geeignete Technologien für ihren jeweiligen Anwendungsfall zu identifizieren.
- **Geschäftsmodellproblem**  
d.h. das Geschäftspotential (Chancen & Risiken, Investitionen, Kosten, Geschäftsmodell & Erlöse) zu bewerten, und dabei weder zu früh in eine neue Technik einzusteigen noch das Thema zu spät aufzugreifen, und von der Konkurrenz überholt zu werden
- **Nachhaltigkeitsproblem**  
d.h. die Nachhaltigkeit und die ökologischen Auswirkungen der 3D-Druck-Technologie hinreichend genau bewerten zu können
- **Weiterbildungsproblem**  
d.h. die Beherrschung der 3D-Druck-Technik muss i.d.R. erst erlernt werden
- **Integrationsproblem**  
Die Integration eines 3D-Druck-Prozesses in herkömmliche Produktionsprozesse von Kunden stellt KMU, die als Dienstleister in eine komplexere Supply-Chain eingebunden sind vor neue Herausforderungen in Bezug auf Qualitäts-, Zeit- und Dokumentationsnotwendigkeiten.

Das Ziel des Projektes ist es zum einen die ökologischen Potenziale der verschiedenen 3D-Druck-Verfahren (inklusive der logistischen Potentiale) in der praktischen Anwendung noch besser zu quantifizieren und zum anderen die KMUs beim Bewältigen der genannten fünf Problemstellungen zu unterstützen.

---

<sup>1</sup> <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/3d-druck.html>

---

## 2 Planung und Ablauf der Arbeiten

3D-Drucktechnologien oder auch additive Fertigungsverfahren bestehen im Bereich des Prototypings schon seit über 20 Jahren. In verschiedenen Industriezweigen, wie der Luft- und Raumfahrt, dem Werkzeugbau oder der Medizintechnik haben sich diese Produktionsprozesse bereits teilweise etabliert (Zäh et al. 2018).

In den letzten Jahren wurden die Verfahren um immer neuere Technologien ergänzt. Nannte Hagl (2015) noch 8 verschiedene „3D-Druck-Technologien“, und die DIN EN ISO 17296-2 7 „Prozesskategorien“, so nennen Ansari Chaharsoughi et al. (2017) bereits 15 verschiedene additive Fertigungsverfahren, die sich im Wesentlichen in 5 Kategorien aufteilen lassen: Verfahren mit Harzen, Verfahren mit Pulverbett, Strangablageverfahren, kombinierte und sonstige Verfahren. Bereits anhand der genannten Quellen zeigt sich die Dynamik des Marktes.

Die Prozesse rund um 3D-Druck werden u.a. in VDI 3405 2014 bisher im Wesentlichen nur generisch in die Prozessschritte Pre-Prozess, In-Prozess, Post-Prozess und nachgelagerte Prozesse eingeteilt. Prozessdetailbeschreibungen sind in verschiedenen Normungsgruppen derzeit noch in Arbeit. Im Bereich der Rückverfolgbarkeit und Transparenz von Fertigungsprozessen wird von Chrystolouris (2013) beschrieben, dass das Aggregieren von Daten im Fertigungsprozess einerseits zur Qualitätskontrolle der Produkte nötig ist und andererseits zur Überwachung und Optimierung des Fertigungsprozesses verwendet werden kann. Zeyn (2017) sieht die digitale Prozesskette als Voraussetzung für die Industrialisierung der Additiven Fertigung: von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel. Weiterhin wird u.a. vom VDI (Bauer et al. 2016) folgenden Forschungsbedarf postuliert: „Es besteht also Bedarf an speziellen Ausbildungen und Schulungen (...) sowie an einer systematischen Applikationsforschung (...).“

Gleichzeitig hat Additive Manufacturing ein hohes ökologisches Potential. Nach Gebler et al. (2014) zeigt 3D-Druck das Potential, bis 2025 Kosten um 170-593 Mrd. US\$, das gesamte Primärenergieangebot um 2,54-9,30 EJ und die CO<sub>2</sub> Emissionen um 130,5-525,5 Mt zu reduzieren.

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es daher, zum einen die ökologischen Potenziale der verschiedenen 3D-Druck-Verfahren (inklusive der logistischen Potentiale) besser zu quantifizieren und zum anderen bayrische Unternehmen beim Bewältigen der genannten fünf Herausforderungen zu unterstützen.

Die konkreten Ziele des Projektes REV3D umfassen in Forschung, Lehre und Transfer daher folgende Aspekte:

a) Reduktion des Ressourceneinsatzes u.a. durch

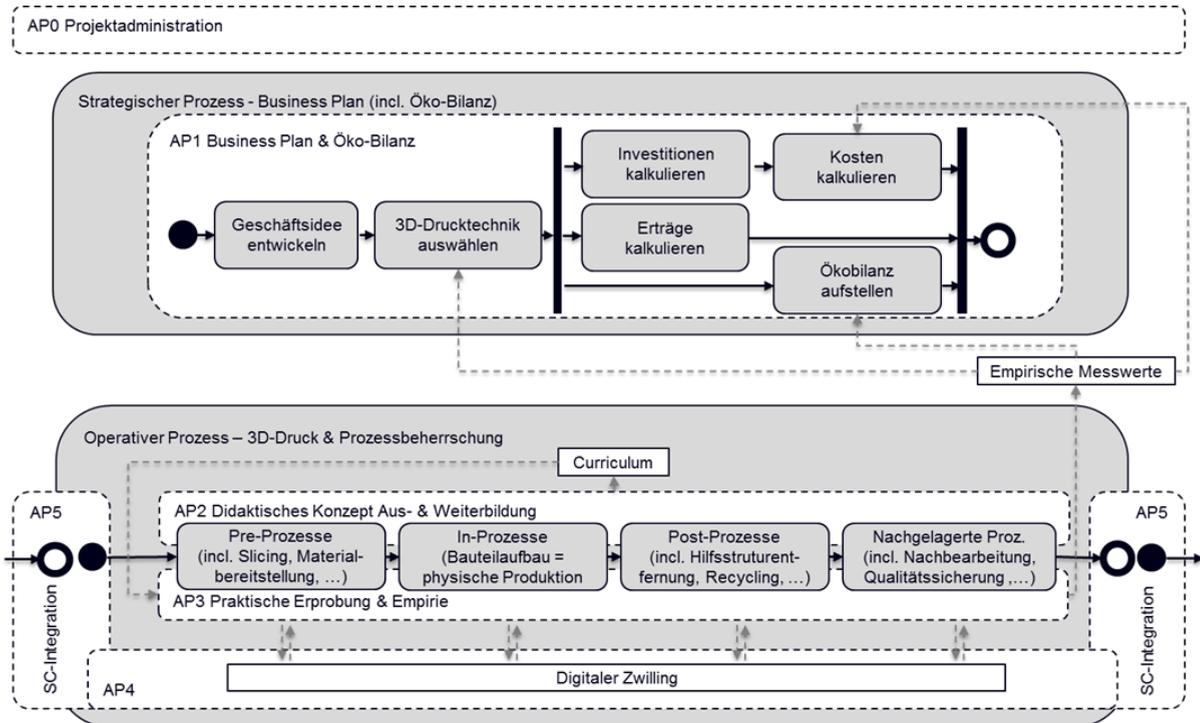
- Verfügbarmachung der neuen und vielfältigen 3D-Druck-Technologien für KMUs in der Produktion
- Reduktion des Ressourcenaufwands in der Transport- & Lagerlogistik

b) Stärkung der bayerischen KMU u.a. durch

- Verfügbarmachung von Templates, Daten und Beispielrechnungen (Business Plan, Ökobilanz) zur Chancennutzung & Risikobeherrschung auf strategischer Ebene
- Erstellung und Erprobung eines generischen Aus- & Weiterbildungscurriculum (Curriculum-Erstellung und -Erprobung) auf universitärer und handwerklicher Ebene
- Integrationshilfe für in eine Supply-Chain eingebundene KMU

- Beschleunigung des Wissenstransfers durch digitale Unterstützung entlang der Prozesskette

Für das Projekt ist die Verwendung von etablierten Standardmethoden aus den Bereichen Ökobilanzierung, Betriebswirtschaftslehre (Kosten-, Erlös- und Investitionsrechnung) und Prozessmanagement (Prozessmodellierung & -analyse, Schnittstellendesign & -analyse) vorgesehen.



**Abbildung 2-1: Übersicht der Arbeitspakete**

Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über den strategischen sowie den operativen Prozess des 3D-Drucks und den Arbeitspaketen des Forschungsprojektes REV3D, welche im Einzelnen kurz beschrieben werden.

**AP 0: Projektadministration**

Dieses AP umfasste das Projektmanagement incl. Organisation der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses PA, Reporting an den Fördermittelgeber und Dissemination.

**AP1: Business Plan & Öko-Bilanz**

Im AP1 wurde zur Lösung des Auswahlproblems auf der zu erstellenden Projekt-Webseite eine strukturierte Übersicht über die aktuell verfügbaren 3D-Druck-Verfahren entwickelt und fortgeschrieben. Neben Informationen zur jeweiligen Technologie und zu geeigneten Anwendungsfällen wurden Daten zu Investitions- & Betriebskosten, Materialbedarf, Recyclingfähigkeit, Energiebedarf & Produktionszeiten aus der Literatur und dem WWW erhoben, und mit Daten aus eigenen Laborerfahrungen (AP 3) angereichert.

Neben dieser Datenbereitstellung wurden Templates für Business-Pläne, Investitions- & Kostenrechnung, Erlöskalkulation und Ökobilanzierung auf Basis der Literatur für den Anwendungsfall „Einsatz von 3D-Druck in KMUs“ erzeugt und bereitgestellt. (Beitrag zum Technologieauswahl-, Geschäftsmodell- & Nachhaltigkeitsproblem– Teil 1)

**AP2: Didaktisches Konzept Aus- & Weiterbildung**

In diesem AP wurden notwendige Lerninhalte für eine Aus- & Weiterbildung zum Thema operative 3D-Druck-Produktion gesammelt, strukturiert und in ein skalierbares, modulares Curriculum

---

überführt. Dabei wurden neue Formen des Lernens (e-learning, blended learning) und konkrete Laborübungen (für das AP3) konzipiert. (Beitrag zum Aus- & Weiterbildungsproblem – Teil1)

#### AP3: Praktische Erprobung & Empirie

Basis für dieses AP war das 2018 erweiterte HNU-Logistik-Labor und das Labor am Lehrstuhl für Produktionsinformatik der UA. In diesen neuen Laborräumen wurden verschiedenartige 3D-Drucker betrieben, mit denen Studierende und Mitarbeitende interessierter KMU aus der Region nach den im AP2 erarbeiteten Curricula aus- & weitergebildet wurden.

Die empirisch aufbereiteten Ergebnisse der durchgeführten Laborübungen finden ihrerseits Eingang in die APs 1 und 4. Ein Schwerpunkt der Empirie liegt dabei auf dem Rohstoffverbrauch, Recyclingmengen und insbesondere den zeitlichen Aufwänden.

So können die Ergebnisse des AP2 im Lehrbetrieb der beiden Hochschulen validiert werden (= Lösungsansatz für das Aus- & Weiterbildungsproblem – Teil 2). Außerdem können die strategischen ökologischen und ökonomischen Bewertungen auf Basis von empirisch gewonnenem Erfahrungswissen an Robustheit gewinnen (Beitrag zum Technologieauswahl-, Geschäftsmodell- & Nachhaltigkeitsproblem– Teil 2)

#### AP 4: Digitaler Zwilling

In AP4 wurde auf Basis der vorangegangenen APs die Grundlage für die digitale Abbildung des Herstellprozesses gelegt (Digitaler Zwilling). Dadurch wird die Transparenz und Rückverfolgbarkeit zur Qualifizierung der Produkte gewährleistet. Ziel ist die Konzeption, Entwicklung und Umsetzung eines virtuellen Bauteildokuments, der sogenannten digitalen Bauteilakte (DBA), das alle nötigen Daten und Informationen zum Herstellprozess enthält. Dazu wurde AP4 in drei wesentliche, aufeinander aufbauende Arbeitsschritte unterteilt:

1. Auswahl gängiger AM-Prozessketten
2. Identifikation, Analyse und Bewertung z.B. qualitätsrelevanter Parameter entlang der Prozessketten
3. Konzeption und Implementierung eines Datenmodells zur strukturierten, systematischen Ablage und Weiterverarbeitung der Informationen

Durch die strukturierte Betrachtung des Herstellprozesses ist die Integration von AM-Verfahren in bestehende Systeme vereinfacht worden, zum anderen kann dieser sukzessive Wissensaufbau direkt für die Aus- und Weiterbildung genutzt werden.

(= Beitrag zum Aus- & Weiterbildungsproblem – Teil3 & Integrationsproblem – Teil1)

#### AP 5: Supply Chain Integration in mehrstufige Produktionsprozesse

Die wachsende Variantenvielfalt auf der einen Seite und die sinkende Reaktionszeit für sogenannte „Engineer-to-order-Produkten“ auf der anderen Seite führt zu rasant steigenden Anforderungen an Prozessketten sowie an die gesamte Supply Chain. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken, stellt die intelligente Einbettung von AM-Verfahren in bestehende Produktionssysteme dar, um auf kundenindividuelle Produktänderungen einzugehen. Wie bereits beschrieben, ist die Integration dieser neuen Fertigungstechnologien ein großes Hemmnis. Gerade an der Schnittstelle zwischen den Kundenanforderungen und dem druckbaren Teil kommt es in der Regel zu mehreren Iterationsschleifen, da trotz der hohen geometrischen Freiheit von AM-Verfahren immer noch Konstruktionsrestriktionen existieren (z.B. die Festlegung nötiger Supportstrukturen). Ziel von AP 5 war es solche zeitintensiven Schnittstellen zu identifizieren und Lösungsansätze zu entwickeln, welche Unternehmen bei der Integration des 3D-Drucks unterstützen. (= Beitrag zum Integrationsproblem – Teil2)

---

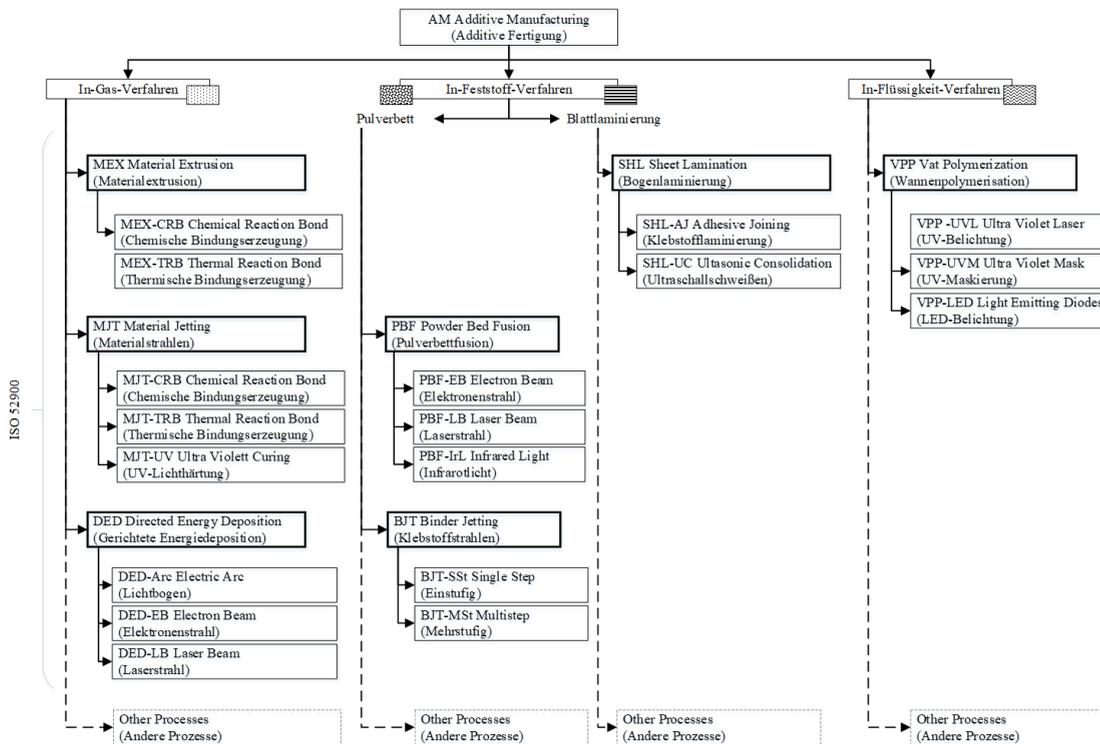
## 3 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete dargestellt. Anschließend findet eine Bewertung dieser Ergebnisse statt und der Beitrag zur Ressourceneffizienz wird erläutert.

### 3.1 AP 1

In AP 1 wird der strategische Prozess (insbesondere Business Plan und Ökobilanz) der additiven Fertigung untersucht. Dabei soll ein Lösungsansatz für das Technologieauswahl-Problem erarbeitet werden. Zur Unterstützung des strategischen Prozesses sollen des Weiteren Templates (z.B. für Investitions- und Kostenrechnung) erzeugt und bereitgestellt werden.

Im Rahmen von MS 11, wurde eine Technologieübersicht erstellt. In den Laboren der Hochschule Neu-Ulm und der Universität Augsburg stehen einige der Technologien aus dieser Übersicht (MEX, VPP und PBF) zur Verfügung. Zu Beginn des Projekts lag der Fokus bei der Erstellung der Technologieübersicht hauptsächlich auf jenen Technologien, welche in den Laboren verfügbar waren. Im weiteren Verlauf wurde die Technologieübersicht jedoch stark erweitert. Neben der Übersicht und der detaillierten Beschreibung der Technologien wurden die einzelnen Verfahren strukturiert kategorisiert. Die Technologiekategorisierung orientiert sich stark an der Norm DIN ISO 52900, um Konsistenz bei der Verwendung von Fachbegriffen zu gewährleisten. Um einzelne 3D-Druck Technologien visuell erklären zu können, wurde eine Icon-Struktur eingeführt, die neben der Funktionsweise auch Materialien und erforderliche Nachbearbeitungsprozesse darstellt. Ziel der Technologieübersicht ist es, regionale KMUs beim Technologieauswahlproblem zu unterstützen. Dafür wurden im Rahmen von AP1 Templates in Form von Checklisten für eine erfolgreiche Nutzung von MEX-, VPP- und PBF-Technologien erstellt (s. Projekthomepage – interner Bereich). Mit Hilfe dieser Checklisten kann die geeignete Technologie für einen spezifischen Anwendungsfall bestimmt werden. Außerdem wird die Technologieübersicht in kurzer Zeit im geplanten Fachbuch „3D-Druck für Manager“ veröffentlicht. Hier werden Charakteristiken sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen 3D-Druck Technologien genau beschrieben. Abbildung 3-1 stellt den aktuellen Stand der Technologieübersicht grafisch dar.



**Abbildung 3-1: Aktualisierte Struktur der Technologieübersicht**

Neben dem Technologieauswahlproblem sollen die Ergebnisse aus AP1 Unterstützung beim Geschäftsmodellproblem liefern. Dazu wurden Templates für eine wirtschaftliche Bewertung bereitgestellt (s. Projekthomepage – interner Bereich). Die wirtschaftliche Bewertung in AP1 fokussiert sich auf zwei Perspektiven: Investitionen & Kosten auf der einen und Erträge auf der anderen Seite. Die Erträge, welche mit dem Einsatz von 3D-Druck-Technologien generiert werden können, sowie die Faktoren, die dabei eine Rolle spielen, lassen sich nicht generalisieren und müssen je nach Ausgangssituation individuell bewertet werden. Dazu müssen verschiedene Aspekte beachtet werden. Um mögliche Erträge zu berücksichtigen, wurde daher ebenfalls eine Checkliste erstellt (s. Projekthomepage – interner Bereich). Anders als die Erträge, können Kosten & Investitionen standardisierter berechnet werden, auch wenn diese von Fall zu Fall variieren und von der Ausgangssituation der jeweiligen Unternehmen abhängen. Um mögliche Investitionen & Kosten zu analysieren und Unterstützung bei Management-Entscheidungen zu liefern wurden drei typische Szenarien mit variierendem Investitionsbedarf und variierenden Kostenstrukturen beschrieben:

- Szenario 1 (S1 – use & make):

Ein Unternehmen plant die Produktion mit 3D-Druck-Technologien und hat bereits in eine geeignete Technologie investiert. Die benötigte Technologie ist somit bereits vorhanden und die getätigte Investition wird als „Sunk Costs“ betrachtet.

- Szenario 2 (S2 – invest & make):

Ein Unternehmen plant die Produktion mit 3D-Druck-Technologien, muss die Investitionen dafür jedoch noch tätigen

- Szenario 3 (S3 – buy):

Ein Unternehmen beauftragt einen Service Provider, der die Produktion mit 3D-Druck-Technologien übernimmt.

Für die drei Szenarien wurden die relevanten Investitionen & Kosten systematisch kategorisiert (s. Projekthomepage – interner Bereich).

Neben Investitionen und Erträgen spielen 3D-Druck spezifische Kosten eine große Rolle für KMUs, die in die 3D-Druck Technologie einsteigen wollen. Aus diesem Grund war die strukturierte Erfassung und Darstellung der Kosten ein Schwerpunkt in Arbeitspaket 1. Im Laufe des Projekts wurden relevante Kosten durch Literaturrecherche sowie durch eigene Erfahrungswerte aus dem Laborbetrieb identifiziert. Diese Kosten wurden in einem Kostenrechnungstemplate gesammelt und dokumentiert. Das Template stellt ein Tool dar, welches durch die Eingabe von wenigen Informationen und Parametern eine relativ genaue Kostenschätzung für einen 3D-Druck Anwendungsfall liefert. Das Template enthält Daten zu den relevantesten 3D-Druck Technologien (MEX, VPP und PBF) sowie zu relevanten Druckmaterialien und kann durch die Kostenschätzung bei Managemententscheidungen unterstützen. In Abbildung 3-2 wird ein Ausschnitt des Templates dargestellt.

Technologieinformation			
verwendete Technologie			MEX
Material 1	M1		PLA
Material 2	M2		
Anteil Material 1	%		100
Anteil Material 2	%		0
Maschinenstundensatz	€		1
Metainformationen			
Drucker vorhanden?			Nein
CAD-Konstruktion vorhanden?			Nein
Erstellung einer CAD-Konstruktion notwendig?			Nein
3D-Scan notwendig?			Ja
3D-Scanner vorhanden?			Nein
Lizenz für CAD-Programm vorhanden?			Ja
Post-Processing-Infrastruktur vorhanden?			Nein
Bauteilinformationen			
Breite	$w_{Pa}$	cm	5
Länge	$l_{Pa}$	cm	5
Höhe	$h_{Pa}$	cm	5
geschätztes Volumen	$V_{Pa}$	cm <sup>3</sup>	125
Oberfläche	$A_{Pa}$	cm <sup>2</sup>	11,10
Losgröße	$n$	/	1
Fülldichte	$d$	%	50
Maschineninformationen			
Breite Bauraum	$w_B$	cm	25
Länge Bauraum	$l_B$	cm	25
Höhe Bauraum	$h_B$	cm	25

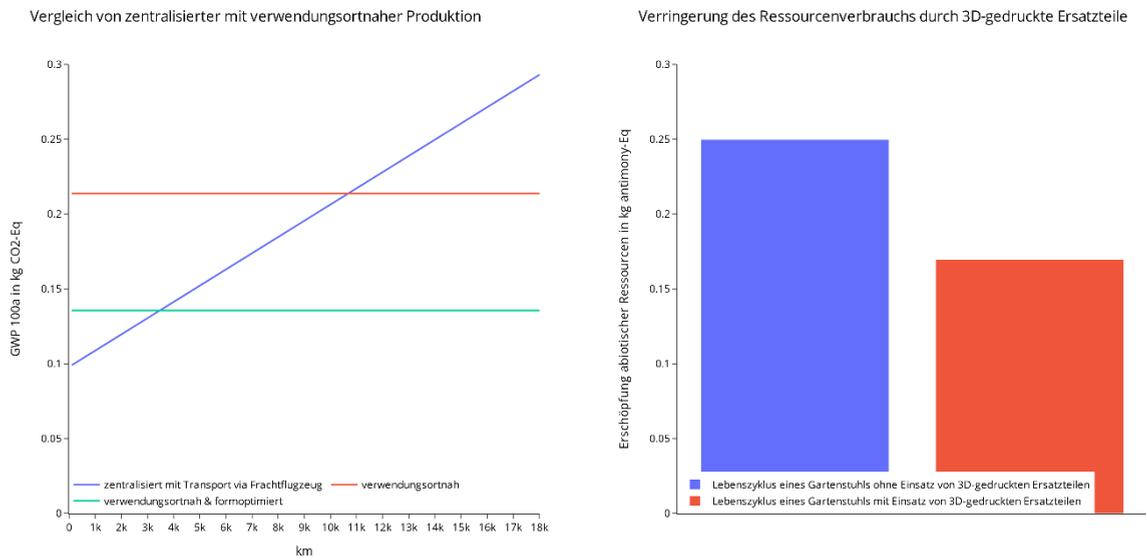
  

Kostenübersicht			
<b>Herstellkosten</b>	$C_H$	€	30,52 €
Direkte Materialkosten (M1)	$C_{D,M1}$	€	2,33 €
Direkte Materialkosten (M2)	$C_{D,M2}$	€	€
Indirekte Materialkosten	$C_{I,M}$	€	0,03 €
Maschinenkosten	$C_M$	€	4,17 €
Personalkosten	$C_P$	€	24,00 €
Gemeinkosten	$C_G$	€	€
<b>Investitionskosten</b>	$C_I$	€	25.000,00 €
3D-Drucker	$C_{I,3D}$	€	5.000,00 €
3D-Scanner	$C_{I,S}$	€	20.000,00 €
Post-Processing-Infrastruktur	$C_{I,PP}$	€	€
Prozessinformationen			
Geschätzte Fertigungszeit	$t_F$	h	4,17

Abbildung 3-2: Ausschnitt aus dem Kostenrechnungs-Template

Neben der ökonomischen Bewertung von 3D-Druck Technologien ist auch die ökologische Bewertung ein zentraler Bestandteil von Arbeitspaket 1. Im Rahmen von Meilenstein 11a wurde ein Template zur ökologischen Bewertung von 3D-Druck Technologien erstellt. Dieses Template enthält eine detaillierte Vorgehensbeschreibung zur Bilanzierung von Umweltwirkungen und fokussiert sich dabei insbesondere auf den 3D-Druck. Die Vorlage soll es unter anderem KMUs ermöglichen, eine Einführung in die ökologische Bewertung von 3D-Druck-Technologien zu erhalten, um diese danach erfolgreich anwenden zu können. Als Methode zur ökologischen Bewertung wurde die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) gewählt. Die Lebenszyklusanalyse kann Umweltwirkungen eines Untersuchungsobjekts „von der Wiege bis zur Bahre“ analysieren. Außerdem kann eine Lebenszyklusanalyse unterschiedliche Umwelteinflusskategorien betrachten. Somit liegt der Fokus nicht nur auf einzelnen Kategorien (z.B. Klimawandel), sondern auf einer möglichst ganzheitlichen Analyse entsprechender Umweltwirkungen. Aus diesen genannten Gründen betrachten wir die Lebenszyklusanalyse als geeignete

Methode zur ökologischen Bewertung von 3D-Druck Technologien und beschreiben diese im erstellten Template. Außerdem wurden Daten gesammelt, um die ökologische Bewertung für Unternehmen und insbesondere KMUs zu erleichtern. Hierbei wurden insbesondere die logistischen Aspekte des 3D-Drucks sowie die Ressourceneffizienz betrachtet, da der Fokus im Projekt REV3D auf verwendungsortnaher Produktion liegt. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden Lebenszyklusanalysen durchgeführt, um die ökologischen Umweltwirkungen von additiver mit konventioneller Fertigung zu vergleichen. Hierbei wurden insbesondere zwei Potentiale des 3D-Drucks quantifiziert. Die Lebenszyklusverlängerung der 3D-gedruckte Ersatzteile zum einen sowie die Substitution von Warentransport durch Datentransport und verwendungsortnahe Produktion zum anderen. Durch potenzielle Lebenszyklusverlängerungen lassen sich Ressourcen einsparen. Auch die verwendungsortnahe Produktion liefert ökologische Vorteile im Vergleich zu zentralisierten Produktionssystemen, welche lange Warentransportwege implizieren. Diese ökologischen Vorteile sind jedoch nicht generell vorhanden. Um von den ökologischen Potentialen profitieren zu können, müssen einige Aspekte beachtet werden. Im geplanten Fachbuch „3D-Druck“ für Manager werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen veröffentlicht und interpretiert. Exemplarische Ergebnisse werden in Abbildung 3-3 dargestellt. Zum einen zeigen die exemplarischen Ergebnisse, dass durch verwendungsortnahe Produktion mit 3D-Druck im Vergleich zur konventionellen Fertigung ab einer gewissen Lieferdistanz Emissionen, welche zum Klimawandel (GWP 100a) beitragen, reduziert werden können. Zum anderen wurde durch die Analysen gezeigt, dass 3D-gedruckte Ersatzteile zu einer Lebenszyklusverlängerung von Produkten beitragen und somit zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs führen können.



**Abbildung 3-3: Ausschnitte aus den Ergebnissen der Lebenszyklusanalysen**

Ziel im letzten Projektjahr (unter anderem von Meilenstein 12) war die Anreicherung und Weiterentwicklung der beschriebenen Templates. Dieses Ziel wurde erreicht.

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 1 haben gezeigt, dass der 3D-Druck ökologische Potentiale aufweist. Diese Potentiale wurden durch Literaturrecherche und durch eigene Lebenszyklusanalysen aufgezeigt. Damit die ökologischen Potentiale sowie insbesondere die Ressourceneffizienzpotentiale ausgeschöpft werden können, muss der 3D-Druck in der Praxis Anwen-

---

derung finden. Viele KMUs haben die Potentiale der Technologie noch nicht erkannt. Die Templates aus Arbeitspaket 1 sollen daher KMUs beim Einstieg in den 3D-Druck unterstützen. Im Laufe des Projekts hat sich herausgestellt, dass Templates allein nicht ausreichen, um eine geeignete Grundlage für einen erfolgreichen Einstieg zu schaffen. Daher soll das geplante Fachbuch „3D-Druck für Manager“ eine Ergänzung darstellen und eine ausführliche Wissensgrundlage liefern, indem ökonomische und ökologische Potentiale für Entscheider in Unternehmen transparent gemacht werden. Dabei werden die Potentiale ausführlich beschrieben und erklärt. Neben dem Fachbuch soll das in Arbeitspaket 2 erstellte didaktische Konzept dazu genutzt werden, um Wissen aus dem Bereich 3D-Druck bereits in der Ausbildung zu verankern. Beispielhafte Potentiale, welche im Projekt identifiziert wurden, sind:

- Materialeinsparung durch Ermöglichung von Hohlstrukturen und Leichtbau im 3D-Druck
- Verringerung des Materialausschusses durch additives Fertigungsprinzip
- Vermeidung der Herstellung von speziellen Formen insbesondere bei der Produktion kleiner Losgrößen
- Nutzung von recycelten und umweltfreundlichen Materialien
- Recycling von Materialausschuss
- Einsparung von Transportdistanzen durch verwendungsortnahe Produktion
- Reduktion von Energieverbrauch bei der Lagerung durch digitale Ersatzteillager und Just-in-time-Produktion
- Einsparung von Verpackungsmaterialien
- Verlängerung von Produktlebenszyklen durch verwendungsortnahen 3D-Druck von Ersatzteilen

### **3.2 AP2**

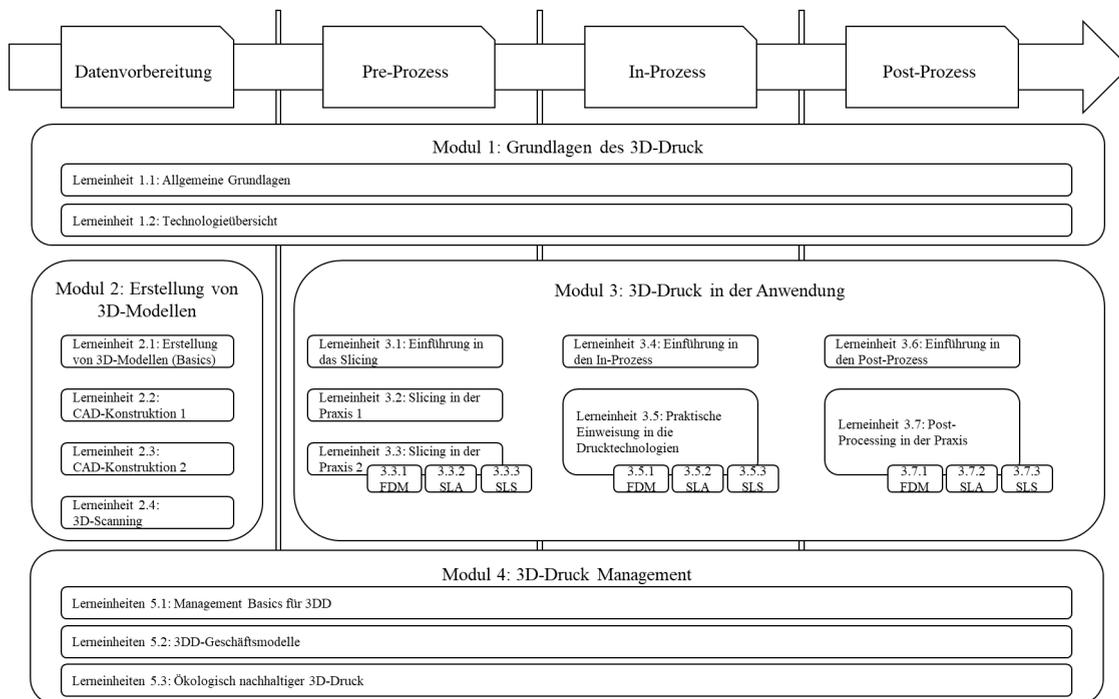
Ziel von AP2 ist es, notwendige Lerninhalte für eine Aus- und Weiterbildung zum Thema operative 3D-Druck-Produktion zu sammeln und in ein geeignetes didaktisches Konzept zu übertragen. Zur Erreichung von MS 21 & MS 22 wurde dieses Didaktikkonzept ausgearbeitet und in einem Dokument festgehalten (s. Projekthomepage – interner Bereich).

Aufgrund unterschiedlicher Qualifikationen, Vorkenntnissen und Anforderungen von möglichen Teilnehmern enthält das Didaktikkonzept drei unterschiedliche Transferebenen:

1. Management-Ebene: Vermittlung von Wissen, welches für Management-Entscheidungen relevant ist.
2. Training-Ebene: Vermittlung von Kenntnissen und Methoden, welche für die Nutzung von 3D-Druck-Technologien im Rahmen eines klar definierten Anwendungsfalls relevant ist (nichtakademische Ausbildung).
3. Education-Ebene: Vermittlung von Wissen, welches über die Nutzung von 3D-Druck-Technologien in einem klar definierten Anwendungsfall hinausgeht (akademische Bildung).

Das Didaktikkonzept orientiert sich am 3D-Druck-Prozess gemäß VDI 3405 2014 und ist aufgrund der vielfältigen Schritte dieses Prozesses modular aufgebaut. Als Lernformate sind E-Learning, Präsenzveranstaltungen und Laborversuche angedacht. Eine Modulübersicht sowie eine grafische Darstellung des erarbeiteten Didaktikkonzepts findet sich auf der Projekthomepage – interner Bereich sowie in Abbildung 3-4.

Im Laufe des Projekts wurde die Lernmaterialsammlung innerhalb eines E-Learning Tools kontinuierlich ergänzt (MS 22 & MS23).



**Abbildung 3-4: Modulares Didaktikkonzept**

Das didaktische Konzept orientiert sich am 3D-Druck Prozess und beinhaltet Lernmodule aus den Bereichen Datenvorbereitung, Pre-Processing, In-Processing und Post-Processing. In den Modulen der Datenvorbereitung wird unter anderem vermittelt wie dreidimensionale Abbildung eines zu druckenden Bauteils beispielsweise durch CAD-Konstruktion und 3D-Scanning erstellt werden können. Im Bereich des Pre-Processings wird vermittelt, wie so ein dreidimensionales Abbild „gesliced“ und somit für den Druck präpariert werden kann. Module aus den Bereichen In- und Post-Processing haben praktischen Charakter. Hierbei stehen praktische Übungen in den Laboren im Vordergrund.

Insgesamt lässt sich der Beitrag des erstellten didaktischen Konzepts positiv bewerten. Durch den Einsatz dieses Konzepts lässt sich Wissen aus dem Bereich 3D-Druck bereits in der Ausbildung vermitteln. Dieser Aspekt ist essenziell, um den 3D-Druck auch in der bayrischen Wirtschaft zu etablieren. Das didaktische Konzept findet in der Lehre an der Hochschule Neu-Ulm sowie an der Universität Augsburg Anwendung. Außerdem soll weiterhin mit der IHK Schwaben zusammengearbeitet werden, um 3D-Druck auch in der beruflichen Ausbildung zu verankern. Man kann jedoch feststellen, dass sich der 3D-Druck in einem sehr dynamischen Umfeld befindet. Da die Technologie noch nicht vollends ausgereift ist, gibt es stetig Weiterentwicklungen sowohl in der technischen Funktionsweise als auch im Prozess. Aus diesem Grund muss das didaktische Konzept auch nach Ende des Projekts REV3D angewendet und weiterentwickelt werden. Nur dadurch können aktuelle Trends und neue Erkenntnisse in die Ausbildung einfließen.

### 3.3 AP3

Ziel von Arbeitspaket 3 war die praktische Erprobung von 3D-Druck Technologien in den Laboren der Hochschule Neu-Ulm und der Universität Augsburg. Durch die praktische Erprobung sollten beispielsweise neue Erkenntnisse z.B. in Bezug auf Recyclingpotentialen sowie Energie- und Ressourcenverbrauch generiert werden. Außerdem sollte das didaktische Konzept in den Laboren getestet werden.

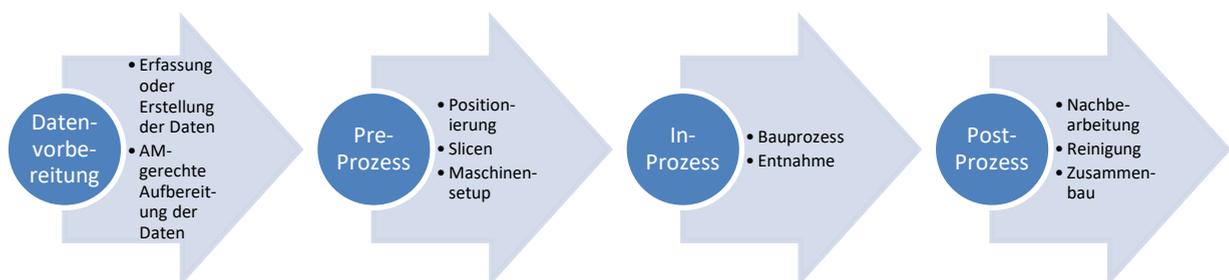
Wegen der aktuellen Corona-Situation und entsprechenden Auflagen der Hochschulen wurde die praktische Erprobung in den Laboren stark eingeschränkt. Insbesondere die Mitarbeit der Praxispartner in den Laboren konnte leider nicht wie geplant durchgeführt werden. Die Prüfung des Didaktikkonzepts ist jedoch in mehreren Seminaren an Studierenden erfolgt. Ein Test des Didaktikkonzepts an externen Personen war coronabedingt im Zeitraum des zweiten Projektjahrs jedoch leider nicht möglich.

Dennoch konnten im Rahmen der praktischen Erprobung eigene hausinterne Druckversuche durchgeführt werden. Bei der Durchführung dieser Druckversuche wird mittlerweile unter anderem der Strom- und Materialverbrauch der unterschiedlichen Technologien dokumentiert, welche wichtige Parameter für die ökologische Bewertung darstellen.

Trotz der pandemiebedingten Einschränkungen lassen sich die Aktivitäten in Arbeitspaket 3 positiv bewerten. Die Drucktests in den Laboren konnten insbesondere bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung von 3D-Druck unterstützen. Es ist zu beachten, dass die Labore zwar professionelle 3D-Drucker enthalten. Hochindustrielle Maschinen konnten in den Laboren jedoch nicht untersucht werden. Hier besteht ein weiterer Forschungsbedarf. Im Rahmen von Arbeitspaket 3 konnte außerdem das didaktische Konzept getestet und angepasst werden. Hier wurde ebenfalls Mehrwert generiert. Wie bereits erwähnt sollte das didaktische Konzept sowie dessen Inhalte dynamisch sein. Daher sollte es auch weiterhin im Laborumfeld geprüft werden. Erkenntnisse aus Arbeitspaket 3 fließen des Weiteren in das geplante Fachbuch „3D-Druck für Manager“ ein.

### 3.4 AP4

Im AP4 sind zuerst die einzelnen Bestandteile einer additiven Prozesskette untersucht worden. Dafür wurde sich an der VDI-Richtlinie 3405 (2007) orientiert und die Prozesskette in folgende 4 Schritte aufgeteilt:



**Abbildung 3-5:** Prozesskette additive Fertigung

Diese 4 groben Prozessschritte sind in einem zweiten Schritt wieder unterteilt worden. Einige dieser Unterprozessschritte sind in der obigen Abbildung zu erkennen. Aufgrund des Platzmangels war es nicht möglich alle Unterprozessschritte abzubilden. Eine vollständige Darstellung

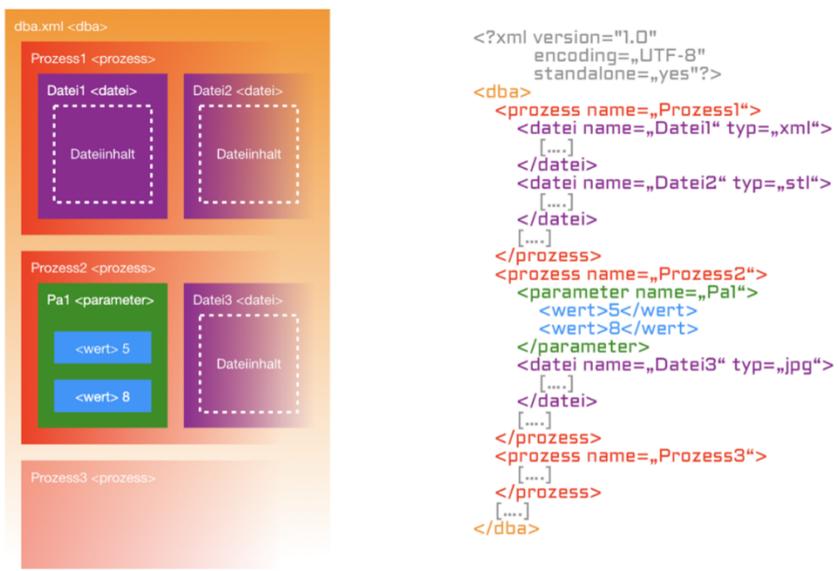
der Prozesskette mit Unterprozessschritten in einem Flussdiagramm kann dem Anhang entnommen werden.

Im nächsten Schritt sind in diesem Arbeitspaket die qualitätsrelevanten Parameter, die innerhalb der Prozesskette anfallen, identifiziert worden. Dabei wurde für jeden einzelnen Unterprozessschritt untersucht, welche Parameter in diesem Prozessschritt anfallen und wie diese gespeichert werden. Nachdem alle anfallenden Parameter für den jeweiligen Prozessschritt gesammelt worden sind, erfolgte mithilfe von Expertendiskussionen und wissenschaftlicher Literatur die Bestimmung der Qualitätsrelevanz jedes Parameters. Ist ein Parameter als nicht qualitätsrelevant angesehen worden, fand keine weitere Berücksichtigung dieses Parameters statt. Alle qualitätsrelevanten Parameter wurden anschließend in einer Excel-Datei abgelegt und ihrem jeweiligen Prozessschritt zugeordnet. Ein Auszug dieser Excel-Liste ist in Anlage 4 zu sehen.

Während dieser Vorgehensweise kam es zu der Erkenntnis, dass einige Parameter, die für die Qualität relevant sind, aktuell in keiner Form gespeichert werden. Deshalb ist für die Speicherung dieser Daten ein Datenmodell konzipiert worden. Zuerst wurde hierfür ein Datenformat gesucht, welches sich für diesen Zweck eignet. Nach einer ausführlichen Recherche und eines Vergleichs ist die Wahl auf das XML-Format gefallen. Die 3 relevantesten Vorteile dieses Formates sind im Folgendem dargestellt:

- XML ist textbasiert, dadurch können Informationen ohne die Anwendung, mit der sie erstellt wurden, gelesen werden
- XML erlaubt die Strukturierung von Daten und ermöglicht sich die Abbildung von hierarchischen Strukturen
- XML ist ein offener Standard im Maschinenbau

Nachdem sich für ein Datenformat entschieden worden ist, konnte ein erstes Konzept für ein Datenmodell, die sogenannte digitale Bauteilakte (DBA) erarbeitet werden. Dieses ist in nachfolgender Abbildung zu sehen:



**Abbildung 3-6:** Ausschnitt digitale Bauteilakte

In dieser Abbildung lässt sich die hierarchische Strukturierung der Daten gut erkennen. Die oberste Hierarchie bildet die „dba“ (orange). Darunter befindet sich die einzelnen Prozessschritte (rot), welche in den vorherigen Arbeitsschritten definiert worden sind und in der Excel-Liste gespeichert sind. In der darunterliegenden Ebene sind entweder Datei (lila), die während

---

des Prozessschrittes anfallen, oder Parameter (grün) hinterlegt. Die hinterlegten Parameter können unterschiedliche Werte (blau) annehmen. Die Werte stellen also eine Unterebene der Parameter dar. Insgesamt gibt es 4 Hierarchiestufen im entworfenen Datenmodell. Dieses kann jedoch um eine beliebige Anzahl an Hierarchiestufen ergänzt werden.

Für die Einbettung von Dateien sowie Daten in XML ist es notwendig, dass Daten oder Dateien, die eine andere Kodierung als die standardmäßige XML-Kodierung aufweisen, konvertiert werden müssen, bevor eine Integration erfolgen kann. Bei der Einbettung von Informationen in die XML-Datei wird zwischen drei unterschiedlichen Fällen unterschieden:

#### 1.Fall: XML-basierte Dateiformate

Wenn die zu integrierenden Daten bereits den XML-Standard entsprechen, liegt der einfachste Fall vor. Durch Verschachtelung können diese einfach in andere XML-basierte Formate integriert werden. Da bereits alle Parameter und Werte XML-konform abgespeichert wurden, treten in diesem Fall keine Kompatibilitätsschwierigkeiten auf. Im folgenden Code ist die Integration der XML-basierten Datenformate in die DBA zu sehen:

```
[...]
<prozess name="Beispielprozess1">
  [...]
  <datei name="bauteil" typ="dae" xmlencoding="utf-8" xmlversion="1.0">
    [...] <!-- Dateiinhalte von bauteil.dae -->
  </datei>
  [...]
</prozess>
[...]
```

#### Abbildung 3-7: Programmcode Integration XML-basierter Dateiformate

#### 2.Fall: Nicht xml-basierte Dateiformate

Entspricht das Dateiformat der abzuspeichernden Informationen nicht dem XML-Standard, ist es notwendig, dass die Daten maskiert und/oder enkodiert werden. Viele Mediendateien, wie z.B. pdf oder jpg, und CAD-Formate zählen zu dieser Kategorie. 8 Bit-Binärdaten, wie Mediendateien sowie CAD-Formate, können mit dem Kodierungsverfahren Base64 in eine lesbare Zeichenfolge, die dem ASCII Standard entspricht, umgewandelt werden. Bei der Umwandlung entsteht allerdings ein erhöhter Speicherplatzbedarf, der bis zu 33 Prozent über der ursprünglichen Dateigröße liegen kann. Durch die Kodierung auf ASCII-Standard können im Programmcode keine unbekanntenen Zeichen sowie Sonderzeichen vorliegen. Sollen die Daten aus der DBA wieder ausgelesen werden, ist es notwendig, dass diese wieder enkodiert werden. Der unten abgebildete Programmcode zeigt eine beispielhafte Umsetzung:

```
[...]
<prozess name="Beispielprozess1">
  [...]
  <datei name="bauteil" typ="CATPart">
    [...] <!-- Dateiinhalte von bauteil.CATPart als Base64 -->
  </datei>
  [...]
</prozess>
[...]
```

#### Abbildung 3-8: Programmcode Integration nicht XML-basierter Dateiformate

#### 3.Fall: Daten ohne standardisiertes Dateiformat

Während der Entwicklung des Datenmodells kam es zu der Erkenntnis, dass es bei einigen qualitätsrelevanten Prozessparametern keinen empfohlenen oder festgelegten Formatierungs-

standard gibt. Selbstverständlich müssen diese Parameter trotzdem in der DBA hinterlegt werden, da Normen oder andere Vorschriften dies vorschreiben. Bei diesen Werten ist es daher notwendig, diese selbstständig in die DBA zu integrieren. Im folgendem Codeausschnitt ist eine beispielhafte Integration dieser Werte abgebildet:

```
[...]
<prozess name="Beispielprozess1">
  [...]
  <parameter name="Startzeit" einheit="s">
    <wert>1541846767</wert>
  </parameter>
  <parameter name="TemperaturBauplattform" einheit="C">
    <wert t="0">86.0</wert>
    <wert t="1">86.3</wert>
    <wert t="2">86.2</wert>
    [...]
  </parameter>
  [...]
</prozess>
[...]
```

### Abbildung 3-9: Programmcode Integration Daten ohne standardisiertes Dateiformat

In Tabelle 2: „Übersicht integrierbare Dateiformate“ sind alle Dateiformate aufgeführt, die im Rahmen des Forschungsprojektes REV3D überprüft worden sind. Somit können Informationen, die in einem der aufgeführten Dateiformate vorliegen, in die DBA eingebettet und wieder ausgelesen werden. Eine Integration von Informationen, die in anderen Dateiformaten vorliegen, ist prinzipiell auch möglich, da eine Zuordnung der Informationen zu einem der drei Fälle möglich ist und die Integration der relevanten Prozessinformationen in die DBA durch die erläuterten Vorgehensweisen erfolgen kann.

**Tabelle 1: Übersicht integrierbare Dateiformate**

Abkürzung	Formatname	Datentyp	XML-basiert
AML	Automation Markup Language	Anlagenplanung	Ja
CAEX (xsd)	Computer Aided Engineering Exchange	Anlagentopologie	Ja
Collada (DAE)	Collaborative Design Activity	3D-Modelle, ...	Ja
MPEG-7 (xsd)	Moving Picture Experts Group 7	Video, Audio	Ja
SVG	Scalable Vector Graphics	Grafiken	Ja
X3D	Extensible 3D	3D-Modelle	Ja
Docx	Word-Dokument	Textverarbeitung	Ja
CATPart	Computer Aided Three Dimensional part	3D-Modelle	Nein
JPG	Joint Photographic Experts Group)	Bilder	Nein
PDF	Portable Document Format	Texte, Bilder, Grafiken	Nein
STP	Standard for the Exchange of Product model data	3D-Bilddatei	Nein
STL	Standard Tessellation Language	3D-Bilddatei	Nein

Damit die zeitintensiven Aufgaben, wie die korrekte Konvertierung der unterschiedlichen Dateiformate der verschiedenen Prozessinformationen sowie die richtige Zuordnung zu einem der drei oben beschriebenen Fälle, nicht manuell durch einen Mitarbeiter erfolgen müssen, wird in

Arbeitspaket 5 ein Tool entwickelt, welches diese Aufgaben automatisiert abwickelt und so den zeitlichen Aufwand dieser Tätigkeiten reduziert.

Auf Basis der Analyse der 3D-Druck-Prozesskette hinsichtlich der anfallenden qualitätsrelevanten Parameter war es möglich, eine Liste mit ebendiesen relevanten Parametern zu erstellen und für interessierte bayrische Unternehmen zugänglich zu machen. Mithilfe dieser Informationen können Unternehmen ihr Wissen über den 3D-Druck erweitern, was einen Beitrag zum Weiterbildungsproblem darstellt. Zudem ist zu erwarten, dass die Qualität der 3D-gedruckten Bauteile zunehmen wird, da Unternehmen mehr Expertise über den 3D-Druck haben. Durch die steigende Qualität der Bauteile werden weniger Bauteile, die nicht den notwendigen Qualitätsanforderungen entsprechen produziert, wodurch der Materialausschuss reduziert wird und so die natürlichen Ressourcen besser genutzt werden. Durch die Erstellung eines Datenmodells im XML-Format, der digitalen Bauteilakte, welche die anfallenden qualitätsrelevanten Parameter für ein Bauteil abspeichert, ist die Grundlage für eine digitale Bauteillagerung geschaffen worden. Der Beitrag zur Ressourceneffizienz einer digitalen Bauteillagerung wird in AP5 erläutert.

### 3.5 AP5

Ziel dieses Arbeitspaketes war es zeitintensive Schnittstellen, die bei der Einbindung eines additiven Produktionsprozesses in ein bestehendes Produktionssystem auftreten, zu identifizieren. Nach der Identifizierung der Schnittstellen wurden diese nach ihrer Priorität geordnet. Anschließend ist ein Tool entwickelt worden, welches den zeitlichen Aufwand für ausgewählte Schnittstellen reduziert. Die identifizierten Schnittstellen sind gemäß ihrer Priorität in der nachfolgenden Tabelle abgebildet:

**Tabelle 2: Übersicht identifizierter zeitintensiver Schnittstellen der additiven Prozesskette**

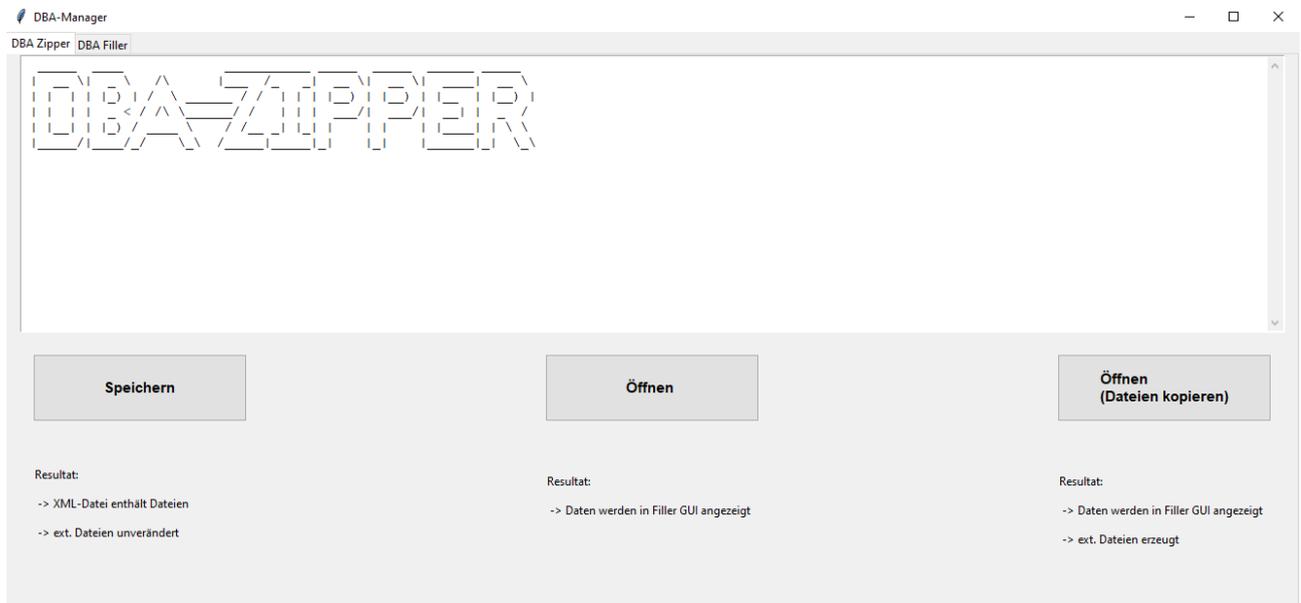
Bezeichnung	Erläuterung	Rating
Fehlende Quantifizierung der additiven Mehrwerte	Ausnutzung der geringen, additiven Fertigungsrestriktionen können nicht monetär quantifiziert werden	1
Identifikation geeigneter Bauteile	Identifikation geeigneter Bauteile aus dem bestehenden Produktportfolio	2
Fehlende Expertise in F&E sowie Konstruktion	Unzureichendes Wissen bzgl. AM-gerechtem Bauteil-Design, dadurch bleiben AM-Potentiale ungenutzt	3
Fehlende Expertise bzgl. Anlagen- & Softwareauswahl sowie Integration in unternehmensspezifische Prozesskette	Hemmung der Nutzung von AM durch suboptimale Integration in bestehende unternehmensinterne physische und digitale Prozesskette & globale SC	4
Schwierige Qualitätssicherung & geringe Reproduzierbarkeit	Einzelteilprüfung aufgrund heterogener Bauteileigenschaften Hoher Zertifizierungsaufwand	5
Nachbearbeitungsaufwand	Bei AM von Polymeren eher gering	6

Notwendigkeit der manuellen Interaktion	Bauteilpositionierung/Nesting, Festlegung Schichtdicke Im Vergleich zu konventionellen Prozessketten geringer zeitlicher Aufwand	7
---	---	---

Bei den Überlegungen zur Tool-Entwicklung, ist die Schnittstelle „Fehlende Quantifizierung der additiven Mehrwerte“ außer Acht gelassen worden, da diese bereits in Arbeitspaket 1 durch die Templates für eine wirtschaftliche Bewertung adressiert wird. Deshalb ist entschieden worden, ein Tool zu entwickeln, dass bei der Erstellung einer DBA unterstützt. Die DBA enthält, wie bereits in Arbeitspaket 4 erwähnt, alle qualitätsrelevanten Parameter, die für ein Produkt entlang der additiven Prozesskette anfallen. Dadurch werden gleich mehrere Schnittstellen berücksichtigt. Zum einen wird die Schnittstelle „fehlende Expertise in F&E sowie Konstruktion“ adressiert, indem für den Konstruktionsvorgang die relevanten Daten gespeichert werden und so auf eine bereits AM-gerechte erstellte Konstruktion wieder zurückgegriffen werden kann. Des Weiteren wird in der DBA hinterlegt, welche Anlage bzw. Software zur Erstellung des Produktes verwendet worden ist. Dadurch wird die Schnittstelle „Fehlende Expertise bzgl. Anlagen- & Softwareauswahl sowie Integration in unternehmensspezifische Prozesskette“ berücksichtigt, da neben der Hinterlegung der Anlage/Software zudem durch das XML-Format ein Austausch der Informationen zwischen den verschiedenen Prozessschritten der Prozesskette erleichtert wird. Durch die Speicherung aller qualitätsrelevanten Parameter wird die Reproduzierbarkeit des Produktes vereinfacht und zudem stellt die DBA ein virtuelles Dokument zur Qualitätssicherung dar. Somit wird auch die Schnittstelle „Schwierige Qualitätssicherung & geringe Reproduzierbarkeit“ durch das erstellte Tool berücksichtigt. Im Folgenden werden die Funktionen des erstellten Tools, dem DBA-Manager, anhand einiger Bildausschnitte des Tools erläutert.

Der DBA-Manager besitzt zwei grundlegende Funktionalitäten:

- DBA-Filler
  - Eintragen von prozessbezogenen Daten für jedem Schritt der additiven Prozesskette
  - Hinterlegen von prozessbezogenen externen Dateien für jedem Schritt der additiven Prozesskette
- DBA-Zipper
  - Abspeichern der eingetragenen Daten und Dateien in einer .xml-Akte (DBA)
  - Lesen und Entpacken einer DBA und anschließendes Darstellen der Informationen in der Oberfläche des DBA Filler

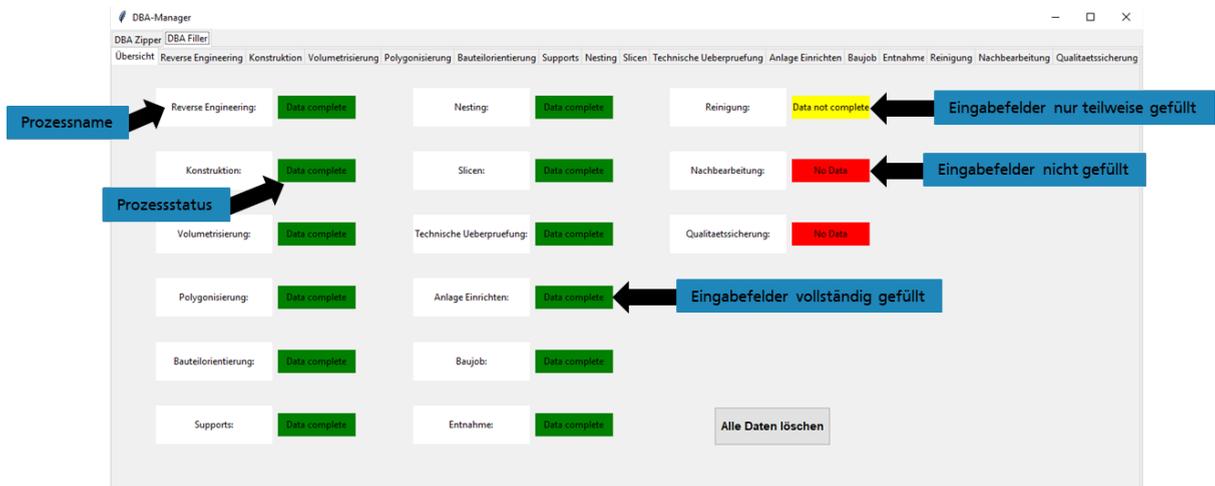


**Abbildung 3-10: DBA-Zipper**

Die obige Abbildung zeigt die Oberfläche des DBA-Zippers. Hierauf sind 3 verschiedene Buttons zu erkennen, deren Funktion im Folgenden erklärt wird:

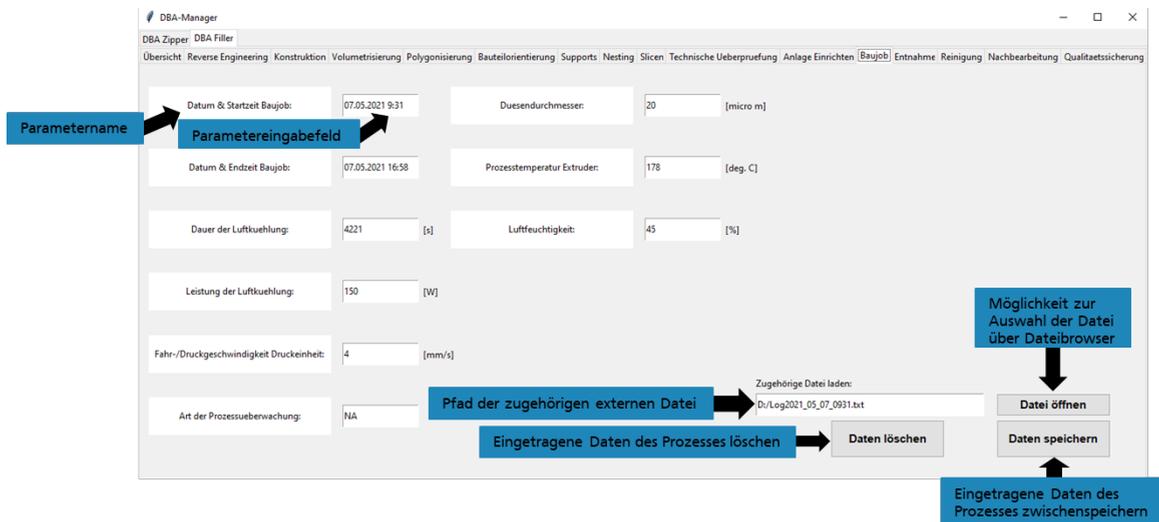
- Speichern
  - Daten sowie Dateien, welche im DBA-Filler hinterlegt worden sind, werden als xml-Dokument gespeichert. Externe Dateien werden hierfür kodiert. Das somit erzeugte Dokument stellt die DBA eines Bauteils dar.
- Öffnen
  - Mit dieser Funktion lässt sich eine bereits erstellte DBA eines Bauteils öffnen. Die hinterlegten Daten werden im DBA-Filler angezeigt und können bearbeitet werden.
- Öffnen (Dateien kopieren)
  - Auch mit dieser Funktion lässt sich eine DBA eines Bauteils öffnen. Neben der Anzeige der Daten ist auch eine Bearbeitung dieser möglich. Im Unterschied zur Funktion „Öffnen“ werden externe Dateien, welche die DBA enthält, enkodiert und liegen als ihr ursprüngliches Dateiformat im Ordner vor.

Der nächste Ausschnitt des entwickelten Tools zeigt die Übersichtsanzeige des DBA-Fillers mit eingefügten Erläuterungen. Wie zu erkennen, sind die einzelnen Namen der Prozesse der Prozesskette in der Übersicht zu sehen. Das Feld „Prozessstatus“ gibt Auskunft über die Vollständigkeit der hinterlegten Daten. Die grüne Farbe sowie der Schriftzug „Data complete“ geben an, dass die hinterlegten Daten für den jeweiligen Prozessschritt vollständig sind. Der Text „Data not complete“ sowie die gelbe Farbe zeigen an, dass die Eingabefelder des Prozessschrittes nicht vollständig ausgefüllt worden sind. Die rote Farbe sowie die Zeichenfolge „No Data“ gibt den Status an, dass aktuell keine Daten für diesen Prozessschritt vorliegen.



**Abbildung 3-11: Übersicht DBA-Filler**

Der untere Ausschnitt des DBA-Fillers zeigt die Prozesseingabemaske des Prozessschrittes „Baujob“. Für jeden qualitätsrelevanten Parameter dieses Prozessschrittes ist ein Feld mit dem Namen des Parameters und eine Parametereingabefeld angelegt worden. Zudem ist die Funktion „Daten öffnen“ programmiert worden. Mit dieser Funktion lässt sich eine externe Datei für diesen Prozessschritt hinterlegen. Der dazugehörige Pfad der externen Datei wird in dieser Übersicht auch angezeigt. Wenn alle angefallenen Daten sowie Dateien des Prozessschrittes hinterlegt worden sind, lassen sich diese durch die Funktion „Daten speichern“ in der DBA abspeichern. Soll für ein weiteres Bauteil eine DBA angelegt werden, können mithilfe der Funktion „Daten löschen“ alle eingetragenen Werte in den Parametereingabefeld gelöscht werden. Wie in der oberen Leiste dieser Abbildung zu erkennen, liegt für jeden Prozessschritt eine entsprechende Prozesseingabemaske vor.



**Abbildung 3-12: DBA-Filler Prozesseingabemaske**

Durch die Bereitstellung dieses Tools im Rahmen des Forschungsprojektes REV3D werden Mitarbeiter bei der Erstellung einer DBA unterstützt. Wie bereits erläutert, stellt die DBA alle wichtigen Informationen über die Prozesskette eines additiv gefertigten Bauteils dar. Mithilfe dieser Daten lässt sich die Reproduzierbarkeit der Bauteile erhöhen. Zudem werden mit dem DBA-Manager einige der oben beschriebenen zeitintensiven Schnittstellen bei der Integration von 3D-Druck in ein Unternehmen adressiert. Dadurch lässt sich die Zeitintensivität der Integration

---

reduzieren und so stellt dieses Tool einen Nutzen für bayrische Unternehmen dar, da Personalkosten reduziert und gleichzeitig die Bauteilqualität erhöht wird.

Gleichzeitig eröffnet die DBA die Möglichkeit einer digitalen Bauteillagerung, da diese alle Informationen enthält, um ein bestimmtes Bauteil zu reproduzieren. Beim Konzept der digitalen Bauteillagerung werden Ersatzteile nicht mehr vorproduziert, sondern nur bei Bedarf mithilfe eines digitalen Bauteilplans, wie beispielsweise der DBA, erzeugt. Dieses Konzept trägt in mehreren Aspekten zur Erhöhung der Ressourceneffizienz bei. Da nur benötigte Bauteile produziert werden, werden Ressourcen, wie Material und Energie, nicht unnötig verschwendet. Zudem wird durch eine digitale Lagerung von Bauteilen der Bedarf an der Lagerfläche reduziert, was zu einer geringeren Versiegelung von Agrarflächen führt.

---

## 4 Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse und Darstellung der Kooperation mit Wirtschaftspartnern

Die praktische Anwendung der Ergebnisse des Forschungsprojekts REV3D soll insbesondere durch zwei Aspekte gewährleistet werden:

- Didaktisches Konzept
- Veröffentlichung der Ergebnisse in einem Fachbuch

Zum einen wird das in Arbeitspaket 2 erstellte Didaktikkonzept sowohl an der Hochschule Neu-Ulm als auch an der Universität Augsburg angewendet, um relevantes Wissen in Bezug auf Ökonomie und Ökologie der additiven Fertigung weiterzugeben. Zielgruppe sind hauptsächlich Studenten der Hochschulen. Das didaktische Konzept orientiert sich am 3D-Druck Prozess und beinhaltet Lernmodule aus den Bereichen Datenvorbereitung, Pre-Processing, In-Processing und Post-Processing. In Modulen der Datenvorbereitung wird unter anderem vermittelt wie dreidimensionale Abbildung eines zu druckenden Bauteils beispielsweise durch CAD-Konstruktion und 3D-Scanning erstellt werden können. Im Bereich des Pre-Processings wird vermittelt, wie so ein dreidimensionales Abbild „gesliced“ und somit für den Druck präpariert werden kann. Module aus den Bereichen In- und Post-Processing haben praktischen Charakter. Hierbei stehen praktische Übungen in den Laboren im Vordergrund. Neben der Anwendung des didaktischen Konzepts im universitären Umfeld, soll auch in Zukunft mit der IHK Schwaben zusammengearbeitet werden, um 3D-Druck auch in der beruflichen Ausbildung zu verankern.

Das didaktische Konzept soll in Zukunft durch das Fachbuch „3D-Druck für Manager“, welches Ergebnisse des Forschungsprojekts REV3D enthält und in absehbarer Zeit veröffentlicht wird, ergänzt werden. Zielgruppe des Fachbuchs sind neben Studierenden auch Entscheider in Unternehmen (insbesondere in KMUs) sowie Auszubildende in technischen und kaufmännischen Berufen. Das Fachbuch fokussiert ökonomische sowie ökologische Potentiale des 3D-Drucks zeigt auf wie diese Technologie gewinnbringend im Unternehmen integriert werden kann.

Durch das didaktische Konzept und das Fachbuch sollen die wissenschaftlichen Ergebnisse in die Praxis transferiert werden, um insbesondere von den Ressourceneffizienzpotentialen zu profitieren.

---

## **5 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts**

Die relevanten Ergebnisse des Forschungsprojekts REV3D sollen gesammelt unter anderem in dem Fachbuch „3D-Druck für Manager“ veröffentlicht werden. Ein Manuskript dieses Fachbuchs ist bereits weitestgehend fertiggestellt. Im nächsten Schritt wird ein Verlag gesucht, um das Fachbuch zu veröffentlichen (open access). Die Veröffentlichung soll alle zentralen Erkenntnisse enthalten. Zielgruppe des Buches sind Entscheider in Unternehmen (KMUs) sowie Studierende und Auszubildende aus wirtschaftlichem Bereich mit Bezug zur Technik. Somit soll gewährleistet werden, dass die Ergebnisse auch nach Abschluss des Projekts verfügbar sind.

---

## **6 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund**

### **6.1 Zusammenarbeit mit Wissenschaftspartnern**

Wissenschaftspartner im Projekt sind die Hochschule Neu-Ulm und die Universität Augsburg. Beide Hochschulen stehen im ständigen Austausch in Bezug auf die Arbeitspakete. Konkrete Beispiele für die Zusammenarbeit:

- Intensiver Austausch bei ökonomischer und ökologischer Bewertung
- Test der digitalen Bauteilakte über Hochschulgrenzen hinweg
- Gemeinsame Validierung der digitalen Bauteilakte
- Zusammenarbeit im gemeinsamen Buchprojekt

### **6.2 Zusammenarbeit mit Wirtschaftspartner**

Durch die Corona-Beschränkungen wurde die Kooperation mit den Wirtschaftspartnern im Bereich der praktischen Erprobung zwar insgesamt erschwert, und ein Projektpartner aus der Wirtschaft hat das Projekt Corona bedingt verlassen, der inhaltliche Austausch zwischen den verbliebenen Wirtschafts- und Wissenschaftspartnern läuft jedoch trotzdem noch gut weiter.

Im Rahmen der Meilensteine 02 & 03 wurden die Zwischenergebnisse des Projekts den Wirtschaftspartnern präsentiert. Innerhalb des Projektausschusses gab es außerdem wertvolles Feedback aus der Praxis. Durch den Austausch haben die Partner aus der Wissenschaft neue Anregungen für ihre Forschung erhalten. Neben den regelmäßigen Treffen des gesamten Projektausschusses gab es weitere bilaterale Treffen zwischen den Hochschulen und ausgewählten Wirtschaftspartnern, um den Austausch in speziellen Bereichen zu vertiefen.

### **6.3 Zusammenarbeit im Projektverbund**

Neben der Teilnahme an den jährlichen Treffen des Verbundprojekts, nahmen die HNU & UA an der Vernetzungsveranstaltung der OTH Amberg-Weiden teil.

---

## 7 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt REV3D wurde zum einen der strategische und zum anderen der operative Prozess des 3D-Drucks erforscht. Der strategische Prozess umfasste dabei die ökonomische und ökologische Bewertung (insbesondere Ressourceneffizienz) der Technologie. Im Rahmen des operativen Prozesses wurde hingegen der 3D-Druck Prozess an sich analysiert. Dabei wurden Konzepte zur Aus- und Weiterbildung entwickelt, die das Weiterbildungsproblem insbesondere von KMUs adressieren. Außerdem wurden untersuchte 3D-Druck Technologien in den Laboren der Forschungspartner praktisch erprobt. Aus der praktischen Erprobung wurden relevante Daten und Erkenntnisse generiert, mit Hilfe derer ein Konzept für ein Datenmodell realisiert wurde. Dieses Datenmodell bündelt die generierten Daten und Erkenntnisse und trägt zur erfolgreichen Integration des 3D-Drucks in Unternehmen bei.

Konkrete Ergebnisse des Projekts REV3D sind beispielsweise Templates für ökonomische und ökologische Bewertung des 3D-Drucks, welche KMUs beim Geschäftsmodellproblem und beim Nachhaltigkeitsproblem unterstützen sollen. Ein weiteres beispielhaftes Ergebnis ist eine strukturierte Technologieübersicht, welche beim Technologieauswahlproblem unterstützt.

Neben der Erstellung eines didaktischen Konzepts wurde im Rahmen des operativen Prozesses ein Tool („DBA-Manager“) entwickelt. Der DBA-Manager stellt ein weiteres konkretes Ergebnis dar und unterstützt bayrische Unternehmen bei der Bewältigung des Integrationsproblems, da durch dessen Einsatz zeitintensive Schnittstellen bei der Integration von 3D-Druck reduziert werden können.

---

## 8 Ausblick

Damit Bayern sowie die bayrische Wirtschaft von den ökonomischen und ökologischen Potentialen des 3D-Drucks, welche im Projekt identifiziert wurden, profitieren kann, muss 3D-Druck in der richtigen Art und Weise praktisch umgesetzt werden. Um dies zu gewährleisten wurde ein didaktisches Konzept zum Wissenstransfer erstellt. Dieses Konzept soll in Zukunft angewendet werden, um Wissensgrundlagen des 3D-Drucks in der Ausbildung sowie Studium und somit auch in der bayrischen Wirtschaft zukünftig zu verankern. Damit die gewonnenen Erkenntnisse des Forschungsprojekts nach Ende der Projektlaufzeit erhalten bleiben, werden diese im geplanten Fachbuch „3D-Druck für Manager“ festgehalten. Die Ergebnisse zeigen, dass ökologische und ökonomische Potentiale oftmals im Einklang stehen. Daher kann die bayrische Wirtschaft gestärkt werden und gleichzeitig einen Beitrag zu einem effizienteren Umgang mit natürlichen Ressourcen leisten.

---

# Literaturverzeichnis

## Literaturverzeichnis

- DIN EN ISO 17296-2, 2016-12: Additive Fertigung\_ - Grundlagen\_ - Teil\_2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (ISO\_17296-2:2015); Deutsche Fassung EN\_ISO\_17296-2:2016.
- VDI 3405 2014, 2014: Additive Fertigungsverfahren.
- Ansari Chaharsoughi, Fazel; Wohlers, Terry; Melullis, Klaus-Jürgen (2017): 3D Printing. Recht, Wirtschaft und Technik des industriellen 3D-Drucks. Hg. v. Andreas Leupold und Silke Glossner. München: C.H. Beck.
- Bauer, D.; Borchers, K., Burkert, T.; Ciric, D.; Cooper, F.; Zäh, M. (2016): Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren. Online verfügbar unter <https://scholar.google.com/citations?user=ku-rdkwaaaaj&hl=de&oi=sra>.
- Chryssolouris, George (2013): Manufacturing Systems. Theory and Practice. New York, NY: Springer (Springer Texts in Mechanical Engineering).
- Gebler, Malte; Schoot Uiterkamp, Anton J.M.; Visser, Cindy (2014): A global sustainability perspective on 3D printing technologies. In: *Energy Policy* 74, S. 158–167. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- Hagl, Richard (2015): 3D-Druck-Technologien. In: Das 3D-Druck-Kompendium: Springer Gabler, Wiesbaden, S. 15–35. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-07047-2\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-07047-2_2).
- Wohlers, T. (2017): 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report Wohlers. The Middle East, and Other Countries.
- Zäh, Michael F.; Schilp, Johannes; Weirather, Johannes; Zeller, Christian; Schmiegel, Benedikt; Ott, Michael; Westhäuser, Sebastian (2018): Additive Fertigungsverfahren. In: Frank Rieg, Rolf Steinhilper und Bettina Alber-Laukant (Hg.): Handbuch Konstruktion. 2., aktualisierte Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary), S. 995–1013.
- Zeyn, Helmut (2017): Industrialisierung der Additiven Fertigung. Digitalisierte Prozesskette - von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel. 1. Auflage. Berlin, Wien, Zürich, Berlin, Offenbach: Beuth; VDE Verlag GmbH (Beuth Innovation).

---

# Anhang

## Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNG	BEDEUTUNG
AM	Additive Manufacturing
BJT	Binder Jetting
CT	Computertomographie
DBA	Digitale Bauteilakte
DED	Directed Energy Deposition
DT	Destructive Testing
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment
MEX	Material Extrusion
MJT	Material Jetting
MS	Milestone
NDT	Nondestructive testing
PA	Projektbegleitender Ausschuß
PBF	Powder Bed Fusion
REV3D	Akronym für: „Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Einsatz von verwendungsortsnahen 3D-Druck Technologien“
SHL	Sheet Lamination
VPP	Vat Photo Polymerization

---

## **Anlage 2: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft**

ABC Tautenhahn GmbH  
Danziger Straße 20, D-89250 Senden

Datadruck GmbH  
Leibier Weg 8, 89278 Nersingen

Honold Service Logistik GmbH  
Ernst-Abbe-Str. 5-7 89231 Neu-Ulm  
Industrie- und Handelskammer Schwaben  
Edisonallee 7, 89231 Neu-Ulm

Ingenics AG  
Schillerstraße 1/15, 89077 Ulm

IWL AG  
Hörvelsinger Weg 62/1, 89081 Ulm

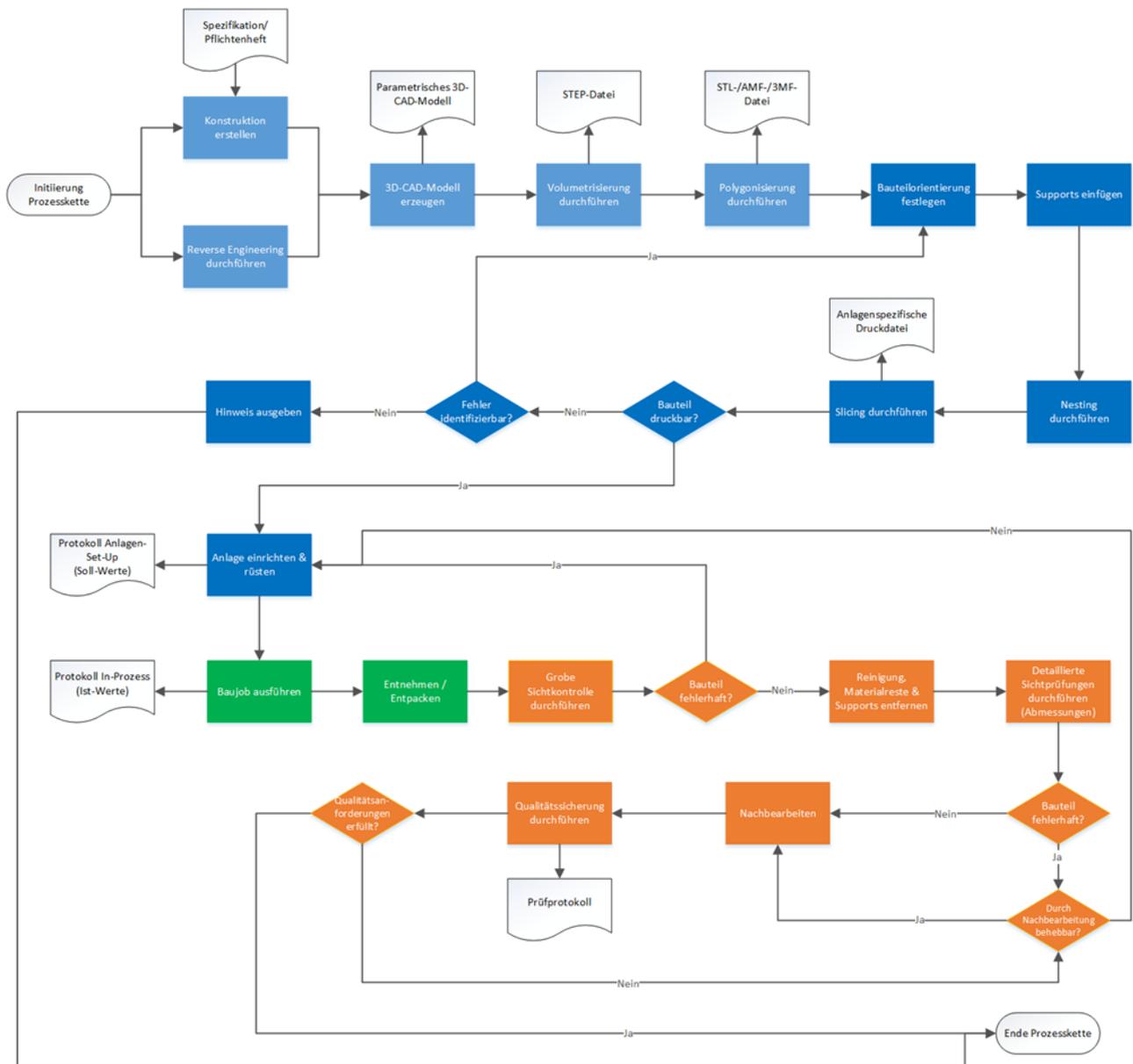
Logistik Cluster Schwaben e.V.(LCS)  
Stettenstraße 1, 86150 Augsburg

Pro3D GmbH  
Charlottenstr. 65, 10117 Berlin

### Ausgeschiedene Kooperationspartner

Bach Maschinenbau GmbH  
Sommerauer Straße 21, D-91555 Feuchtwangen

# Anlage 3: Flussdiagramm Prozesskette



## Anlage 4: Qualitätsrelevante Parameter entlang der Prozesskette

Prozessschritt	Bezeichnung	Einheit	Datentyp	Datenquelle	Kommentar / Beschreibung
Reverse Engineering durchführen	Auflösung Scan	ppmm	float	Eingabe	
	Goodness of fit	mm	float	Eingabe	Maßzahl für Abweichung von Referenzkörper
Konstruktion erstellen	Abmessungen	mm	float	CAD-Datei oder durch Eingabe	als Boudning Box (LxBxH)
	Bauteilvolumen	mm <sup>3</sup>	float	CAD-Datei oder durch Eingabe	momentan n.a.
	Toleranzen	mm	float	CAD-Datei oder durch Eingabe	momentan n.a. oder aus technischer Zeichnung
	Werkstoffzusammensetzung	/	string	ERP-Stammdatensatz	
	Werkstofflieferant	/	string	ERP-Stammdatensatz	
	Materialnummer	/	integer	ERP-Stammdatensatz	
	Serialnummer	/	integer	ERP-Stammdatensatz	
	Auftrags-Nr.	/	integer	ERP-Stammdatensatz	
Volumetrisierung durchführen	genaues Step-Format	/	string	STEP-Datei	
Polygonisierung durchführen	Auflösung	Sehnenhöhe	float	STL-/AMF-/3MF-Datei oder Eingabe	einstellbar durch Konstrukteur ins Slicing-Tool
	Minimaler Kantenwinkel	rad	float	STL-/AMF-/3MF-Datei oder Eingabe	einstellbar durch Konstrukteur ins Slicing-Tool
Bauteilorientierung festlegen	Orientierung im Bauraum	rad	float	Datei oder Eingabe	Orientierung der Ebenen des CAD-Modells im Bauraum in rad zur Referenz-CAD-Datei momentan n.a.
Supports einfügen	Volumen der Supports	mm <sup>3</sup>	float	Datei oder Eingabe	momentan n.a.
	Art der Supports	/	string	Datei oder Eingabe	Gitter, Waben, etc. teilweise n.a. abhängig von Maschine/Anlage
	Supportfläche	mm <sup>2</sup>	float	Datei oder Eingabe	entspricht der Auflagefläche momentan n.a.
Nesting durchführen	XYZ-Positionierung des Bauteils	mm	float	Datei oder Eingabe	
	Anteil der effektiven Nutzung des Bauraums	%	integer	Datei oder Eingabe	momentan n.a.
	Anzahl der Bauteile	/	integer	Datei oder Eingabe	momentan n.a.
	Abstand in XYZ-Richtung zu anderen Bauteilen	/	integer	Datei oder Eingabe	momentan n.a.
Slicen durchführen	Schichtdicke	µm-mm	float	Anlagenspezifische Druckdatei oder Eingabe	
Technische Überprüfung	Printability Ja/Nein	/	boolean	Eingabe	
Anlage einrichten & rüsten	Anlagentyp	/	string	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	
	Anlagennummer	/	integer	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	
	Firmware-Serien-Nr.	/	integer	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	
	Temperatur Bauraum	°C	float	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	
	Temperatur Bauplattform	°C	float	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	
	Kennung Anlagenbediener	/	string	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	
	Materialcharakteristik vor Baujob	/	dictionary	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	momentan n.a.
	Systemcheck	/	boolean	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	momentan n.a.
	Füllstand Ausgangsmaterial	kg	float	Protokoll Anlagen-Setup oder Eingabe	je nach Maschine/Anlage n.a.

	Zustand der Anlagenkomponenten	%	integer	Protokoll Anlagen-Set-Up oder Eingabe	pro Komponente, bzw. Tage bis zur nächsten Anlagenwartung momentan n.a.
	Vorheiztemperatur Extruder	°C	float	Protokoll Anlagen-Set-Up oder Eingabe	momentan n.a.
	Anzahl Extruder	/	integer	Protokoll Anlagen-Set-Up oder Eingabe	momentan n.a.
<b>Baujob ausführen</b>	Datum & Startzeit Baujob	/	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	
	Datum & Endzeit Baujob	/	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	
	Dauer der Luftkühlung	s	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	je nach Maschine/Anlage n.a.
	Leistung der Luftkühlung	W	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	
	Fahr-/Druckgeschwindigkeit Druckeinheit	mm/s		Protokoll In-Prozess oder Eingabe	kontinuierlich (Max. & Min.) momentan n.a.
	Art der Prozessüberwachung	/	string	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	
	Düsendurchmesser	µm	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	spezifisch MEX
	Prozesstemperatur Extruder	°C	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	spezifisch MEX; momentan nicht exakt bestimmbar
	Luftfeuchtigkeit	%	float	Protokoll In-Prozess oder Eingabe	Spezifisch MEX; momentan n.a.
<b>Entnehmen/Entpacken</b>	Kennung Anlagenbediener	/	string	Eingabe	
<b>Reinigung, Materialreste &amp; Supports entfernen</b>	Art der Reinigung	/	string	Eingabe	
	Dauer der Reinigung	s	float	Eingabe	
	Art der Supportentfernung	/	string	Eingabe	
	Dauer der Supportentfernung	s	float	Eingabe	
<b>Nachbearbeitung durchführen</b>	Art der Nachbearbeitung	/	string	Eingabe	
	Dauer der Nachbearbeitung	s	float	Eingabe	
<b>Qualitätssicherung durchführen</b>	Art der Bauteilprüfung	/	string	Prüfprotokoll oder Eingabe	
	Bauteilgewicht	kg	float	Prüfprotokoll oder Eingabe	
	Bauteildichte	kg·m <sup>-3</sup>	float	Prüfprotokoll oder Eingabe	
	Oberflächengüte durch Rauigkeit	µm	float	Prüfprotokoll oder Eingabe	gemittelte Rautiefe
	Maßhaltigkeit/Verzug	%	float	Prüfprotokoll oder Eingabe	der Geometrie - Abweichung von festgelegten Toleranzen mittels 3D-Scans
	Art Festigkeitsprüfung	/	string	Prüfprotokoll oder Eingabe	optional falls DT wirtschaftlich
	Festigkeit	MPa	float	Prüfprotokoll oder Eingabe	optional falls DT wirtschaftlich
	Eigenspannungen	MPa	float	Prüfprotokoll oder Eingabe	optional falls DT wirtschaftlich
	Rissprüfung/Geometrie-Defekte	tbd	tbd	Prüfprotokoll oder Eingabe	mittels CT-Can/Wirbelstrom/Ultraschall, optional falls NDT wirtschaftlich