



Schlussbericht gem. Nr. 8.2 der NKBF 98

Zuwendungsempfänger: Materialise GmbH (**MTLS**)
Konrad-Zuse-Str. 7
28359 Bremen

Ausführende Stelle: Materialise GmbH, Bremen

Förderkennzeichen: 20W2103E

Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt TIRIKA
Teilvorhaben: Ressourceneffiziente und kostenoptimierte
additive Fertigung in der Luftfahrt
(**TIRIKA - Materialise**)

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 bis 31.03.2025

Berichtszeitraum: 01.01.2022 bis 31.03.2025

Ausgabedatum: 18.06.2025

Projektleiter: Dr. Fabian Neugebauer
Dr.-Ing. Joschka zur Jacobsmühlen
Materialise GmbH

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20W2103E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zusammenfassung

TIRIKA-MTLS – Ressourceneffiziente und kostenoptimierte additive Fertigung in der Luftfahrt

Das Teilvorhaben im Verbundprojekt „TIRIKA – Technologien und Reparaturverfahren für nachhaltige Luftfahrt in Kreislaufwirtschaft“ zielte darauf ab, innovative Ansätze zur Optimierung der additiven Fertigung (AM) zu entwickeln, um Ressourceneffizienz, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit zu steigern. Dabei wurden digitale und technische Lösungen erforscht, um die additive Fertigung als Schlüsseltechnologie weiterzuentwickeln. Die Projektarbeit gliederte sich in drei zentrale Arbeitspakete:

Arbeitspaket 3.1 – Nachhaltige additive Fertigung. Ein Schwerpunkt lag auf der Entwicklung ressourceneffizienter Parameter für die Fertigung von Ti6Al4V-Bauteilen durch pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M). Die Prozessparameter beschleunigen den Druckprozess um 40 %, erzielen eine hohe Materialdichte und reduzieren nachweislich die CO₂-Emissionen. Die Validierung ergab jedoch kleinere Abweichungen bei der Bruchdehnung (9 % statt 10 %). Ergänzend wurden Strategien zur Reduktion von Supportstrukturen sowie Methoden für ein effizientes Post-Processing erarbeitet, darunter automatisierte Verfahren wie Kugelstrahlen, elektrochemische Supportentfernung, sowie das Trockeneisstrahlen. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Effizienz und Ressourcenoptimierung.

Arbeitspaket 3.3 – Materialkreislauf für die additive Fertigung. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden Konzepte zur Wiederverwertung von Materialien entwickelt. Besonders hervorzuheben ist die Optimierung der Wiederverwendbarkeit von PA12-Pulver für die SLS-Produktion. Durch ein optimales Mischverhältnis von 80 % recyceltem und 20 % neuem Pulver konnte die Luftfahrtanforderung bis zum vierten Buildzyklus erfüllt werden. Die Erkenntnisse tragen zur Reduzierung von Materialkosten und Abfällen bei und unterstützen die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft in der additiven Fertigung.

Arbeitspaket 3.4 – Digitaler Kreislaufprozess. Das Ziel war die Entwicklung eines End-to-End-Workflows für die additive Fertigung, der digitale Prozesse nahtlos miteinander verknüpft und eine Automatisierung ermöglicht. Ein neuer Cloudservice zur automatischen Supporterzeugung wurde erfolgreich an die „AM One“-Plattform von Airbus angebunden, sodass eine Buildsimulation ohne manuelle Vorbereitungsschritte möglich ist. Die interaktive Kostenberechnung wurde über ein Plugin in Materialise Magics zur automatischen Erfassung der Bauteilmaße optimiert. Beide Workflows konnten erfolgreich bei Airbus demonstriert werden. Ein Softwareprototyp zur automatischen Bauvorbereitung, der die Bauteilorientierung unter Berücksichtigung der Druckbarkeit optimiert und Supportstrukturen an Kanten und Flächen platziert, wurde entwickelt und in der Metallproduktion der Materialise GmbH evaluiert. Im realen Betrieb konnte der Aufwand um ca. 40 % reduziert werden. Zusätzlich wurden Prädiktionsmodelle zur Schätzung der Dauer von Produktionsschritten (Bauzeit, manuelle Oberflächenbearbeitung) trainiert, die eine effiziente Produktionsplanung und optimierte Angebotserstellung unterstützen.

Fazit. Die gesetzten Ziele wurden in AP 3.3 und 3.4 vollständig erreicht, in AP 3.1 konnten nicht alle Anforderungen erfüllt werden. Die Lösungen fördern die Effizienz, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigung und tragen zur Etablierung ressourcenschonender und wirtschaftlicher Produktionsmethoden bei. Die Ergebnisse bieten großes Potenzial für die industrielle Anwendung und wurden bereits erfolgreich am Standort Bremen in Produkte überführt (Magics Automation Module) bzw. befinden sich im Ergebnistransfer (Methoden zur automatischen Orientierungsoptimierung und Supporterzeugung).

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick über das Vorhaben	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
2.1	Erzielte Ergebnisse.....	7
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	14
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	14
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	15
2.5	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	15
2.6	Veröffentlichungen.....	15
3	Verzeichnisse	17
3.1	Abkürzungsverzeichnis	17
3.2	Abbildungsverzeichnis	17
3.3	Tabellenverzeichnis	18

1 Überblick über das Vorhaben

1.1 Aufgabenstellung

1.1.1 Bezug zu den förderpolitischen Zielen und globale Ziele des Vorhabens

Die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Luftfahrt ist ein bedeutender Standortfaktor für die global stark integrierte Wirtschaft in Deutschland und in Europa. Deswegen ist es ein Ziel des LuFo-Programms, die Transportleistung der Luftfahrt effizienter zu gestalten. Entwicklungs-, Fertigungs- und Instandsetzungsverfahren sind über den gesamten Produktionszyklus zu bewerten und unter Berücksichtigung neuester technologischer Erkenntnisse zu optimieren. Hier soll die deutsche Luftfahrtindustrie, inklusive der sie unterstützenden Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen, einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung der Ziele des „Flightpath 2050“ leisten.

- Entwicklung und Optimierung nachhaltiger Technologien mit reduziertem Energie-, Schadstoff- und Materialverbrauch
- Digitalisierung und intelligente Vernetzung des Prozessworkflows der additiven Fertigung
- Steigerung der Akzeptanz der Luftfahrt in der Bevölkerung durch die Verbesserung des Images der Luftfahrt hinsichtlich ihres Einflusses auf das Klima

Die Luftfahrtbranche befindet sich in einer intensiven Neuausrichtung zum emissionsfreien Flugverkehr. Dieser Wandel zur Nachhaltigkeit erfordert eine ganzheitliche Veränderung der gesamten Prozesskette von der Erzeugung von Bauteilen, deren Integration und dessen Betrieb bis hin zum Ende der Betriebsdauer im Luftfahrzeug. Der TIRIKA-Verbund nimmt sich dieser Herausforderung an und schließt wesentliche Lücken auf dem Weg zu einer vollumfänglich nachhaltigen Luftfahrtindustrie unter Mitwirkung aller wesentlichen nationalen Ressourcen aus Industrie und Forschung. Folglich nimmt die deutsche Luftfahrtindustrie mit den in TIRIKA geplanten Veränderungen eine Vorreiterrolle für eine nachhaltige Luftfahrt mit maximaler Akzeptanz in der Bevölkerung unter gleichzeitiger Wahrung industriepolitischer Interessen ein.

Das Ziel des TIRIKA-Verbundes ist die Förderung einer umweltfreundlichen Luftfahrt durch die Weiterentwicklung und Reifmachung nachhaltiger Technologien, wie der additiven Fertigung, Materialien zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen in Produktion und Flugbetrieb, sowie der konsequente Weiterausbau einer geschlossenen digitalen End-to-End-Kette. Im Vordergrund steht die Stärkung der Leistungsfähigkeit und Effizienz der Luftfahrt in Deutschland.

Die additive Fertigung wird durch die hohe Flexibilität als eine der Schlüsseltechnologien einer nachhaltigen Produktion der Zukunft im Flugzeugbau angesehen. Die nahezu völlige Designfreiheit erlaubt die Herstellung hoch komplexer Bauteile, die beispielsweise die Funktionen mehrerer konventionell hergestellter Bauteile kombinieren und zudem in der Regel leichter ausfallen und somit weniger Emissionen über die gesamte Lebensdauer verursachen. Zudem ermöglicht die additive Fertigung eine flexible, bedarfsgerechte Produktionsplanung, die beispielsweise zusätzlich als Ausgleich für Engpässe verwendet werden kann. Auch können Bauteile aus bestehenden Serien problemlos geändert werden, wodurch Kosten für die

Herstellung neuer Werkzeuge und der Abfall in Form alter/unbrauchbarer Werkzeuge eingespart werden.

In den letzten Jahren hat die additive Fertigung gewaltige Entwicklungssprünge erfahren, die eine zunehmende kostenbezogene Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren bietet. Die Flugzeugindustrie ist deshalb immer häufiger bereit, konventionell hergestellte Bauteile durch AM-Bauteile zu ersetzen. Damit dieser Ersetzungsprozess weiter beschleunigt wird, muss das noch hohe Potential zur nachhaltigen Steigerung der Effizienz additiver Fertigungsverfahren weiter ausgeschöpft werden. Die Materialise GmbH verfolgt deshalb innerhalb des TIRIKA-Konsortiums in HAP3 – „Ressourceneffiziente Fertigung“ die folgenden übergeordneten Ziele:

- Steigerung der Effizienz der AM-Produktion (pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl, PBF-LB/M), um die Produktionskosten und den Ressourcenverbrauch zu reduzieren und damit die Wettbewerbsfähigkeit im Flugzeugbau und darüber hinaus zu sichern und in Form von Marktanteilen auszuweiten
- Reduzierung des PA12-Pulverabfalls beim pulverbettbasierten Kunststoffschmelzen mittels Laserstrahl (PBF-LB/P) durch optimierte Materialkreislaufkonzepte zur Erhöhung der Wiederverwertungsquote
- Steigerung des Automatisierungsgrades und Vereinfachung der technologischen Zugänglichkeit des Prozessablaufs in der additiven Fertigung durch Einführung eines digitalen End-to-End-Prozesses

1.1.2 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Abgeleitet aus den globalen Zielen verfolgte die Materialise GmbH die folgenden wissenschaftlichen/technologischen Arbeitszielen innerhalb von TIRIKA. Für das PBF-LB/M-Fertigungsverfahren waren das:

- Die Reduktion der Druckkosten ausgewählter AM Bauteile um bis zu 40 % durch die Entwicklung hochproduktiver Prozessparameter und intelligenter Hatchingstrategien. Die Produktivitätssteigerung sollte anhand von Benchmarks mit Luftfahrtbauteilen validiert werden und ist ein wesentlicher Beitrag für eine effizientere Produktion auf dem Weg zur Dekarbonisierung der Fertigungskette.
- Die Prozesssicherheit beim Drucken mit hoch produktiven Prozessparametern erfordert angepasste Supportstrategien, die idealerweise in einem Druck ohne zusätzliches Stützmaterial aufgehen. Ziel war deshalb die Entwicklung eines neuen Supporttyps, der sicher bei hochproduktiven Prozessbedingungen verwendet werden kann und 25 % weniger Ressourcen verbraucht als üblich. Der positive Beitrag zur effizienten Luftfahrt und Ökoeffizienz begründet sich in einer erhöhten Produktivität sowie einem reduzierten energetischen Aufwand in der Herstellung des Supports. Gleichzeitig werden Ressourcen eingespart, da weniger Abfall (entfernter Support) resultiert.

Der Support muss effizient entfernbar sein, insbesondere mit Blick auf die Serienfertigung. Ziel war deshalb neben der Optimierung konventioneller manueller Strategien und Methoden, die Entwicklung einer alternativen Supportentfernungsstrategie auf Basis der elektrochemischen Materialbearbeitung zusammen mit dem Projektpartner Fraunhofer IFAM. Angestrebt wurde eine Reduzierung der Supportentfernungszeit von 30 % und die Konzeptionierung des neuen

Nachbearbeitungsprozesses für die Serienfertigung. Insgesamt wird das Potential der elektrochemischen Entfernung von Support als Sprungbrett zur Serienfertigung metallischer AM-Bauteile gesehen, da die Kosten und der Zeitaufwand für die Supportentfernung signifikant gegenüber der konventionellen/manuellen Bearbeitung gesenkt werden können und damit zur effizienten Luftfahrt beitragen.

Für das Fertigungsverfahren pulverbettbasiertes Kunststoffschmelzen mittels Laserstrahl (PBF-LB/P) wurde folgendes Ziel verfolgt:

- Die Ausarbeitung von Strategien zur Reduktion der thermischen Zersetzung von PA12 war Hauptthema für die in AP 3.3.1 geplanten Tätigkeiten seitens Materialise GmbH. Es sollte ein Konzept zur Wiederverwertung von PA12 für die Herstellung von Luftfahrtbauteilen entwickelt werden mit dem Ziel einer >90%igen Wiederverwertungsquote.

Es war die Entwicklung eines End-to-End-Prozesses als Softwaredemonstrator zur effizienteren ganzheitlichen Bedienung der Prozesskette der additiven Fertigung vorgesehen. Die folgenden Ziele wurden im Arbeitspaket digitaler Kreislaufprozess verfolgt:

- Entwicklung einer digitalen End-to-End-Prozesskette zur Automatisierung der additiven Fertigung. Bestandteil waren unterschiedliche Software-Demonstratoren, welche die folgenden Aufgaben übernehmen (Beispiele): Bauteilorientierung, STL-Reparatur, Supporterzeugung, Slicing, Hatching, Druckereinrichtung, Produktionsplanung, Tracking und Kostenkalkulation. Ziel war es, die wesentlichen Bausteine für den End-to-End-Prozess innerhalb der Projektlaufzeit umzusetzen.
- Ziel in diesem Themenschwerpunkt war die prototypische Verknüpfung der automatisierten, digitalen Einzelschritte (End-to-End) rund um die additive Fertigung mit einer zentralen Bedienplattform, um eine vereinfachte Zugänglichkeit zur additiven Fertigung mit reduziertem notwendigem Expertenwissen aufzubauen. Dieser Schritt sollte die Nutzung erleichtern, bietet das Potential zur Steigerung der Anwendungshäufigkeit und ist damit ein maßgeblicher Schritt zur Reifmachung der Technologie für die digitalisierte und maßgeschneiderte Serienfertigung im Flugzeugbau und anderen Industrien.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Forschungs- und Technologiethemata dieses Vorhabens waren Teil der strategischen Ziele der Materialise GmbH, die die Verwendung additiver Fertigung im Bereich der Luftfahrtproduktion weiter etablieren und bestehende Hürden mithilfe von Softwarelösungen überwindbar machen möchte. Dies wurde bereits in vorherigen Forschungsvorhaben (siehe Tabelle 1) bearbeitet und sollte im Rahmen von TIRIKA weiter ausgebaut und im Luftfahrtkontext validiert werden.

Die Arbeiten wurden im Metallkompetenzzentrum der Materialise GmbH am Standort Bremen ausgeführt.

Von Projektbeginn im Januar 2022 bis Ende April 2024 hatte die Materialise GmbH die Teilprojektleitung des Hauptarbeitspakets HAP 3 inne, die anschließend vom Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE) übernommen wurde.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben TIRIKA war in fünf Hauptarbeitspakete (HAP, siehe Abbildung 1) aufgeteilt, die Arbeitspakete der Materialise GmbH lagen in HAP 3: Ressourceneffiziente Fertigung. HAP3 beschäftigte sich mit der notwendigen Definition der Anforderungen, der Prozessentwicklung, sowie Materialtests und sollte die Reifmachung und Optimierung der additiven Fertigung für Polymer- und Metallwerkstoffe ermöglichen, beispielsweise durch Parameteroptimierung und Reduktion des Ressourceneinsatzes. Dabei standen sowohl die physikalische Effizienz und Umweltfreundlichkeit der Prozesse als auch die unterstützende Entwicklung eines digitalen End-to-End-Prozesses zur Realisierung einer effizienten Prozesskette im Vordergrund. Des Weiteren wurden Konzepte entwickelt, um einen geschlossenen Materialkreislauf zu ermöglichen.

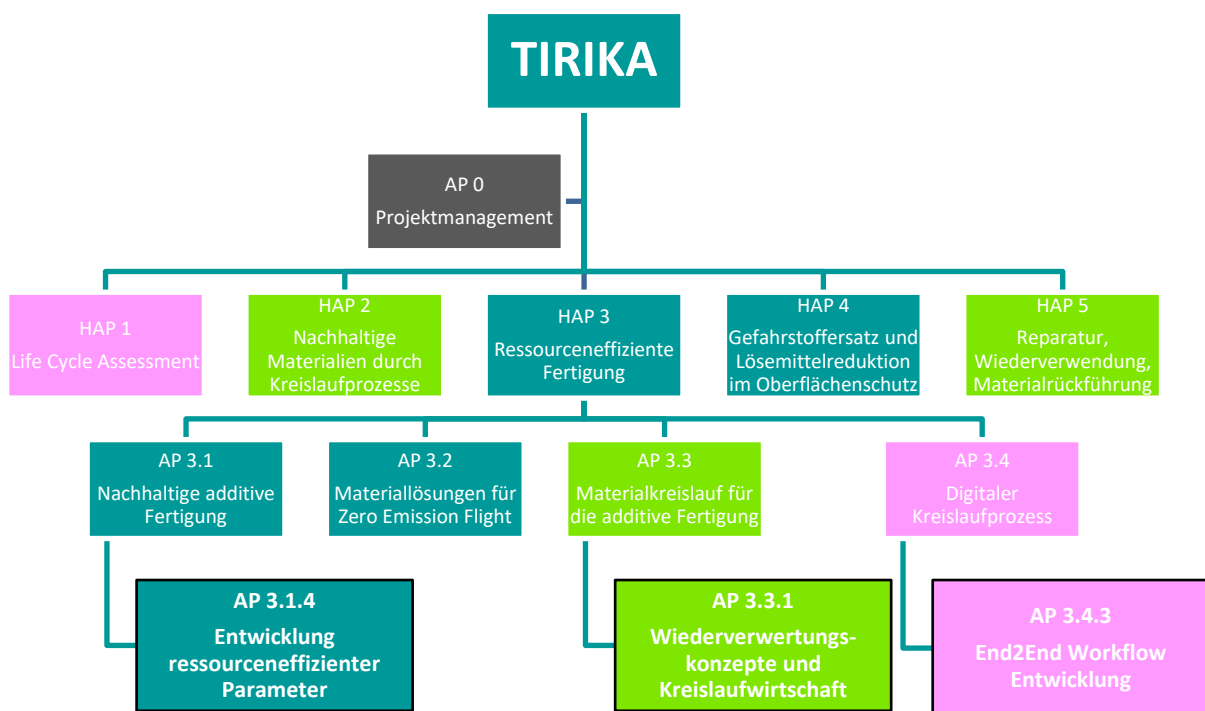


Abbildung 1 Projektstrukturplan mit Hervorhebung der Arbeitspakete der Materialise GmbH

Ein Auszug des Projektplans inklusive der zugehörigen Liefergegenstände (Deliverables, DEL) der Materialise GmbH findet sich in Abbildung 2. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Liefergegenstände separat aufgelistet, um einen Überblick über die Vollständigkeit der Arbeiten zu geben.

Produktionsprozess für Bauteile aus Ti6Al4V mit Airbus geteilt und die dort erarbeiteten Erkenntnisse bilateral geprüft und diskutiert.

Für Arbeitspaket 3.3.1 stellte Materialise defekte Kunststoffbauteile zur Erprobung der Wiederverwertungskonzepte zur Verfügung. Die Untersuchung zur Steigerung der Wiederverwendungsrate von PA12 wurde als Unterauftrag von Materialise NV (Leuven, Belgien) ausgeführt.

In Arbeitspaket 3.4.2 wurden die Anforderungen an digitale End-to-End-Workflows gemeinsam mit Airbus erarbeitet und die Zwischenergebnisse in bilateralen Treffen präsentiert und diskutiert. Bei der Entwicklung der automatischen Methoden zur Datenvorbereitung stellte Airbus Demonstratorgeometrien bereit und bewertete die Ergebnisse der ersten Softwareprototypen aus Produktionssicht. Die Demonstration des entwickelten Cloudservices zur Supporterzeugung innerhalb der Airbus-Plattform „AM One“, sowie die Validierung des Plugins zur Kostenberechnung aus Materialise Magics heraus, wurden bilateral mit Airbus durchgeführt.

2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Erzielte Ergebnisse

Die Ziele der Arbeitspakete wurden im Rahmen des Projekts weitgehend erreicht und liefern eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung und industrielle Anwendung. Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Ergebnisse der Arbeitspakete zusammen und bewerten die Zielerreichung anhand der SMART-formulierten Ziele aus der Vorhabenbeschreibung.

2.1.1 Arbeitspaket 3.1.4 Entwicklung ressourceneffizienter Parameter

Hier lag der Fokus auf der Entwicklung ressourceneffizienter Parameter für die PBF-LB/M-Fertigung von Ti6Al4V-Bauteilen. Der Fokus lag auf der Parameterentwicklung für Schichtdicken von 60 μm und 120 μm . Um die optimale Parameterkombination zu ermitteln, wurden sowohl die Hatchbreite als auch die Scangeschwindigkeit in geringfügigen Abweichungen vom Referenzparameter variiert. Die Laserleistung wurde durchgehend konstant auf dem Maximalwert gehalten. Die spezifischen Ziele wurden durch die Optimierung der Prozessparameter und Verwendung einer Schichtstärke von 120 μm erfolgreich adressiert, was eine Druckprozessbeschleunigung von 40 % bei einer relativen Dichte von 99,9 % ermöglichte (Abbildung 3). Es konnte sowohl eine Reduktion von CO₂-Emissionen als auch des Materialverbrauchs nachgewiesen wurde. Allerdings wurde das Ziel einer Bruchdehnung von 10 % knapp verfehlt (erzielt: 9 %), was als Abweichung zu berücksichtigen ist. Die entwickelten Parameter und Strategien wurden innerhalb des Projektzeitraums validiert und tragen direkt zur Ressourcenschonung und Kostenreduktion bei, während weitere Optimierungen nach Projektende vorgeschlagen werden.

Da der Aufwand zur Nachbearbeitung von Bauteilen direkt von der Menge des verwendeten Supports abhängt, sind Strategien zur Reduzierung des benötigten Supportvolumens wertvoll. Im Teilvorhaben wurde eine Scanzeitkompensation untersucht, bei der die Belichtungszeiten der Schichten über eine Kompensationsgeometrie homogenisiert werden (Abbildung 5). Im Druckversuch mit einem reduzierten Supportwinkel und Kompensationsgeometrie konnte der Demonstrator erfolgreich gedruckt werden und die Qualität der Oberflächen in Downskinregionen wurde als äquivalent zur Originalversion (höherer Supportwinkel) bewertet. Eine solche Anpassung der Belichtungs- bzw. Abkühlzeiten kann auf Build-Processor-Ebene umgesetzt werden und anstelle einer Kompensationsgeometrie eine entsprechend angepasste Pfadplanung genutzt

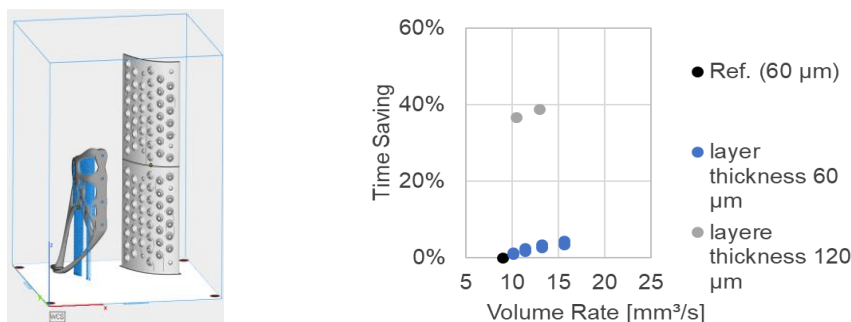


Abbildung 3 Ermittlung der rechnerischen Bauzeit (BTE) zur Identifikation eines produktiven Grundparametersatzes. Bauplatzform für die BTE-Ermittlung mit Bauteilen von Airbus (links: X-Fitting & rechts: Dots-Plate). Das Diagramm zeigt die Druckzeiterparnis unterschiedlicher Parameter im Vergleich zur Referenz.



Abbildung 4 Flugzeugdemonstrator gedruckt in 120 µm Schichtstärke

werden, bei dem z.B. ein anderes Bauteil belichtet wird, während das vorherige abkühlt.

Zusätzlich wurden Strategien und Methoden entwickelt, um den Post-Processing-Prozess von additiv gefertigten Bauteilen effizienter und ressourcenschonender zu gestalten. Ziel war es, den Aufwand und den Materialverbrauch in der Nachbearbeitung zu reduzieren, um sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Nachhaltigkeit der additiven Fertigung zu verbessern.

Die wesentlichen Ergebnisse umfassen:

- **Automatisierte Verfahren:** Es konnte nachgewiesen werden, dass automatisiertes Kugelstrahlen bei Kleinteilen eine deutliche Einsparung von Ressourcen ermöglicht. Durch die Automatisierung konnte der Arbeitsaufwand reduziert und die Prozesszeit verkürzt werden.

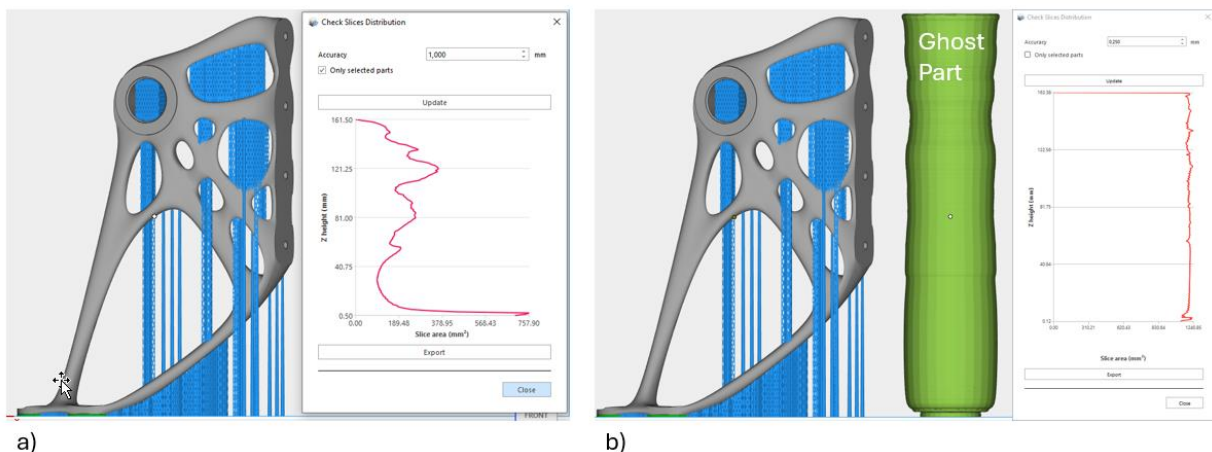


Abbildung 5: Verteilung der Schichtfläche in Abhängigkeit der Bauhöhe a) ohne und b) mit Ghost Part

- **Optimierte Supportentfernung:** Eine Methode zur Entfernung von Supportstrukturen mittels elektrochemischer Materialbearbeitung wurde erfolgreich entwickelt und abgeschlossen. Dabei wurde eine Korrelation zwischen Einstellparametern, Supportdesign und Bauteilgeometrie erarbeitet, die eine gezielte Optimierung des Prozesses ermöglicht. Zusätzlich wurde eine Studie zur Verwendung von Trockeneisstrahlen zur Supportentfernung durchgeführt.
- **Effizienzsteigerung:** Die entwickelten Methoden zeigen großes Potenzial für die Serienfertigung, da sie den Ressourceneinsatz minimieren und gleichzeitig die Qualität der Bauteile im Post-Processing sicherstellen.

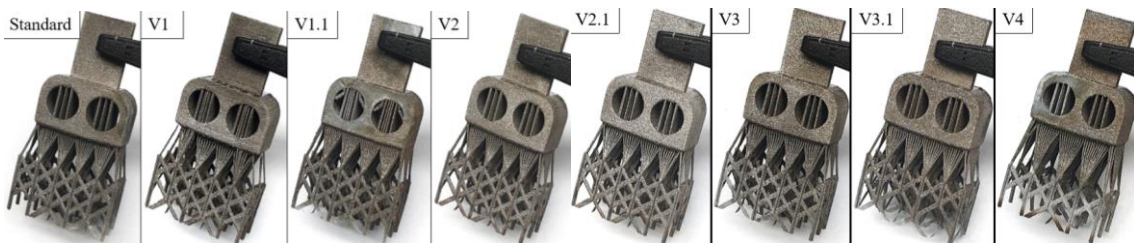


Abbildung 6: Versuchsproben für die EC-Supportentfernung mit unterschiedlichen Supportstrukturvarianten. Das Bauteil hat eine Tiefe von 10 mm.

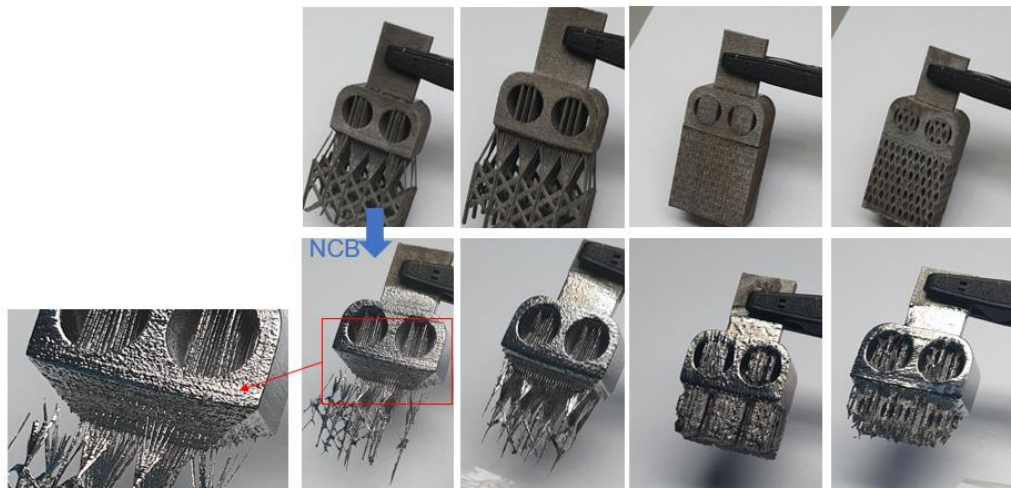


Abbildung 7: Einfluss der Anbindungsichte des Supports auf die Supportentfernung mittels elektrochemischen Abtrages.

Zur Skalierung einer AM-Produktion sind automatisierte Verfahren zur Supportentfernung notwendig. Neben der elektrochemischen Supportentfernung wurde auch Trockeneisstrahlen erprobt. Dabei wird Trockeneis auf das Bauteil gerichtet beschleunigt und löst Supportstrukturen direkt an der Anbindungsstelle. Anhand der Demonstratorgeometrie wurde dieses Verfahren erprobt und der Support handgesteuert in unter einer Minute entfernt. Durch ein Anlernen der Düsenpfade kann dieser Prozess automatisiert werden. Für die effiziente Produktion von Serien ist diese Option als vielversprechend zu bewerten.

2.1.1.1 Liefergegenstände gemäß Projektplan

DEL 3.1.4.1 - Effizienter Prozessparametersatz Ti6Al4V

- Entwicklung eines neuen Ti64 Prozessparameters mit 120 µm Schichtdicke ✓
- Supportstrategien für hohe Schichtdicken entwickelt ✓
- Erfüllung AIMS-Vorgaben für Materialeigenschaften ✗
- Effizienz nachgewiesen – Druckzeit um 40% reduziert verglichen zum Standardparameter (60 µm) ✓
- Beitrag zum LCA geleistet – Einsparung von 5,5 kg CO₂ (-33%) mit neuem Parameter bei vollbelegter Bauplatte ✓
- Optimierte Belichtungsstrategie mittels „Cold Printing“ ✓

DEL 3.1.4.2 - Strategien/ Methoden für optimiertes Post-Processing ✓

- Optimierung des Supports in der Datenaufbereitung für ein effizienteres Entfernen untersucht ✓
- Methode zur Entfernung von Support mittels elektrochemischen Abtrags entwickelt (mit IFAM) ✓
- Methode zur Supportentfernung mittels Kugelstrahlen untersucht und eingeführt ✓
- Supportentfernung mittels Trockeneisstrahlen untersucht und bewertet ✓

DEL 3.1.4.3 - Herstellung eines Demonstrators

Flugzeugdemonstrator hergestellt (Abbildung 4) ✓

2.1.1.2 Bewertung der SMART-formulierten Ziele

Bewertung: spezifisch

Reduzierung der Fertigungskosten, der benötigten Ressourcen (Beiträge zum Ziel effiziente Luftfahrt) und des CO₂-Ausstoßes in der L-PBF-Fertigung von Ti6Al4V-Bauteilen durch die Optimierung und Weiterentwicklung einzelner Prozessschritte entlang der Prozesskette in Form von prozess- und softwarebasierten Lösungen.

Bewertung: messbar

Optimierungs- und Entwicklungsmaßnahmen ermöglichen entlang der Prozesskette beim LPBF eine

- ✓ Verkürzung der Arbeitszeit einzelner Prozessschritte von bis zu 40 %
- ✓ Kostenreduktion von bis zu 10 %
- ✓ Einsparung von Ressourcen in Form von Energie und Material um bis zu 30 %

Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

2.1.2 Arbeitspaket 3.3.1 Wiederverwertungskonzepte und Kreislaufwirtschaft

Im Arbeitspaket 3.3 wurde das Ziel verfolgt, die Wiederverwertungsquote von PA12-Pulver in der SLS-Produktion zu erhöhen. Dazu wurden verschiedene Mischverhältnisse von frischem und recyceltem Pulver genutzt und Bauteile mit und ohne Vorheizung des Pulverbettes produziert und deren Oberflächenqualität (Orange-Peel-Effekt, Abbildung 8) und mechanische Eigenschaften (Zugtest) geprüft. Die Versuche erfolgten in einer Vorstudie und einer produktionsnahen Versuchsphase, dabei zeigte sich, dass mit Vorheizung des Pulverbettes ein Mischverhältnis von 80 % recyceltem und 20 % neuem Pulver Bauteile erzeugt, die bis zum vierten Buildzyklus den luftfahrtspezifischen Anforderungen entsprechen (Abbildung 9). Die Ergebnisse zeigen, dass die Wiederverwertung auf industrieller Ebene umsetzbar ist und zur Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung in der additiven Fertigung beiträgt. Auch dieses Arbeitspaket wurde innerhalb des Projektzeitraums abgeschlossen.

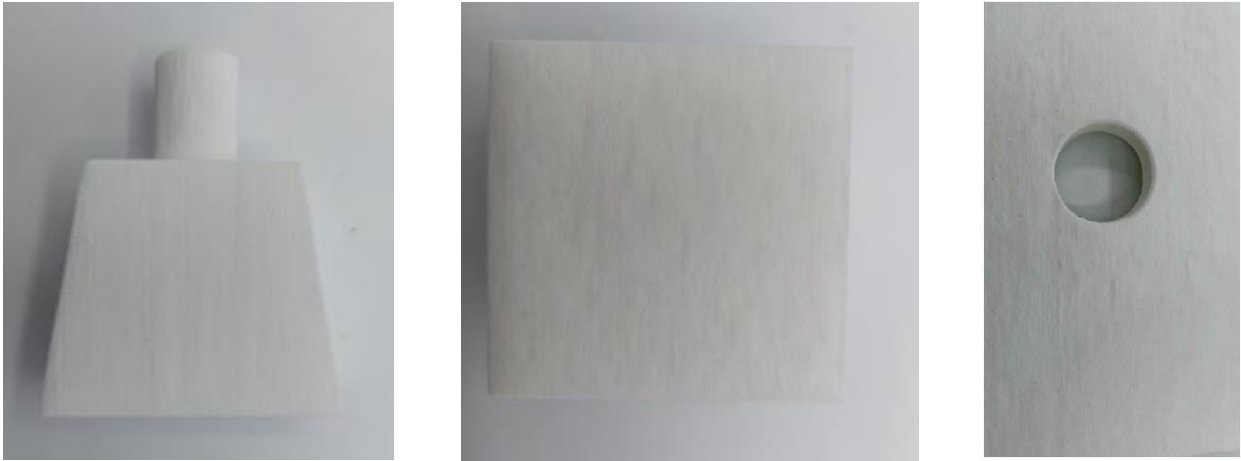


Abbildung 8: Screeningphase: Orange-Peel-Effekt auf Bauteilen, die aus Pulver im Verhältnis 80%/20% ohne Vorheizung gedruckt wurden.

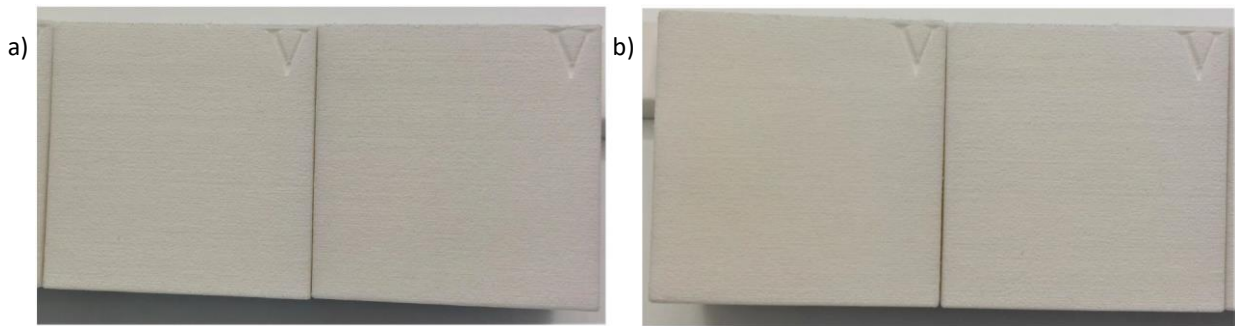


Abbildung 9: Oberflächenvergleich für einen Würfel gedruckt mit a) 85/15-Mix (links), 90/10-Mix (rechts), b) 80/20-Mix (links) und 85/15-Mix (rechts). Zwischen 85/15 und 90/10 besteht nur ein minimaler Unterschied (a), bei 80/20 und 85/15 ist der Unterschied größer (b). Der 80/20-Mix (b, links) wurde für die Produktionsphase ausgewählt.

2.1.2.1 Liefergegenstände gemäß Projektplan

DEL 3.3.1.5 Wiederverwertungskonzept für PA12 ✓

- Notwendigkeit einer Vorheizung des Pulverbetts wurde nachgewiesen ✓
- Mit 80/20%-Pulvermix (recycelt, frisch) resultiert Wiederverwendungsquote > 90 % ✓
- Qualitätsanforderungen für Luftfahrt erfüllt ✓

2.1.2.2 Bewertung der SMART-formulierten Ziele

Bewertung: spezifisch

Steigerung der Wiederverwendbarkeit von PA12 Pulver für die SLS-Produktion bei Erfüllung der Qualitätsanforderungen an das gefertigte Bauteil.

Bewertung: messbar

Es wird eine Pulverwiederverwendungsquote von mehr als 90 % in der Luft- und Raumfahrt angestrebt, was knapp einer Verdopplung der bisherigen Rate entspricht

Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

2.1.3 Arbeitspaket 3.4.2 End-to-End-Workflow-Entwicklung

Das Arbeitspaket 3.4 zielte auf die Entwicklung eines End-to-End-Workflows für die additive Fertigung ab, einschließlich eines Cloudservices zur Supporterzeugung und eines Softwareprototyps zur automatisierten Bauvorbereitung. Die spezifischen Ziele wurden durch die erfolgreiche Implementierung dieser Technologien erreicht. Bei der automatischen Supporterzeugung wurde der Stand der Technik deutlich verbessert, insbesondere bei nach unten zeigenden Kanten, die nun automatisch durch eine Kombination aus massiven (z.B. Kegelsupports) und nicht-massiven (z.B. Linien- oder Blocksupports) Strukturen gestützt werden. Mithilfe des Cloudservices konnte in der Airbus-Plattform „AM One“ ein automatisierter Workflow zur Buildsimulation mit automatisch erzeugten Supportstrukturen umgesetzt und demonstriert werden (Abbildung 10).

Die Entwicklung der automatisierten Bauvorbereitung führte zu einer neuen Methode für die merkmalsbasierte Orientierungsoptimierung, die prozessspezifische Geometriemerkmale (z.B. dünne Wände, Labels/kleine Strukturen auf der Oberfläche, Abbildung 11) erkennt und bei der Orientierung so berücksichtigt, dass eine druckbare Orientierung gefunden wird. Durch die Kombination mit der verbesserten automatischen Supporterzeugung konnte eine Lösung geschaffen werden, die vollautomatisch Bauteile orientiert und mit Supportstrukturen versieht. Basierend auf Expertenwissen der Metallproduktion der Materialise GmbH wurden Orientierungsprofile erstellt, die drei Orientierungsvorschläge für ein Bauteil erzeugen: niedrige Bauhöhe, hohe Packungsdichte und Qualität als Kompromisslösung (Abbildung 12).

Die Evaluierung im realen Betrieb zeigte eine Reduktion der benötigten Arbeitszeit um 40 %, was den Erfolg messbar demonstriert. Zudem bietet die automatisierte Datenvorbereitung klare Vorteile gegenüber manuellen Konkurrenzlösungen, insbesondere durch die Berücksichtigung der Druckbarkeit in jedem Optimierungsschritt. Die entwickelten Tools und Workflows wurden erfolgreich bei Airbus demonstriert und stärken die Wettbewerbsfähigkeit der Materialise GmbH. Die Digitalisierung und Automatisierung der Prozesskette adressieren die Projektziele direkt, eine Weiterentwicklung dieser Technologien ist bereits geplant.

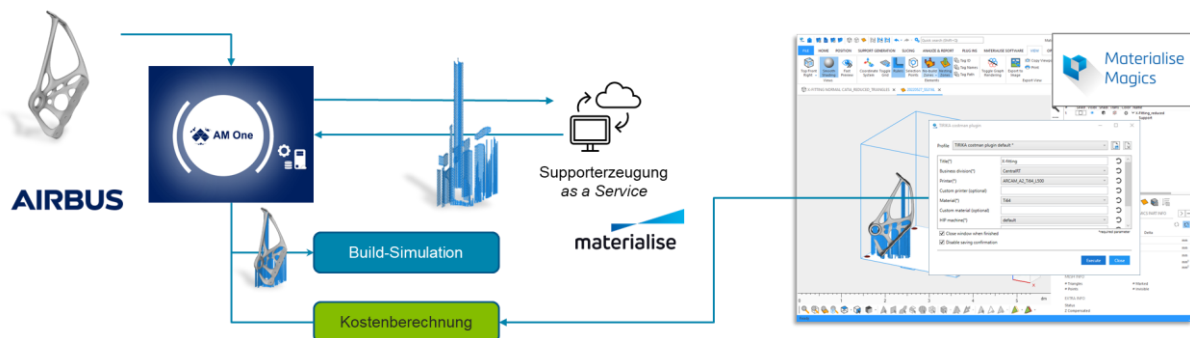


Abbildung 10 Automatischer und interaktiver Workflow: die automatische Supporterzeugung ermöglicht eine direkte Durchführung der Build-Simulation in Airbus' AM-One-Plattform (links), durch die Integration eines Kostenplugins in Materialise Magics, lässt sich die Kostenberechnung in AM One interaktiv anstoßen (rechts).



Abbildung 11 Beispiele für erkannte Geometriemerkmale (v.l.n.r.): Zugänglichkeit der Oberfläche, exponierte Flächen, Labels und Löcher.



Abbildung 12 Orientierungsvorschläge für das Airbus X-Fitting: niedrige Bauhöhe (links), hohe Packungsdichte (mitte), Qualität (rechts).

2.1.3.1 Liefergegenstände gemäß Projektplan

DEL 3.4.3.1 Definition der Gesamtarchitektur

- Anforderungen an eine integrierte End-to-End-Prozesskette definiert ✓
- Architektur für automatisierte und interaktive Abläufe definiert ✓

DEL 3.4.3.2 Demonstration End-to-End-Prozesse

- Cloud-Service zur Supporterzeugung bereitgestellt, in Softwareplattform „AM One“ (Airbus) eingebunden und erfolgreich bei Airbus demonstriert ✓
- Interaktive Kostenberechnung in „AM One“ via Plugin für Materialise Magics realisiert und erfolgreich bei Airbus demonstriert ✓

2.1.3.2 Bewertung der SMART-formulierten Ziele

Bewertung: spezifisch

Steigerung des Automatisierungsgrades des AM Produktion hinsichtlich des digitalen Prozessworkflows und dessen Zusammenführung in einem End2End Prozessportal als Softwareprototyp. Folglich wird die AM-Produktion der Luftfahrt mit dieser Maßnahme verlässlicher, effizienter und der Zugang zur Technologie für den Nutzer wird signifikant vereinfacht.

Bewertung: messbar

Der insgesamt betrachtete Prozessworkflow

- ✓ erbringt eine Zeitersparnis von mindestens 40% zur Vorbereitung von Bauteilen für die AM Fertigung
- ✓ besitzt das perspektivische Potential einer Reduktion um 80% bis 2025. Es resultieren diesbezüglich Kosteneinsparungen von 10% bis 20%.

Ergebnistransfer

Übernahme von Komponenten in die Softwareprodukte von Materialise hat begonnen

Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

2.1.4 Zusammenfassung

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Arbeitspakete, dass die SMART-Ziele weitgehend erreicht wurden. Die Fortschritte in den Bereichen Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung leisten einen bedeutenden Beitrag zur nachhaltigen additiven Fertigung, wobei kleinere Abweichungen, wie die Bruchdehnung in AP 3.1 und die Wiederverwertung von PA12 in AP 3.3 über vier Buildzyklen hinaus, als Ansatzpunkte für zukünftige Entwicklungen dienen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten waren im vorliegenden Vorhaben der größte Posten. Durch die Breite der bearbeiteten Themen von der Parameterentwicklung für den PBF-LB/M-Prozess über die Optimierung der Nachbearbeitung (Supportentfernung), die Softwarearchitektur und die Entwicklung einer automatisierten Methode zur Datenvorbereitung war über die gesamte Projektlaufzeit die Beschäftigung unterschiedlicher Expert:innen notwendig. Für Druckversuche mit Daten aus der automatischen Datenvorbereitung wurde Metallpulver angeschafft und verwendet. Die Studie zur Erhöhung der Wiederverwendungsrate von PA12 wurde als Unterauftrag ausgeführt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Förderung des Teilvorhabens TIRIKA-Materialise war angesichts der hohen Komplexität und des technischen Risikos der durch Materialise durchgeführten Arbeiten angemessen und notwendig. Die additive Fertigung ist von zentraler Bedeutung für die nachhaltige Weiterentwicklung der Luftfahrtindustrie, doch die Etablierung neuer Prozesse und Technologien in diesem Bereich ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Materialise stand vor der Aufgabe, innovative Ansätze zu entwickeln, die sowohl die Ressourceneffizienz steigern als auch die Digitalisierungsziele des Projekts erfüllen sollten. Diese Arbeiten waren mit einem hohen technischen Risiko verbunden, da sie die Grenzen bestehender Technologien erweitern und gleichzeitig den strengen Anforderungen der Luftfahrtindustrie genügen mussten.

Die Entwicklung eines End-to-End-Workflows, einschließlich automatisierter Bauvorbereitung und Supporterzeugung, erforderte die Integration komplexer digitaler Prozesse und die Abstimmung unterschiedlichster Systeme. Das technische Risiko bestand nicht nur in der Unsicherheit, ob die entwickelten Lösungen zuverlässig funktionieren würden, sondern auch darin, ob sie langfristig in der industriellen Praxis wirtschaftlich einsetzbar wären. Die Herausforderung, innovative Technologien zu entwickeln, die sowohl die Produktionskosten senken als auch die Nachhaltigkeitsziele erreichen, war besonders anspruchsvoll und

erforderte erhebliche Ressourcen und Fachkenntnisse. Ohne die gezielte Förderung wäre es kaum möglich gewesen, diese Arbeiten durchzuführen und die Risiken angemessen zu bewältigen.

Ein weiteres technisches Risiko lag in der Optimierung der Materialkreisläufe, insbesondere bei der Wiederverwertbarkeit von PA12-Pulver. Materialise musste sicherstellen, dass recycelte Materialien die hohen Qualitätsanforderungen der Luftfahrtindustrie erfüllen, während gleichzeitig die Kosten und der Abfall reduziert werden sollten. Diese Aufgabe war mit Unsicherheiten bezüglich der Materialeigenschaften und der langfristigen Stabilität der wiederverwendeten Pulver verbunden. Die Förderung ermöglichte es, umfangreiche Tests und Analysen durchzuführen, um diese Risiken zu minimieren und tragfähige Konzepte zu entwickeln.

Die Arbeiten von Materialise im Rahmen von „TIRIKA“ bewegten sich in einem hochdynamischen und wettbewerbsintensiven Umfeld, das durch ständig steigende Anforderungen an Effizienz, Nachhaltigkeit und technologische Innovation geprägt ist. Die gezielte Förderung war daher nicht nur angemessen, sondern essenziell, um die technologischen Risiken zu bewältigen und gleichzeitig nachhaltige Lösungen zu entwickeln, die einen direkten Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie leisten.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die beschriebenen Ergebnisse bilden eine wichtige Basis für die weitere Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der additiven Fertigung. Die optimierten Prozessparameter sollen ab 2025 in der Metallproduktion am Standort Bremen eingeführt werden. Das Konzept zur Erhöhung der Pulver-Wiederverwertungsquote wird in bestehende Fertigungsprozesse integriert.

Das bereits projektbegleitend industrialisierte Produkt „Magics Automation Module“ wurde bereits an mehrere Kunden im EWR lizenziert und soll weiter zur Lösung individueller Automatisierungsanforderungen genutzt werden.

Die entwickelten Softwaremodule und -prototypen werden weiterentwickelt, industrialisiert und mittelfristig in die Produkte von Materialise integriert. Eine verbesserte Methode zur Supporterzeugung an Kanten wurde bereits in „Materialise Magics“ v29 integriert (Release Mai 2025). Die Methoden zur automatischen Bauteilorientierung und Supporterzeugung werden weiterentwickelt und in ein neues Softwareprodukt integriert.

2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Es ist von keiner anderen Stelle Fortschritt an den bearbeiteten Themen bekannt geworden.

2.6 Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit erfolgten keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

Die Untersuchung der elektrochemischen Supportentfernung erfolgte zum Teil im Rahmen der Masterarbeit „Optimierung von Supportstrukturen für die effiziente elektrochemische Entfernung an additiv gefertigten Ti6Al4V-Bauteilen“, die in Kooperation mit der Universität Bremen und dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) durchgeführt wurde.

3 Verzeichnisse

3.1 Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BTE	Build time estimation, Bau-/Druckzeitschätzung
CAD	Computer Aided Design
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
EOS	EOS Electro Optical Systems GmbH
FhG	Fraunhofer Gruppe
FIBRE	Faserinstitut Bremen e. V.
HAP	Hauptarbeitspaket
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
IWT	Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien
ML	Machine Learning
MTLS	Materialise GmbH
PBF-LB/M	Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl
PBF-LB/P	Pulverbettbasiertes Schmelzen von Kunststoff (Polymeren) mittels Laserstrahl

3.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Projektstrukturplan mit Hervorhebung der Arbeitspakete der Materialise GmbH..	4
Abbildung 2: Ausschnitt aus dem detaillierten Gesamtprojektplan mit Fokus auf die Tätigkeiten und Liefergegenstände der Materialise GmbH.....	5
Abbildung 3 Ermittlung der rechnerischen Bauzeit (BTE) zur Identifikation eines produktiven Grundparametersatzes. Bauplattform für die BTE-Ermittlung mit Bauteilen von Airbus (links: X-Fitting & rechts: Dots-Plate). Das Diagramm zeigt die Druckzeitersparnis unterschiedlicher Parameter im Vergleich zur Referenz.....	7
Abbildung 4 Flugzeugdemonstrator gedruckt in 120 µm Schichtstärke.....	8
Abbildung 5: Verteilung der Schichtfläche in Abhängigkeit der Bauhöhe a) ohne und b) mit Ghost Part.....	8
Abbildung 6: Versuchsproben für die EC-Supportentfernung mit unterschiedlichen Supportstrukturvarianten. Das Bauteil hat eine Tiefe von 10 mm.....	9
Abbildung 7: Einfluss der Anbindungsichte des Supports auf die Supportentfernung mittels elektrochemischen Abtrages.	9
Abbildung 8: Screeningphase: Orange-Peel-Effekt auf Bauteilen, die aus Pulver im Verhältnis 80%/20% ohne Vorheizung gedruckt wurden.	11
Abbildung 9: Oberflächenvergleich für einen Würfel gedruckt mit a) 85/15-Mix (links), 90/10-Mix (rechts), b) 80/20-Mix (links) und 85/15-Mix (rechts). Zwischen 85/15 und 90/10 besteht nur ein	

minimaler Unterschied (a), bei 80/20 und 85/15 ist der Unterschied größer (b). Der 80/20-Mix (b, links) wurde für die Produktionsphase ausgewählt. 11

Abbildung 10 Automatischer und interaktiver Workflow: die automatische Supporterzeugung ermöglicht eine direkte Durchführung der Build-Simulation in Airbus' AM-One-Plattform (links), durch die Integration eines Kostenplugins in Materialise Magics, lässt sich die Kostenberechnung in AM One interaktiv anstoßen (rechts). 12

Abbildung 11 Beispiele für erkannte Geometriemerkmale (v.l.n.r.): Zugänglichkeit der Oberfläche, exponierte Flächen, Labels und Löcher. 13

Abbildung 12 Orientierungsvorschläge für das Airbus X-Fitting: niedrige Bauhöhe (links), hohe Packungsdichte (mitte), Qualität (rechts). 13

3.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Überblick relevanter Vorarbeiten der Materialise GmbH. 5