RWTH Aachen | Lehrstuhl DAP
Campus-Boulevard 73, 52074 Aachen

Abschlussbericht
Fachlicher Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Förderaufruf	LuFo VI-1	
Verbundprojekt	Additive Herstellung und subtraktive Nachbearbeitung einer BLISK vor dem Hintergrund der industriellen Anwendung	
Akronym	AMB2S	
Teilvorhaben	BLISK-Fertigung mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF-) Verfahren	
Fördermittelgeber	BMWK	
Förderkennzeichen (FKZ)	20T1925G	
Laufzeit des Vorhabens *von / bis*	01.09.2020	30.09.2024
Berichtszeitraum *von / bis*	01.09.2020	30.09.2024

Eingehende Darstellung des Projektes

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Im folgenden ersten Teil werden die einzelnen Arbeitspakete sowie die erzielten Ergebnisse im Detail beschrieben. Die Konsortialpartner werden in der schriftlichen Ausarbeitung durch folgende Kürzel benannt:

Präwest Präzisionswerkstätten GmbH:	**PW**
BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH:	**BCT**
Innoclamp GmbH:	**IC**
Maschinen, Montage & Betriebsmitteltechnik GmbH:	**MMB**
Oetzbach Edelstahl GmbH:	**OE**
TPW Prüfzentrum GmbH:	**TPW**
Fraunhofer-Institut für Produktinostechnologie:	**IPT**
RWTH Aachen University – Lehrstuhl Digital Additive Production:	**DAP**

HAP 1 Design und Auslegung

Zu Beginn des Projektes wurde zunächst ein Designmodell einer Blisk seitens **IPT** ausgewählt, welche in den Stufen 2-4 eines 9- bis 12-stufigen HPC-Modules eingesetzt wird. Wie in Abbildung 1 dargestellt, ist dieser Demonstrator nach dem Stand der Technik entworfen und besitzt damit die typischen Designfeatures wie Scallops, Labyrinthdichtungen und Hinterschnitte am Scheibenkörper, sowie stark verdrillte Schaufelblätter und ist auf eine Größe von 225 mm im Durchmesser skaliert.

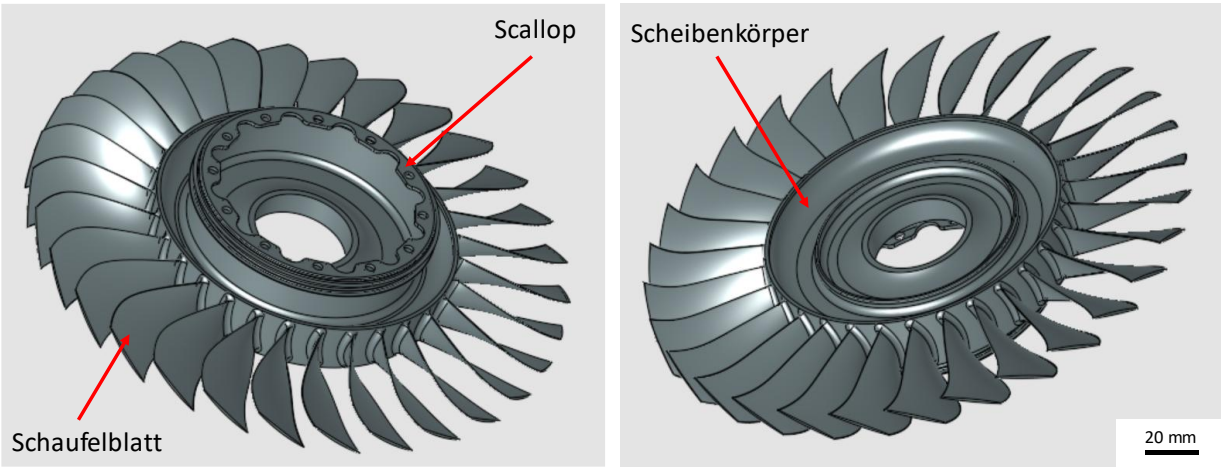


Abbildung 1: Digitales CAD-Nominalmodell des Blisk-Demonstrators im Rahmen von AMB2S

Nachdem die notwendigen Prozessschritte zur fertigen Blisk definiert wurden: 1 Herstellen (**DAP/MMB**); 2 Geometrische Optische Vermessung (GOM) (**DAP**); 3 Wärmebehandlung (**OE/DAP**); 4 GOM (**DAP**); 5 Abtrennen vom Substrat (**IPT/DAP**); 6 GOM (**DAP**); 7 subtraktive Bearbeitung (**PW/BCT/IC/IPT**); 8 GOM (**DAP**); 9 Qualitätssicherung (**DAP/TPW/PW**), mussten die jeweiligen Input und Output-Faktoren bestimmt werden. So bedarf es zur Herstellung der Blisk mit dem PBF-LB/M-Prozess, Stützstrukturen, welche die überhängenden Bereiche im Pulverbett stützen, um einen homogenen Fertigungsprozess zu gewährleisten und Verzug infolge der Eigenspannungen zu verhindern. Diese haben wiederum einen direkten Einfluss auf die subtraktive Nachbearbeitung, Werkzeugverschleiß und Zeit. Zudem bedarf das CAD-Modell weiterer Modifizierungen, um die Ausrichtung des rotationssymmetrischen Bauteiles für die nachfolgende subtraktive Nachbearbeitung zu ermöglichen. Mithilfe des digitalen Abbildes des Bauteiles kann der Verzug nach der Wärmebehandlung und Entfernung vom Substrat bei der CNC-Fräsplanung miteinbezogen und die Blisk auf das finale Maß gefräst und gedreht werden.

AP 1.2 Prozesskettenentwicklung und -bewertung

Der erste große Unterschied in der Gestaltung der Prozesskette ergibt sich bereits in der Konstruktionsphase. In dieser Phase müssen alle nachfolgenden Prozessschritte berücksichtigt werden. Zu nennen sind hier beispielsweise die Aufmaße, Stützkonstruktionen, Referenzkörper für die Ausrichtung bei der subtraktiven Bearbeitung oder die Anpassung der Bauteildatei für ein Spannsystem bei der subtraktiven Bearbeitung. Der nächste große Unterschied kann der Rohlingsfertigung zugeschrieben werden. Während der konventionelle Fertigungsprozess mit einem Gieß und Schmiedeprozess beginnt, wird der additiven Fertigung zunächst die Pulverherstellung vorangestellt, bevor der Rohling selbst hergestellt wird. Die Abweichung im Gefüge zwischen geschmiedetem und additiv gefertigtem Rohling müssen dabei kritisch betrachtet werden. Diese Unterschiede sowie die fehlende Verknüpfung neuer Technologien in den definierten Normen müssen vor dem Hintergrund der Luft- und Raumfahrtzertifizierung diskutiert werden. Die abgeleitete Prozesskette kann Abbildung 2 entnommen werden.

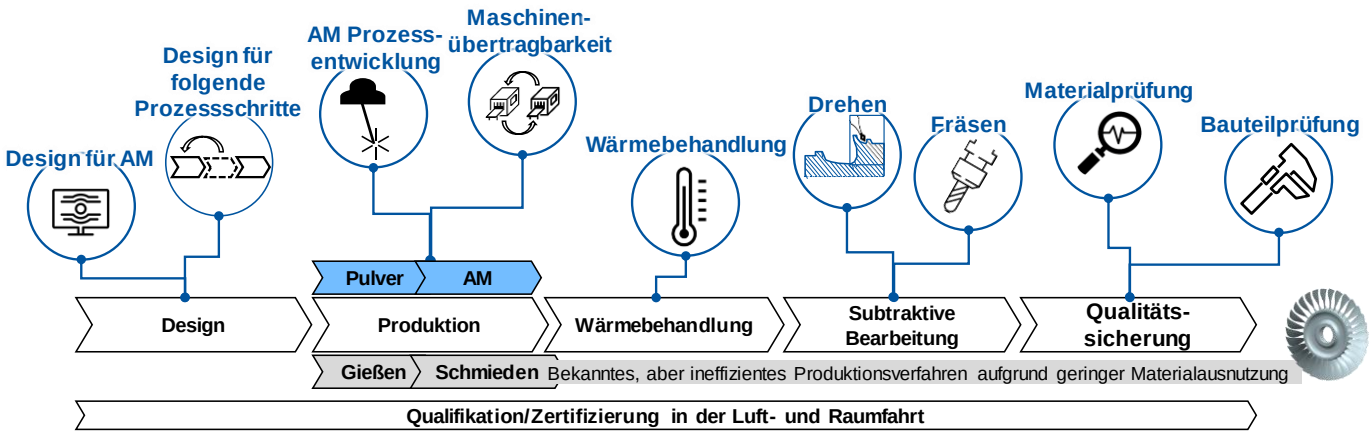


Abbildung 2: Vergleich der konventionellen (grau hervorgehoben) und der additiven (blau hervorgehoben) Prozesskette für die Bliskherstellung

Soweit möglich wurden die bestehenden Normen für die konventionelle Route für die additive Fertigung übernommen. Keine AM-spezifischen Normen sind für die Wärmebehandlung, subtraktive Bearbeitung und abschließende Bauteilprüfung erforderlich und können einfach übernommen werden. Entscheidend ist jedoch die Verknüpfung der Qualitätssicherung mit der neuen Art der Rohlingsfertigung, da die Standards für gegossene und geschmiedete Bauteile keine Anwendung mehr finden können. Hier wurde die Qualitätssicherung über die gesamte Prozesskette anhand verschiedener Messungen wie z.B. Werkstoffprüfung, Prozessdaten und GOM-Scans, gemäß den abgeleiteten Maßnahmen für die Luftfahrtzertifizierung aus HAP6, sichergestellt und werden im späteren Abschnitt detailliert besprochen. Im Rahmen der Prozesskettenentwicklung wurde beschlossen zwei verschiedene Konzepte für die Fräsbearbeitung der Schaufelblätter zu verfolgen. Konzept 1 beinhaltet die Abstützung jedes einzelnen Schaufelblattes. Bei diesem Konzept dienen die Stützstrukturen lediglich der Aufbaubarkeit während der additiven Fertigung und ermöglichen demnach eine deutliche Materialeinsparung und optimierte Strukturauslegung. Konzept 2 verfolgt das Ziel, Stützstrukturen so auszulegen, dass diese für die Herstellbarkeit und Nachbearbeitung gleichermaßen genutzt werden können. Zu diesem Zwecke werden Stützstrukturen nicht nur für die Anbindung an das Substrat während der Herstellung, sondern auch für die Stabilisierung nebeneinanderliegender Schaufelblätter bei der spanenden Nacharbeit genutzt. Die Untersuchungen und Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel AP 1.4 näher beschrieben.

AP 1.3 Konstruktive Bauteilauslegung für die Prozesskette

Nachdem sich das Konsortium auf das Demonstrator Nominalteil geeinigt hat, wurden von **jedem Projektpartner** Bauteilanpassungen vorgeschlagen und im Konsortium diskutiert. Außerdem wurde ein durchgängiges Aufmaß von 1 mm gewählt um einen möglichen Bauteilverzug während des PBF-LB/M-Prozesses, sowie der Wärmebehandlung und dem Abtrennen auszugleichen. Abschließend erfolgte die Definition der Aufbaurichtung (siehe Abbildung 3) bevor die konstruktive Bauteilauslegung unter Berücksichtigung der ganzheitlichen Prozesskette vollzogen werden konnte.

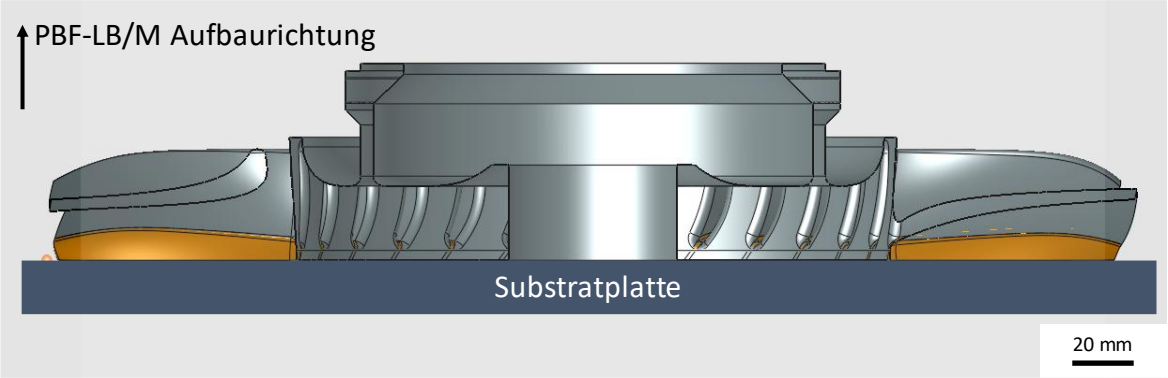


Abbildung 3: Schnittansicht durch die Mitte des Blisk-Demonstrators mit orange hinterlegten Schaufelverlängerungen für die Anbindung an die Substratplatte

Diese Ausrichtung wurde gewählt, um die zu stützenden Flächen zu minimieren. Die Größten Anpassungen vom **DAP** beziehen sich dabei vor allem auf Überhanggeometrien. Hierunter zählt die Verschließung des Scheibenkörpers und Scallops. Die Scallops wurden durch einen Absatz mit 45° Winkel ersetzt, um schwer entfernbare Stützstrukturen in diesen Bereichen zu verhindern. Zudem kann durch die subtraktive Bearbeitung dieser Designfeatures, die hohe geforderte Genauigkeit sichergestellt werden. Um den Verzug der Schaufelblätter während des PBF-LB/M-Prozesses zu verringern wurden diese ebenfalls in geschwungener Form verlängert und an die Substratplatte angebunden. Auf diese Weise können, die während des PBF-LB/M-Prozesses auftretenden inneren Spannungen ohne massive Stützstrukturen aufgefangen werden, bis diese durch die Wärmebehandlung minimiert werden. Zudem hat der **DAP** während der gesamten Diskussion über die Anpassungen des Demonstrators eine Einschätzung über die PBF-LB/M-Aufbaubarkeit der gewünschten Features gegeben. Die oben beschriebenen Anpassungen sind in Abbildung 4 zu sehen und ergeben im gesamten das „Rohteil der Fertigung“.

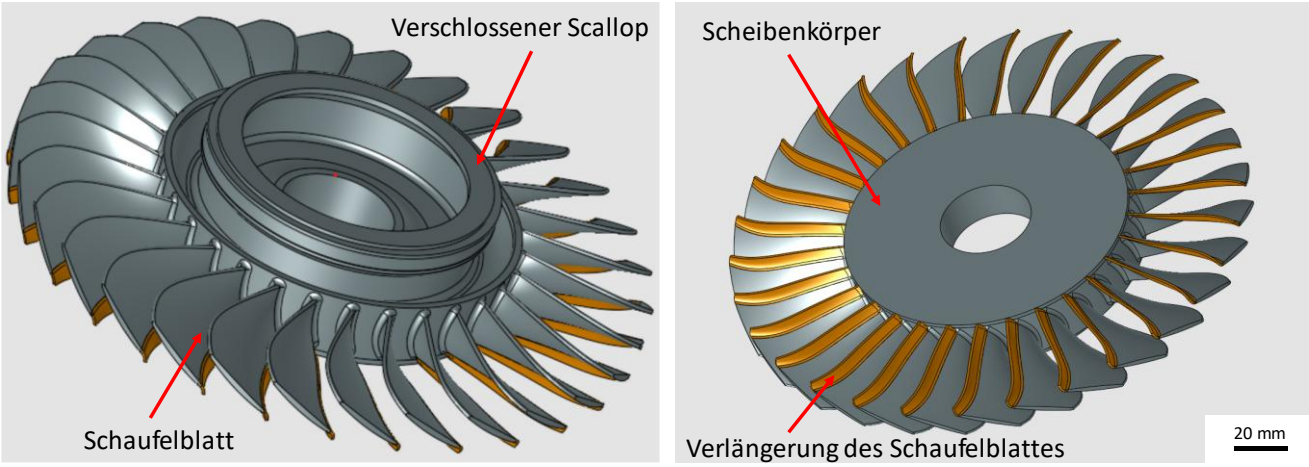


Abbildung 4: Digitales CAD-Modell des Rohteils der Fertigung des Blisk-Demonstrators im Rahmen von AMB2S

AP 1.4 Design und Auslegung von Stützstrukturen

Im Rahmen der Abstimmung mit den Projektpartnern wurden zwei Konzepte für die Dreh- und Fräsbearbeitung gewählt, welche die Anforderungen an die Stützstrukturen der Schaufelblätter maßgeblich ändert. Zudem wurden Referenzprobekörper und deren Stützen für die Ausrichtung des Bauteiles definiert (siehe Abbildung 5).

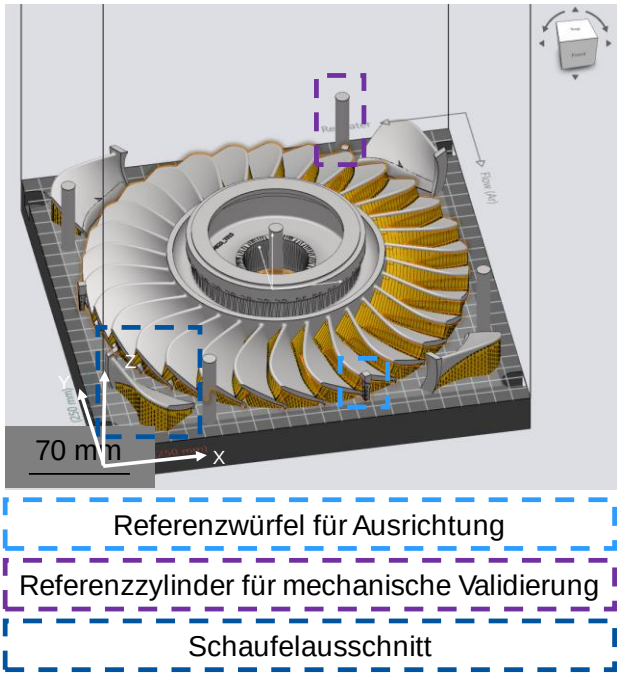


Abbildung 5: Darstellung der finalen CAD-Modelle: Blisk-Vorform, Würfelmodifikation an spezifischen Schaufeln für die Ausrichtung zur subtraktiven Bearbeitung, sowie gedruckten Prüfkörper für die Qualitätssicherung

<u>Konzept 1:</u> Bei der Stabilisierung der Schaufelblätter durch ein Spannsystem soll jedes Schaufelblatt einzeln abgestützt werden. Bei diesem Vorgehen dienen die Stützstrukturen demnach lediglich der Aufbauarbeit mittels dem PBF-LB/M-Prozess. In Absprache mit **IC** erfolgt dabei die Definition von "Design Spaces", Bereiche, die mit Stützstrukturen versehen werden dürfen oder nicht, siehe Abbildung 6. Für die Stützstrukturen müssen Eigenschaften, wie möglichst geringe Prozesszeit, geringer Materialverbrauch, gute Zerspanbarkeit und ausreichende Wärmeableitung gegeneinander abgewogen werden.

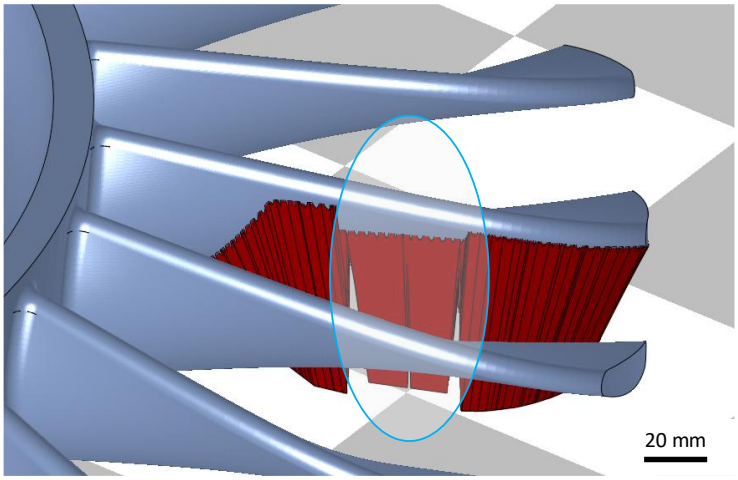


Abbildung 6: Stützstrukturen der Schaufelblätter mit beispielhaftem Design-Space umkreist in blau

Konzept 2: Bei der Stabilisierung der Schaufelblätter durch weitere Supportstrukturen sollen die Schaufelblätter durch Strukturen zwischen nebeneinanderliegenden Schaufelblättern, während der Fräsbearbeitung stabilisiert werden. Bei diesem Vorgehen wird das Spannsystem lediglich für das Fixieren des gesamten Scheibenkörpers genutzt. Insgesamt wurden im Rahmen von Konzept 2, fünf Hauptstrukturen untersucht, welche der Abbildung 7 entnommen werden können.

1. Poröse Strukturen (Vollmaterial mit einer prozessbedingten Restporosität)
2. Blocksupport mit kurzen Platzhaltern
3. Blocksupport mit langen Platzhaltern
4. Schmale Umhüllstruktur
5. Voll-Umhüllstruktur

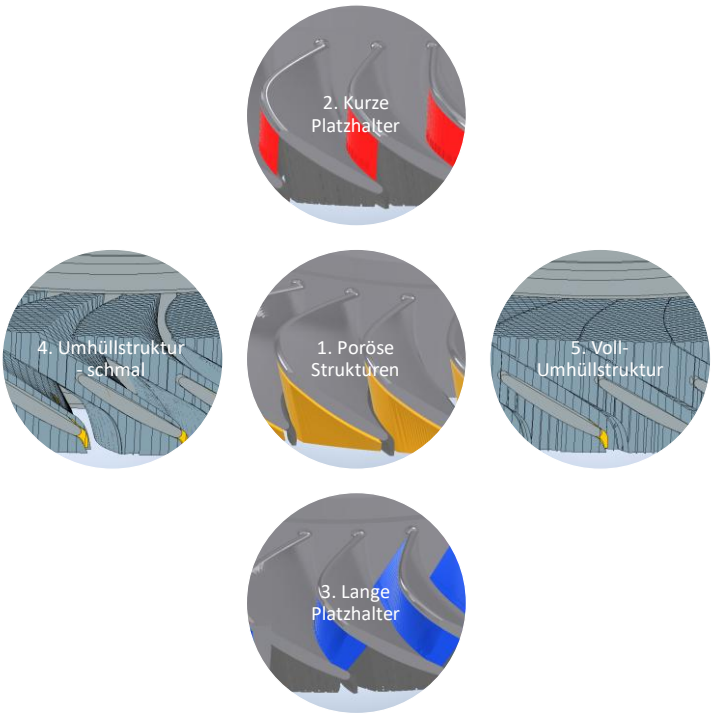


Abbildung 7: Verschiedene Ausprägungen der untersuchten Stützstrukturen

Die subtraktive Bearbeitung einer porösen Struktur führte dabei zu erhöhtem Werkzeugverschleiß und kann auf das häufige Ein- und Austreten der Schneidenbereiche in die poröse Materie zurückgeführt werden. Aufbauend auf den Ergebnisse wurden abschließend vier verschiedene Ausprägungen des sogenannten „Block-Supports“ untersucht. Die Strukturen setzen sich ebenso wie die Stützstrukturen 2-5 aus einer verstärkten Außenwand und einer inneren Struktur zusammen, welche in Voruntersuchungen eine halb so große Verschleißmarkenbreite der Schneidkante eines Fräswerkzeuges aufwies. Basierend auf den Erkenntnissen, dass eine Außenwand, die mittels Doppelbelichtung gefertigt ist, zu einem größeren Werkzeugverschleiß führt und eine zu geringe Menge an Material sowie zu dünne Außenwände bei den Platzhaltern die Eigenspannungen während der additiven Fertigung oder die Vibrationen bei der subtraktiven Bearbeitung unzureichend auffängt, konnten die langen Platzhalter mit verstärkter Außenwand als bis dato erfolgversprechendste Stützstruktur identifiziert werden. Die Korrelation zwischen notwendigem Materialaufwand und ausreichender Kraftaufnahme in den nachfolgenden Prozessschritten stand hierbei stets im Vordergrund. Der Einfluss der „Umhüllstruktur“ in den zwei Ausprägungen auf den additiven Fertigungsprozess und auf die subtraktive Nachbearbeitung wurden der Performance der langen Platzhalter gegenübergestellt. Hierbei wurde die Idee verfolgt, die einzelnen Streben in einer solchen Art und Weise zu designen, dass die Vektoren lediglich mit einem einzelnen Scan abgebildet werden können und damit eine verschleißarme subtraktive Nachbearbeitung gewährleistet werden kann. Beim Zusammenschluss der Streben zu einem Gitter sollen die auftretenden Vibrationen durch eine erhöhte Steifigkeit der filigranen Schaufelblätter kompensiert werden. Die Herstellung der

„Umhüllstrukturen“ war durch eine Inhomogenität aufgrund der filigranen Gitterstruktur und der damit verbunden Überhitzung der Strukturen gekennzeichnet. Diese Überhitzung führt zu einer sogenannten Superelevation, ein Hochziehen der Strukturen, welches den Pulverauftrag direkt beeinflusst. Im Hinblick auf die subtraktive Nachbearbeitung konnte zudem ein erhöhter Werkzeugverschleiß festgestellt und auf den erhöhten Materialeinsatz für die Gitterstruktur zurückgeführt werden. Demnach lassen sich folgende Schlussfolgerungen zu den unterschiedlichen Konzepten ableiten:

Konzept 1: Effiziente Auslegung der Stützstrukturen; Minimierung des Materialaufwandes entsprechend der verzugsarmen Herstellbarkeit im PBF-LB/M-Prozess → lediglich Anbindung zur Substratplatte über typische Blocksupports

Konzept 2: Kompromiss zwischen Materialeinsatz, Scan-Strategie (Einzel- vS. Doppelbelichtung) sowie dem Design der Stützstrukturen unter und zwischen den Schaufelblättern → lange Platzhalter mit verstärkter Außenwand

Für die finale Gegenüberstellung wurden diese Erkenntnisse hinsichtlich der Konzepte in jeweils einer Blisk umgesetzt. Insgesamt hat der Bearbeitungsprozess mit dem neu entwickelten Spannsystem gezeigt, dass dieses sehr gut funktioniert und die durch den Zahneingriff des Bearbeitungswerkzeuges erzeugten Schwingungen gedämpft werden. Unter Verwendung des Spannsystems ist die resultierende minimale Oberflächenrauheit mit 0,265 µm jedoch schlechter als die Ergebnisse der Oberflächenrauheit unter Verwendung der Platzhalter mit einer minimalen Oberflächenrauheit von 0,139 µm aufzeigen. Die Vorteilhaftigkeit der Materialeinsparung (keine Notwendigkeit von Platzhaltern) bei diesem Konzept und der damit verbunden geringeren Prozesszeit muss bei der Weiterentwicklung des Spannsystems berücksichtigt werden.

HAP 2 Additive Herstellung

Im Rahmen von HAP 2 wurde in Zusammenarbeit von **DAP** und **MMB** die Prozesskette zur Charakterisierung der additiven Fertigungsanlagen und deren Ressourcen entwickelt. Zudem wurden Demonstratoren und Probekörper gefertigt und die Prozessübertragbarkeit auf verschiedene Anlagen (EOS M280, SLM Solutions 280) untersucht.

AP 2.1 Charakterisierung PBF-LB/M-Anlagen und des Pulvers

Als Vorbereitung für die Prozessübertragbarkeit und zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und Sicherstellung einer zertifizierbaren Prozesskette wurden parallel in HAP6 Maßnahmen für die Charakterisierung der Anlagen und Rohstoffe vor dem Hintergrund der Luft- und Raumfahrtzertifizierung abgeleitet. Die zugehörigen Details finden sich in den Kapiteln zu HAP 6.

Charakterisierung der PBF-LB/M-Anlagen:

Vor Inbetriebnahme der Maschine ist eine Qualifizierung nach DIN EN ISO/ASTM 52941 erforderlich und beinhaltet unter anderem die Vermessung der Laserleistung und Strahlkaustik. Das geometrische Verhalten wird nach DIN EN ISO/ASTM 52902 und den darin definierten Prüfkörpern geprüft. Diese Charakterisierungsbaujobs wurden durchgeführt werden, um ebenfalls die Eigenschaften der produzierten Bauteile auf den jeweiligen Anlagen zu vergleichen und Korrekturen zu erfassen. Dies umfasste Baujobs zur Ermittlung der Wiederholungsgenauigkeit, des thermischen Shifts als auch der mechanischen Eigenschaften. Die relevantesten Kenngrößen sind im folgenden aufgeführt und werden diskutiert.

- **SLM Solutions 280 bei PW**
  Laserleistung: Unter der Berücksichtigung der Abweichung von 25-30 W für jede Leistungsstufe wurde eine Leistungsstabilität von 99,987-99,994 % bei einer Soll-Leistung von 200 W detektiert.
  Strahlkaustik: Intensitätsverteilung sowie Strahlgeometrie gemäß Normbestimmungen
  Fokusdurchmesser bei 250 W: 76,25 µm
- **EOS M290 am DAP**

Laserleistung: Abweichung von max. 8 W bei einer Soll-Laserleistung von 325 W mit einer Leistungsstabilität von 99,08-99,66 % über 30 min bei einer Soll-Leistung von 200 W
Strahlkaustik: Intensitätsverteilung sowie Strahlgeometrie gemäß Normbestimmungen
Fokusdurchmesser bei 250 W: 77,4 µm

- **EOS M280 bei MMB**
  Während des Anlagenumbaus bei **MMB** wurde eine neue Laserstrahlquelle in die Anlage integriert. Bei der Anlagenvermessung konnten mehrere signifikante Defizite festgestellt werden. Wie in Abbildung 8 b) ersichtlich, weicht die Intensitätsverteilung von dem typischen Gauß'schen Profil (Abbildung 8 a)), insbesondere im Bereich oberhalb der Fokusebene, ab. Zudem ist in Abbildung 10 die Auswertungssoftware des Kaustikmessgerätes beispielhaft aufgezeigt.

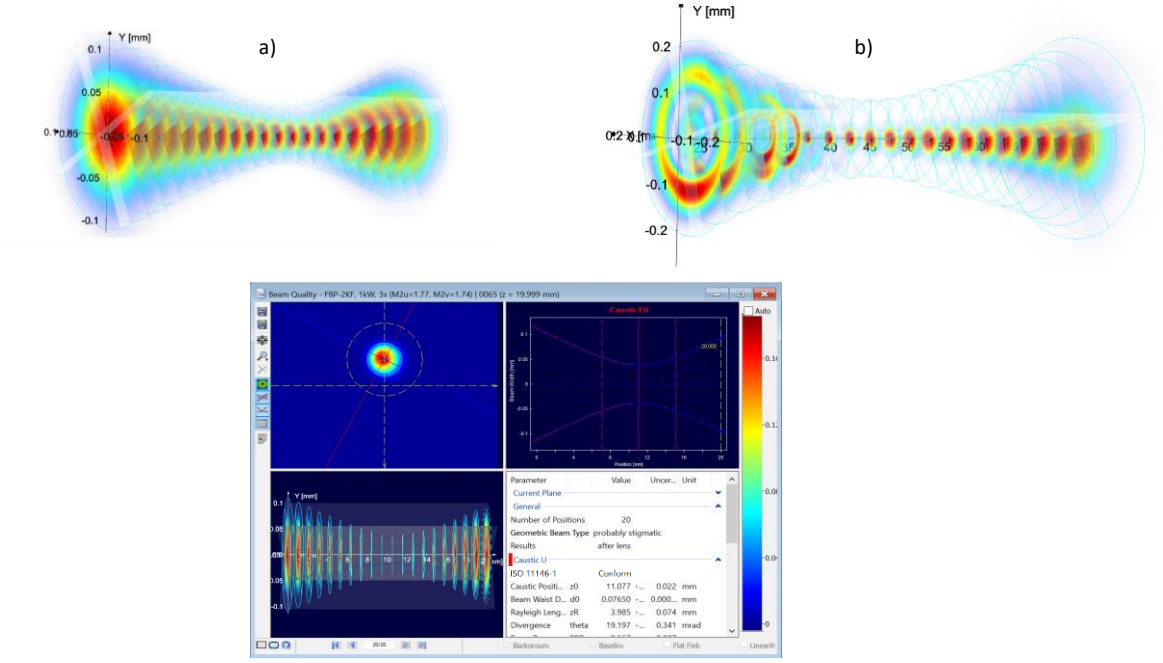


Abbildung 8: In der oberen Hälte der Darstellung ist eine beispielhafte Strahlkaustik a) in typischer Form mit Gauß'scher Intensitätsverteilung, sowie b) mit suboptimaler Intensitätsverteilung, dargestellt. In der unteren Hälfte ist die Auswertungssoftware mit den entsprechenden Kenngrößen aufgeführt.

Weiterhin sollte der Laserstrahldurchmesser im Fokuspunkt bei ungefähr 75 µm liegen, tatsächlich konnte in diesem Fall bei einer Soll-Leistung von 285 W ein Laserstrahldurchmesser von 180,35 µm detektiert werden. Abschließend wird ebenfalls eine Kenngröße zur Quantifizierung der Strahlqualität von der Auswertungssoftware ausgegeben, dass sogenannte M^2, welches idealerweise bei 1 liegen sollte und im vorliegenden Fall 2,233 beträgt. Aufgrund dessen wurde die Anlage für die Anlagenübertragbarkeit nicht berücksichtigt.

Charakterisierung des Pulvers:

Der Charakterisierungsprozess ist ebenfalls mit den zuvor genannten Anforderungen, welche in HAP 6 abgeleitet werden, verknüpft und wird durch die Norm für das Management des Lebenszyklus von Pulvern DIN EN ISO/ASTM 52928 geregelt. Für das Projekt AMB2S wurde im gesamten Konsortium 550 Kg Oerlikon MetcoAdd-In718 aus einer Charge (21PMO1984C) beschafft, um produktionstechnische Unterschiede des Pulvers in den durchgeführten Untersuchungen zu minimieren. Dieses Pulver ist seitens Oerlikon für die Luftfahrt und additive Fertigung zertifiziert. Dieses Pulver wurde mittels Querschliffen auf die Partikelmorphologie und Dichte, mittels Retsch Camsizer sowie CT hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung und mittels CTX bezüglich der chemischen Zusammensetzung geprüft. Zusammenfassend können die Angaben des Herstellers bestätigt werden. Das Pulver erfüllt die Norm der chemischen Zusammensetzung, die geeignete Partikelgrößenverteilung von 15-45 µm, sowie eine sphärische Partikelmorphologie.

AP 2.2 Prozessentwicklung und Entwicklung bauteilabhängiger Scan-Strategien

Dieses AP läuft parallel zum AP 1.4, in welchem eine gesonderte Scanstrategie für die Supportstruktur entwickelt wird, sowie zum HAP 3, bei welchem die Mikrostruktur des gefertigten Werkstoffes charakterisiert und angepasst wird. Verschiedene Probekörper zur Evaluierung der mechanischen Eigenschaften, Blisk-Ausschnitte und Testgeometrien für das Spannsystem wurden in dem Rahmen gefertigt. Zeitgleich werden Untersuchungen zur Übertragbarkeit der gewählten Scanstrategie auf andere PBF-LB/M-Anlagen durchgeführt (siehe AP 2.4).

In einem ersten Schritt wurden verschiedene Probekörper oder Blisk-Ausschnitte mit verschiedenen Verfahrensparametern aufgebaut, um die mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften sowie die Wechselwirkungen mit der anschließenden subtraktiven Bearbeitung zu bestimmen. Aufgrund der nachfolgenden subtraktiven Bearbeitung ist die Entwicklung von Verfahrensparametern für die Belichtung der Kontur der Bauteile hinfällig. Nach Sicherstellung einer relativen Bauteildichte von >99,95 % wurde mit der Entwicklung von bauteilabhängigen Scan-Strategien in Abhängigkeit der verschiedenen Stützstrukturen (Konzept 1 +2) begonnen. Hervorzuheben ist hier die Entwicklung einer Prozessroute für die Herstellung von porösem Vollmaterial als Stützstruktur sowie die Entwicklung der Prozessroute für die Belichtung der verschiedenen, vom Block-Support, abgeleiteten Hauptstrukturen. In der folgenden Abbildung 9 ist das initiale Ablösen der Platzhalter bei der zuvor definierten Belichtungsstrategie dargestellt.

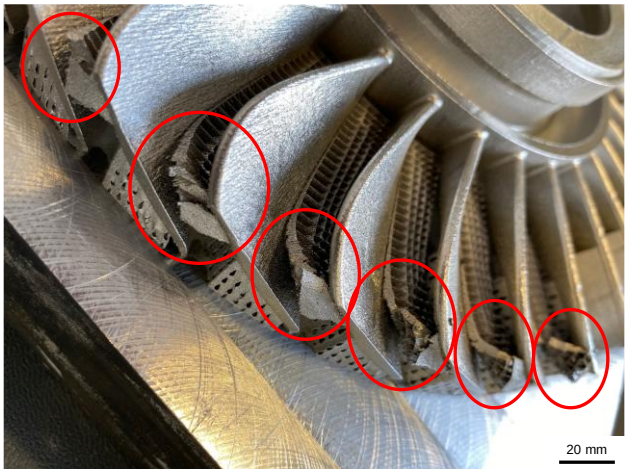


Abbildung 9: Ablösen der Platzhalter bei Belichtung ohne Verwendung einer bauteilabhöngigen Scan-Strategie

Zudem sind in Abbildung 10 die Scanvektoren zu erkennen, welche von der Anlage umgesetzt werden. Sowohl die Struktur zur Abstützung der einzelnen Schaufeln für die PBF-LB/M-Prozessierbarkeit (orange dargestellt), als auch die Struktur zur Schwingungsdämpfung während der subtraktiven Bearbeitung zwischen den Schaufeln (grün) wird hier verdeutlicht. Die einfache Belichtung der filigranen Außenwände der Platzhalter war nicht ausreichend, um die während der additiven Fertigung auftretenden Eigenspannungen zu kompensieren. Nachdem weitere Versuche unternommen wurden, konnten die langen Platzhalter mit verstärkter Außenwand als vielversprechendste Struktur identifiziert. Dabei lag der Fokus stets auf der optimalen Balance zwischen notwendigem Materialeinsatz und der Fähigkeit, die Kräfte während der Herstellung und in den nachfolgenden Prozessschritten zuverlässig aufzunehmen.

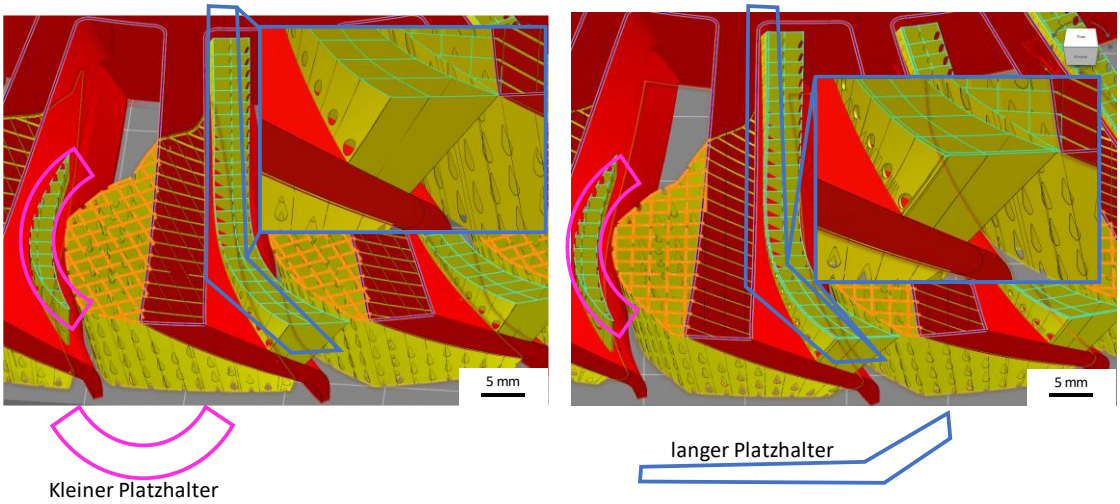


Abbildung 10: Konstruktion der Stützstrukturen in Form von Blocksupports für die definierten Designspaces, links: Abstützung der einzelnen Schaufeln und einer Einzelscan-Belichtung der Außenwand (relevante Stelle blau markiert) und rechts: Schwingungsdämpfung zwischen den Schaufeln und einer Doublescan-Belichtung der Außenwand (relevante Stelle blau markiert)

AP 2.3 Additive Herstellung des BLISK Demonstrators

Im Rahmen des AMB2S-Projektes, wurden eine Vielzahl von Blisk-Demonstratoren gefertigt. Auch aufgrund des lange verzögerten Anlagenumbaus bei **MMB** bis zum letzten Bearbeitungsjahr, hat der **DAP** dabei die Aufgabe übernommen alle relevanten Probekörper und Demonstratoren im Rahmen von AMB2S herzustellen.

Der erste erfolgreiche Demonstrator beinhaltete eine vollständige Blisk mit porösem Vollmaterial (85 % relative Bauteildichte) als Stützstruktur unterhalb der Turbinenschaufeln in Anlehnung an das Konzept 2 für die Dreh- und Fräsbearbeitung (siehe AP 1.4). Im nächsten Schritt wurden für den folgenden Blisk-Demonstrator Platzhalter gemäß Konzept 1 in unterschiedlichen Ausprägungen gefertigt. Die Blisk wurde hierfür in zwei Bereiche unterteilt, sodass jeweils 15 Turbinenschaufeln mit kurzen und langen Platzhaltern versehen werden konnten, siehe Abbildung 11. Die erfolgreiche Herstellung wurde dann mit einer verstärkten Außenwand für die Platzhalter gewährleistet. Zudem wurde der vielversprechendste Platzhalter (langer Platzhalter) mit den verschiedenen Umhüllstrukturen (schmal und voll) in einem Demonstrator vereint. Aufbauend auf den Ergebnissen der subtraktiven Nachbearbeitung, wurde abschließend der letzte Blisk-Demonstrator vollständig mit langen Platzhaltern versehen, um die Fräs- und Drehbearbeitung mit dem neu entwickelten adaptiven Spannsystem, dem konventionellen Prozess, gegenüberzustellen (siehe Abbildung 12).

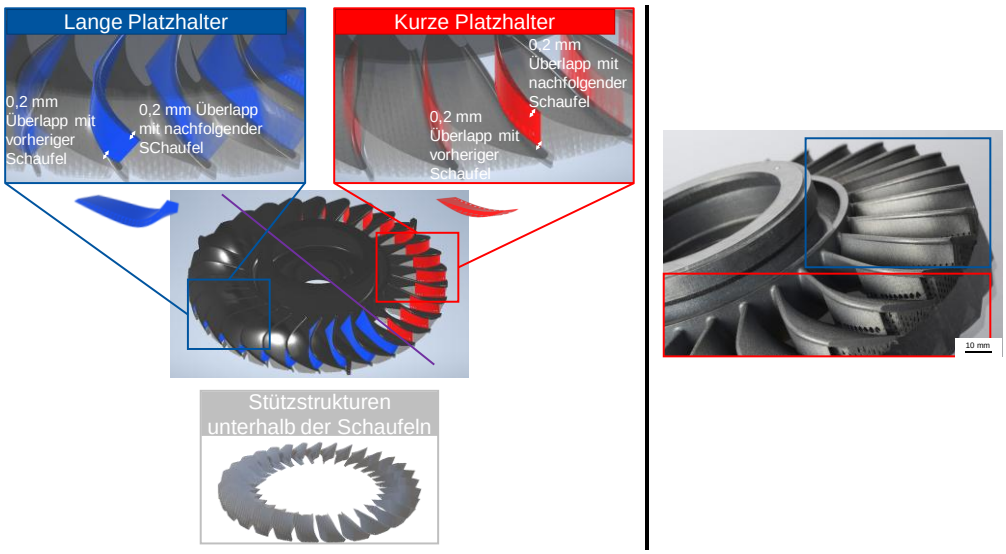


Abbildung 11: (links) Digitales CAD-Modell, bestehend aus der Blisk (schwarz), verschiedenen Platzhalter (rot und blau) und den Stützstrukturen (grau); (rechts) gefertigter Demonstrator mit markierten Bereichen für die langen Platzhalter blau umrandet sowie für die kurzen Platzhalter rot umrandet

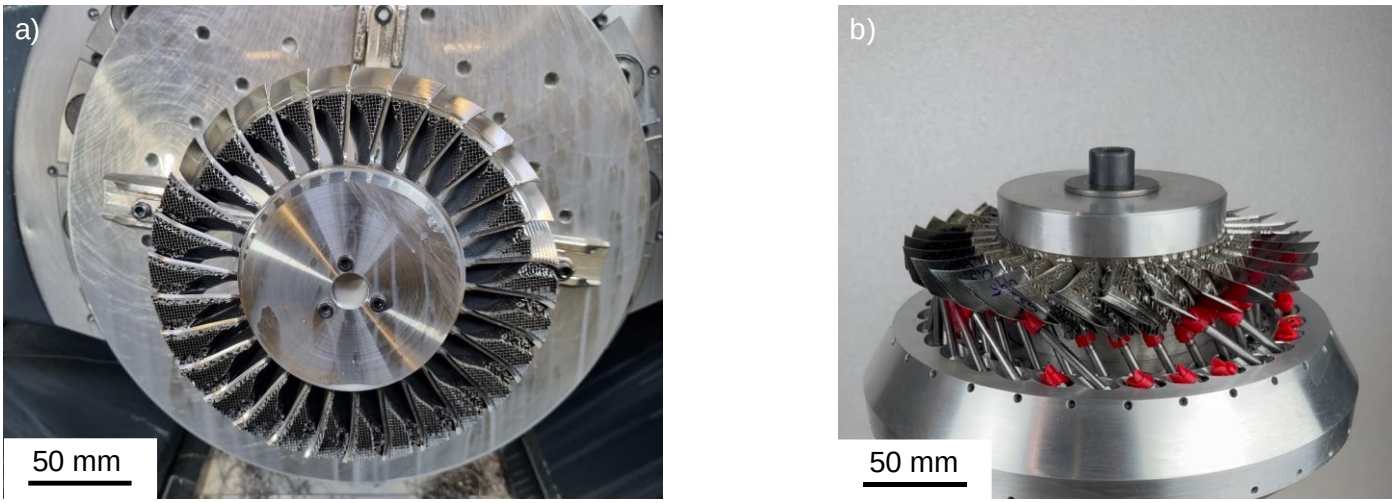


Abbildung 12: Gegenüberstellung (a) der konventionellen Spannvorrichtung zur subtraktiven Bearbeitung einer Blisk mit Verstärkungsstützstrukturen auch zwischen den Schaufeln mit (b) der neu entwickelten adaptiven Spannvorrichtung zur Bearbeitung einer Blisk

AP2.4 Prozessübertragbarkeit auf weitere L-PBF Anlagen

Für die Untersuchung der Prozessübertragbarkeit wurde die Abhängigkeit der relativen Bauteildichte von den Verfahrensparametern und vom Anlagentyp untersucht. Ausgehend von den jeweiligen „Standardparametersätzen“ der unterschiedlichen Projektpartner **PW**, **MMB** und dem **DAP** sollte ein Parameterfeld aufgespannt, siehe Tabelle 1. Aufgrund des lange ausstehenden Anlagenumbaus bei **MMB** und der suboptimalen Laserstrahlkaustik werden die Versuche zur Prozessübertragbarkeit bei **MMB** nicht für die Analyse in diesem Kapitel berücksichtigt. Für das Aufspannen des Parameterfeldes wurden die Scan-Geschwindigkeit um 100 und 200 mm/s in positive und negative Richtung und der Hatch-Abstand um 10 bzw. 20 µm in positive und negative Richtung angepasst. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die mittlere Abweichung über alle Parametersätze hinweg zwischen den gefertigten Strukturen für eine Schichtstärke von 40 µm am geringsten ausfällt. Hier liegt die mittlere Abweichung in der relativen Bauteildichte bei 0,21 %. Demgegenüber liegt die mittlere Abweichung bei dem SLM-Parameter und einer Schichtstärke von 30 µm bei 0,73 % und für eine Schichtstärke von 50 µm bei 0,39 %. Unter der Voraussetzung, dass die relative Bauteildichte > 99,95 % entsprechen soll und die Abweichung zwischen den Anlagen minimal, wurde für die folgenden Untersuchungen der EOS-Standardverfahrensparametersatz verwendet. Zudem bietet eine Schichtstärke von 40 µm einen guten Kompromiss zwischen Detailauflösung und Prozessgeschwindigkeit vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit und einer ableitbaren Serienfertigung.

Tabelle 1: Standardparametersätze von PW (SLM) und DAP (EOS)

Standardparameter	SLM **(PW)**		EOS **(DAP)**
Ds-Laserstrahldurchmesser	30 µm	50 µm	40 µm
Pl-Laserleistung	175 W	275 W	285 W
Vs-Scan-Speed	610 mm/s	805 mm/s	960 mm/s
Ys-Hatch-Abstand	140 µm	120 µm	110 µm

HAP 3 Wärmebehandlung

PBF-LB/M gefertigte Bauteile weisen eine charakteristische Mikrostruktur mit hohen Eigenspannungen auf, die durch die hohen Abkühlraten im Prozess entstehen. Zudem variiert die Mikrostruktur über die Bauteilhöhe durch die komplexen Zeit-Temperaturgradienten. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus wirken die oberen Lagen dabei wie eine in-situ Wärmebehandlung und begünstigten damit die Ausbildung eines inhomogenen Gefüges. Im Rahmen dieses Hauptarbeitspaketes wird in Zusammenarbeit mit **OE** eine angepasste Wärmebehandlungsroute entwickelt, um die Homogenisierung der Mikrostruktur, die Reduzierung von Eigenspannungen und die Einstellung der mechanischen Eigenschaften, um die in der AMS 5662/3-Norm definierten Anforderungen (Mindestzugfestigkeit von 1267 MPa und -bruchdehnung von 12 %) für die Luft- und Raumfahrtzertifizierung zu erreichen. Dieses Hauptarbeitspaket wird parallel durch HAP 5 für die Qualitätssicherung begleitet, da für die Evaluierung zerstörende und zerstörungsfreie Methoden der Bauteilprüfung erforderlich sind. Der Einfluss der Wärmebehandlung und die Bestimmung des Verzuges infolge der additiven Herstellung, der Wärmebehandlung bzw. durch das Abtrennen von der Substratplatte werden fortlaufend über ein sogenanntes GOM-System abgebildet, welches einer präzisen industriellen 3D-Messtechnik entspricht. GOM steht hierbei für Geometrical Optical Measurement. Diese Technik ermöglicht den direkten Vergleich der Geometrie zweier Scans und die relative Abweichung zueinander.

AP 3.2 Minimierung des Bauteilverzuges durch Wärmebehandlung

Durch die gezielte Anpassung der Wärmebehandlungsstrategien können Eigenspannungen, die während des Aufbaus entstehen, reduziert und die Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile verbessert werden. Insbesondere bei der Verarbeitung von metallischen Werkstoffen spielt die Wahl geeigneter Wärmebehandlungsparameter eine entscheidende Rolle. Dabei werden Aspekte wie die Temperaturführung, Abkühlraten und Haltezeiten individuell an das Material und die Geometrie des Bauteils angepasst. Die spezifischen Maßnahmen werden detailliert im Abschlussbericht von **OE** behandelt. Wie am Beispiel der letzten Test-Blisk in Abbildung 13 verdeutlicht, konnte mit der angepassten Wärmebehandlung der Bauteilverzug minimiert werden. Insbesondere in den vier Ecken des Substrates kann diese Veränderung beobachtet werden. Die durchschnittliche Abweichung vom CAD Modell nimmt dabei ca. um 0,1 mm ab. Aufgrund des integrierten Aufmaßes von 1 mm und der grundsätzlich geringeren Abweichung der Bauteilgeometrie von der Nominalbauteilgeometrie kann die Wärmebehandlung vor dem Hintergrund des Bauteilverzuges als erfolgreich definiert werden.

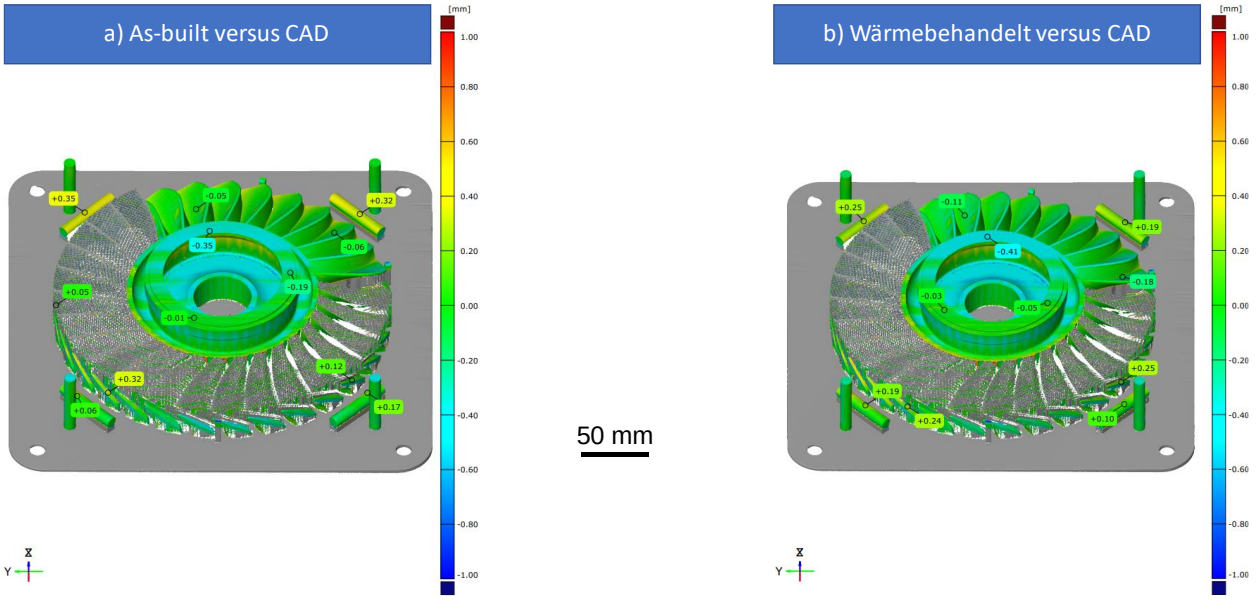


Abbildung 13: GOM-Daten für den Vergleich der Blisk T014 im as-built-Zustand vs. wärmebehandelt

AP 3.3 Entwicklung der Wärmebehandlung für additiv hergestellte Luftfahrtkomponenten

Um die nach AMS 5662/3 geforderten Eigenschaften zu erreichen, wurden verschiedene Wärmebehandlungsrouten untersucht. Verschiedene Faktoren mussten hierbei berücksichtigt werden. Der dem Wärmebehandlungsprozess vorgelagerte Schmiedeprozess in der konventionellen Prozesskette hat einen entscheidenden Einfluss auf die Mikrostruktur, wobei die spezifische Mikrostrukturausbildung durch Temperatur und Verformungsrate determiniert wird. Äquivalent kann dieser Schritt in der additiven Fertigung durch einen zusätzlichen Wärmebehandlungsschritt nachgebildet werden. Die untersuchten Wärmebehandlungsrouten unterscheiden sich in Bezug auf diesen Vorwärmebehandlungsschritt, bevor die eigentliche Wärmebehandlungsroute nach AMS5662/3 durchgeführt wurde. Der Vorbehandlungsschritt bei hohen Temperaturen (bis 1150 °C) ist notwendig, um die in der AMS5662/3 definierte Bruchdehnung durch Vergröberung des AM-Gefüges zu erreichen. Das Zusammenspiel zwischen der Vermeidung von spröden Laves-Phasen, der Einstellung der Korngröße und dem Ausscheidungsverhalten der kohärenten und geordneten γ'- und γ''-Phase bestimmt hierbei die Werkstoffeigenschaften. Die mechanische Untersuchung der Proben zur Ableitung der Wärmebehandlungsroute für additiv hergestellte Luftfahrtkomponenten gemäß AMS 5662/3 wird im nachfolgenden HAP 5 zur Qualitätssicherung diskutiert. Die finale Wärmebehandlungsroute für die ebenfalls in HAP 5 diskutierten AxF-Versuche besteht aus einem vorgelagerten Wärmebehandlungsschritt bei 1150 °C für 3 Stunden, bevor ein Lösungsglühen bei 1010 °C für 1 Stunde und eine zweistufige Auslagerung (718 °C für 8 Stunden, Abkühlen auf 621 °C mit einer Haltezeit von 10 Stunden) gemäß AMS 5662/3 erfolgt.

HAP 5 Qualitätssicherung

Im Rahmen von HAP 5 wurden in Zusammenarbeit mit **TPW** und **PW** verschiedene zerstörende und zerstörungsfreie Prüfkonzepte auf Basis der gängigen in der Luftfahrt zugelassenen Prüfkonzepte erstellt. Die Qualitätssicherung über Werkstoffprüfungen wurde durch eine digitale Prozessüberwachung ergänzt, um Bauteildefekte bereits bei der Herstellung zu identifizieren. Abgeschlossen wurde dieses Arbeitspaket mit AxF-Versuchen zur Ermittlung der Ermüdungseigenschaften der additiv gefertigten und wärmebehandelten Probekörper.

AP 5.1 Zerstörende Werkstoffprüfung

Die in HAP 2 hergestellten und in HAP 3 verschieden wärmebehandelten Probekörper wurden bei Raumtemperatur gemäß DIN EN ISO 6892-1 mittels Zugversuchen validiert. Aufgrund der Vielzahl an Proben und zeitlicher Engpässe sind am **DAP** ebenfalls Zugversuche durchgeführt worden. Die in Abbildung 14 aufgezeigten mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit der gewählten Wärmebehandlungsroute zeigt deutlich, wie durch einen vorgelagerten Wärmebehandlungsschritt bei erhöhten Temperaturen die Bruchdehnung zunimmt und die Zugfestigkeit abnimmt. Dies ist auf die Notwendigkeit zurückzuführen, das feine Gefüge der additiven Fertigung zu vergröbern, um die gewünschten mikrostrukturellen Eigenschaften zu erreichen. In Rot ist hier die Mindestanforderung gemäß AMS 5662/3 markiert.

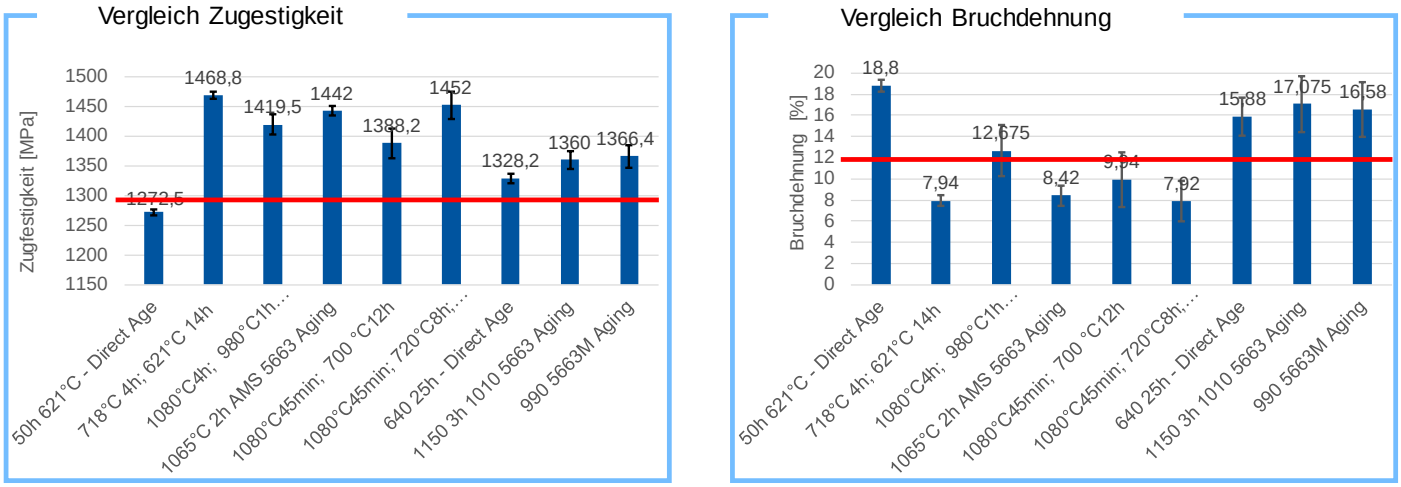


Abbildung 14: Mechanische Kennwerte für die Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit der gewählten Wärmebehandlungsroute

AP 5.2 Zerstörungsfreie Bauteilprüfung

Der Einfluss einen jeden Prozessschrittes auf die Abweichung der Bauteilgeometrie vom CAD-Nominalbauteil wurde über ein GOM-System am **DAP** abgebildet. Die Untersuchungen wurden nicht nur zur Validierung der Bauteilgeometrie sondern ebenfalls für die Ausrichtung der Blisk-Demonstratoren bei der subtraktiven Nachbearbeitung in HAP 4 genutzt. Zudem wurde die Prozessüberwachung an der additiven Fertigungsanlage verwendet, um die Defektausbildung in-situ zu detektieren. So können beispielsweise Risse, Überhitzungen oder Delaminationen im Vorfeld erkannt, der Prozess gestoppt und Material eingespart werden. Eine Delamination innerhalb eines Blisk-Demonstrators konnte auf diese Weise in-situ detektiert werden. Wie in Abbildung 15 dargestellt, weisen dabei 5 Blades auf der linken Seite ein erhöhtes Signal auf, welches auf eine Überhitzung hindeutet. Aufgrund der Position ist dementsprechend von einer Delamination auszugehen, wobei eine Wärmeableitung während dem Laserstrahlprozess nicht mehr gewährleistet werden kann in den darauffolgenden Schichten.

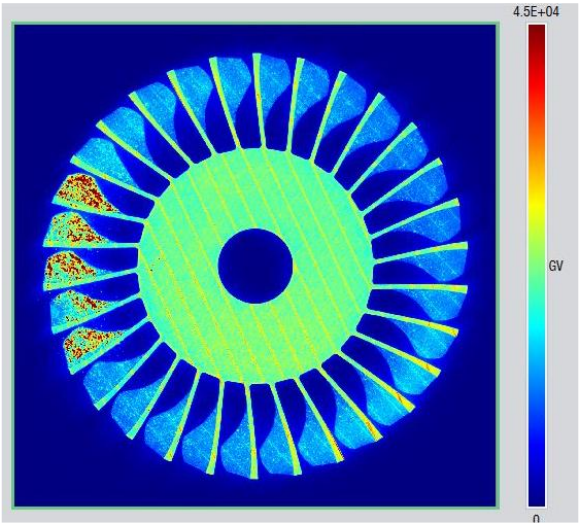


Abbildung 15: Prozessbeobachtung während der additiven Fertigung mittels Optischer Tomografie am Beispiel eines Blisk-Demonstrators

AP 5.3 Durchführungen von AxF Tests zur Qualifizierung der gefertigten Bauteile

Abschließend zum Projekt wurde der additive Fertigungsprozess sowie die daran angepasste Wärmebehandlungsroute anhand von 26 Testkörpern durch ein akkreditiertes Prüflabor: **BWF**, validiert. In dem Rahmen wurden Festigkeitsversuche unter rein wechselnder Axialbelastung (R=-1) bei Raumtemperatur durchgeführt

werden. Hierfür werden additiv gefertigte Schulterkopfproben aus dem Werkstoff IN718 hergestellt, prüffertig geschliffen und anschließend unter verschiedenen Bedingungen mechanisch geprüft (siehe Abbildung 16).

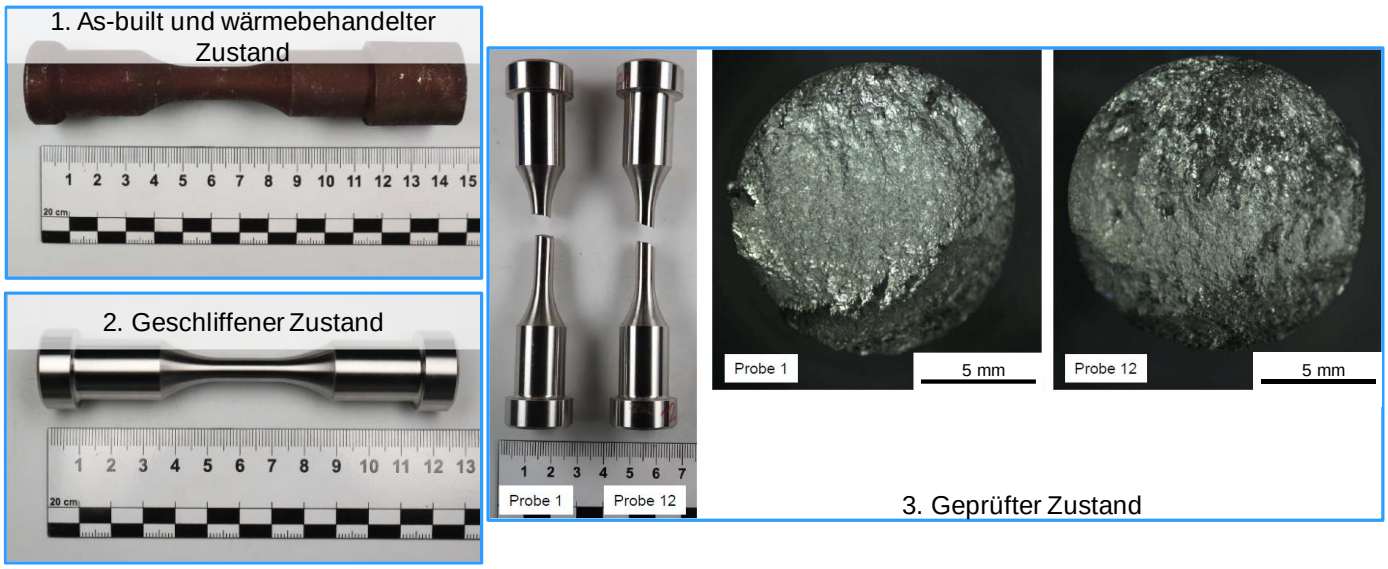


Abbildung 16: Darstellung der verschiedenen Arbeitszustände für die Festigkeitsuntersuchung unter wechselnder Axialbelastung

Jeweils drei Probekörper wurden bei einer Nennspannungsamplitude S_a von 700, 600, 500 und 400 MPa untersucht. Hierbei konnte kein Durchläufer, gleichbedeutend mit dem Standhalten von 10.000.000 Zyklen, identifiziert werden. Die Nennspannungsamplituden 330 sowie 270 MPa wurden jeweils an sieben Probekörpern untersucht. Der erste Durchläufer konnte bei einer S_a von 330 MPa beobachtet werden. Demgegenüber konnten 5 von 7 Probekörper bei einer S_a von 270 MPa als Durchläufer identifiziert werden. Auf Basis dieser Ergebnisse konnten, die in Abbildung 17 ermittelten Wöhlerkurven abgeleitet werden. Die jeweiligen Angaben in Prozent auf dem Wöhlerkurven geben die Wahrscheinlichkeit des Versagens innerhalb einer bestimmten Anzahl von Zyklen an. So würden im vorliegenden Fall 90 % der Probekörper bei einer Zyklenanzahl von 1,48 Millionen und Nennspannungsamplitude S_a von 354,5 Mpa, versagen

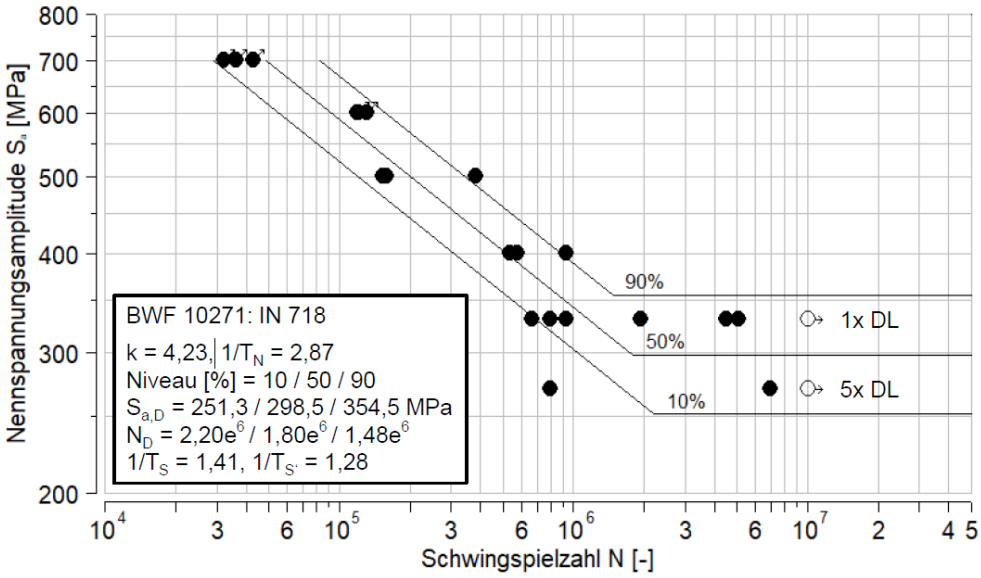


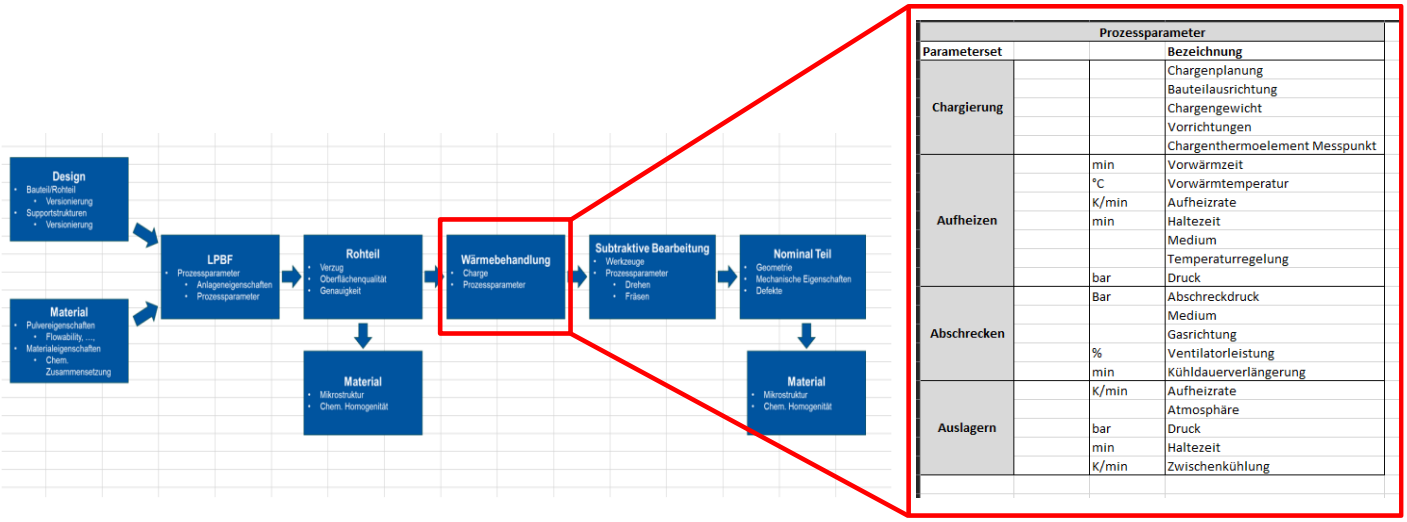
Abbildung 17: Darstellung der Ergebnisse der Festigkeitsversuche unter axialer Wechselbelastung in Form von Wöhlerkurven

HAP 6 Machbarkeitsstudie zur Luftfahrtzertifizierung

Die Luftfahrtzertifizierung als notwendige Bedingung für die Kommerzialisierung von additiv gefertigten und sicherheitskritischen Luftfahrtkomponenten wird in Zusammenarbeit mit dem **IPT** und mit **PW** durch eine Machbarkeitsstudie adressiert. Hierzu zählen die Identifikation und Dokumentation zertifizierungsrelevanter Informationen, die Identifikation von Herausforderungen und Ausarbeitung eines Zertifizierungskonzeptes. Ausgehend von der konventionellen Prozesskette wurden Maßnahmen abgeleitet, um die strengen Anforderungen an Bauteile der Sicherheitsklasse 1 zu erfüllen. Die prozessbedingte Komplexität der additiven Fertigung und die damit verbundenen Herausforderungen, wie Positionsabhängigkeit und Reproduzierbarkeit, erschweren die direkte Übertragbarkeit der bestehenden Normen.

AP 6.1 Dokumentation zertifizierungsrelevanter Informationen

Grundlegende Anforderungen wie Bauteilqualität (mechanische Eigenschaften und Maßhaltigkeit), Prozesswiederholbarkeit, Rückverfolgbarkeit und Qualifizierung gelten sowohl für den additiven als auch für den konventionellen Fertigungsprozess. Diese sind in den Spezifikationen von Normen sowie des OEM definiert. Im Sinne der Rückverfolgbarkeit wurde im Rahmen des Projektes ein Laufkartenprinzip entwickelt, in welchem alle zertifizierungsrelevanten Informationen prozessschrittspezifisch dokumentiert und den Beteiligten zugeordnet werden können. Zur Dokumentation der zertifizierungsrelevanten Informationen und Daten wird jedem Baujob eine Seriennummer zugeordnet. Dieser Seriennummer werden dann ebenfalls allen gefertigten Proben, sowie die erhobenen Daten zugeordnet. Um alle relevanten Daten zu sammeln, wird die entwickelte Prozessdokumentation genutzt (siehe Abbildung 18). In diesem Dokument werden alle Inputs, Einstellungen, Parameter, sowie Outputs und Messdaten gesammelt bzw. verlinkt. Zur Erleichterung der Handhabung der gefertigten und untersuchten Probekörper wurde zusätzlich eine Laufkarte erstellt. Diese stellt eine Art Begleitblatt, vor allem für den Versand von Proben, dar. Auf dieser Laufkarte sind sowohl allgemeine Infos zur Herstellung als auch die Prozessschritte dokumentiert, welche die Probe bereits durchlaufen hat und noch durchlaufen soll. Alle Daten müssen jederzeit rückverfolgbar und mit den entsprechenden Prozessschritten, Prozessparametern und verantwortlichen Personen verknüpft sein.



Prozessparameter			
Parameterset			Bezeichnung
Chargierung			Chargenplanung
			Bauteilausrichtung
			Chargengewicht
			Vorrichtungen
			Chargenthermoelement Messpunkt
Aufheizen		min	Vorwärmzeit
		°C	Vorwärmtemperatur
		K/min	Aufheizrate
		min	Haltezeit
			Medium
			Temperaturregelung
		bar	Druck
Abschrecken		Bar	Abschreckdruck
			Medium
			Gasrichtung
		%	Ventilatorleistung
		min	Kühldauerverlängerung
Auslagern		K/min	Aufheizrate
			Atmosphäre
		bar	Druck
		min	Haltezeit
		K/min	Zwischenkühlung

Abbildung 18: Beispielhafte Prozessdokumentation aller relevanten Daten für den Wärmebehandlungsschritt

AP 6.3 Ausarbeitung eines Zertifizierungskonzeptes

Der Produktionsprozess der additiven Fertigung unterscheidet sich erheblich von dem der konventionellen Fertigung. Aufgrund des unterschiedlichen Ausgangsmaterials (Pulver für die additive Fertigung und gegossener Knüppel für die konventionelle Fertigung) müssen zusätzliche neue Maßnahmen zur Überprüfung der Pulverqualität ergriffen werden.

Dazu gehören die Prüfung der Fließfähigkeit, Partikelgrößenverteilung, Feuchtigkeit, Morphologie, chemischen Zusammensetzung und der Schüttdichte. Aufgrund der großen Anzahl von Einflussfaktoren während des Herstellungsprozesses, der hohen Komplexität der additiven Fertigungssysteme (lokale Prozessbedingungen, optisches System) und des kleinen Produktionsmaßstabs stellt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Maschinensysteme sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf einem einzelnen System eine Herausforderung dar. Im Gegensatz zur konventionellen Prozesskette müssen alle einzelnen PBF-LB/M-Maschinen als Teil der additiven Prozesskette zertifiziert werden, sobald die gefertigten Bauteile den Anforderungen entsprechen. Die Zertifizierung anderer 5-Achs-Fräsmaschinen des gleichen Typs ist demgegenüber aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit einem geringeren Aufwand verbunden. Während in der konventionellen Fertigung ein Bauteil pro Fertigungslos als Verschnitt nach der Wärmebehandlung untersucht wird, ist die Definition der Losgröße aufgrund des kleinen Produktionsvolumens in der PBF-LB/M-Prozesskette wesentlich komplizierter. Die Losgröße für den AM-Prozess kann an das Wartungsintervall oder die Wärmebehandlung angepasst werden. Es wurden Prüfverfahren und Prüfkörper identifiziert, die notwendig sind, um die Anforderungen für die Zertifizierung in der Luft- und Raumfahrt zu erfüllen. Aus dem neu entwickelten Prüfplan wurde das Build Job Design abgeleitet, welches in Abbildung 2 dargestellt ist. Die in diesem Projekt entwickelte Methodik basiert auf bestehenden Normen und garantiert ein zertifizierbares Verfahren. Der vorgegebene Rahmen beinhaltet so weit wie möglich die gleichen Maßnahmen wie das konventionelle Verfahren. Die endgültige Freigabe der abgeleiteten Losgröße, der Prüfkörpergeometrien und der vom konventionellen Verfahren abweichenden Prüfverfahren muss durch einen OEM mit entsprechendem Pflichtenheft erfolgen. In diesem Zusammenhang wird ein verbesserter Regelungsrahmen für industrielle Anwendungen unerlässlich sein, z. B. Normen, die von offiziellen Instituten wie DIN, ISO, ASTM und EN entwickelt werden.

2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Vergleich des Vorhabenablaufs mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung zeigt, dass die Mittelverwendung eng an den geplanten Ablauf geknüpft war und alle wesentlichen Kostenpositionen effektiv adressiert wurden. Ein Großteil der Projektmittel entfiel auf die Entwicklung und Optimierung des PBF-LB/M-Prozesses sowie der Bauteilentwicklung. Zu den wichtigsten Positionen zählten die Beschaffung der pulverförmigen Rohstoffe und die Personalkosten. Weiterhin waren die Herstellung und Charakterisierung des großen Probenumfangs durch Verbrauchsmaterialkosten, Zugversuche, metallographische Analysen, zerstörende und zerstörungsfreie Untersuchungen ein zentraler Kostenfaktor. Diese Analysen wurden mit modernster Analytik und Prüftechnik durchgeführt und bildeten die Grundlage für die iterative Optimierung der Prozesse. Ein Hauptanteil der Arbeiten am **DAP** wurde durch wissenschaftliche Mitarbeiter durchgeführt, insbesondere die Entwicklung und Parametrierung des PBF-LB/M-Prozesses, die zerstörungsfreie Untersuchung der Bauteile sowie die wissenschaftlich technologische Auswertung der Ergebnisse. Die prozessbegleitenden Studien und die Durchführung von metallographischen Analysen und Anlagenaufbereitung wurden durch Hiwis (Hilfswissenschaftler) unterstützt. Diese Arbeitsteilung ermöglichte es, die hochspezialisierten Tätigkeiten effizient zu bearbeiten und gleichzeitig den zeitlichen Rahmen einzuhalten.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Projektarbeiten des Vorhabens "AMB2S" waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die gesteckten wissenschaftlich-technischen Ziele zu erreichen. Der innovative Ansatz, die Ressourceneffizienz und Umweltverträglichkeit von Triebwerkskomponenten durch die Integration der additiven Fertigung und eines adaptiven Spannsystems vor dem Hintergrund der Luft- und Raumfahrtzertifizierung zu verbessern, erforderte eine umfassende interdisziplinäre Forschung und Entwicklung. Das Projekt adressierte ein grundlegendes Problem der Industrie: den hohen Verschleiß und die begrenzte Lebensdauer von Fräswerkzeugen bei gleichzeitig ressourcenintensiver Herstellung mit einer geringen Materialausnutzung (Buy-to-Fly Verhältnis > 10). Die durchgeführten Arbeiten ermöglichten signifikante Fortschritte in der Erforschung und Optimierung hybrider zertifizierbarer Prozessketten, der Auswahl und Charakterisierung geeigneter Probekörper und Losgrößen sowie der Entwicklung angepasster Wärmebehandlungs- und Nachbearbeitungsprozesse. Die im Projekt etablierten Methoden und Prozesse sind übertragbar und eröffnen neue Anwendungsfelder für die Herstellung komplexer

Turbinenschaufelräder in anderen Industriebereichen. Die durchgeführten Arbeiten waren somit nicht nur gerechtfertigt, sondern essenziell, um den Erfolg und die Verwertbarkeit der Projektergebnisse sicherzustellen.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im AMB2S-Projekt erzielten Ergebnisse bieten erheblichen Nutzen und ein breites Verwertungspotenzial sowohl im industriellen als auch im wissenschaftlichen Kontext. Durch die Entwicklung einer Prozesskette vor dem Hintergrund der Luft- und Raumfahrtzertifizierung für die Herstellung von sicherheitskritischen Bauteilen mittels additiven Fertigungsverfahren in Kombination mit angepassten Wärmebehandlungs- und Nachbearbeitungsprozessen konnten neue, ressourceneffiziente Lösungen für die Herstellung von Turbinenschaufelrädern geschaffen werden. Durch Einsatz der additiven Fertigung kann die Designfreiheit bei der Auslegung der Komponente erhöht und die Ressourceneffizienz während der Fertigung gesteigert werden (Buy-to-Fly Verhältnis < 3). Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz der additiven Fertigung nicht nur die Entwicklung und Fertigung kleinerer, komplexerer Kerntriebwerke mit einer Schadstoff- und Lärmemissionsreduktion im Sinne von „Flightpath 2050“, sondern garantiert ebenfalls eine effizientere subtraktive Nachbearbeitung durch die Kombination von minimal zu zerspanendem Materialvolumen und des adaptiven Spannsystems (Schwingungsvermeidung). Die entwickelte ganzheitliche Prozesskette ermöglicht eine signifikante Steigerung der Standzeit von Werkzeugen bei gleichzeitiger Reduzierung von Materialverbrauch. Die Verlängerung der Werkzeuglebensdauer reduziert die Kosten für Ersatzteile und die damit verbundenen Ausfallzeiten in der Fertigung. Die Prozesskette erfüllt die höchsten Anforderungen an die Bauteilzertifizierung und ist daher direkt auf zahlreiche industrielle Anwendungsbereiche übertragbar, darunter die Energieerzeugung durch Gasturbinen, die Automobilindustrie (Turbosysteme) sowie die Luft- und Raumfahrt. Die hohe Flexibilität der additiven Fertigung und des adaptiven Spannsystems ermöglicht die Anpassung an spezifische Anforderungen verschiedenster Anwendungen. Zudem stellen die Ergebnisse eine wertvolle Wissensbasis für die Ausbildung im Bereich der additiven Fertigung und Materialwissenschaften dar. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden bereits teilweise in Vorlesungen und Schulungen integriert und bieten zukünftigen Ingenieuren und Forschern praxisnahe Einblicke in ressourceneffiziente Fertigungsmethoden. Gleichzeitig wird die wissenschaftliche Verwertung durch Publikationen, Fachvorträge und die Einbindung in zukünftige Forschungsprojekte sichergestellt, um die Reichweite und den Einfluss der Projektergebnisse zu maximieren. Ein Folgeprojekt mit dem bestehenden Konsortium wurde bereits 2024 beantragt, um die im AMB2S-Projekt geschaffene Basis weiter auszubauen. Dieser Antrag wurde jedoch mit geringer Priorität bewertet.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Durchführung des AMB2S-Projektes haben Lufthansa Technik und Premium AEROTEC nach eigenen Angaben das weltweit erste lasttragende Metallbauteil entwickelt, welches mittels additiver Fertigung und speziell dem PBF-LB/M-Prozess hergestellt wird. Das Bauteil ist für den Einsatz in Flugzeugen zugelassen und zeigt, dass strukturrelevante Metallkomponenten für den Einsatz außerhalb der Kabine auch additiv gefertigt und von der EASA für den Flugbetrieb zertifiziert werden können.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Konferenzbesuch der SPIE Photonics West mit Veröffentlichung von Ergebnissen in Form eines Conference Proceedings (2024):

Titel: Holistic view of additive manufacturing of blade integrated disks in the context of aerospace certification; DOI: 10.1117/12.3001268

Ausstellung eines Projekt-Demonstrators auf der Formnext in Frankfurt (2023)

Im November 2023 wurde im Rahmen der AM-Messe in Frankfurt ein Demonstrator des AMB2S-Projektes ausgestellt, um die Sichtbarkeit des Projektes zu erhöhen und die vielversprechenden Ergebnisse mit Fachleuten aus Industrie und

Forschung zu teilen. Die Teilnahme an der Messe ermöglichte es, das Projekt auf internationaler Ebene zu präsentieren und wertvolle Kontakte für die weitere Verwertung und Entwicklung der Ergebnisse zu knüpfen.

Mitarbeit an einem Review Article (2024):

Titel: Machinability study in orthogonal cutting of additively manufactured Inconel 718 with specifically induced porosity

DOI: 10.18154/RWTH-2024-01102

Review Paper (geplant für 2025):

Voraussichtlicher Titel: Driving efficiency in turbomachinery systems: Advances in additive manufacturing fort he production of Blade Integrated Disks

Das Paper ist finalisiert, lediglich die Identifikation des passenden Journals ist ausstehend.