

Schlussbericht Teil II: Eingehende Darstellung

zum Teilvorhaben	Additive Herstellung und subtraktive Nachbearbeitung einer BLISK vor dem Hintergrund der industriellen Anwendung
im Verbundprojekt	Additive M anufactured BLISK to Sky (AMB2S)
Zuwendungsempfänger	Präwest Präzisionswerkstätten Dr.-Ing. Heinz-Rudolf Jung GmbH & Co. KG
Förderkennzeichen	20T1925A
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2020 – 31.12.2023
Berichtszeitraum:	01.09.2020 – 31.12.2023
Verfasser	Hans-Christian MELZER, hans-christian.melzer@praewest.com

Der nachfolgende Schlussbericht beschreibt die Tätigkeiten von Präwest (PW, es werden die Verbundpartnerkürzel wie auf dem Projektplan dargestellt verwendet) im Rahmen des LUFO Verbundvorhabens AMB2S in den Arbeitspaketen mit wesentlicher Beteiligung oder unterstützender Funktion. Die Inhalte lassen sich wie folgt gliedern in:

- Titel des Arbeitspaketes
- Hintergrund
- Durchgeführte Arbeiten
- Ergebnisse des APs

Einleitung

Der Bericht umfasst die Forschungstätigkeiten von PW um eine effizientere Produktion von komplexen Bauteilen eines Triebwerkes zu erzielen. Das gewählte Bauteil ist eine BLISK, welches eine Komplexität in vielen Bereichen vereint und in seiner Gesamtheit eine besondere Herausforderung darstellt. Die Effizienz umfasst dabei die additive Herstellung eines Rohlings und die subtraktive Bearbeitung. Diese ist nur mit smarten Lösungen zu erreichen, welche sich über den gesamten Fertigungsbereich erstreckt und ineinandergreifend agieren müssen.

Die Arbeiten wurden von festangestellten qualifizierten Mitarbeitern durchgeführt und auf für die Produktion oder dafür eigens abgestellten Anlagen durchgeführt. Insofern externe Maßnahmen erforderlich waren, zum Beispiel im Rahmen der Qualitätssicherung, wurde unter anderem auf die Verbundpartner zurückgegriffen.

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket HAP 0 „Projektmanagement“

Hintergrund

Das Verbundprojekt AMB2S umfasst 8 Partner mit sehr dezidierten Fähigkeiten und Erfahrungen, die es um Erfolg zu haben koordinieren und im organisatorischen Rahmen auch zu steuern gilt.

Durchgeführte Arbeiten

Zu den Tätigkeiten eines Projektleiters im Rahmen des Projektmanagements gehört das Zeitmanagement des Projektes mit Vereinbarung von Regel Telkons, -meetings und ggf. außerordentlichen Meetings, wenn notwendig. Das regelmäßige Monitoring des Projektfortschrittes mit Update des Projektplanes und sofern notwendig Abstimmung und Anpassungen, die Dokumentation der Meetings, Bündelung der Ideen, Direktion von Aufgaben wo es notwendig erschien, Lenkung und Initiierung notwendiger Maßnahmen für den Projektfortschritt. So erfolgte der Austausch von Daten, Ideen, Dokumenten – auch zur Dokumentation auf der OwnCloud des DAP. Die besondere Herausforderung bestand für dieses Projekt, wie sicherlich auch für vielen andere in der Zeit der Covid19 Pandemie, der temporäre Ausfall von Mitarbeitern oder der temporäre Fertigungsstillstand. An dieser Stelle sei die besonders gute Zusammenarbeit und Abstimmung der Partner hervorgehoben, welche trotz der Widrigkeiten sich in dem Ergebnis sehr positiv widerspiegelt.

Ergebnisse des APs

Die in dem Projektplan definierten Meilensteine wurden inhaltlich erreicht und ein über das Projekt hinaus gehender Ansatz für eine Forschungsfortsetzung identifiziert.

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 1.1 „Auswahl eines BLISK Demonstrators“

Hintergrund

Um die Aufgabenstellung zu erfüllen, bedurfte es eines Bauteils und Designs welche zugleich ein Abbild der technischen Anforderungen der Industrie und Leistungsfähigkeit ist, aber auch von den Partnern gefertigt werden kann und die Übertragbarkeit auf den AM Anlagen ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten

In Abstimmungsrunden mit allen Partnern, wurden o.g. Punkte diskutiert und aus den verschiedenen Optionen bis zu Neudesign, hat man sich für ein Design des IPT entschieden.

Ergebnisse des APs

Das Design der Blisk ist repräsentativ für das Hochdruckverdichter Modul, welche u.a. auch wegen des Durchmessers und der Schaufelsehnenlänge eine der hinteren und hochbelasteten Stufen in puncto Last und Temperatur darstellt. Als Werkstoff wurde die hochwarmfesten Legierung Inco718 ausgewählt, welche zu der Standardlegierung in dem heutigen Design und Triebwerk

zählt. Die Schaufelstellung mit dem Twist, dem Abstand, Kantendesign und Dicke entspricht annähernd aktuellen Designvarianten der OEMs.

Im Detail besteht die Blik aus einem massiven Scheibenkörper, deren Anbindung an die nächste Stufe konstruktiv über einen Kranz mit Löchern und Schrauben erfolgt, der wiederum auskragend über einen sogenannten Wing Raum für die Strömungsanforderungen in dem Verdichter schafft. Gewichtsoptimierungen werden durch Scallops / Aussparungen erzielt. Die Abdichtung und Trennung der Luftströme erfolgt über Labyrinth Dichtungen (Fin) und sind in dem Design integriert. Die Schaufeln weisen vom Schaufelfuß (Ringraum) zur Schaufelspitze einen Twist (Verdrehung) von knapp 30° auf, mit nicht linearen Schaufelkanten, einer elliptischen Kantenform und abnehmender Schaufeldicke vom Schaufelfuß zur Spitze und Schaufelmitte zur Kante.

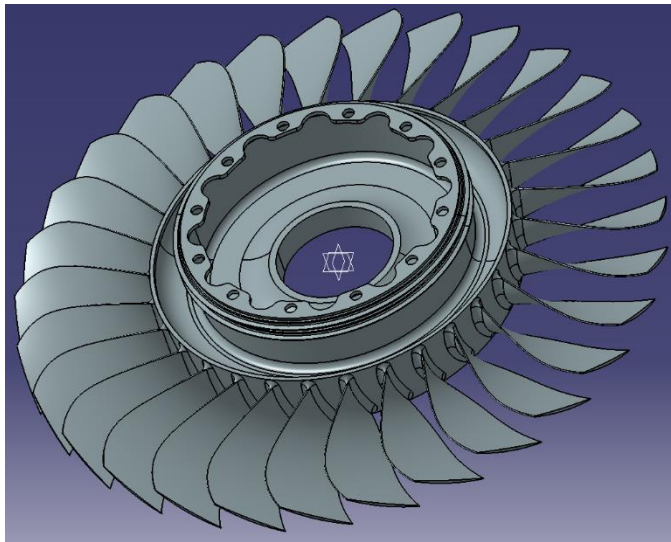


Abbildung 1: Blik Druckseite

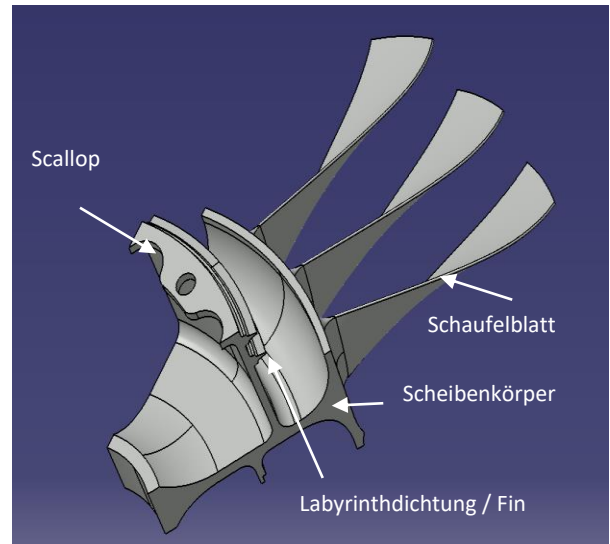


Abbildung 2: Blik Segment mit Erläuterung Detail

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 1.2 „Prozesskettenentwicklung und -bewertung“

Hintergrund

Auf Basis der langjährigen Erfahrung von PW und Partner, sowie der vorliegenden 3D Modelle, Zeichnungen, Spezifikationen und gültigen Vorschriften wird vor der additiven, wie auch spanenden Bearbeitung, ein sogenannter Arbeitsplan erstellt, welcher die einzelnen Schritte detailliert plant und die Herstellung oder Einhaltung der Anforderungen sicherstellt.

Durchgeführte Arbeiten

Ausgehend von einem Entwurf des IPT, wurden die Details im Verbund, aufbauend auf den Erfahrungen und Kenntnissen der Partner – auch aus Industrieprojekten übertragend - diskutiert und sofern notwendig angepasst.

Ergebnisse des APs

Die Prozesskette, stark vereinfacht, beinhaltet folgende Schritte:

- Additiver Aufbau der Blisk inklusiver der Stützstrukturen und Probenkörper
- GOM-Vermessung auf der Bodenplatte, noch vor der Wärmebehandlung
- Wärmebehandlung und Auslagern
- GOM-Vermessung vor dem Abtrennen der Blisk von der Bodenplatte
- Abtrennen der BLISK von der Bodenplatte
- GOM-Vermessung nach dem Abtrennen von der Bodenplatte mittels Sägen
- Aufspannen und Herstellung einer ersten planen Fläche zur Aufspannung für die Drehbearbeitung
- Drehbearbeitung 1. Seite Scheibenkörper (Schrupp- und Schlichtbearbeitung bis Fertigmaß) und Schaufelbereich bis zu einem definierten Aufmaß
- Drehbearbeitung 2 Seite Scheibenkörper (Schrupp- und Schlichtbearbeitung bis Fertigmaß) und Schaufelbereich bis zu einem definierten Aufmaß
- Fräsbearbeitung (Schrupp- und Schlichtbearbeitung bis Fertigmaß) der Schaufeln
- GOM-Vermessung des Fertigteils
- CMM / KMG Vermessung zur Korrelation und nicht zugänglicher Stelle für die optische Vermessungstechnik
- Messung Oberflächengüte der Schaufeln, Schaufeldicke sowie Oberflächengüte des Scheibenkörpers



Abbildung 4: Blisk Fräsoperation



Abbildung 3: Blade teilbearbeitet

Für die Frässtrategie hat sich PW im Verbund für die sogenannte top-entry Strategie eingesetzt und letztendlich wurde diese auch von dem IPT adaptiert. Die top-entry Strategie, sieht eine Bearbeitung oder Herausarbeiten der Schaufelgeometrie aus dem Rohling von der Schaufelspitze ausgehend, unter Anwendung eines positiven Tannenbaumprofils vor. Auf diese Weise ist die Schaufel im Prozess gegen Verdrängung gestützt und Vibrationen, aus der Rotation des Werkzeuges mit bis zu 4 Schneidkanten und sequentiellem Eingriff resultierend, gedämpft. Die Prozessabfolge und Bearbeitungsstrategie, hat sich als zielführend herausgestellt, wenn auch die Vorrichtung im letzten Ansatz komplett modifiziert wurde. Auf die Bearbeitungsprozesskette hatte es keinen Einfluss.

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 1.3 „Konstruktive Bauteilauslegung für die Prozesskette“

Hintergrund

Für den additiven Prozess sind konstruktive Maßnahmen durchzuführen. Zum einen Definition von einem Aufmaß zu der Fertigteilkontur. Dieses Aufmaß kompensiert eventuelle Verzüge durch die Wärme und strukturelle Fehler. Um ein übermäßiges Absenken der Schaufeln, gravitationsbedingt, werden Stützstrukturen zwischen die Schaufeln eingeplant, welche, wie auch unterhalb des Scheibensegments das Bauteil an der Bauplatte verankern und Wärme ableiten. Für den subtraktiven Prozess der Schaufeln erfüllen die Stützstrukturen eine stützende und dämpfende Funktion.

Durchgeführte Arbeiten

Um das 3D Modell des Fertigteils wurden eine Hülle gelegt, die von den Software Applikationen NX und Inventor unter anderem minimal Anbindung des Scheibenkörpers und der Schaufelkanten modelliert. Darüber hinaus, im ersten Schritt für die Schaufelzwischenräume, verschiedene Varianten der Stützstrukturen.

Ergebnisse des APs

Das protektive Aufmaß wurde in iterativen Schritten mit 1mm festgelegt, manche Bereiche, die keinen Nachteil oder Mehraufwand in der Bearbeitung erzeugen, auch mit mehr Aufmaß. So wurde die Schaufellänge über das Richtmaß 1mm verlängert, um in dem subtraktiven Prozess einen „sauberen“ Prozess fahren zu können. Für die schaufelverbindende Elemente wurde initial poröses Material in 3 Dichten gedruckt und 4 verschiedene Stützstrukturen Designs ausgewählt und implementiert. Im Zuge der subtraktiven Bearbeitung und dem damit verbundenen Learner, wurden die schaufelverbindenden Elemente mehr und mehr zurückgebaut bzw. modifiziert. Auf die Auswirkungen wird in AP 4.5 näher eingegangen.

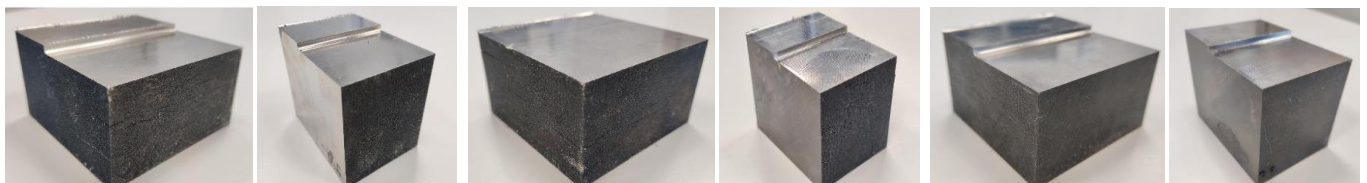


Abbildung 6: Probenkörper mit 85,88% Dichte Abbildung 5: Probenkörper mit 95,66% Dichte Abbildung 7: Probenkörper mit 99,94% Dichte



Abbildung 8: verschiedene erprobte Varianten der Stützstrukturen

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 2.3 „Additive Herstellung des BLISK Demonstrators“

Hintergrund

Die konventionelle Fertigungsmethode, auf einem geschmiedeten Rohling basierend, setzt auf der Ultraschallkontur auf. Das buy-to-fly ratio wird in der Literatur mit Werten von 10 und größer angegeben und steht für den Materialanteil der als Späne oder Stückschrott in dem Prozess verloren geht, d.h. ohne Mehrwert.

Eine additive Herstellung des Rohlings erlaubt einen sehr konturnahen Rohling, das ein sehr hohes Einsparungspotenzial an Material, Werkzeugen, Zeit auf der Maschine und letztendlich effektiv Energie bedeutet, die in CO₂ Einsparung ausgewiesen werden kann. Der additive Ansatz kann ein buy-to-fly ratio von <3 erzielen und ist damit deutlich im Vorteil.

Durchgeführte Arbeiten

Das im Verbund gekaufte zertifizierte Material wurde verwendet um auf der AM Anlage von PW, mit den definierten und an die Anlage, hier Schichtstärke 40µm, angepassten Parameter die modellierten Rohlinge der Blisk zu fertigen.

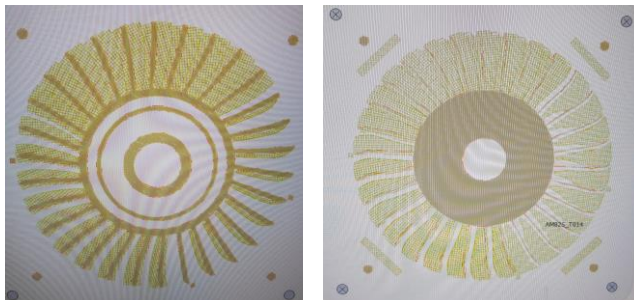


Abbildung 9: AM Druck im Pulverbett

Als Bodenplatte wurde initial das Material C45, ein unvergüteter Werkzeugstahl in der Stärke von 22mm verwendet. Der Aufbau der Blisk erfolgte ohne nennenswerte Prozessanomalitäten oder -unterbrechungen, die strukturelle oder dimensionale Fehler an dem Bauteil hinterließen. Dies konnte an in Summe 9 Blisken, welche sich in den Stützstrukturen unterscheiden, demonstriert werden.

Ergebnisse des APs

Es wurden Blisk Rohlinge gedruckt, welche nach der Wärmebehandlung und Trennung von der Bodenplatte, dank des Aufmaßes und geringen Verzuges, das Fertigteil vollständig umschlossen und ausreichend Materialaufmaß vorhielten um die subtraktive Bearbeitung mit den nominalen Dreh- und Fräsprogrammen zu ermöglichen.

Die unterschiedlichen Stützstrukturen zwischen den Schaufelblättern, haben in Abhängigkeit der Güte der Anbindung an Bodenplatte oder Nachbarschaufelblatt, da wo eine Anbindung angestrebt war, gehalten oder sich geringfügig gelöst. Einen Einfluss auf die dimensionale Allokation der Schaufelblätter hatte dies allerdings nicht, da sie konzeptionell für die subtraktive Bearbeitung gefertigt wurden.

Die Proben, Zylinder oder Würfel, und in-situ genommenen Proben, haben nach dem Wärmebehandlungszyklus kohärente Dichte und mechanische Kennwerte gezeigt, welche mit der Materialspezifikation übereinstimmen.

Die CT-Untersuchung ergab in machen Bereichen Fehler, welche unterhalb der Detektionsgenauigkeit der Ultraschallprüfung und somit außerhalb der Spezifikation waren. Diese Fehler sind auf Prozessfehler in dem AM Prozess zurückzuführen und würden sich voraussichtlich durch Anpassung der Parameter beheben lassen. Da es sich nicht um wiederholbare Fehler handelte, ist von einem grundsätzlichen Prozess- oder Materialfehler nicht auszugehen. Ob eine bessere Prozessüberwachung und prozessbegleitende Fehlerdetektion oder Fehlerindikation hier langfristig eine praxistaugliche Lösung darstellt, war nicht Gegenstand dieses Projektes, aber ein Ansatz für ein weiteres Forschungsprojekt.

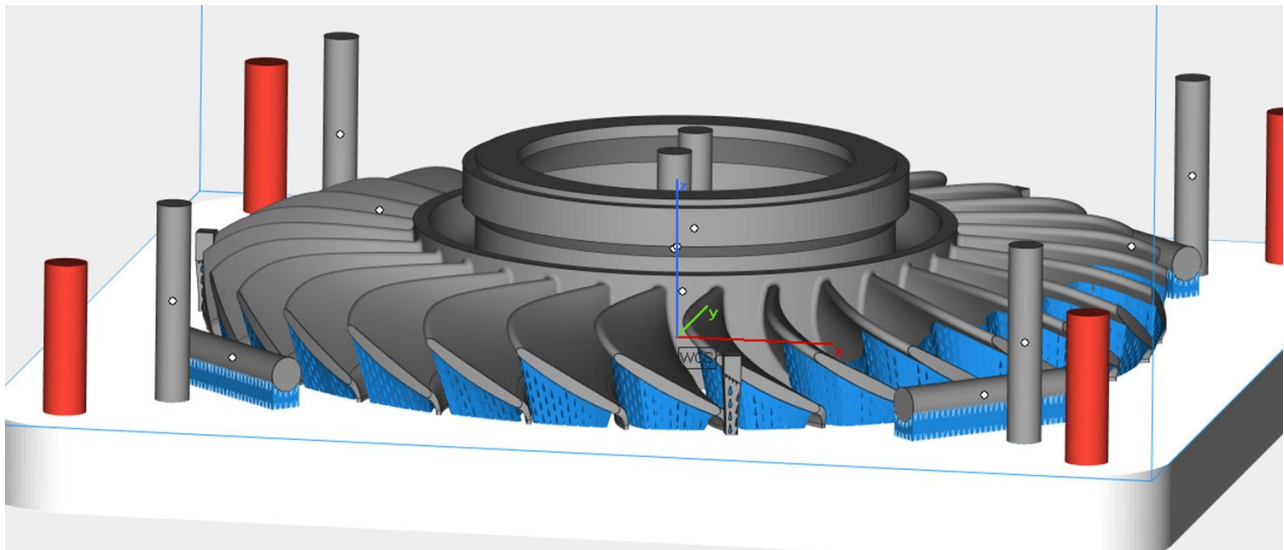


Abbildung 10: additiver Aufbau der Blisk inkl. der Zugprobenkörper, alternativ zu Dichtwürfel

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 2.4 „Prozessübertragbarkeit auf weitere L-PBF Anlagen“

Hintergrund

Komplexe Anlagen, welche multiple mechanische, elektrische Elemente in sich vereinen und Belastungen wie Kinematik, Wärme und allgemeinem Verschleiß ausgesetzt sind, kann man als individuelle Objekte mit eigener Charakteristik im Kleinen bezeichnen. So kann das Ergebnis für das gleiche Bauteil, mit gleichen Parametern und Werkzeugen, doch unterschiedlich ausfallen.

Durchgeführte Arbeiten

Um eine der vielen Variablen in einem additiven Prozess, die als Charakteristika der Anlagen gesehen werden können, zu eliminieren, haben sich die Verbundpartner abgestimmt und für die Luftfahrt zugelassenes Inco718 Pulvermaterial von Oerlikon metco aus der gleichen Charge gekauft. Eine in Abstimmung mit einer Luftfahrtzulassung genommene Stichprobe wurde durch die

Verbundpartner DAP und TPW untersucht und im Rahmen der Materialcharakterisierung auf Korngrößenstreuung, Form und Fließfähigkeit, mit positivem Ergebnis, geprüft.

PW besitzt eine Anlage von SLM-Solutions, mit der Bezeichnung SLM 280 (280 steht für das verfügbare Bauraum von 280mm, der quadratisch ausgelegt ist). Das DAP besitzt eine Anlage von EOS mit der Bezeichnung M290. Beide nutzen als Technologie das Selektive Laserschmelzverfahren (LPBF).

Der wesentliche Unterschied in den Anlagen liegt in der Verarbeitung in Schichtstärken. Kann PW Schichtstärken von 30µm bis 50µm abbilden, ist die Anlage vom DAP für 40µm ausgelegt bzw. der Parametersatz für Inco718 bekannt und freigegeben. Um die Maschinenübertragbarkeit zu gewährleisten, wurden gemeinsam bzw. in Absprache mit dem DAP zwei wesentliche Schritte unternommen.

Ergebnisse des APs

In Kooperation mit dem DAP wurde die PW SLM Anlage einer Charakterisierung unterzogen, welche eine Vermessung der Laserleistung, der -qualität und -stabilität umfasst. Das geringfügige Delta in der gemessenen Laserleistung im Vergleich zum Soll in der Größenordnung von 25W-30W wurde in der Ermittlung und Anpassung der Parameter im nächsten Schritt berücksichtigt. Im zweiten Schritt hat PW einen Parametersatz für 40µm und Inco718 entwickelt, diesen in multiplen Bau Jobs repliziert und in Untersuchungen auf Materialdichte, Geometrie, Schichtenausprägung, Randzoneneffekten und Prozesswiederholgenauigkeit eingehend untersucht. Darauf aufbauend wurden dann gemeinschaftlich mit dem DAP der Parametersatz für den Bau Job für die BLISK ermittelt.

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 4.5 „Subtraktive Bearbeitung des BLISK Demonstrators“

Hintergrund

PW hat in seiner fast 80-jährigen Geschichte eine von den OEMs anerkannte Expertise in der Bearbeitung und Herstellung der Strömungsgeometrien und Oberflächen aufgebaut. Diese umfasst neben der sehr spezifischen Programmierung der Fräsbahnen, auch die Auslegung und Fertigung von Spezialwerkzeugen, um in den kritischen und schwer zugänglichen Bereichen, die geforderten Maße und Oberflächengüte herzustellen.

Die Geometrie und die Oberfläche sind die maßgeblichen Ursachen für die Effizienz und Leistungsfähigkeit des Verdichters und letztendlich des Triebwerkes. Gehen 20% des Luftmassstroms durch den Verdichter, so treiben diese als Lufttreibstoffgemisch die restlichen 80% des Luftmassstrom im Bypass des Fans und somit des Flugzeuges an.

Durchgeführte Arbeiten

Ausgehend von dem mit Hilfe der Software von BCT ausgerichteten Rohlings wurde die Drehbearbeitung in den 2 Aufspannungen durchgeführt, inklusive der Fertigstellung der Bohrungen und Scallops bevor die Fräsbearbeitung der Schaufel Geometrien begonnen wurde. Die Fräsbearbeitung der Schaufeln, sowie des Ringraumes wurde in der top-entry Methode vorgenommen, um

den maximalen Nutzen von der stützenden und dämpfenden Funktion der Stützstrukturen zu heben. Zum Ende des Projektes wurde ein radikaler Ansatz erforscht, welcher den Materialeinsatz, sowie den Verschleiß der Werkzeuge minimieren soll.

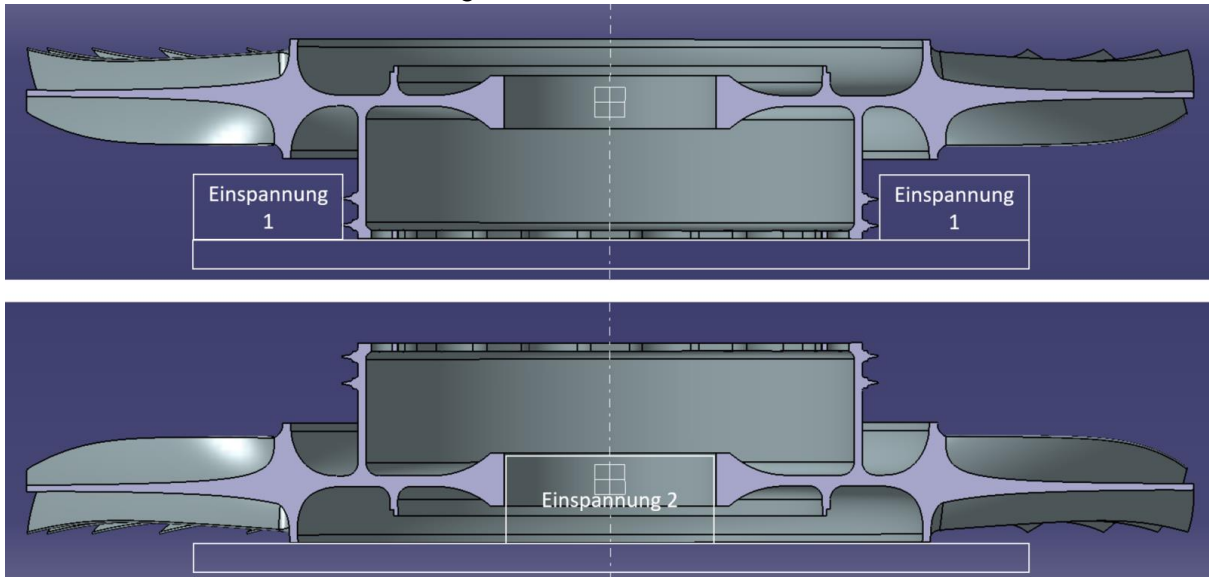


Abbildung 11: initiales konventionelles Spannsystem für Dreh- und Fräsoption

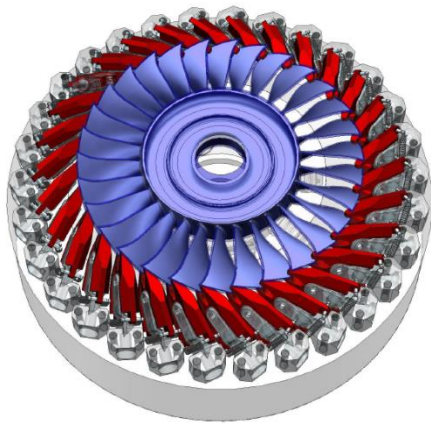


Abbildung 12: initiale alternative Vorrichtung mit passiven Schaufelpitzeneinspannelementen

Nach anfänglicher Meinung und Erfahrungsschatz, bedarf die top-entry Bearbeitungsmethodik der Schaufeln Stützstrukturen. Um das buy-to-fly ratio weiter zu senken und auch den Bearbeitungsumfang, sowie Dauer, wurde von IC ein alternatives Konzept in Diskussion mit den Verbundpartner angedacht. Dieses Konzept sah ein passives Spannsystem an den Schaufelspitzen vor, welches die Schaufeln stabilisieren und dämpfen sollte. Diese Alternative wurde nicht in dieser Form umgesetzt, war aber Ausgangsbasis für neue Ansätze.

Die Abtrennung der additiv gedruckten Blistk von der Grundplatte, erfolgt entweder per Drahterodieren oder mittels Sägen. Beide Methoden sind etabliert und als prozessstabil zu betrachten. Diese Prozesse sind nicht Bestandteil der Forschungsumfangs. Während oder nach dem Abtrennen, können sich thermisch/mechanische induzierte Eigenspannungen lösen und zu einem Verzug des Bauteiles führen.

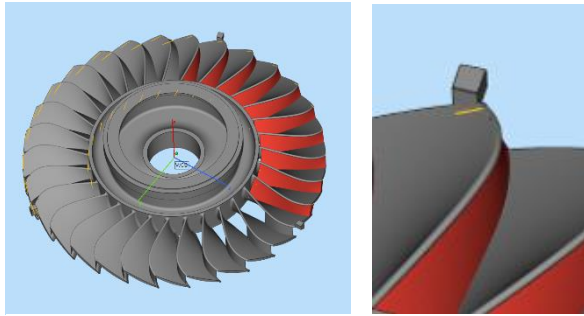


Abbildung 13: Referenzierungswürfel

Diese Verzüge wurden mit Hilfe der Software von BCT kompensiert durch eine Ausrichtung, dergestalt, dass das Fertigteil von der Hülle, aus dem Aufmaß bestehend, umfasst wird.

Dazu wurde die Einmessung an den Referenzierungswürfel, die an den Schaufelspitzen angebracht wurden durchgeführt und das Bauteil, BCT-Software unterstützt, positioniert.

Die Drehbearbeitung wurde nach best-practice Ansätzen und Werkzeugen umgesetzt. Dazu wurden in den 2 Aufspannungen, in Summe 19 Arbeitsschritte (OPs) mit 8 verschiedenen Schneidplatten durchgeführt. Die Wahl der Schneidplatten richtete sich nach der herzustellenden Geometrie.

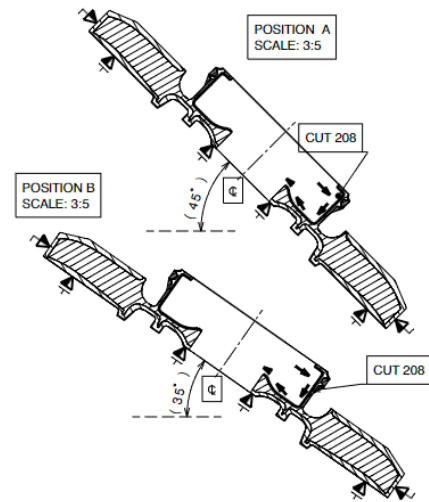
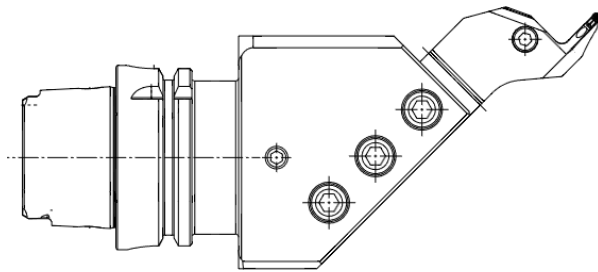


Abbildung 14: Arbeitsblatt Drehbearbeitung OP208

Vor Beginn der eigentlichen Fräsbearbeitung wurden zwei grundsätzliche Ansätze für die Stütz- und Dämpfungsstrukturen verfolgt. Der eine Ansatz war massiver Materialaufbau zwischen den Schaufeln, mit unterschiedlicher Porosität (85,88%; 95,66%; 99,94%). Es wurden umfangreiche Fräsversuche an den Probenkörpern durchgeführt. Dabei wurden die Fräsbahnen parallel und senkrecht zur Aufbaurichtung gefahren.

Die Bearbeitung der laminaren oder wabenartigen Stützstrukturen, mit partieller Anbindung zwischen den Einzelschaufeln oder nur eine Einzelschaufel umhüllend, wurde anhand vom Werkzeugverschleiß beurteilt.

Die dabei eingesetzten Fräser unterscheiden sich nach Einsatzzweck und Eingreiftiefe. In Summe wurden für die Schrupparbeiten 2 Schafffräser eingesetzt und für die Schlichtarbeiten 3 Kugelfräser. Die Anzahl der Schneiden sind 4, mit Ausnahme des kleinsten Schlichtfräasers, der hat 2 Schneiden.

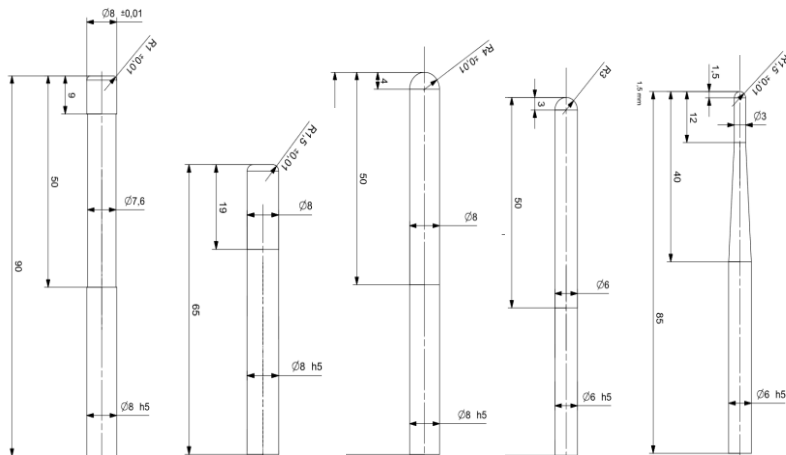


Abbildung 15: Fräswerkzeuge

Ergebnisse des APs

Die Ergebnisse der Drehbearbeitung haben einen erhöhten Verschleiß aufgezeigt. Bedingt durch die Materialdichte und einen in manchen Bereichen unterbrochenen Schnitt, wenn Stützstrukturen und Anbindungen in dem Abtrennverfahren der Bodenplatte nicht planparallel erfolgt. Dies deckt sich mit Erfahrungswerten.

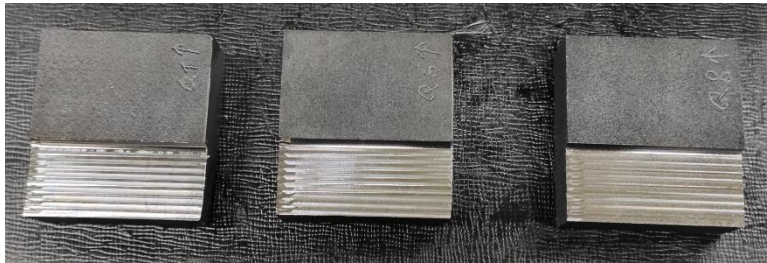


Abbildung 16: Probenkörper; Q1-99,94%, Q2-95,66%, Q3-85,88%

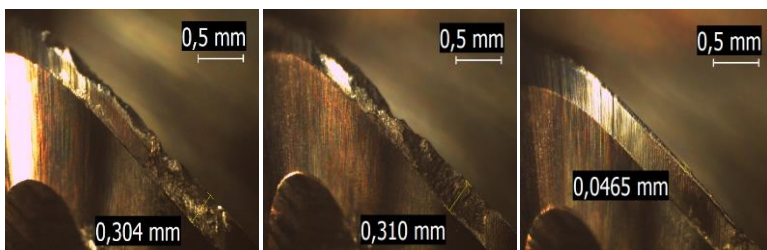


Abbildung 17: Werkzeugverschleiß an Dichteprobenkörper

Die Fräsbearbeitung der massiven Probenkörper hat in Abhängigkeit der Dichte unterschiedliche Ergebnisse geliefert. Den geringsten Werkzeugverschleiß und Abdrängung, weist dabei der Probenkörper Q3 mit der geringsten Dichte auf. Der Verschleiß der Werkzeuge der Proben Q1 und Q6 sind durch partiellen Reibverschleiß, Aufbauschneiden, deutlichen Kantenausbrüchen und partieller Kantenverformung, als Folge der Abdrängung, zu erklären.

Die Fräsbearbeitung der laminaren / wabenartigen Stützstrukturen in unterschiedlicher Ausprägung wurde an Blisken, in Segmenten angebracht, durchgeführt. Dazu wurden in 10er Segmente die unterschiedlichen Stützstrukturen eingebracht. In diesem Bearbeitungsaufsatz wurde auch die Oberflächengüte und Schaufeldicke bewertet.

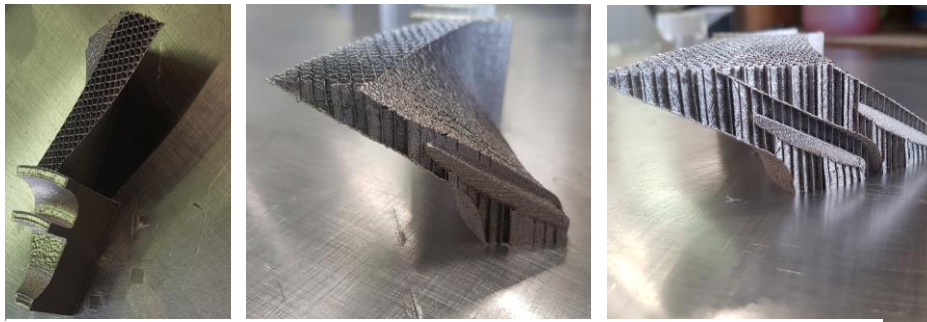


Abbildung 18; Typ 1, Typ 2, Typ 3 Stützstrukturen

Den Einfluss der Strukturen, deren Wirkung als unterbrochener Schnitt, die Länge und Tiefe des Eingriffes, kann an dem Verschleiß und damit an der Menge der bearbeiteten Schaufeln, bis die Verschleißgrenze erreicht ist, ermittelt werden. Der Einfluss ist nur in den Schrupp- und Vorschlichtprozessschritten zu erkennen, da der Schlichtprozess dem eines in Vollmaterial gleichgestellt ist. Auf den zu Grunde liegenden Daten ist keine eindeutige Aussage möglich.



Abbildung 19: Auswertung Werkzeugverschleiß

Die vertikalen Angaben stehen für die Arbeitsfolge (OP), horizontal werden die Anzahl der Schaufeln dargestellt und farblich sind die Werkzeuge, die eingesetzt wurden, abgebildet.



Abbildung 20: Blisk teilbearbeitet

Ein weiteres Merkmal und Ausprägung der Stützfunktion, ist die Oberflächengüte. Neben dem Werkzeugverschleiß sind Vibrationen, aus dem Prozess oder nicht gleichmäßigen Werkzeugeingriff resultierend, die maßgebliche Ursache. Die in Abbildung 22 dargestellten Werte stehen in grau für die Druckseite und in orange für die Saugseite der Schaufeln. Aus der Graphik lassen sich höhere Vibrationen (schlechtere R_a -Werte) für die Typen 1 & 2 ableiten.

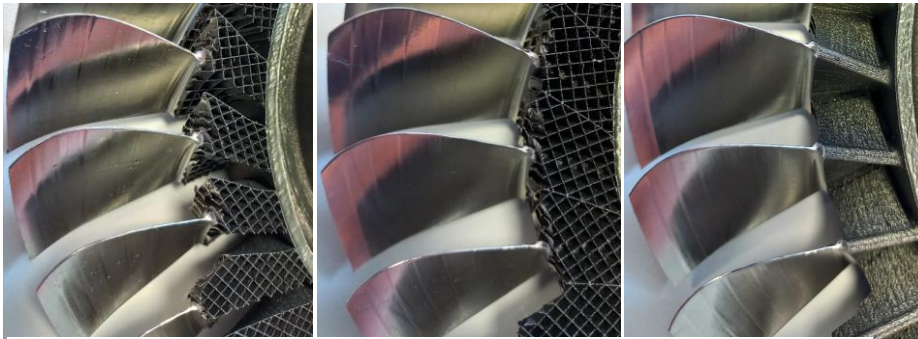


Abbildung 21: Oberflächengüte, Typ 1, Typ 2, Typ 3

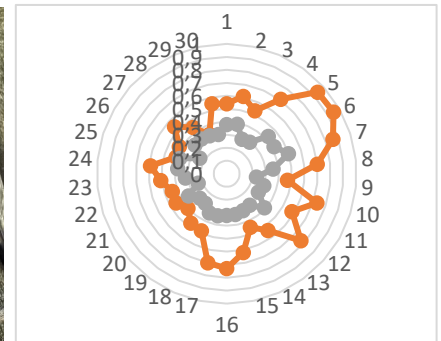


Abbildung 22: Ra Wert, Typ 1 Schaufel 1 bis 10, usw.

In dem letzten Ansatz wurde eine in 2 Schritten entwickelte Vorrichtung von IC auf Prozessstauglichkeit untersucht. Die ursprüngliche passive Vorrichtung wurde verworfen und im ersten Schritt eine aktive rudimentäre Vorrichtung am IPT an Segmenten untersucht. Das Ergebnis war vielversprechend und funktional. Die daraus weiter gedachte Vorrichtung hat 2 aktive Elemente je Schaufel und konnte aktiv über eine manuelle pneumatische Steuerung im Prozess angesteuert werden.



Abbildung 23: aktives Vorrichtungskonzept

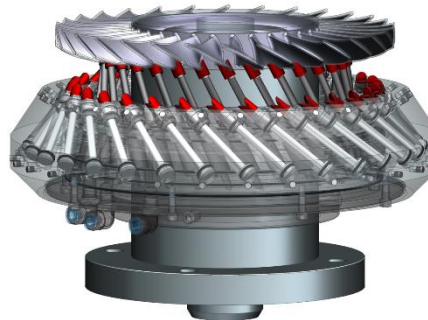
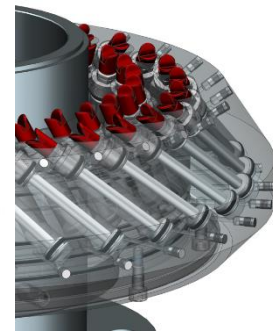


Abbildung 24: aktive Vorrichtung



Der Versuch wurde in voller Skalierung bei PW erfolgreich durchgeführt. Die grundsätzliche Funktionalität der Vorrichtung konnte nachgewiesen werden und die Ergebnisse anhand der Rauheitswerte geben eine solide Indikation ob das Konzept weiter auszubauen, optimieren und eine komplette Integration in die NC-Steuerung des Bearbeitungszentrums zu verfolgen ist. Die vorliegenden Daten geben in dem Gesamterscheinungsbild, der Streuung und im Vergleich der Min und Max Werte keine Verschlechterung gegenüber den Stützstrukturen zwischen den Schaufeln. Die Bearbeitungszeit, der Werkzeugeinsatz und -verschleiß sind allerdings geringer.

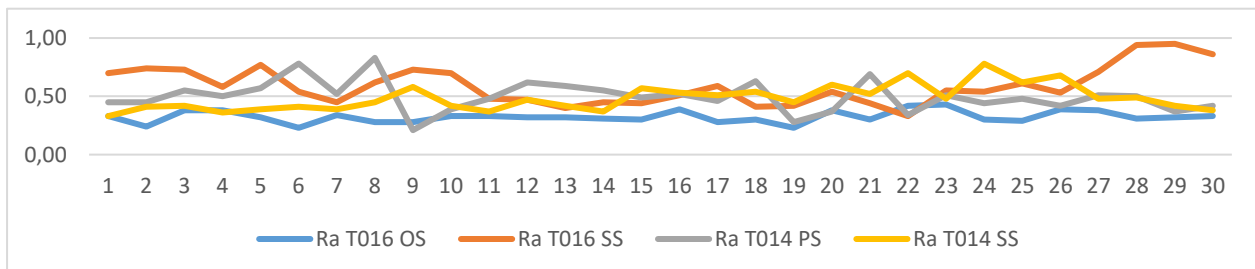


Abbildung 25: Ra Werte, T014 & Stützstrukturen, T016 mit aktiver Vorrichtung

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 5.2 „Zerstörungsfreie Bauteilprüfung“

Hintergrund

Die Prüfung von Klasse 1, sicherheitskritischen Bauteilen erfolgt bis dato zerstörungsfrei und periodisch auch zerstörend. Davon ausgenommen sind prozessbegleitende Probekörper, die stellvertretend für das Bauteil zerstörend geprüft werden. Die Prüfungen erfolgen an mehreren Prozessschritten innerhalb der Kette. Zu den zerstörungsfreien Prüfungen und innerhalb von den Prozessfähigkeiten von PW, liegt die maßliche Prüfung der Bauteilcharakteristika mittels Koordinatenmessmaschine (CMM) oder optischer Messverfahren (GOM), die Oberflächengüte und Schaufeldicke. Sie dient der Überprüfung der Maße und der Rauheit, sowie zur Dokumentation derselbigen.

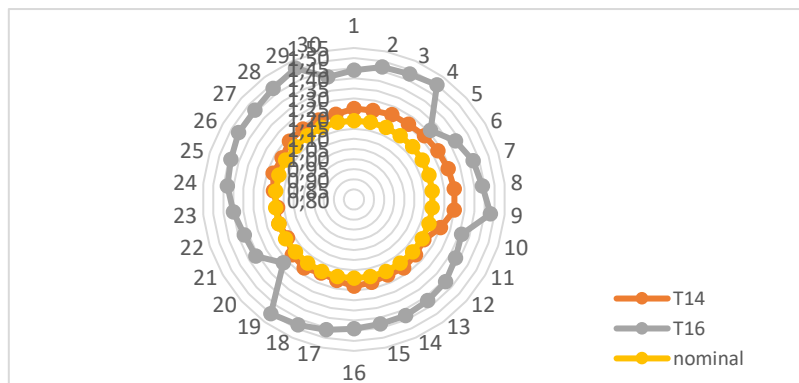
Durchgeführte Arbeiten

Die getätigten zerstörungsfreien Prüfungen durch PW beschränken sich auf die Oberflächengüte, Blattdicke und den Verschleiß der Werkzeuge. Der Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten wurde auf Erfahrungen in der subtraktiven Fertigung von unterschiedlichen Stützstrukturen oder unter Einsatz der aktiven Vorrichtung gelegt. Eine Messung und finale Überprüfung nach geltenden Kundenanforderungen, mittels CMM / KMG wurde nicht durchgeführt.

Die Oberflächengüte wurde an den Schaufeln (siehe Abb.25) nach gängigem Verfahren und standardisierten Messmittel geprüft. Das gleiche gilt für die Blattdicke. Da aufgrund der geringen Anzahl von Proben, hier bearbeitete Schaufeln pro Variation der Stützstrukturen, zur Verfügung stand, sind die gemessenen Wert als Indikatoren zu sehen.

Ergebnisse des APs

Die Ergebnisse der Messung der Rauheit (Oberflächengüte) zeigen Erwartungsgemäß eine starke Abhängigkeit von dem Verschleiß der Werkzeuge und der Stabilität der Schaufel in dem Schlichtvorgang. Ergebnisse sind in Abb25 abgebildet.



Die Schaufeldicke an zwei Blischen gemessen, gegen den Nominalwert, zeigt ein besseres Ergebnis für Schaufeln mit Stützstrukturen (T014).

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 5.3 „Durchführung von AxF Tests zur Qualifizierung der gefertigten Bauteile“

Hintergrund

Im Rahmen der Zulassung eines Bauteils wird es umfangreich geprüft, bevor es in einem Subsystem wie einem Modul und schlussendlich in einer Gasturbine oder Strahltriebwerk eingesetzt wird. Einer dieser zerstörenden Tests ist der sogenannte A x F Test für die Schaufel. Damit wird, ausgehend von dem Design das Material und letztendlich auch die Fertigungsmethode geprüft, ob diese in Summe den Belastungen, welcher die Schaufel ausgesetzt, aushalten. Dieser Test wird entweder bis zu einem definierten Test-/Sollwert durchgeführt, oder aber bis zum Bruch der Schaufel. Dabei wird die Schaufel in Schwingung versetzt und ein Rissbruch bei einer definierten Amplitude und Frequenz herbeigeführt.

Durchgeführte Arbeiten

Für die Probenherstellung wurden geeignete Probenkörper hergestellt und bei einem Unterauftragnehmer zur Durchführung des Tests in Auftrag gegeben.

Ergebnisse des APs

Die Tests dauern zum Zeitpunkt der Abgabe des Berichtes immer noch an.

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 6.2 „Identifikation von Herausforderungen bestehender Zertifizierungsverfahren“

Hintergrund

Um die Herausforderungen im Detail beschreiben zu können, wurde das Zertifizierungsprocedere des konventionellen Herstellungsstranges dem neuen, hier zu untersuchenden Herstellungsstranges, gegenübergestellt.

Die Gemeinsamkeit endet nach dem Abguss der Legierung in einen Ingot bzw. Umformung in ein Billet, getrieben durch die angestrebte Menge an Pulver.



Abbildung 26: Inco718 Billet

Beide Ausgangsformen werden einer Untersuchung unterzogen auf chemische Zusammensetzung und metallurgische Eigenschaften. Ab der Verdüsung des Materials zu Pulver, nimmt der Fertigungsprozess einen anderen Lauf. Während konventionell eine Umformung mit umfangreicher zerstörungsfreier und zerstörender Prüfung an Schmiedeteilen erfolgt, ist es das Ziel im AM Prozess eine zerstörende Prüfung zu vermeiden.

Beiden Prozessvarianten gemeinsam ist grundsätzlich die Wärmebehandlung und anschließende subtraktive Bearbeitung, in unterschiedlichem Aufmaß, bedingt durch das zu zerspanende Materialvolumen.

Durchgeführte Arbeiten

Im direkten Vergleich der beiden Prozessketten, wurden die Prozessschritte gegenübergestellt und bekannte Qualifikations- bzw. Zertifizierungsverfahren zugeordnet oder aber Alternativen diskutiert und evaluiert.

Ergebnisse des APs

Was beiden Prozessketten gemein ist, sind die Grundanforderungen:

- Bauteilqualität
- Prozesswiederholbarkeit
- Rückverfolgbarkeit
- Personal
- Infrastruktur

Um die Produkt- oder Bauteilqualität sicherzustellen, sind mind. die gleichen Anforderungen zu stellen und zu erfüllen. Ist an einem Schmiedeteil eine Ultraschallprüfung möglich, so bietet sich für additiv gefertigte Bauteile, aufgrund ihrer konturnahen Rohlings Form mit eventuell vorhandenen Kavitäten, die CT-Prüfung an. Die geltende Industrienorm nach DIN EN ISO 15708 berücksichtigt Materialeinschlüsse in Form von Pulver nicht und lässt sich folglich nicht für eine anerkannte allgemeingültige Qualifikation heranziehen. Hier muss eine dezidierte ISO CT-Norm für AM Bauteile geschaffen werden, oder aber die Kunden eine solche, als OEM oder Designverantwortlicher Partie erstellt werden.

Für Schmiedeteile werden für die zerstörende Qualifikation entweder Proben aus dem sogenannten Probenring entnommen, oder aber aus dem Bauteil selber, als periodisches Cut-Up- In dem AM Prozess, aufgrund konturnaher Fertigung, sind Probenringe nicht per se vorhanden. Eine Annäherung an einen solchen Probenring, können mitgedruckte Probenkörper, in Form und Größe das Bauteil recht gut repräsentierend, sein. Diese müssen natürlich den Wärmebehandlungszyklus mit durchlaufen.

Werden aus einem Schmiedelos periodische oder losgebundene Cut-Up gefertigt, welche sich in der Regel an ein Wärmebehandlungslos orientieren, Ausnahme periodisches Cut-Up, so kann für die AM Prozesskette der Ansatz übernommen werden, sofern die Bauteile aus einer Materialcharge, einer Ofencharge und Prozessfertigungsfenster stammen, das nicht durch ein anderes Produkt oder eine schwerwiegende Fehlermeldung der AM Anlage, der Prozess unterbrochen wurde. Eine einheitliche Spezifikation liegt aktuell nicht vor und muss auf OEM-Ebene geregelt werden.

Die Wärmebehandlung scheint und ihre Parameter, insbesondere der Spannungsarmglühprozess, sehr Bauteil und AM Prozess spezifisch zu sein. Um eine Zertifizierung zu erlangen sind viele Versuchsreihen zu fahren und zu dokumentieren.

Für die Übertragbarkeit der entwickelten Prozesse, trotz sehr ähnlicher Parameter bei gleichem Material, sind in der Qualifikation umfangreiche Test für die AM Anlage zu durchlaufen. Als Ergebnis ist ein periodischer Requalifikationsprozess zu erwarten, der die Wärmebehandlung mit beeinflusst.

Wie bereits festgestellt sind die AM Anlagen sehr komplexe Anlagen, die einem hohen Verschleiß unterliegen und die bei geringen Parameterverschiebung, sehr sensitiv die Materialgüte bis Bauteil Geometrien negativ beeinflussen. Auch hier würde der periodische Requalifikationsprozess unterstützend wirken.

Die Dokumentations- und damit auch der Rückverfolgbarkeit, kann mit den durch die Anlage und der Prozessdokumentation zur Verfügung gestellten Daten, Genüge getan werden. Trotzdem sind diese von den OEMs zu formulieren und in den Audits sichergestellt werden.

An das Personal wie auch die Infrastruktur sind Forderungen an Eignung und Kompetenz zu stellen, durch geeignete Weiterbildungsmaßnahmen sicher zu stellen und die Infrastruktur immer den aktuell geltenden Sicherheitsvorschriften anzupassen.

Präwest Arbeiten im Arbeitspaket AP 6.3 „Ausarbeitung eines Zertifizierungskonzepts“

Hintergrund

Nach heutigem Stand gibt es weltweit für fliegenden Anwendungen kein Zertifizierungskonzept für eine Blisk oder ein sicherheitskritisches Bauteil. Die Anforderungen, über die allgemein gültigen Anforderungen hinaus gehend, sind bauteilspezifisch und sehr wahrscheinlich auch Prozessspezifisch zu formulieren.

Durchgeführte Arbeiten

Es wurden die allgemeinen Vorschriften mit den Vorschriften für den konventionellen Prozess abgeglichen und deren Anforderungen für AM umformuliert oder angepasst.

Es betrifft sehr umfangreich die Infrastruktur ähnlich einer 5-Achs Fräsmaschine und kann gebündelt wie folgt formuliert werden:

- Dokumentation (Aufstellen & Inbetriebnahme)
- Umgebungsbedingungen und -überwachung
- Lückenlose Prozessdokumentation
- Einhaltung gesetzlicher Auflagen
- Einhaltung der Sicherheitsvorschriften
- Auditsichere Prozessbeschreibung und -handhabung

Das Personal betreffend, muss dieses AM spezifische Kenntnisse haben in Fragen der Sicherheit im Umgang mit der Anlage, dem Pulver und dem Prozess. Mindestanforderungen nach DIN EN ISO/ASTM 52942 sind zu erfüllen.

Das damit vertraute Instandsetzungs- und Wartungspersonal muss Anlagenspezifisches Wissen haben, sowie die Sicherheitsvorschriften im Umgang mit Anlage und Pulver beherrschen.

Im Rahmen der Prozessdefinition und der notwendigen Arbeitsschritte, sind in einem Dokument die Methodik, das Material, Prozessschritte und Abnahmegrenzen zu definieren. AM-spezifische Faktoren wie Laserleistung, Fokus, Gaszusammensetzung des Bauraums u.a. gehören mit dazu.

Ergebnisse des APs

Die breit recherchierten Daten und aus der Lückenanalyse aufbauend, nach DIN EN ISO/ASTM 52904 resultierende Konzept, kann tabellarisch wie folgt dargestellt werden:

	Anforderungsdokument	Validierungsdokument
Personal	Qualifizierungsanforderungen	Qualifizierungsbericht
Digitale Daten	Definition des Bauteils	Prüfbericht zur Geometrie
	Vom Kunden gelieferte Daten (z.B. CAD-Dateien)	Prüfbericht zur Geometrie
	Vom Hersteller erstellte CAD-Dateien (z.B. Übersetzungen, Point Cloud Daten)	Qualitätsprüfungsbericht
	Baudateien (Bauanordnungen, Slice-Dateien)	Baufauftragsbericht (Bau-Protokoll-datei)
PBF-Geräte	Anforderungen an die Installation und Wartung	Aufzeichnungen zur Installation und Wartung der Geräte
	Angaben zur Bauplattform	Konformitätsbescheinigung der Bauplattform
	Gasspezifikation	Gas-Zertifikat
	Angaben zum Beschichter	Lieferschein
	Verfahren der Anlage	Prüfprotokolle für Hilfswerkzeuge und -geräte, Kalibrierungszertifikate für Messgeräte, Checklisten
Ausgangsmaterial	Spezifikation für den Kauf von Ausgangsmaterialien	Zertifikat für das Ausgangsmaterial (z.B. ISO/ASTM 52907), Mit dem Ausgangsmaterial erhaltene Dokumentation
	Verwendungsspezifikation des Ausgangsmaterials	Rückverfolgbarkeitsaufzeichnungen für wiederverwendetes Pulver

Fertigung	Definition von Details und Ablauf des Verfahrens	Produktionsplan
	Anforderungen an die Prozessqualifizierung (z.B. Prüfung und Prüfplan)	Kontrollkarten
Verfestigtes Material	Definition der Materialeigenschaften (Materialspezifikation)	Konformitätserklärung
Bauteil	Definition der Bauteileigenschaften	Konformitätserklärung
	Bestätigung des erfolgreichen Abschlusses aller im Produktionsplan festgelegten Schritte	Vollständige Herstellungsunterlagen (z. B. erfüllter Produktionsplan, Checklisten)

Geplante Veröffentlichungen

Das Projekt wurde auf der ILA2024 im Rahmen einer Präsentation einem breiten Publikum vorgestellt und aktiv am Stand vermarktet.

Auf der ASME-Konferenz in London, war das AMB2S Projekt aktives Gestaltungselement des Präwest Standes.