

Luftfahrtforschung und -technologie

Abschlussbericht

Integrierte OEM/MRO Repair für Hochwertbauteile (Int_Rep)

Förderkennzeichen 20T1304

Laufzeit: 01.01.2014 bis 30.09.2017

Berichtersteller: Dr. S. Gerloff



MTU Aero Engines AG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

München, März 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
Zusammenfassung.....	5
1.1 Projektstrukturplan.....	5
1.2 Erreichte Ergebnisse	6
1.2.1 AP1 Blisk Repair	6
1.2.2 AP2 Prüf- und Fertigungsprozessadaption	8
Technische Darstellung der Arbeitspakete	11
1.3 AP1 Blisk Repair.....	11
1.3.1 AP1.1 Standardisierte Reparatur Blisk.....	11
1.3.2 AP1.2 Lokale Wärmebehandlung	16
1.4 AP2 Prüf- und Fertigungsprozessadaption	17
1.4.1 AP2.1 Automatisierte quantitative Eindringrissprüfung	17
1.4.2 AP2.2 Optimierte Ermittlung standardisierter Fertigungsparameter.....	21
1.4.3 AP2.3 Entkopplung Mensch und Maschine	27
2 Literaturverzeichnis	37

1 Einleitung

Durch High-Tech-Reparaturverfahren soll die globale Wettbewerbsposition der MTU als weltweit größter unabhängiger Anbieter von Wartung, Reparatur und Überholung von Triebwerken gestärkt und ausgebaut werden – trotz Bestreben der OEM, den Markt zu beherrschen. Mit selbstentwickelten Verfahren erreicht MTU weltweit einmalige Reparaturtiefen und ist damit in der Lage, selbst stark abgenutzte Teile zu reparieren.

Diese Kompetenz soll weiter gestärkt und auf neue Baugruppen, wie z.B die Blisk (Bladed Disk) bzw. IBR (Integrally Bladed Rotor), ausgeweitet werden. Durch neuartige Verfahren zur Reparatur sollen solche integralen Hochwertbauteile vermehrt instandgesetzt werden, anstatt diese durch Neuteile zu ersetzen.

Nachdem in den letzten Jahren im zivilen Markt eine klare Tendenz zu Flight-Hour-Agreements zu erkennen ist, wurde auch MTU-seitig die Repair-Strategie überprüft und angepasst. Während der letzten 40 bis 50 Jahre war das Business-Modell der sogenannten Parts&Material-Verträge für die MRO etabliert. Die veränderten Geschäftsmodelle hin zu den Flight-by-hour-Verträgen mit den Airlines dagegen erfordern eine stärkere Verzahnung der OEM- und MRO-Geschäftsmodelle.

Weitergehende Überwachungs- und Automatisierungsansätze in der Fertigung sollen entwickelt und auf spezifische MRO-Belange adaptiert werden. Schwerpunkt sind die Stabilisierung neuer effizienter Zerspanungsprozesse mit dem Ziel, höhere Stückzahlen und reduzierte Ausschuss- und Nacharbeitsraten zu erreichen. Stellhebel sind die Reduzierung der Kontroll-, Handlings- und prozessbegleitenden manuellen Tätigkeiten und Verfahrenserweiterungen bei modernen mehrachsigen Bearbeitungsmaschinen.

Auflistung der Arbeitspakete mit durchführenden Teilprojektleitern:

Hr. Dr. Junge	AP1.1: Standardisierte Reparatur Blisk
Hr. Brungs	AP1.2: Lokale Wärmebehandlung
Hr. Piorun	AP2.1: Automatisierte quantitative Eindringrissprüfung

Hr. Hampel AP2.2: Optimierte Ermittlung standardisierter Fertigungsparameter
Fr. Kuck AP2.3: Entkopplung Mensch und Maschine

Zusammenfassung

1.1 Projektstrukturplan

Abbildung 1.1.1. zeigt den Projektstrukturplan des Vorhabens.

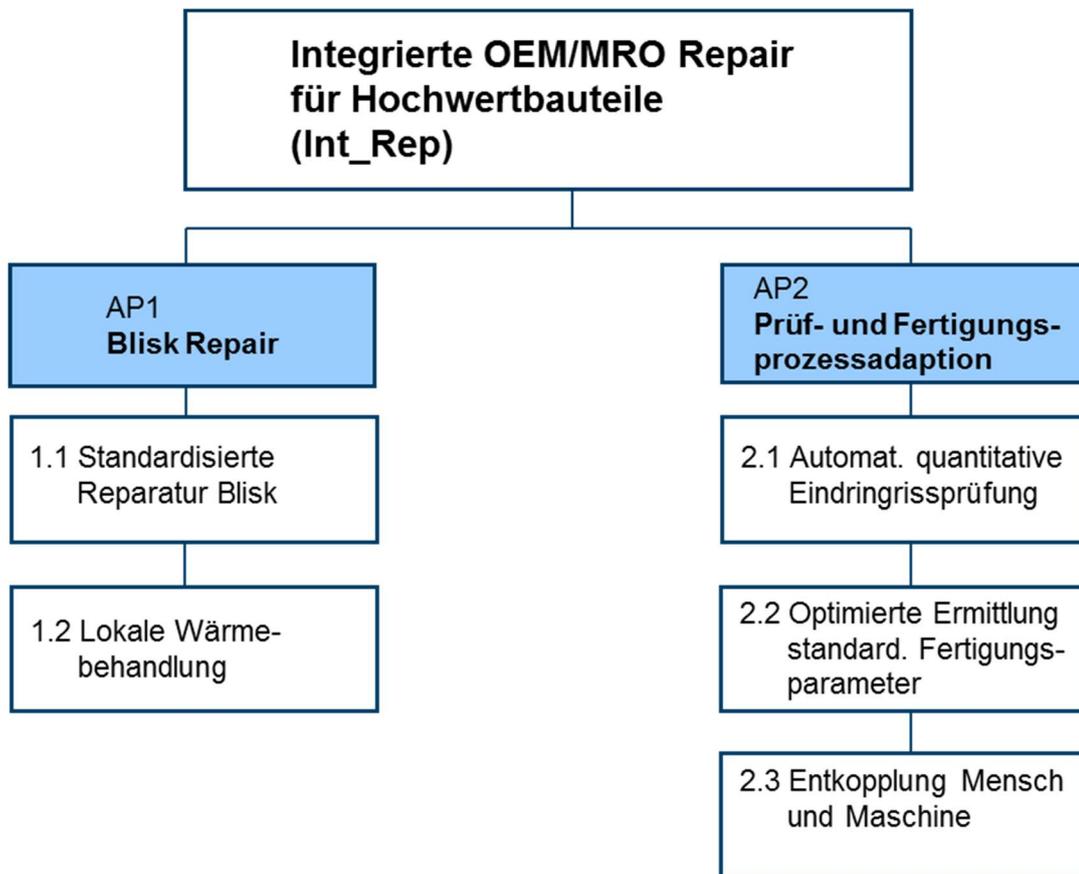


Abbildung 1.1.1: Projektstrukturplan

1.2 Erreichte Ergebnisse

1.2.1 AP1 Blisk Repair

1.2.1.1 AP1.1 Standardisierte Reparatur Blisk

In einem ersten Schritt wurde umfangreiches Datenmaterial (ca. 100.000 Hochdruck-Verdichterschaufeln aus zivilen Triebwerksprogrammen) ausgewertet. Die hauptsächlichsten Schädigungsarten an diesen Laufschaufeln sind Erosion (bevorzugt an Vorderkante und Schaufelspitze), Fremdkörperschaden (Foreign Object Damage – FOD) an der Schaufelvorderkante, Fretting am Schaufelfuß, Korrosion und Oxidation sowie Anstreifschäden an der Schaufelspitze. Bei Blisks, d.h. einem integral gefertigten Schaufel-Scheibenverbund, muss derzeit die gesamte Blisk ausgetauscht bzw. repariert werden, wenn bereits eine Schaufel beschädigt ist.

In weiteren Untersuchungen wurden verschiedene Aspekte und Einflussfaktoren, die sich auf die Wirtschaftlichkeit einer Bliskreparatur auswirken, näher untersucht, dies betrifft vor allem die:

- Ermittlung der zu erwartenden Schäden und die damit ermittelten Scrap-Raten,
- Anzahl der zu erwartenden Reparaturen auf Basis der Lieferleisten.
- Erwartete Kosten für die Ersatzteile.
- Erwartete Kosten für die Entwicklung der Reparatur sowie
- Berücksichtigung der erwarteten Vertragsgestaltung (Flight-Hour-Agreements vs. Parts & Materials-Verträge).

Hierauf basierend wurden die Anzahl der zu erwartenden Reparaturen in den nächsten Jahren auf Basis der erwarteten Marktentwicklung und den Schadensraten ermittelt/prognostiziert.

Die Analyse der Schädigungsverteilungen bestätigte die Erkenntnis, dass ein Erosionsangriff auf alle Schaufeln einer Blisk gleichmäßig einwirkt, während im FOD-Fall nur ein Teil der Schaufeln betroffen ist. Dieser Anteil der FOD-Schäden lag im Bereich der Vorderkante bei 8 bis 10%. Auf der Basis einer probabilistischen Simulation wurden diese an Einzelschaufeln gewonnene Datenbasis auf die HDV-Blisks über-

tragen. Die Modellierung der durch FOD betroffenen Schaufeln eines Bauteils wurde mit einer Exponentialverteilung realisiert. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass nur für eine eng begrenzte Zahl von FOD-beschädigten Schaufeln eine Reparatur in Betracht kommt und wirtschaftlich abbildbar ist. Mit zunehmender Laufzeitakkumulation des Blisks steigt einerseits die Wahrscheinlichkeit eines Schadens, demgegenüber steht aber die zunehmende Unwirtschaftlichkeit der Reparatur einer Blisk, da diese nur noch eine abnehmende Lebensdauer besitzt.

Zudem erfordern Flight-Hour-Agreements vom Triebwerkshersteller zukünftig eine deutlich robustere Auslegung der Bauteile, um die zugesagte Lebensdauer sicher zu erreichen. Vorzeitige Reparaturen oder Ersatzteilbereitstellung gehen bei diesem Geschäftsmodell zu Lasten des Triebwerksherstellers.

Mögliche Reparaturprozesse wurden im Rahmen einer systematischen Entscheidungsanalyse bewertet. Neben vier Muss-Kriterien wurden weitere 15 Soll-Kriterien definiert, an denen die betrachteten Füge-Reparaturverfahren bzw. Reparaturprozessketten gespiegelt werden. Folgende drei Verfahren wurden entsprechend der Entscheidungsanalyse ausgewählt und detailliert mit Unterstützung des Laser-Zentrum Hannover e.V. (LZH) und des TWI (TWI - The Welding Institute, Cambridge, Great Britain) untersucht:

- Laserpulverauftragsschweißen.
- Induktives Hochfrequenzpressschweißen,
- Induktives Diffusionsschweißen.

In einem weiteren Unterarbeitspaket wurde die Eignung des Ein-Ebenen-Wuchtens als Alternative für das Rotierende Wuchten untersucht und konnte für die Bauteilfamilien Ringe (Dichtringe, Zwischenringe, u.a.); Scheiben (Verdichterscheiben, Turbinescheiben, Coverplates, u.a.) sowie für Einzelblisks erfolgreich gezeigt werden.

1.2.1.2 AP1.2 Lokale Wärmebehandlung

Bei der Wärmebehandlung mittels Laserstrahlung wurde eine spezielle Laserleistungsregelung, ein kamerabasiertes Temperaturerfassungssystem oder als Alternative ein schnelles lokales Temperaturerfassungssystem sowie eine dynamische Strahlformungseinheit in einer den komplexen Bauteilen angepassten Schutzgaskammer installiert. Eine Alternative ist eine schnelle Pyrometrie-Messung, bei der zur Visualisierung der Gleichmäßigkeit der Erwärmung eine Bildberechnung erfolgen muss. Für die Wärmebehandlung mittels Induktion wurde ein Testsystem mit Spule und Schutzgaszuführung aufgebaut bzw. ein bestehendes System erweitert. Durch den Abbruch des APs wurden konnten keine relevanten Ergebnisse erarbeitet werden.

1.2.2 AP2 Prüf- und Fertigungsprozessadaption

1.2.2.1 AP2.1 Automatisierte quantitative Eindringrissprüfung

Als Voraussetzung für eine automatisierte quantitative Eindringrissprüfung wurden Methoden zur Eliminierung der oftmals auftretenden sogenannten Hintergrundfluoreszenz (HGF) bei der Eindringrissprüfung erarbeitet. In diesem Arbeitspaket wurde ein Prozess und eine Laboranlage für das Bleichen von Titan-Blisks entwickelt und erprobt. Im Rahmen einer Ursachenanalyse wurden die Randbedingungen ermittelt, die zum verstärkten Auftreten von HGF führen.

In einem Lösungsansatz wurde untersucht, inwieweit eine veränderte chemische Behandlung nach dem BEA-Seigerungsätzen (Blue-Etch-Anodize) zu einer signifikanten Reduktion des HGF-Auftretens führt. Mit einer Optimierung der Parameter beim sogenannten Abziehen (Entfernen) der Anodisierschicht konnte die HGF-Neigung deutlich reduziert werden. In Verbindung mit veränderten Eindringrissprüfparametern wurde das HGF-Auftreten an Titanblisks an Serienbauteilen reduziert. Die neu definierten, gegenüber der bisher gültigen FPI-Norm eingeschränkten Parameter werden zeitnah umgesetzt und sind für Klasse 1-Rotorbauteile zulassungsfähig. Ausschlaggebend für diesen Erfolg war eine gesamtheitliche Bewertung aller

Teilprozesse, die Einfluss auf die Qualität der Eindringrissprüfung haben.

1.2.2.2 AP2.2 Optimierte Ermittlung standardisierter Fertigungsparameter

In diesem Arbeitspaket wurde das Ziel verfolgt, den Aufwand bei der Ermittlung neuer bzw. optimierter Fertigungsparameter am Beispiel von Zerspanuntersuchungen deutlich zu reduzieren. Ausgangspunkt ist bisher typischerweise eine voll faktorielle Versuchsplanung, die einen erheblichen Versuchsaufwand widerspiegelt. Mit Hilfe zweier vorausgewählter statistischer Verfahren: „Latin Hypercube Sampling“ und „Abgewandelte univariate Methode“ wurde eine Reduzierung der Versuchsmatrix und damit eine Einsparung an Maschinenbelegung, Werkzeuganzahl und Auswerteaufwände angestrebt. Für das statistische Verfahren „abgewandelte univariate Methode“ konnte die erweiterte Versuchsmatrix erfolgreich für verschiedene Hartmetallsorten und Schnittwerte umgesetzt werden. Die Ergebnisse aus den statistischen Verfahren wurden dem vollfaktoriellen Versuchsplan gegenübergestellt und bewertet und zeigen eine gute Übereinstimmung. Durch die Verwendung der statistischen Verfahren lassen sich ca. 80% des Versuchsaufwands im Vergleich zur voll faktoriellen Versuchsplanung einsparen. Der Nachweis bezüglich Robustheit und Praktikabilität der univariaten Methode wurde am Beispiel der Werkzeugoptimierung für den Bohrprozess in Inconel 718 erbracht. Zudem konnte gezeigt werden, dass sich diese DoE-Methodik auch für andere spanende Verfahren mit definierter Schneide anwenden lässt.

1.2.2.3 AP2.3 Entkopplung Mensch und Maschine

In diesem Arbeitspaket standen drei Aufgaben im Fokus. Als Erstes wurde eine neuartige Technologie zum Drehen von Triebwerksteilen (Verdichter- bzw. Turbinenrotoren, Gehäusebauteile) entwickelt. In einem zweiten Ansatz wurden verbesserte Mess- und Korrekturprozeduren für das Radiusfräsen untersucht, die es erlauben, manuelle Eingriffe der Werker und damit die erforderliche Verfügbarkeit des Maschi-

nenbedieners auf ein Minimum zu reduzieren. Die dritte Aufgabe bestand darin, das Gewindebohren und -fräsen ohne Werkereingriff an Gehäusebauteilen zu optimieren. Für die neuartige Drehtechnologie ist eine schwenkbare Dreh-Fräs-Einheit auf der Bearbeitungsmaschine erforderlich, wie sie in Form von Dreh-Fräsmaschinen (z.B. WFL Millturn bzw. Monforts Unicen 1000) existieren. Diese ermöglichen durch einen veränderlichen Schwenkwinkel der Drehwerkzeuge die Nutzung eines größeren Bereiches der eingesetzten Wendeschneidplatten. So konnte im Rahmen des Projektes bei unserem Projektpartner FhG-IPT Aachen an einer Monforts-Unicen 1000 eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit und damit eine Erhöhung des nutzbaren Drehweges beim Drehen mit aktiver Werkzeugschwenkachse um den Faktor 3 realisiert werden. Dazu wurden umfangreiche Maschinenfähigkeitsanalysen und Verschleißversuche für die simultane 3-Achs-Drehbearbeitung durchgeführt und ausgewertet. Basis der Lösung der zweiten Aufgabe war eine umfassende Analyse der Toleranzketten bei der Fertigung von Radien, Schaufelnuten und Bohrungen sowie die Beschreibung von umsetzbaren Optimierungspotenzialen. Darauf aufbauend wurden Methoden zum automatisierten Vermessen von Radien, Bohr- und Räumprofilen ermittelt und bezüglich des Verbesserungspotentials bewertet. Zielführend erwies sich der Austausch des in der Fräsmaschine integrierten einfachen laserbasierten Systems zur Werkzeug- und Kantenvermessung gegen ein Laser-Bügelmesssystem mit spezifischer Druckluftreinigung. Damit konnte erfolgreich gezeigt werden, dass das Einmessen der zu bearbeitenden Kante mit einer höheren Qualität erfolgte. Für die dritte Aufgabe standen sowohl das automatisierte Vermessen von gefertigten Innengewinde als auch das Gewindebohren bzw. Gewindefräsen ohne Werkereingriff an Gehäusen im Vordergrund. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Gewindegewinde auch mit dem in der Maschine benutzten KSS prozessstabil umsetzen lässt.

Technische Darstellung der Arbeitspakete

1.3 AP1 Blisk Repair

1.3.1 AP1.1 Standardisierte Reparatur Blisk

In diesem Arbeitspaket wurde in einem ersten Schritt umfangreiches Datenmaterial aus den verschiedenen MTU Standorten zusammengetragen und bewertet. Für die detaillierte Analyse der Schadensbilder und -häufigkeiten erfolgte eine Auswertung von 100.000 Hochdruck-Verdichterschaufeln aus den zivilen Triebwerksprogrammen. Die hauptsächlichsten Schädigungsarten sind Erosion (bevorzugt an Vorderkante und Schaufelspitze), Fremdkörperschaden (Foreign Object Damage – FOD) an der Schaufelvorderkante, Fretting am Schaufelfuß, Korrosion und Oxidation sowie Anstreifschäden an der Schaufelspitze.

Wesentliches Ziel der Datenanalyse an den Verdichterlaufschauflern war die Bestimmung von sogenannten Scrap-Raten (Ausschuss-Raten), also die Häufigkeit, mit der ein Bauteil aufgrund von nicht erfüllten Kriterien (z.B. maßliche Abweichung, Risse, Beschädigung) nicht weiter betrieben werden darf. Bei Blisks, d.h. einem integral gefertigten Schaufel-Scheibenverbund, muss derzeit die gesamte Blisk ausgetauscht bzw. repariert werden, wenn auch nur eine Schaufel beschädigt ist. Für eine Übertragung der Daten war es daher nötig, nicht nur die Scraprate auf Schaufelbasis zu ermitteln, sondern zusätzlich auch die Anzahl der betroffenen Schaufeln je Stufe zu erfassen.

Die statistische Analyse zeigte, dass im Falle eines FODs ca. 15,8% der Schaufeln betroffen sind, d.h. bei z.B. 30 Schaufeln auf einer Stufe also 5 Schaufeln. Es ist ersichtlich, dass tendenziell weniger als 20% der Schaufeln betroffen sind.

Ohne eine Reparatur müssten somit alle Blisks ausgetauscht werden. Die Reparaturkosten steigen jedoch mit der Anzahl der defekten Schaufeln und abhängig von der Art der Schädigung.

In den weiteren Untersuchungen wurden verschiedene Aspekte und Einflussfaktoren näher untersucht, die sich auf die Wirtschaftlichkeit einer Bliskreparatur auswirken, dies betrifft vor allem die:

- Ermittlung der zu erwartenden Schäden und die damit ermittelten Scrap-Raten,
- Anzahl der zu erwartenden Reparaturen auf Basis der Lieferleisten.
- Erwartete Kosten für die Ersatzteile.
- Erwartete Kosten für die Entwicklung der Reparatur sowie
- Berücksichtigung der erwarteten Vertragsgestaltung (Flight-Hour-Agreements vs. Parts & Materials-Verträge).

Die Zahlen für die erwarteten Schäden wurden als Scrap-Raten je Flugstunde ermittelt. Dabei erhärtete sich das Ergebnis, das nur signifikant Einzelne, auf wenige Schaufeln begrenzte Schadensfälle (z.B. durch FOD) in den Betrachtungsumfang aufgenommen werden können. Erosionsschäden betreffen typischerweise alle Schaufeln einer Blisk, der daraus resultierende Reparaturbedarf ist wirtschaftlich nicht umsetzbar.

In einer weiteren Analyse wurden die Anzahl der zu erwartenden Reparaturen in den nächsten Jahren auf Basis der erwarteten Marktentwicklung und den Schadensraten ermittelt. Gleichzeitig wurden die Kosten für die Entwicklung und industriellen Einsatz eines Reparaturverfahrens mit der getroffenen Eingrenzung auf die Verfahren induktives Hochfrequenzpressschweißen, Laserpulverauftragsverfahren und induktives Diffusionsschweißen detailliert und bis zur Markteinführung abgeschätzt.

Die Einführung einer Schaufelreparatur ist zu Beginn aber mit erheblichen Kosten verbunden, speziell dann, wenn die Kosten für ein solches Reparaturverfahren nicht durch Synergieeffekte, z.B. durch die gleichzeitige Nutzung der neuen Technologien im Bereich der Neuteilfertigung und der Schaufelreparatur, reduziert werden können. Deswegen wird der Break-Even-Punkt, an dem der Nutzen die Kosten übersteigt, erst sehr spät innerhalb des Life Cycles des Triebwerks erreicht. Dieser Punkt liegt abhängig vom Markterfolg mit dem damit verbundenen Volumenanstieg an GTF-Triebwerken zwischen 10 und 15 Jahren.

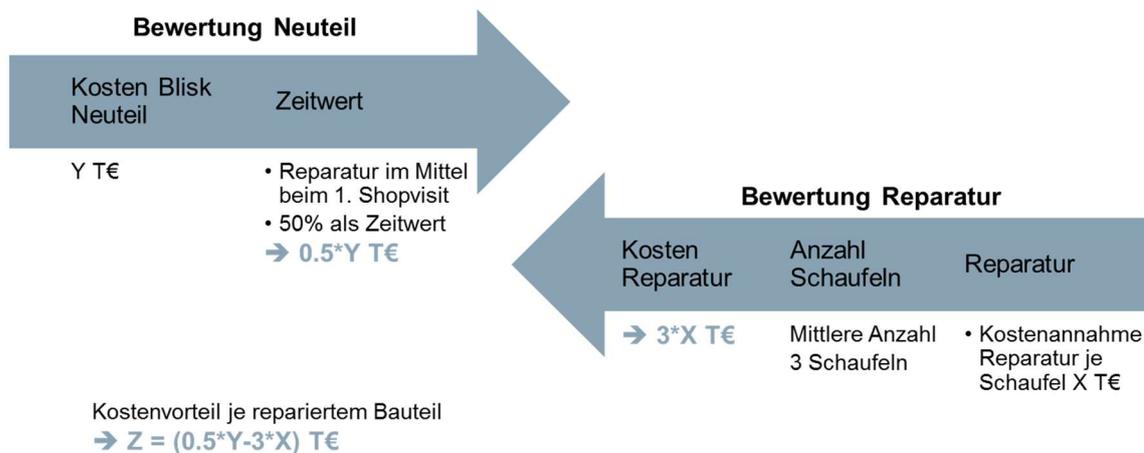


Abbildung 1.3.1.1: Bewertungsmethodik mit Randbedingungen

Durch optimierte Fertigungsverfahren und Produktionsabläufen, verbunden mit hohen Gleichteilvolumina aufgrund des verfolgten Familienkonzepts der GTF-Triebwerke, konnten die Herstellkosten signifikant gesenkt werden. Die Investitionen in die Reparaturverfahrensentwicklung, Erprobung, Tests, Validierung und Zulassung neuer Reparaturverfahren dominieren den unter „X“ in Abbildung 6 dargestellten Kostenblock. Im Ergebnis wird der Kostenvorteil „Z“ auch durch den Verfall des Zeitwerts der Blisks negativ beeinflusst, der stark vom Zeitpunkt und vom Umfang des zu reparierenden Bauteilschadens abhängt.

Als Ergebnis von Simulationen zur Schadensverteilung kann festgehalten werden, dass nur für eine eng begrenzte Zahl von FOD-beschädigten Schaufeln eine Reparatur in Betracht kommt und wirtschaftlich abbildbar ist. Mit zunehmender Laufzeitakkumulation des Blisks steigt einerseits die Wahrscheinlichkeit eines Schadens, demgegenüber steht aber die zunehmende Unwirtschaftlichkeit der Reparatur einer Blisk, da diese ja nur noch eine abnehmende Lebensdauer besitzt.

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchungen wurde die systematische Auswahl möglicher Reparaturprozesse vorangetrieben. Wesentlich für den Nachweis der Machbarkeit und die Umsetzung des Reparaturverfahrens ist der Kernprozessschritt. Für die vorangehenden und nachfolgenden Prozessschritte existieren meist mehrere Verfahrensalternativen, die je nach Kernprozess günstiger oder weniger günstig durchgeführt werden können.

Im Rahmen einer systematischen Entscheidungsanalyse wurden Muss- und Kann-Kriterien erarbeitet und darauf basierend die einzelnen möglichen Kernprozesse einer Bewertung unterzogen.

Ein wesentliches Kriterium ist hierbei der zu erwartenden Schwingfestigkeitsabfall (HCF - High Cycle Fatigue-Abfall). Entsprechend der aktuellen Auslastung der Zielbauteile darf am reparierten Bauteil neu ein geringer Abfall der Schwingfestigkeit auftreten. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist, dass das Reparaturverfahren nicht nur auf den obersten Schaufelblattbereich beschränkt ist. Wie sich aus der Bedarfsanalyse abzeichnet, sind die Schäden durch FOD im äußeren Bereich der Schaufel angesiedelt, aber nicht nur auf die äußersten 10% beschränkt. Das dritte Muss-Kriterium bezieht sich auf das Qualitätssicherungssystem und ist wesentlich für eine Reparatur-Zulassung. Das vierte Muss-Kriterium stellt sicher, dass das Reparaturverfahren für die ausgewählte Anwendung zum Einsatz kommen kann. Neben den Muss-Kriterien wurden weitere 15 Soll-Kriterien definiert, an denen die betrachteten Füge-Reparaturverfahren bzw. Reparaturprozessketten gespiegelt werden. Folgende drei Verfahren wurden entsprechend der Entscheidungsanalyse ausgewählt:

- Laserpulverauftragsschweißen.
- Induktives Hochfrequenzpressschweißen,
- Induktives Diffusionsschweißen.

Der Vorteil des Laserpulverauftragsschweißens (LPA) liegt vor, wenn geringe Aufbauhöhen an der Schaufel generiert werden sollen. Nachteilig wird die mangelnde Prozessstabilität und die erreichbare Fügequalität bezüglich Einschlüssen und Fehlstellen bewertet, zudem ist die statistische Absicherung der notwendigen Bauteilfestigkeit aufwändig.

Die Vorteile des Induktiven Hochfrequenzpressschweißens können wirksam werden, wenn eine Kombination von Fertigungs- und Reparaturprozess umgesetzt werden kann. Der Fügeprozess generiert eine hohe Festigkeit in der Fügezone, da im teigigen Zustand verschweißt wird, was vergleichbare Materialeigenschaften zur Schmiedequalität ermöglicht. Als Nachteil ist zu vermerken, dass die Verfahrensentwicklung und Prozesszulassung sehr aufwändig ist und aktuell einen niedrigeren Reifegrad als

das Laserpulverauftragsschweißen aufweist.

Auch das Induktive Diffusionsschweißen generiert eine sehr gute Qualität der Fügezone, verbunden mit einer hohen Bauteilfestigkeit. Die sehr lange Schweiß- bzw. Haltezeit, die für den Diffusionsvorgang notwendig ist, lässt eine schlechte Wirtschaftlichkeit erwarten. Zudem sind die Anforderungen an die Prozessumgebung (Vakuum) und die erforderliche hohe Qualität der Aufbereitung der Fügeflächen nachteilig.

Parallel hierzu wurden am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover (IW) und am Laserzentrum Hannover e.V. (LZH) noch alternative, sich in einem früheren Entwicklungsstadium befindliche Reparaturverfahren untersucht. Am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover wurden im wesentlichen Schmelzschweißverfahren bezüglich einer Eignung für die Bliskreparatur bewertet. Kritisch für die meisten Schmelzschweißverfahren ist die Forderung, dass eine Zugänglichkeit für die oberen 50% des Schaufelblattes sichergestellt werden muss. Für eine Reparatur sowohl der Vorder- als auch der Hinterkante müssten also mindestens zwei Patchvarianten erstellt werden. Patchreparatur bezeichnet das Einschweißen entsprechend vorkonfigurierter Blechabschnitte aus dem Original-Bliskmaterial. Dazu muss in einem ersten Schritt ein vorher definierter Bereich der beschädigten Bliskschaukel entfernt werden. Hier bietet sich bereits die Definition von entsprechenden standardisierten Größen an, die sich wirtschaftlicher fertigen lassen. Nach dem Einschweißen muss ein Nachbearbeitungsverfahren eingesetzt werden, das die auf der Zeichnung geforderte Schaufelkontur wiederherstellt. Dies ist nach heutigem Erkenntnisstand nur durch ein adaptives Verfahren möglich, d.h. die Istgeometrie der zu reparierenden Schaufel(n) ist jeweils zu erfassen, das adaptive Fertigungsverfahren (z.B. Fräsen) muss sowohl in radialer als auch in axialer Richtung sicherstellen, dass eine aerodynamisch und strukturmechanisch den Anforderungen genügende Schaufeloberfläche reproduzierbar wiederhergestellt werden kann. Somit wird in allen Richtungen und an allen Positionen auf der Druck- und Saugseite der Bliskschaukel ein tangentialer und sanfter Übergang zwischen der Originalschaukel und dem Patchbereich zwingend gefordert, sogenannte Machining Steps (Absätze zwischen diesen beiden Oberflächen) sind nicht zulässig.

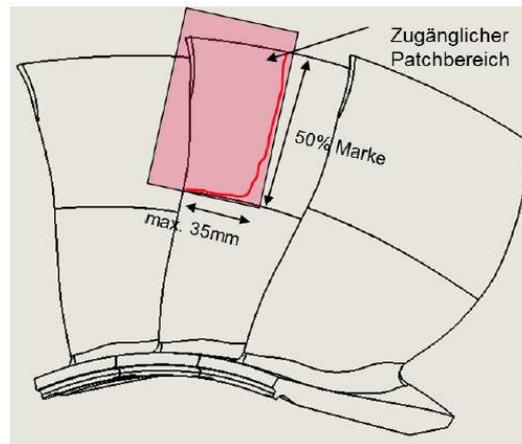


Abbildung 1.3.1.3: Beispiel für die Zugänglichkeit von Schmelzschweißverfahren
(Quelle: IW der LU Hannover)

Am Laser-Zentrum Hannover e.V. (LZH) wurden verschiedene Ansätze zur Schaufelreparatur mittels Laserschweißen untersucht:

1. Laserpulverauftragsschweißen zur Regeneration,
2. Laserpulverauftragsschweißen für die Herstellung eines Individual-Patches + Laserverbindungsschweißen und
3. Verwendung eines Standard-Patch + Laserverbindungsschweißen.

Für das vorgestellte Zielbauteil wird die Variante 1 empfohlen.

1.3.2 AP1.2 Lokale Wärmebehandlung

Für dieses Arbeitspaket wurden zwei Verfahren in die engere Auswahl genommen, eine Wärmebehandlung mittels Laserstrahlung und alternativ ein Prozess mit Induktionserwärmung.

Für die Wärmebehandlung mit Laser erwies es sich als zwingend erforderlich, eine spezielle Laserleistungsregelung, ein kamerabasiertes Temperaturerfassungssystem oder als Alternative ein schnelles lokales Temperaturerfassungssystem sowie eine dynamische Strahlformungseinheit zu installieren. Zur Behandlung kompletter Bauteile ist zudem eine besondere Schutzgaskammer notwendig.

Zur Erfassung der Oberflächentemperatur stehen grundsätzlich zwei Systeme zur Verfügung. Das kamerabasierte System ist derzeit nur in der Lage, Temperaturen

oberhalb 700 °C sicher zu erfassen, was eine Weiterentwicklung erfordert. Ist dies nicht möglich, kann alternativ auf die schnelle Pyrometrie-Messung zurückgegriffen werden. Ein dynamisches Strahlformungssystem gestattet es, den Strahl breit zu scannen, aber nur in geraden Linien.

Für die Entwicklung des Wärmebehandlungsprozesses mittels Induktion wurde ein Testsystem mit Spule und Schutzgaszuführung aufgebaut (siehe Abbildung 1.3.2.1) und erste Voruntersuchungen durchgeführt



Abbildung 1.3.2.1: Testsystem zur induktiven Wärmebehandlung

1.4 AP2 Prüf- und Fertigungsprozessadaption

1.4.1 AP2.1 Automatisierte quantitative Eindringrissprüfung

Bei der Eindringrissprüfung tritt oftmals sogenannte Hintergrundfluoreszenz (HGF) auf. Diese behindert in der Serie die automatisierte Prüfung und führt zu einem erhöhten Aufwand bezüglich einer manuellen Nachprüfung.

Dazu wurden unterschiedliche Lösungsansätze untersucht und weiterentwickelt.

Ein vielversprechender Ansatz ist Ozonbleichen; hierdurch soll die Hintergrundfluoreszenz reduziert bzw. beseitigt werden.

Eine Laboranlage zum Ozonbleichen von Proben und realen Bauteilen wurde entwickelt und optimiert. Sie besteht im Wesentlichen aus zwei Ozongeneratoren und einem leistungsstarken Ventilator. Damit konnte die erforderliche und gleichmäßige

Ozonkonzentration im gesamten Behandlungsraum innerhalb einer Minute erreicht werden (Abbildung 1.4.1.1).



Abbildung 1.4.1.1: Laboranlage mit Blistrommel für das Bleichen mit Ozon

Mit Hilfe dieser Versuchseinrichtung konnte nachgewiesen werden, dass das Bleichen mit Ozon eine zielführende Methode zur Beseitigung von Hintergrundfluoreszenz (HGF) an Titanbauteilen ist. Es zeigte sich allerdings früh im Projekt, dass die Ozonbehandlung die Helligkeit von FPI-Anzeigen reduzieren kann. Mit Hilfe einer POD-Analyse (Probability Of Detection) wurde untersucht, ob sich dieser Effekt negativ auf die Erkennung tatsächlicher Risse und Fehlstellen auf der Oberfläche der Bauteile auswirkt, was eine Einschränkung in der Umsetzung in der Serienproduktion zur Folge hätte.

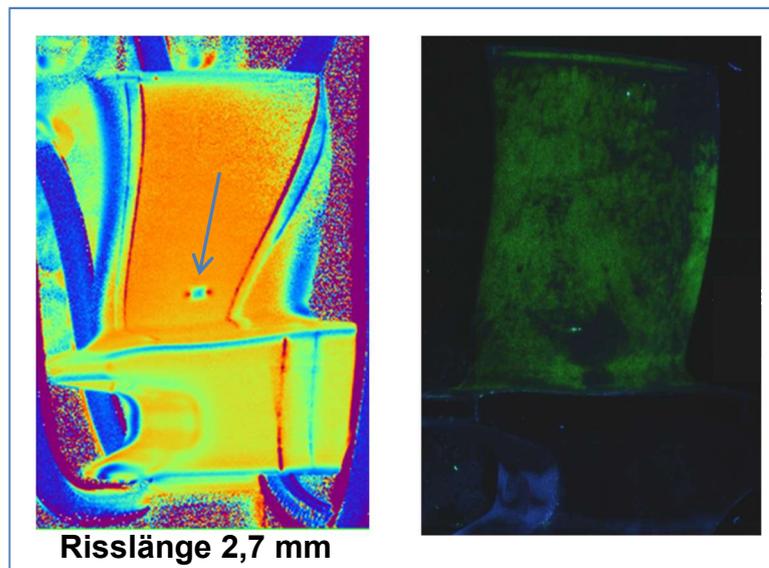


Abbildung 1.4.1.2: Schaufelsegment bei FPI-Prüfung

Die Betrachtung der Ergebnisse zeigt qualitativ keine Verschlechterung der FPI-Fehlererkennbarkeit durch das Ozonbleichen.

Als Fazit muss konstatiert werden, dass das Bleichverfahren mit Ozon auch bei optimierter Prozessführung nicht nur die HGF beseitigt, sondern auch das Auffinden und die Auswertbarkeit von schwach detektierbaren Risse negativ beeinflusst. Aufgrund der hohen Qualitätsforderungen und Anforderungen an die Betriebssicherheit der Rotorbauteile wie z.B. Blisks kann dieser Prozess an Klasse 1-Bauteilen nicht eingeführt werden, jedoch an Bauteilen der Klasse 2, bei denen geringere Anforderungen an die Eindringrissprüfung (z.B. Vanes, Variable Guide Vanes, Additive gefertigte Bauteile) gestellt werden.

In der Ursachenanalyse zeigte sich, dass die Hintergrundfluoreszenz vor allem bei Bauteilen mit rauer „aktiver“ Oberfläche auftritt. Im Serienprozess der Bauteilherstellung sind hiervon vor allem Triebwerksteile betroffen, die vor der Eindringrissprüfung einem chemischen Ätzprozess, dem Blue-Etch-Anodize-Verfahren (BEA), unterzogen werden müssen (Abbildung 1.4.1.3).



Abbildung 1.4.1.3: Oberfläche nach BEA, mit Resten der Anodisierschicht (blau)

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Vorhabens noch nach weiteren alternativen Methoden zur Vermeidung von HGF gesucht.

Im Rahmen dieses Projekts wurden viele FPI-Messungen durchgeführt und bewertet. Hierbei zeigte sich, dass die Zwischenreinigung nach dem Benetzen und Eindringen des Fluoreszenzöls einen starken Einfluss auf das Auftreten von HGF hat. Es wurde deshalb untersucht, ob durch die Optimierung der FPI-Prozessparameter, vor allem bei der Zwischenreinigung, das Auftreten von HGF auch an problematischen Oberflächen reduziert werden kann. Dieser Optimierungsansatz beruht darauf, innerhalb der gültigen Norm zum Eindringrissprüfungen bei Beibehaltung der etablierten und zugelassenen Prozesskette optimierte Parameter zu finden, die ein Auftreten der HGF-Effekte wirksam reduziert. Mit zahlreichen Versuchen auf Serienanlagen wurden Parametervariationen durchgeführt, um optimierte Parameter zu finden. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung beispielsweise der Emulgatorkonzentration in Verbindung mit einer erhöhten Wassertemperatur beim Vorwaschen zu einer signifikanten Reduktion der HGF-Intensität führt. Nach der Optimierung der FPI-Parameter werden damit alle Risse gefunden, dies wurde an repräsentativen Materialproben mittels High-Cycle-Fatigue (HCF)-Versuchen nachgewiesen. Da sich die optimierten Parametersätze innerhalb der Limits der MTU-Norm als auch der amerikanischen ASTM-E1417 (Standard Practice for Liquid Penetrant Testing) befinden, können diese Parameter in die Serienprüfung ohne Veränderung der Zulassung eingeführt werden.

Die Möglichkeit zur Umsetzbarkeit einer FPI-Auswertung mit Hilfe einer automatisierten Bildauswertung an einem FPI-Messplatz wurden auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen geprüft. Es konnte mit Hilfe einer POD-Studie

gezeigt werden, dass der klassische Prüfprozess störungsfrei unterstützt wird. Dies konnte mittels Vergleich der Detektion von Fehlstellen bzw. zur Unterscheidung Fehlstelle vs. HGF zwischen klassischer FPI und beim Einsatz von Bildverarbeitungsverfahren am FPI-Messplatz gezeigt werden. Das zeitliche Erscheinungsbild von FPI-Rissanzeigen ist teilweise identisch zu den HGF-Signalen. Die Intensität der Anzeigen wird schwerpunktmäßig durch die Wahl des Entwicklers beeinflusst. Es zeigte sich, dass die Risse nicht grundsätzlich heller sind als die HGF-Anzeigen. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich allein durch den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems HGF- und Rissanzeigen nicht unterscheiden lassen. Das Bildverarbeitungssystem wird zukünftig vor allem zur quantitativen Bewertung und zur Dokumentation der FPI-Messungen eingesetzt, was zu einer Entlastung der Mitarbeiter führt und eine auditsichere Dokumentation und Datensicherung gewährleistet.

1.4.2 AP2.2 Optimierte Ermittlung standardisierter Fertigungsparameter

Die Optimierte Ermittlung standardisierter Zerspanungsparameter an bereits in der Fertigung eingeführten Werkstoffen als auch die Suche nach optimalen Zerspanparametern bei neuen, insbesondere unbekanntem Werkstoffen bzw. Werkstoffklassen (z.B. Titanaluminide) war die Hauptaufgabe in diesem Arbeitspaket. Um diesen Bedarfen der Fertigung gerecht zu werden, wurden aus der Vielzahl von statistischen Methoden zwei Verfahren ausgewählt:

- Abgewandelte univariate Methode:
 - Startpunkt für globale Optimumsuche
 - Erhöhung und Bewertung der Schnittgeschwindigkeit nach demselben Prinzip wie bei der Vorschubsuche (siehe Abbildung 1.4.2.1).
 - Endgültige Überprüfung des neu abgeleiteten Optimums (siehe Abbildung 1.4.2.2)
 - Statistische Überprüfung des Optimums (mindestens drei Wiederholungen)
 - Vorteile der Methode: schnelle Fokussierung auf einen Quadranten; Erhöhung des Aufwandes resultiert in einer direkten Erhöhung der Genauigkeit des Op-

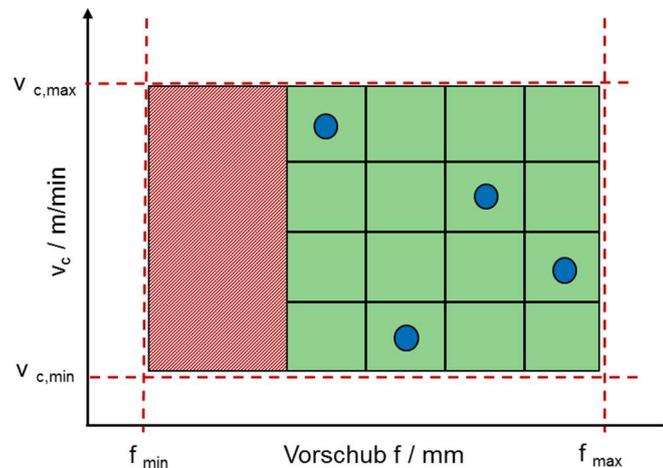


Abbildung 1.4.2.3: Prinzip der optimalen Schnittwertsuche mit Latin Hypercube Sampling

Beim Latin Hypercube Sampling werden in einem vorgewählten Raum (grünes Feld in der Abbildung 1.4.2.3 matrixartig erste Startparameter gesetzt (hier 4 Startpunkte im 4×4 Raster) untersucht. Diese Methodik eignet sich besonders für die Ermittlung der ersten Startparameter bei der Fertigungserprobung einer noch unbekanntes Werkstoffklasse und liefert so erste funktionierende Startparameter für eine weitere Optimierung.

Die „Abgewandelte univariate Methode“ basiert auf einem bereits vorhandenen Startparametersatz, der entweder aus Vorversuchen ermittelt wurde oder durch „Querlesen“ aus den Bearbeitungsparametern vergleichbarer Werkstoffe (z.B. DA718 aus Inco718) gewählt wurde. Da dieser Ausgangszustand bei der deutlichen Mehrzahl der Optimierungsfragestellungen in der Fertigung auftritt, wurde diese Methodik bevorzugt.

Erste Versuche zeigten, dass die zunächst geplante 3×3 -Matrix (3 Vorschübe, 3 Schnittgeschwindigkeiten, mit Zwischenpunkten) zur Überprüfung der Anwendbarkeit von statistischen Methoden nicht ausreichend ist, da die Optima teilweise nur angedeutet waren. Daher wurde die Matrix um zusätzliche Punkte erweitert. Auf dieser Basis wurden die noch ausstehenden Versuche durchgeführt und die Ergebnisse der voll faktoriellen Versuchsplanung mit den Ergebnissen aus der abgewandelten univariaten Methode verglichen und gegenübergestellt. Vergleicht man die voll faktorielle und statistische Versuchsmethode, so zeigen die Versuchsergebnisse eine gute Übereinstimmung der gefundenen Optima.

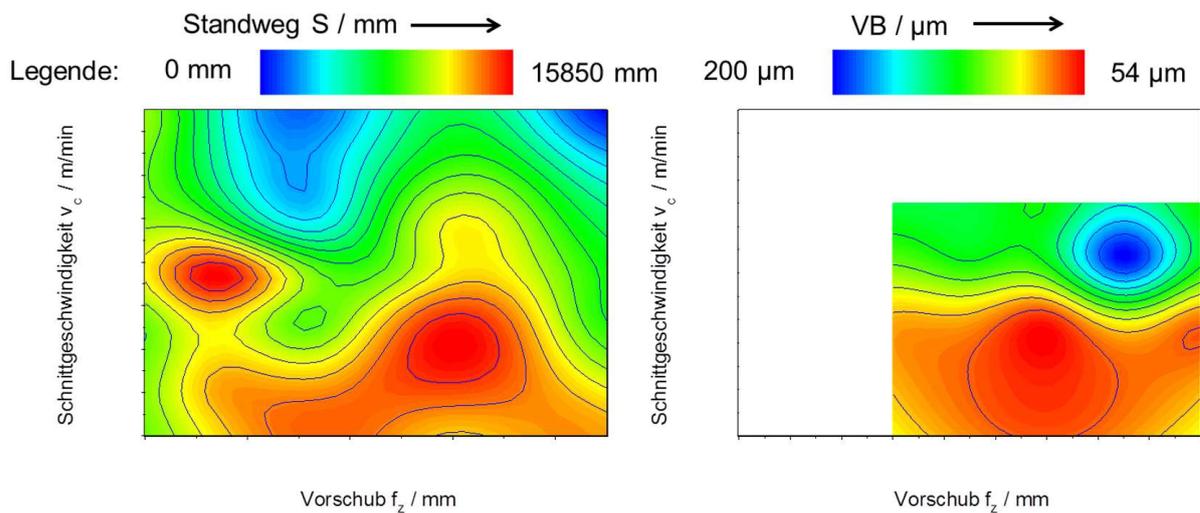


Abbildung 1.4.2.4: Vergleich voll faktoriellem (links) zu teilfaktoriellem Versuchsplan (rechts)

Die Abbildung 1.4.2.4 zeigt den Vergleich zwischen einem voll faktoriellen und einem teilfaktoriellen Versuchsplan für eine Fräsbearbeitung, wobei beim voll faktoriellen Versuchsplan der Standweg berücksichtigt wurde, während beim teilfaktoriellen Plan der Werkzeugverschleiß als Kriterium verwendet wurde. Der Standweg des Werkzeugs verhält sich ggü. dem Verschleißwert VB bei einem stabilen Zerspanprozess und theoretisch idealem Verschleißfortschritt entgegengesetzt proportional, d.h. ein maximaler Standweg wird mit einem minimalen Verschleiß VB erzielt. Beide zeigen das Einsatzoptimum des Werkzeuges im gleichen Bereich der Schnittgeschwindigkeit-Vorschub-Kombination. Da die statistische Methode mit weniger Messpunkten arbeitet, ist das Optima weniger detailliert ausgeprägt als bei der voll faktoriellen Methode.

Des Weiteren wurde untersucht, wie die Versuchsergebnisse aus- und bewertet werden können. Hier bietet sich das Netzdiagramm an. Verschiedene Bewertungsgrößen können bei dieser Art von Diagramm berücksichtigt werden, wie z.B. Verschleiß, Standweg, Oberflächenrauheit, Schnittgeschwindigkeit oder Vorschub (Abbildung 1.4.2.5).

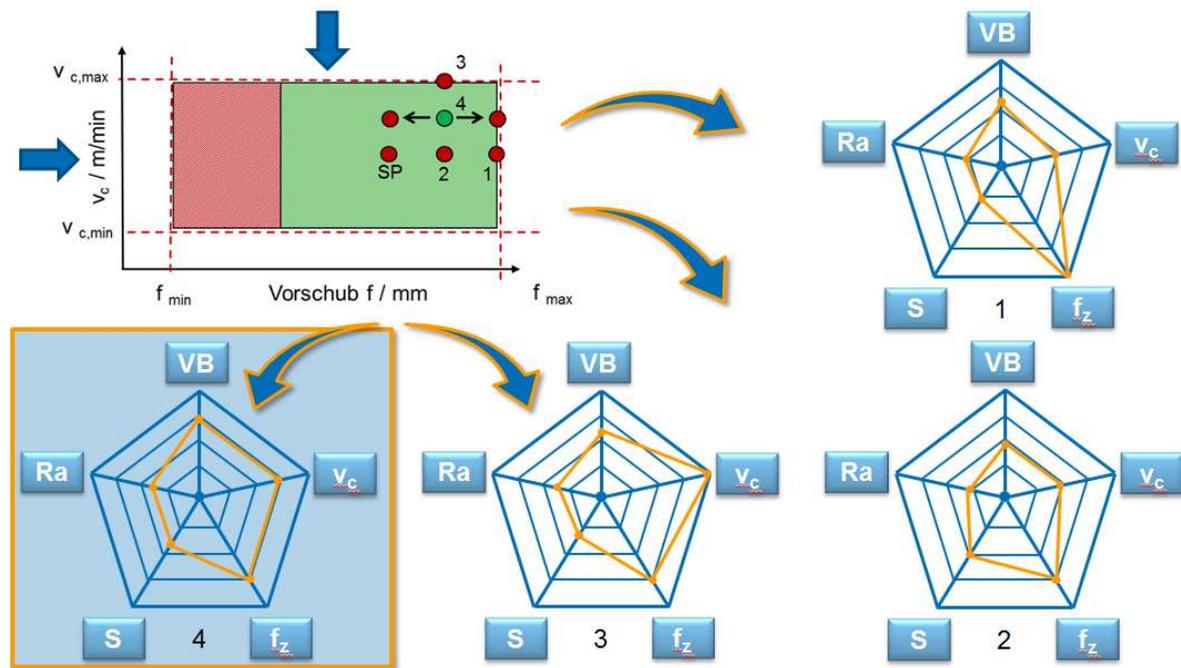


Abbildung 1.4.2.5: Ableitung von Parameter-Netzdiagrammen für die Betrachtungspunkte aus der univariaten Optimumsuche

Durch die entwickelte Methode können Ressourcen für die Identifizierung optimaler Bearbeitungsparameter minimiert werden. Der resultierende Versuchsaufwand der entwickelten Methode beim Bohrprozess betrug lediglich 12% des Aufwandes des voll faktoriellen Versuchsplans. Beim Fräsen betrug der Aufwand 17%, was zu einer deutlich messbaren Einsparung an Versuchszeit, Versuchsmaterial und letztlich Erprobungskosten führt.

Im Rahmen eines Abschlussmeetings für dieses Arbeitspaket wurden noch einmal die Vor- und Nachteile der verschiedenen statistischen Methoden diskutiert. Dabei wurden die nichtgewählten Methoden abschließend bewertet (Abbildung 1.4.2.6).

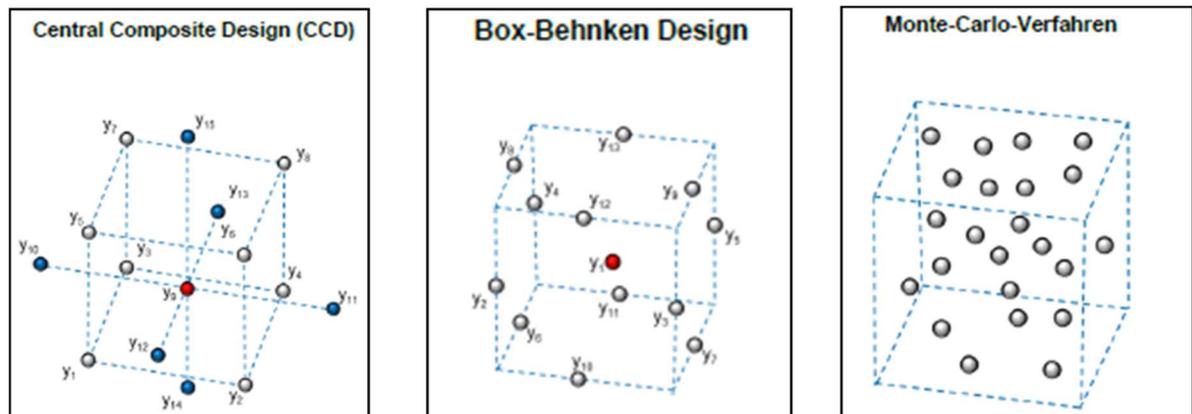


Abbildung 1.4.2.6: Nichtgewählte statistische Verfahren für Untersuchungen im Optimierungsgebiet

Das „Monte-Carlo-Verfahren“ kommt häufig im Kontext mit Computersimulationen zum Einsatz, nachteilig wirken sich die hohe Anzahl notwendiger Versuche aus, um den gesamten Versuchsraum abzudecken. Die Randbereiche werden dabei wenig betrachtet.

Die Methodik „Box-Behnken Design“ ist grundsätzlich für eine Versuchsplanung mit 3 bis 5 Faktoren geeignet. In den betrachteten Fällen liegen jedoch nur zwei Faktoren vor. Für diese Voraussetzungen ist das „Box-Behnken Design“ zu aufwendig und würde keine Reduzierung des Versuchsaufwandes bewirken. Mit steigender Faktorenanzahl kommt zudem ein Einsatz des „Central Composite Design (CCD)“ in Betracht.

Generell gilt, dass für Versuchspläne bezüglich der Untersuchung großer Parameterräume mit drei oder mehr Faktoren und der Abhängigkeiten vieler Wechselwirkungen (wie z.B. bei der Additiven Fertigung) die oben aufgeführten Methoden grundsätzlich besser geeignet sind. Für die Zerspanuntersuchung mit vergleichsweise wenigen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung haben sich die beiden untersuchten Methoden (Latin Hypercube Sampling und abgewandelte univariate Methode) als zielführend und ausreichend erwiesen. Beide Verfahren werden innerhalb für Untersuchungen in der Zerspanungsentwicklung als Standard Work Prozess eingeführt.

1.4.3 AP2.3 Entkopplung Mensch und Maschine

Drehen mit aktiver B-Achse

Mit der neuartigen Drehtechnologie mit aktiver B-Achse beim Drehen wird es möglich, den Eingriffsbereich der Werkzeugschneide zu vergrößern, so dass die tatsächliche Nutzlänge der aktiven Werkzeugschneide signifikant vergrößert werden kann. Dies führt zu einer deutlich höheren Werkzeugstandzeit und damit zu einer Reduktion des Werkzeugverbrauchs. Ein weiterer Effekt ist die Reduktion der erforderlichen werkzeughalter für die Drehbearbeitung kompletter Konturzüge.

Die Arbeiten an diesem Arbeitspaket wurden mit der Durchführung eines vergleichenden Stichversuches mit und ohne aktive B-Achse begonnen. Dazu wurden vergleichende Plandrehversuche an einem DA718 Schmiederohrteil für eine Turbinenscheibe auf Monforts Unicen 1000 Drehfräsmaschine durchgeführt. Es wurde eine Standarddrehplatte RCGX-060600T-T01 mit dem Keramik-Schneidstoff WG300 und Standardparametern verwendet. Je Schnitt wurde eine Einsatzzeit von 1,6 min mit einem Drehweg von ca. $l_c = 420$ m eingestellt. Abbildung 1.4.3.1 zeigt die Situation des Schneideneingriffs bei einem diskontinuierlichen Einsatz der B-Achse zwischen -115° bis -70° .

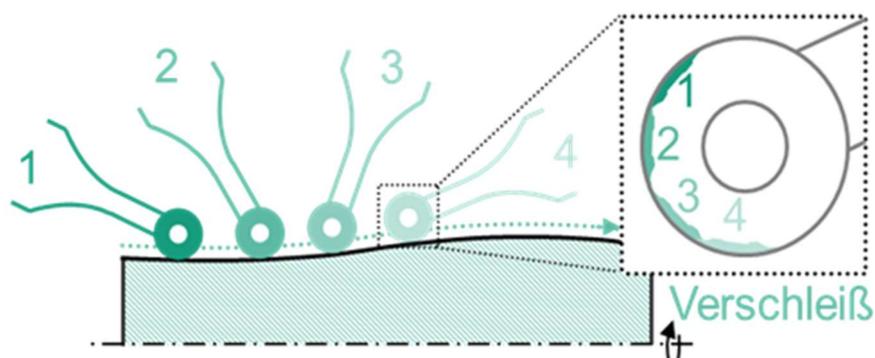


Abbildung 1.4.3.1: Beispiel für Einsatz der aktiven B-Achse (diskontinuierlich)

Der vergleichende Stichversuch zeigt ein deutlich verändertes Verschleißverhalten mit einer um den Faktor 3 erhöhten Werkzeugstandzeit. Die Verbesserung resultiert aus der Verteilung des erlaubten Verschleißes auf einen größeren Bereich des Schneidenumfangs bei der eingesetzten Rundschneidplatte. Mit einer festen Win-

keleinstellung ohne Schwenken der B-Achse können nur zwei Drehschnitte bis zum Erreichen des Verschleißlimits $V_{B_{max}}$ durchgeführt werden. Mit der Schwenkung der B-Achse um 45° lassen sich 6 Schnitte mit demselben Verschleißlimit durchführen.

Um die Vergleichbarkeit der Maschinen zu gewährleisten erfolgte an zwei Maschinen bei MTU in München und an der Maschine des Fraunhofer IPT in Aachen Kräftermessungen. Die Messungen zeigten, dass eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Außerdem wurden Versuche zum Verschleißverhalten mit und ohne aktive B-Achse beim Fraunhofer IPT durchgeführt, die die Ergebnisse erster Versuche bei MTU München bestätigen:

- Plandrehen an DA718 auf vergleichbarer Maschine am Fraunhofer IPT
- Verwendung von Standardparametern
- Je Schnitt ca. 1 min Einsatzzeit bei ca. 1000 m Drehweg
- Drehen mit simultan veränderter B-Achse ($-90^\circ > -70^\circ > -90^\circ$)
- Drehen mit inkrementell veränderter B-Achse ($-90^\circ // -70^\circ$)

Im Ergebnis der 3-achsigen Versuche konnte nachgewiesen werden, dass durch die Verteilung des Werkzeugverschleißes entlang eines größeren Bereichs der Schneidkante eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit möglich ist. Es zeigt sich in den ersten Versuchsreihen, dass eine Verdoppelung der Schneideneingriffslänge ebenso zu einer Verdoppelung der Werkzeugstandzeit führen kann. Dabei ist es egal, ob die Kontaktzone inkrementell (2 + 1-achsiges Drehen) oder kontinuierlich (simuliertes 3-achsiges Drehen) variiert wird.

Zusätzlich zu den bereits stattgefundenen Versuchen zum Verschleißverhalten wurden Versuche zur Oberflächenbeschaffenheit an DA718 durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde jeweils ohne veränderte B-Achse und mit simultan veränderter B-Achse gedreht. Ziel war es, den Kopfversatz und die Kompensationswerte zu ermitteln. Die Versuche haben bestätigt, dass die Kompensationswerte des Kopfversatzes und somit der entwickelte Berechnungsalgorithmus funktionieren. Diese Funktionalität ist unabdingbar für die Einhaltung der Genauig-

keitsforderungen beim Längs-, Plan- und Konturdrehen unter verschiedenen B-Achswinkeln.

Weitere Versuchsaufbauten zeigen, dass auch die Vorgaben bezüglich der erreichten Rauheit und Ebenheit realisiert werden können. Es wurde nachgewiesen, dass auch die Schneidenradiuskorrektur mit TRAORI und aktiver B-Achse funktioniert. Mit TRAORI wird für die verschiedensten 5-Achskinematiken eine Online-Transformation der Werkzeugmittelpunktbahn auf die Maschinenachsen vorgenommen. Programmiert wird wie üblich die Kontur am Werkstück und zusätzlich die Orientierung des Werkzeugs. Zudem ist bei den verwendeten Schlichtparametern keine Abdrängung des Werkzeughalters festzustellen. Hierbei ist in einem Überlagerungsbild gezeigt, wie sich die Bearbeitung der Planfläche mit unterschiedlichen Schwenkwinkeln am Originalbauteil einer Turbinenscheibe darstellt (Abbildung 1.4.3.2).



Abbildung 1.4.3.2: Drehbearbeitung mit aktiver B-Achse (Überlagerungsbild)

Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass ein erheblicher Aufwand entstehen wird, die Ergebnisse auf die weitestgehend baugleichen Maschinen zu übertragen. Dies ist zum einen dadurch begründet, dass die Monforts Unicen 1000 vom IPT Aachen nach den häufigen Maschinenausfällen technologisch mit einem steiferen, robusten Schwenkkopf für die B-Achse ausgerüstet wurde, während die MTU-Maschinen den

serienmäßig verbauten Schwenkkopf mit einem anderen Steifigkeitsverhalten besitzen. Zum anderen wird in der MTU Serienfertigung ein anderes Programmiersystem mit entsprechenden Post-Prozessoren verwendet. Eine Drehbearbeitung mit aktiver B-Achse setzt TRAORI-Funktionen voraus, was wiederum die heutigen Serien-Postprozessoren nicht leisten.

Nach Abschluss der Voruntersuchungen am IPT Aachen wurden die Ergebnisse, basierend auf den NC-Programmen auf das im Projekt gewählte Demonstratorbauteil auf die Serienmaschinen bei MTU übertragen (Abbildung 1.4.3.3).



Abbildung 1.4.3.3: Serienmaschine Monforts Unicen 1000 in der Rotorfertigung MTU München

Bei den Erprobungen wurden mit Serienparametern die finalen Drehkonturen der Eintritts- und Austrittsseite der Niederdruckturbinenscheibe gefertigt (Abbildung 1.4.3.4). Die NDT-Scheiben wurden im gespannten Zustand mit dem in der Maschine integrierten Werkstückmesssystem vermessen. Im gespannten Zustand konnte nachgewiesen werden, dass die Kernmaße den Zeichnungsforderungen entsprechen. Nach dem Abrüsten von der Maschine und der Vorrichtung wurden die Erprobungsteile im entspannten Zustand auf der Koordinatenmessmaschine (CMM) gegengeprüft und die Messergebnisse bestätigt.

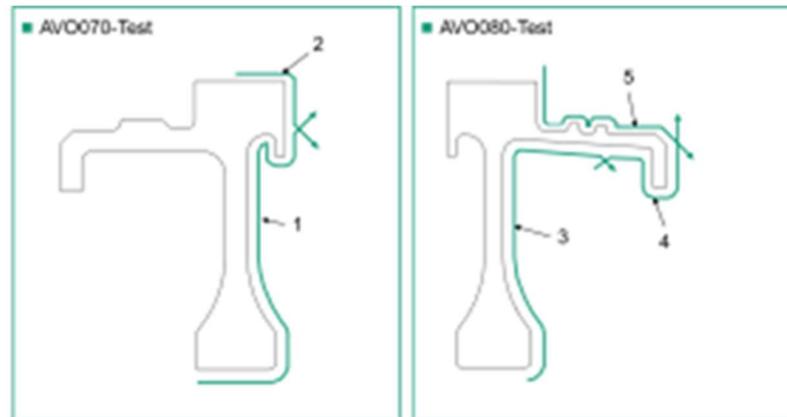


Abbildung 1.4.3.4: Schnittaufteilung bei der Fertigung des Demonstratorbauteils NDT-Scheibe

Der Verschleiß der Wendeschneidplatten verhielt sich analog zu den Ergebnissen der Analogieversuche. Somit bestätigt sich nach den ersten Versuchen, dass sich der theoretische Standzeitvorteil in die industrielle Praxis übertragen lässt. Die Zeichnungsvorgaben bezüglich der zu erreichenden Rauheit und Ebenheit konnten erfüllt werden.

Im Rahmen einer weiteren Optimierung wurden drei neu designte und mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) nachgerechnete Ausführungen von Drehwerkzeughaltern speziell für die Verwendung mit schwenkender B-Achse an der Monforts Unicen 1000 entwickelt und getestet (Abbildung 1.4.3.5). Durch den Einsatz dieser Werkzeughalter konnten die notwendigen Haltervarianten zur Bearbeitung reduziert werden, was im zukünftigen Serienbetrieb zu einer Einsparung durch die Anzahl der notwendigen Werkzeughalter führen wird und eine Kostenreduktion bei der verschleißbedingten Wiederbeschaffung erwarten lässt. Das Verhalten der Werkzeughalter während der Bearbeitung wurde durch die Maschinenbediener der Serienfertigung der MTU positiv bewertet. Auch bei höheren Belastungen traten keine Vibrationen auf und es war keine Abdrängung festzustellen.

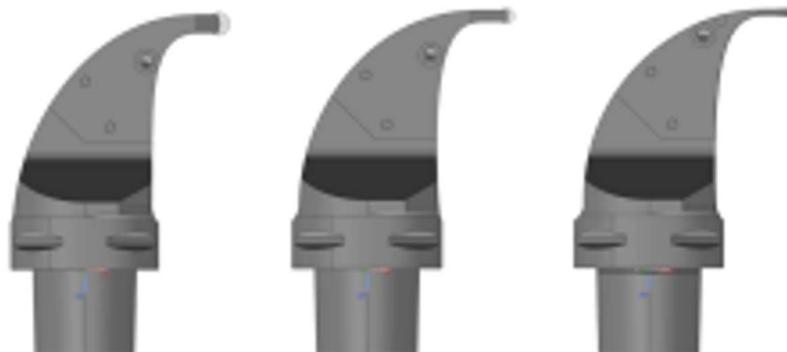


Abbildung 1.4.3.5: Angepasste Werkzeughalter für das Drehen mit 3-Achs-Drehen

Radiusfräsen an Bohr- und Räumprofilen

Für die Bearbeitung der Bauteilkanten an den Bohr- und Räumprofilen wurde eine Bewertungsmatrix erstellt. Diese beinhaltet die Vielzahl der aufgrund der unterschiedlichen Designforderungen alternativen Bauteilkantendefinitionen. In einem ersten Schritt wurden die technischen Anforderungen hinsichtlich Bearbeitung abhängig von den unterschiedlichen Bauteilkantenformen durch die Strukturmechanik und die Fertigung hinsichtlich technisch-wirtschaftlicher Randbedingungen bewertet (Abbildung 1.4.3.6).

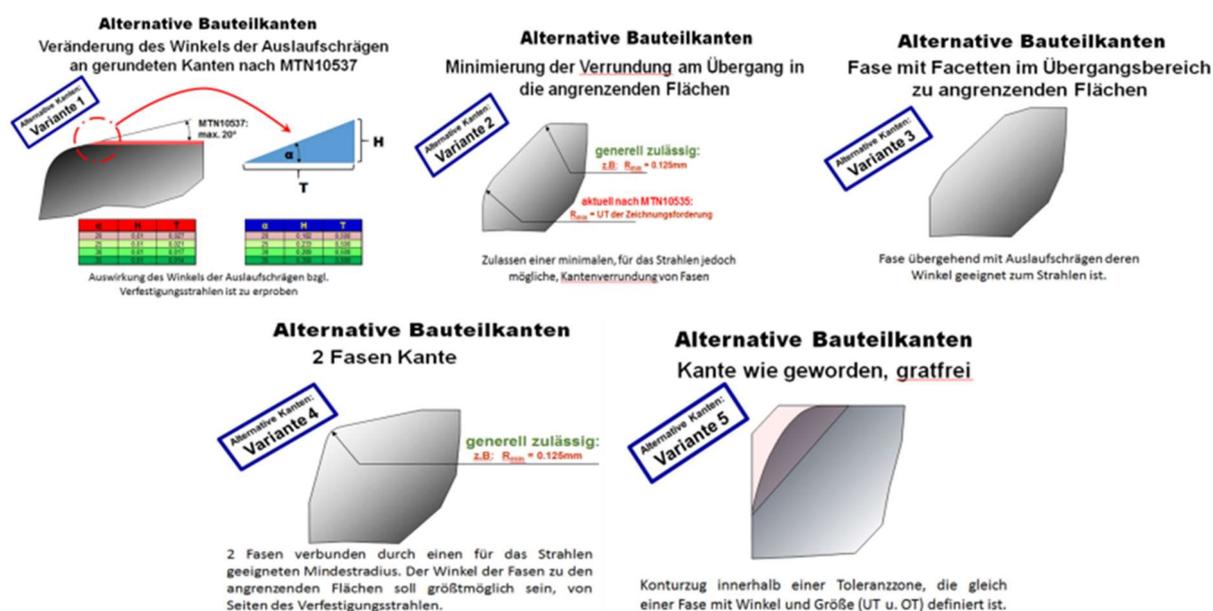


Abbildung 1.4.3.6: Alternative Bauteilkantendefinitionen für Räum- und Bohrfeatures

Auf Basis des vorhandenen Maschinenparks wurde der Bedarf für eine verbesserte Mess- und Korrekturprozedur ermittelt. Dabei zeigt sich, dass sowohl die Bauteilkanten als auch die Bearbeitungswerkzeuge bezüglich Form und Lage mittels Konturvermessung genauer vermessen werden müssen. Eine erste Analyse der am Markt verfügbaren Sensoren und Messtechniken ergab, dass nur eine geringe Zahl überhaupt geeignet erscheint, die komplexe Messaufgabe mit der erforderlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erfüllen zu können. Es bestätigte sich, dass die Herausforderungen in diesem Arbeitspaket in der softwaretechnischen Verarbeitung der Messdaten und der Entwicklung der entsprechenden Korrekturprozeduren für die Werkzeugpositionierung und die Bahnplanung liegen. Dabei zeigt sich, dass sowohl die Bauteilkanten als auch die Bearbeitungswerkzeuge bezüglich Form und Lage vermessen werden müssen.

Eine Toleranzkettenanalyse des Gesamtsystems wurde durchgeführt. Durch die Analyse der Prozesse und Prozesskette hinsichtlich Einflussgrößen nach 5M, konnte eine Vielzahl von Einflussfaktoren gefunden werden. Eine Strukturierung der gefundenen Faktoren in die Themenfelder Maschine, Werkzeug, Bauteil und Messen ist die Grundlage um die Wirkungen und Wechselwirkungen zu ermitteln. Anhand der Bewertung konnten Optimierungspotentiale und der Schwankungsbereich aufgezeigt werden. Im Rahmen einer Marktanalyse wurden existierende Messsysteme für die Werkzeugvermessung und für die Vermessung der Bauteillage in der Fertigungsmaschine ermittelt und bewertet. Mit Hilfe der Marktanalyse und dem erfassten Ist-Stand wurden Optimierungspotentiale erarbeitet. Diese sind: a) Steigerung der Messgenauigkeit des Sensors durch Umstellung auf ein Bügelmesssystem bei der Werkzeugvermessung, b) Integrierte Reinigung des Werkzeugs während des Messprozesses und c) Optimierung der Tastereinmessung für die Definition der Bauteillage.

Um die Bauteillagevermessung zu optimieren, wurden Versuche mit alternativen Messtastern durchgeführt, die eine höhere Genauigkeit versprachen. Die Analyse der Messergebnisse zeigte jedoch, dass der Wechsel der Messtaster zu keiner Verbesserung führt. Durch den Einsatz von neuen Messzyklen, welche eine veränderte Antaststrategie an das Bauteil erfordern, konnte eine Verbesserung der Bauteillagebestimmung nachgewiesen werden.

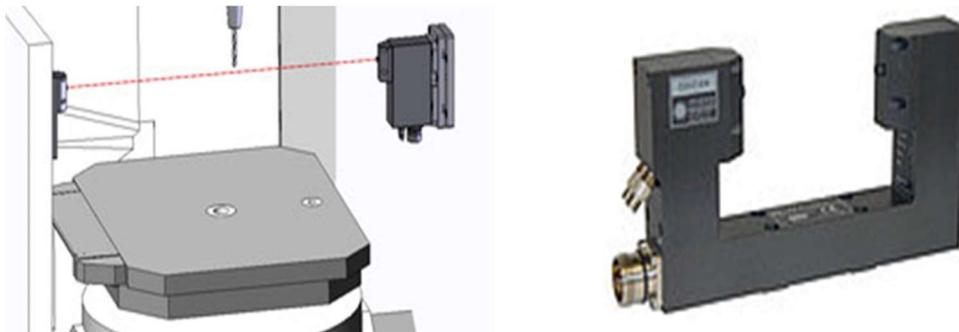


Abbildung 1.4.3.7: Vergleich Single-System zu Bügelmesssystem zur Werkzeugvermessung

Ein Vergleich eines laserbasierten Single-Systems mit einem laserbasierten Bügelmesssystem zur Werkzeugvermessung zeigte, dass die Messergebnisse des Bügelmesssystems genauer sind (Abbildung 1.4.3.7). Die Messgenauigkeit konnte gesteigert werden. Eine Reduzierung der Messabweichung von ca. $20\mu\text{m}$ auf ca. $5\mu\text{m}$ ist bei einem Austausch der Systeme möglich. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die Prozessstabilität in der rauen Fertigungsumgebung einer Bearbeitungsmaschine deutlich höher ist.

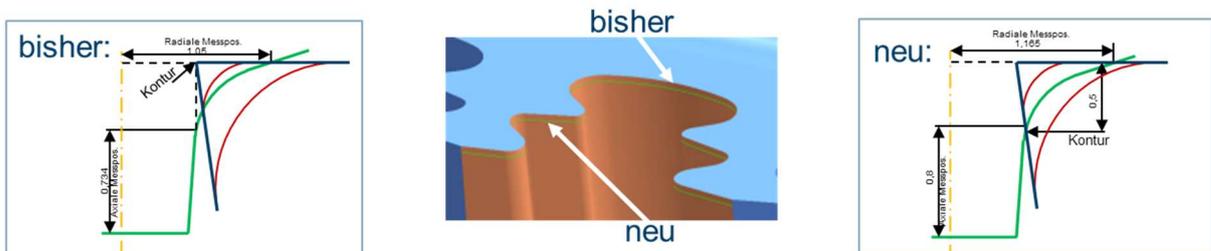


Abbildung 1.4.3.8: Neue Programmierstrategie zum Werkzeugeinmessen vor Fertigungsbeginn

Bei der Bauteillagevermessung und insbesondere beim Finden und Einmessen durch das Räumen der Tannenbaumnuten entstehenden Kante zu den Planflächen der NDT-Scheibe konnte ebenfalls die Prozessstabilität durch eine optimierte Antaststrategie und die Verwendung alternativer Messzyklen erhöht werden. Dazu erfolgt das Antasten an den tragenden Flanken statt im Nutgrund der Räumnut (Abbildung 1.4.3.8). Da das Toleranzband der tragenden Flanken der Schaufelnut deutlich kleiner ist als die zulässige Toleranz im Nutgrund, werden bezüglich des Einmessens

bessere, d.h. reproduzierbarere Ergebnisse erzielt.

Gewindebohren und Fräsen an großen Gehäusebauteilen

In diesem Arbeitspaket wird vor allem das Ziel verfolgt, eine Reduzierung der manuellen Maschineneingriffe durch den Bediener, die mit einem Programmstopp verbunden sind, zu reduzieren. So müssen im aktuellen Serienbetrieb z.B. die Schmierleitungen für das Fertigen der Gewinde manuell angebracht bzw. wieder entfernt werden, auch die Zwischenprüfung der Gewinde erfolgt durch manuellen Werkereingriff. Folglich ist nachteilig an diesen Abläufen, dass eine mannlose Fertigung z.B. über das Wochenende nicht möglich ist. Zudem findet eine ständige Vermengung des Kühlschmierstoffs (KSS) mit dem Gewindeschneidöl statt, was die Leistungsfähigkeit und die Standzeit des KSS massiv reduziert und einen häufigen KSS-Wechsel erfordert. Mit der Umsetzung eines neuen Gewindebearbeitungsverfahrens soll der KSS-Wechsel halbiert werden.

In den Vorversuchen wurde mittels metallographischer Analyse festgestellt, dass das Verfahren Gewindeformen aufgrund der starken Verformung der Randzone in den Gewindegängen nicht zulässig ist. In Zusammenarbeit mit drei verschiedenen Werkzeugherstellern und dem bereits auf der Maschine installierten Kühlschmierstoff Ecocool TN2525 wurden das Gewindeschneiden erprobt.

Dazu wurden Versuche an Originalbauteilen durchgeführt (siehe Abbildung 1.4.3.9). Die Versuche zeigen, dass die geforderten Standzeiten und Werkzeugverschleißanforderungen mit den ausgewählten Werkzeugen und Schnittwerten erzielt werden können.

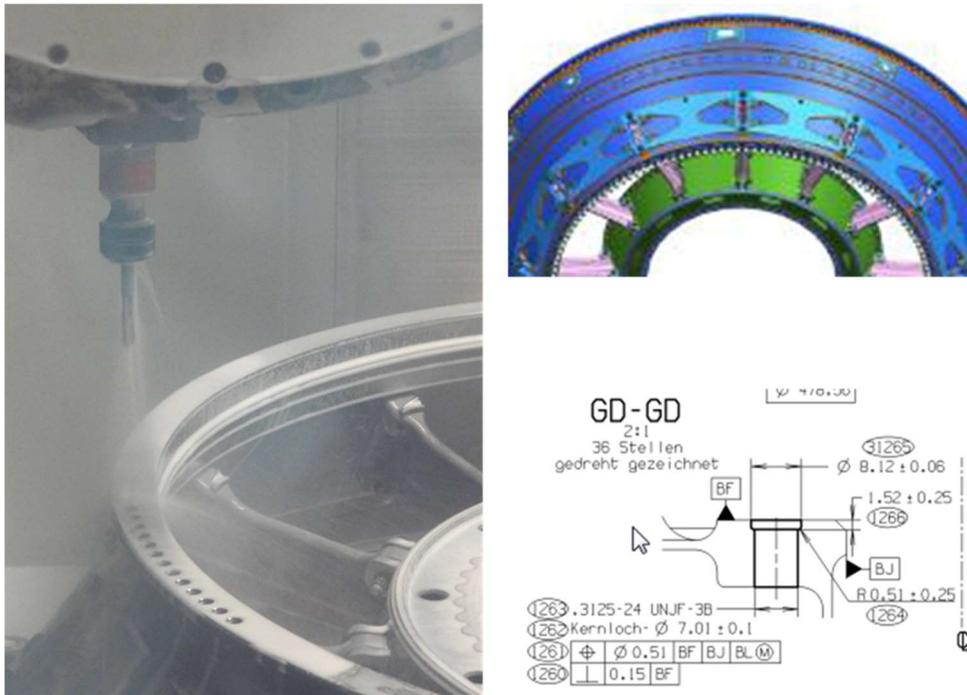


Abbildung 1.4.3.9: Gewindebohren an einem Gehäusebauteil aus Inconel 718

Für eine weitgehend mannarme Gewindefertigung muss ein Ausbrechen der Werkzeugschneiden sicher vermieden werden. Dies ist nur mit einer Überwachung der Zerspankräfte und Drehmomente beim Gewindebohren möglich.

Die Herausforderungen bestehen vor allem darin, dass die gemessenen Nutzsignale (Kraft- und Drehmomentwerte) beim Gewindebohren deutlich kleiner sind als beispielsweise beim Bohren ins volle Material. Ziel soll es dabei sein, eine automatisierte Gewindeprüfung durch das sogenannte Gewindelehren umzusetzen. Erste Versuche an Testbauteilen haben gezeigt, dass die Integration von automatisierten Methoden zum Gewindelehren in die Fertigungsmaschine möglich ist. Als technologische Neuerung ist festzuhalten, dass es erstmals bei der Fertigung von hochwarmfesten Nickelbasis-Schmiedelegerungen gelungen ist, wirtschaftlich und prozessstabil umsetzbare Parameter für die Gewindefertigung mit einer Standard-Emulsion als KSS anstelle von schneidöl industriell umzusetzen.

2 Literaturverzeichnis

keine

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Integrierte OEM/MRO Repair für Hochwertbauteile (Int_Rep)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Gerloff, Steffen	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2017
	6. Veröffentlichungsdatum März 2018
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MTU Aero Engines AG Postfach 50 06 40 D-80976 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 20T1304
	11. Seitenzahl 37
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 22
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Vorhaben ist Teil des Luftfahrtförderprogramms V (LuFo V) der Bundesregierung und wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 20T1304 gefördert. Ziel war zum einen die Schaffung von Voraussetzungen für eine wirtschaftliche und prozess-stabile Reparatur von gelaufenen zivilen rotierenden Hochwert-Bauteilen sowie zum anderen die Reduzierung der Kontroll-, Handlings- und prozessbegleitenden manuellen Tätigkeiten als Voraussetzung für konsequente Umsetzung einer Mehrmaschinenbedienung zur Entlastung des Maschinenbedieners in der Neuteilefertigung. Im Arbeitspaket „Blisk Repair“ wurden Untersuchungen zur wirtschaftlichen und prozessstabilen Reparatur von gelaufenen zivilen Blisks / IBRs durchgeführt. Auf der Basis statistischer Schadensfälle an Verdichterschaufeln wurden Methoden und Tools erarbeitet, um abhängig von der Schadensfall notwendige Reparaturmaßnahmen zu definieren. Nutzbare Reparatur-Fügetechnologien wurden ermittelt. Im Arbeitspaket „Prüf- und Fertigungsprozessadaption“ wurden Methoden entwickelt, um die Hintergrundfluoreszenz an Titanbauteilen bei der Eindringrissprüfung eliminieren bzw. verringern zu können. Für die optimale und kostenreduzierte Ermittlung von Fertigungsparametern wurden statistische Verfahren untersucht und in ihrer Umsetzbarkeit anhand der Optimierung von Zerspanverfahren erprobt. In einem weiteren fertigungsorientierten Arbeitspaket stand die Entkopplung Mensch und Maschine im Sinne von „Closed Door“-Anwendungen im Vordergrund. Dazu wurde eine neue Drehtechnologie auf 5Achsen-Drehfräszentren erfolgreich entwickelt und an seriennahen Prototypbauteilen erfolgreich umgesetzt. Zusätzlich wurden verbesserte Mess- und Korrekturprozeduren für die Fräsbearbeitung von Radien auf dem Bearbeitungszentrum realisiert. Für eine weitere Reduktion der manuellen Bedien- und Korrekturingriffe in die Maschinen wurde eine neue Gewindebearbeitungstechnologie mit der Nutzung des verfügbaren KSS anstatt des typischen Schneidöls erfolgreich entwickelt und erprobt.	
19. Schlagwörter Blisk, IBR, Eindringrissprüfung, Closed Door, Drehtechnologie, Gewindefertigung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Integrierte OEM/MRO Repair für Hochwertbauteile (Int_Rep)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Gerloff, Steffen	5. end of project 30.09.2017
	6. publication date March 2018
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) MTU Aero Engines AG Postfach 50 06 40 D-80976 München	9. originator's report no.
	10. reference no. 20T1304
	11. no. of pages 37
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures 22
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This project is part of the aviation funding program V (LuFo V) and has been supported by the German Ministry of Economics under the reference No. 20T1304. The technical objectives of the project was to investigate opportunities and challenges for a high value rotating components repair and to investigate possibilities of reduction of control, handling and process-accompanying manual activities as a prerequisite for the consistent implementation of a multi-machine operation. In the work package "Blisk Repair" investigations were carried out on the economic and process-stable repair of used commercial Blisks / IBRs. On the basis of statistical damage cases on compressor blades, methods and tools were developed to define necessary repair measures depending on the case of damage. Useful repair joining technologies were identified. In the work package "Test and Manufacturing Process Adaptation" methods were developed to eliminate or reduce the background fluorescence of titanium components during the Fluorescent Penetrate Inspection (FPI) process. For the optimal and cost-reduced determination of production parameters, statistical methods were investigated and their feasibility was tested on the basis of the optimization of machining processes. In another production-oriented work package "closed door" applications was in the foreground. For this purpose, a new turning technology has been successfully developed on 5axis turn-mill-machining centers and successfully implemented on production-near prototype components. In addition, improved measuring and correction procedures for the milling of radii on the machining center were realized. To further reduce the manual handling and corrective action on the machines, a new threading technology has been successfully developed and tested using the available coolants.	
19. keywords Blisk, IBR, fluoreszenz penetration testing, closed door, turning technology, thread machining	
20. publisher	21. price