

FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN, ENTWICKLUNGEN UND TRENDS IN TECHNOLOGIENETZWERKEN

G. Kappmeyer*, P. Janschek**, M. Baumgärtner***, C. Bremer****

* Rolls-Royce Deutschland
Ltd & Co. KG
Hohemarkstr. 60-70
61440 Oberursel

** Leistriz
Turbinenkomponenten
Remscheid GmbH
42859 Remscheid

*** Leistriz
Turbomaschinentechnik
GmbH
90459 Nürnberg

**** BCT GmbH
44227 Dortmund

1. ÜBERSICHT

Moderne Verdichtersysteme in Flugtriebwerken erfordern modernste Fertigungstechnologien sowie Technologiekompetenz zur wirtschaftlichen Herstellung gewichtsoptimierter und leistungsfähiger Komponenten. Die Weiterentwicklung bestehender Fertigungsprozesse und -verfahren sowie die Entwicklung neuer Technologien zur optimierten Fertigung hochintegrierter Komponenten setzt dabei die Bündelung von unterschiedlichen Kompetenzen voraus. Am Beispiel des im Rahmen des LuFo III vom BMWi geförderten Projektes OptiFer (Optimierte Fertigungsverfahren für Verdichter) werden Ergebnisse vorgestellt, die laufende und geplante Triebwerksentwicklungsprogramme unterstützen und die Grundlage für eine kostengünstige Verdichtertifertigung am Standort Deutschland bilden. Im Schwerpunkt der Betrachtungen stehen Aspekte der interdisziplinären Zusammenarbeit in Technologienetzwerken bei der Erarbeitung zukunftsweisender Technologien sowie die dadurch erreichten Ergebnisse im Rahmen solcher Entwicklungsprojekte.

2. BEZEICHNUNGEN

Blisk Bladed Disk („beschaufelte Scheibe“)
PECM Pulsed Electrochemical Machining (gepulste elektrochemische Bearbeitung)
CTS Close to size (konturnah)
HPC high pressure compressor (Hochdruckverdichter)
LPC low pressure compressor (Niederdruckverdichter)
MFS Milled from Solid (aus dem vollen gefräst)
LFW Linear Friction Welding (lineares Reibschweißen)

3. EINFÜHRUNG

Der Kundenwunsch nach kostengünstigem und gleichzeitig sicheren Lufttransport gepaart mit steigendem Umweltbewusstsein und somit der Forderung nach reduzierten Lärm-, Abgas- und Brennstoffverbrauchswerten führt zur Entwicklung von leichten, hochintegrierten und komplexen Triebwerkskomponenten zu gleichzeitig geringeren Herstellkosten. Daraus ergeben sich neue Anforderungen an angepasste Fertigungsstrukturen und Fertigungstechnologien, die das traditionelle Fertigungsumfeld verändern. Im Rahmen des Projektes OptiFer werden innerhalb eines integrierten Kompetenznetzwerkes Entwicklungen zur optimierten Fertigung von Verdichterkomponenten erarbeitet, die Prozesse in Herstellung und Reparatur unterstützen, deren Leistungsfähigkeit steigern oder alternative Verfahren entwickeln und erproben.

Als Bauteilgruppe stehen hier Verdichter in Blisk Bauweise im Vordergrund, die in modernen Triebwerken vermehrt Anwendung finden. Beispiele sind hier Verdichter des BR715 oder TP400 Triebwerks.



BILD 1. Hochdruckverdichterscheibe in Blisk Bauweise

Die Blisk-Bauweise unterscheidet sich grundlegend von der konventionellen Verdichterbauweise, da

hierbei die Herstellung der Schaufeln in die Prozesskette der Verdichterscheibenfertigung integriert wird. Dies hat Einfluss auf die gesamte Fertigung, den Betrieb und auch die Reparatur des Triebwerks. Damit sind Fragen nach dem Kundennutzen, Fertigungs- und Reparaturtechnologien und den bauteilbezogenen Kostenstrukturen direkt miteinander verknüpft und werden auch bei der Entwicklung von modernen Fertigungstechnologien aufeinander aufbauend betrachtet (Bild 2).

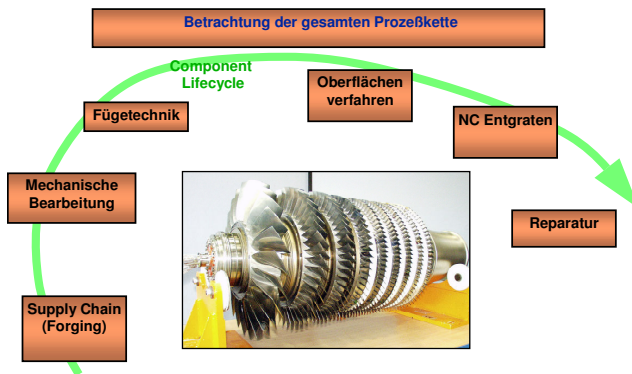


BILD 2. Prozesskette Komponentenfertigung einschließlich Reparatur

Aufbauend auf Arbeiten zur Betrachtung und Modellierung von Lebenszykluskosten und daraus abgeleiteten Forderungen zur Auslegung und Instandhaltung von Triebwerkskomponenten stehen folgende fertigungsorientierten Themenbereiche im Fokus:

- Konturnahes Schmieden
Einsparen von Material und Fertigungskosten
- Spanende Fertigung Blisk
Optimierte Frässtrategien und Herstellkostenreduktion
- PECM Fertigung Blisk
Fertigbearbeitung von Blisks mit gepulstem (Pulsed) ECM
- NC gesteuertes Entgraten
Entgraten integriert auf NC-Fräsmaschinen
- Endoskopische Reparaturverfahren
Technologie zur On-Wing-Reparatur von Blisks

Die Projekte werden in einzelnen Projektgruppen mit Beteiligung unterschiedlicher Industriepartner und Universitätsinstitute bearbeitet. Dieses „Kompetenznetzwerk“ ermöglicht eine ausreichende Spezialisierung auf technologisch entscheidende Randbereiche bei gleichzeitig guter Integration in die Gesamtzielstellung eines Projektes. Im folgenden sollen die behandelten Projekte vorgestellt und im Rahmen der Verdichterfertigung diskutiert werden.

4. VORSTELLUNG DER BEARBEITETEN TECHNOLOGIEBEREICHE

4.1. Lebenszykluskosten

Lebenszykluskosten beinhalten neben den Kosten für die Herstellung von Komponenten auch deren Wartungs- und Instandhaltungskosten. Signifikante Änderungen im Aufbau von Triebwerken und der Bauweise einzelner Komponenten führen hier zu deutlichen Unterschieden zwischen verschiedenen Triebwerkskonzepten. Um die Auswirkungen neuer Bauweisen auf die Kostenstrukturen über den gesamten Lebenszyklus eines Triebwerks hinweg zu verstehen, werden diese in Zusammenarbeit mit dem Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart modelliert und die Ergebnisse als Grundlage für die Entwicklung von Fertigungs- und Reparaturverfahren herangezogen. Schädigungsszenarien wie z.B. FOD (foreign object damage) (siehe Bild 3) werden dabei bzgl. der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens und der so entstehenden Kosten für Austausch der Komponente oder Reparatur bewertet [1]. Die Verfügbarkeit von Reparaturverfahren zur kostengünstigen Wiederherstellung von beschädigten Bauteilen erweist sich dabei als notwendige Voraussetzung für eine wirtschaftliche Nutzung von teuren Integralbauteilen wie Blisk-Verdichtern.

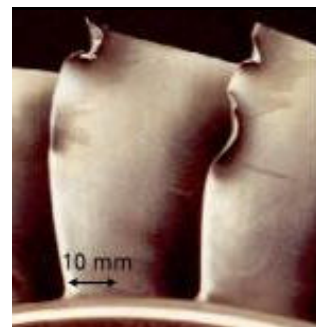


BILD 3. Beispiele von Fremdkörperschäden an Verdichterschaufeln

Beispiele für innovative Reparaturverfahren werden im Abschnitt „Endoskopische Reparaturverfahren“ näher beschreiben.

4.2. Effizienter Materialeinsatz und Optimierung der Herstellkosten - konturnahes Schmieden

Bei modernen Verdichterkomponenten kommen zumeist leistungsfähige Titanlegierungen zum Einsatz. Bei der Herstellung von Verdichterschaufeln in konventioneller Bauweise werden häufig Schmiedeverfahren zur Herstellung der Schaufeln eingesetzt. Dies führt zu relativ geringem Rohmaterialverbrauch im Bezug auf das Volumen des fertigen Bauteils. Bei Blisk-Verdichtern werden die

Schaufeln zumeist aus dem Vollen gefräst (MFS, milled from solid), wobei als Ausgangsmaterial ein entsprechend dimensionierter Schmiederohling verwendet wird. Bild 4 zeigt beispielhaft das Materialvolumen des Schaufelbereichs eines mehrstufigen Verdichters. Dabei wird ersichtlich, dass insbesondere die großen vorderen Stufen ein überproportional großes Werkstoffvolumen benötigen, das zunächst als Rohteil beschafft und anschließend bei der Bearbeitung der Schaufelbereiche möglichst wirtschaftlich wieder zerspannt werden muss.

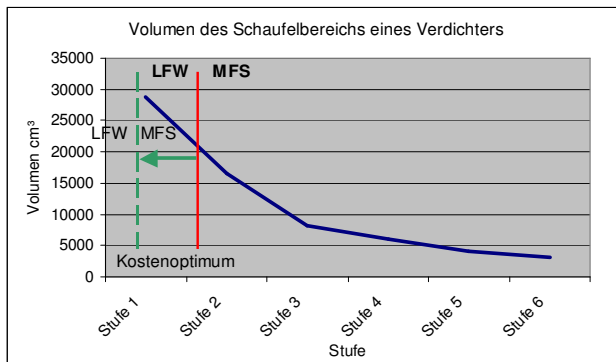


BILD 4. Volumina der Schaufelbereiche am Beispiel eines mehrstufigen Verdichters

Aus diesem Grund steigen die Kosten für die Herstellung aus dem Vollen für diese Komponenten meist deutlich an, weshalb zumeist auf alternative Herstellmethoden mit geringerem Materialeinsatz wie dem linearen Reibschweißen (LFW) zurückgegriffen werden muss. Bei diesem Verfahren werden vorgefertigte (geschmiedete) Schaufeln durch lineares Reibschweißen mit einem Scheibengrundkörper verbunden, wodurch eine Blisk mit größeren Schaufeln bei gleichzeitig deutlich geringerem Werkstoffeinsatz hergestellt werden kann. Für diese Herstellmethode sind jedoch gänzlich andere, zumeist sehr teure Fertigungseinrichtungen erforderlich.

Als Alternative zum linearen Reibschweißen wird deshalb von den Firmen Rolls-Royce Deutschland und der Firma Leistriz Turbinenkomponenten Remscheid eine Technologie vorangetrieben, bei der durch konturnahes Schmieden des Schaufelbereichs der Materialeinsatz bereits beim Schmieden deutlich gegenüber der Vollscheibe reduziert werden kann. Gleichzeitig ermöglicht diese Technologie signifikante Einsparungen bei der sonst notwendigen Schrumpferspannung der Schaufelzwischenräume. Damit kann das Kostenoptimum für aus dem Vollen gefräste Blisks hin zu größeren Schaufelgeometrien verschoben werden und so eine Vereinheitlichung der Fertigungsmethoden für einen ganzen Verdichter erreicht werden.

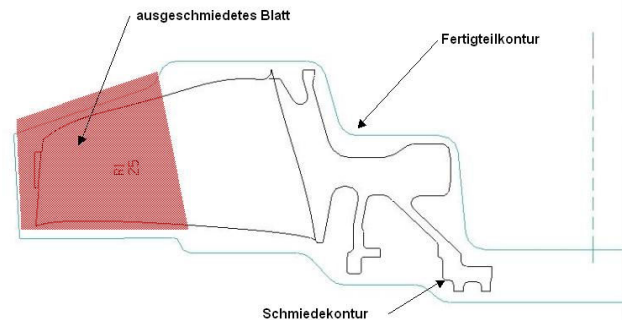


BILD 5. Konturnah geschmiedeter Bereich eines Blisk Schmiedeteils

Wesentlich ist dabei die Auslegung und Gestaltung der Schmiedegesenke, um gleichzeitig hohe Gesenkstandzeiten und eine maximale Materialeinsparung erreichen zu können (Bild 6).

Gips-Abdruck des Modell-Blisks

Blisk-Gesenk mit erodierten Gesenktaschen



BILD 6. Abdruck und Gesenk einer Hochdruckverdichter Blisk mit konturnah geschmiedeten Schaufeln

Die Materialeinsparungen liegen dabei in einer Größenordnung von ca. 18% des Schmiedeeinsatzgewichtes der gesamten Blisk, wodurch ein positiver Beitrag zur Verbesserung der Materialverfügbarkeit erreicht werden kann.

Die Geometrie des Schmiedegesenkes wurde so gewählt, dass sowohl eine gute Gesenkfüllung, als auch eine möglichst gute Annäherung an die fertige Schaufelgeometrie erreicht werden kann. Darüber hinaus lassen sich die Bearbeitungszeiten beim Fräsen durch Wegfall des zu zerspanenden Volumens deutlich reduzieren, da ein Großteil der Schrumpfbearbeitung durch Fräsen entfallen kann. Im Rahmen des Projektes wird exemplarisch an einer Blisk die modifizierte Prozesskette untersucht und die Einsparpotenziale durch Modellrechnungen und Fertigungsversuche ermittelt (Bild 7).

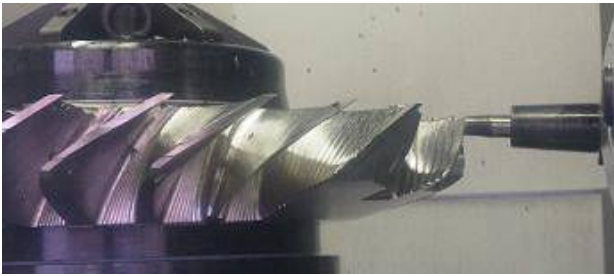


BILD 7. 5-achsige Fräsbearbeitung einer HPC Blisk

4.3. Spanende Fertigung von Blisk Verdichtern - optimierte Frässtrategien

Für kleine bis mittelgroße Blisks aus Titan-Legierungen von ca. 20 – 150 mm Schaufelhöhe stellt das 5-achsige Fräsen eine flexible und universell einsetzbare Fertigungsmethode dar. Weltweit wurden und werden vielfältige Fräsmethoden zur möglichst wirtschaftlichen Fräsbearbeitung entwickelt und eingesetzt. Dabei werden unterschiedliche Ansätze zur Leistungssteigerung beim Schruppfräsen wie auch beim Schlichtfräsen verfolgt. Hochgeschwindigkeitszerspanung, Einsatz neuartiger Werkzeugformen, optimierte Bahnformen und der Einsatz von flexiblen Programmiersystemen steht dabei im Vordergrund. Bild 8 zeigt eine Aufstellung verschiedener Fräsmethoden zur Blisk Bearbeitung sowie einige Anforderungen an das zu verwendende Maschinensystem.

	Schruppfräsen	Schlichtfräsen Schaufelblatt	Schlichtfräsen Schaufelkante	Schlichtfräsen Annulus	Maschinenanforderungen
Flankenfräsen			Nur 2D		Stiffigkeit, Dämpfung
Schlichtfräsen konv.					Stiffigkeit
Taumelfräsen					Stiffigkeit, Dynamik
Bohren					Stiffigkeit
Tauchfräsen					Stiffigkeit
Stirnfräsen (Scheibenfräser)					Stiffigkeit, Dämpfung
Punktkontaktfräsen umlaufend					Genauigkeit, Dynamik
Punktkontaktfräsen ziehend					Genauigkeit
Punktkontaktfräsen mit Tonnenfräser					Genauigkeit, Dynamik
Formfräsen (axial und/oder schräge Werkzeuganstellung)					Genauigkeit, Dämpfung, Stiffigkeit
Stripe Milling					Genauigkeit, Stiffigkeit

BILD 8. Fräsverfahren zur Blisk Bearbeitung

Maßgeblich für die Auswahl einer geeigneten Fräsmethode ist die individuelle Blisk Geometrie sowie die zu erreichenden Qualitätsanforderungen bzgl. Form- und Profilgenauigkeit. Moderne 3D-Schaufelgeometrien erfordern dabei spezielle Fräsmethoden wie z.B. das Punktkontaktfräsen oder die Nutzung von tonnenförmigen Fräsern. Damit ist gegenüber der Kugelform eine Vergrößerung des Bahnabstandes und somit eine Reduzierung der erforderlichen Fräszeit möglich. Zur Analyse verschiedener Frässtrategien bezüglich ihrer geometrie- und größenbezogenen Leistung und

somit der voraussichtlichen Fräsdauer wurde ein Modell entwickelt, dass unter Einbeziehung von Bliskgröße, Geometrie und Werkstoff die Abschätzung der Bearbeitungszeit verschiedener Fräsmethoden ermöglicht, ohne eine vollständige Programmierung und Simulation des Fräsprogramms durchzuführen.

Somit ist eine Vorauswahl der günstigsten Frässtrategie vor Beginn der eigentlichen NC-Programmierung möglich.

Bild 9 zeigt die Kriterien zur Erfassung der Abmessungen und Spezifikation der jeweiligen Blisk Stufe. Der modulare Aufbau zur Einbindung einzelner Teilprozesse unterstützt dabei eine detaillierte und strukturierte Prozessmodellierung unter Einbeziehung sinnvoller Zerspanungsparameter. Durch Variation der Parameter, z.B. bei Einsatz neuer Werkzeug- oder Schneidstofftechnologien, können dabei deren Einflüsse auf unterschiedliche Frässtrategien bewertet und so Optimierungsansätze priorisiert werden.

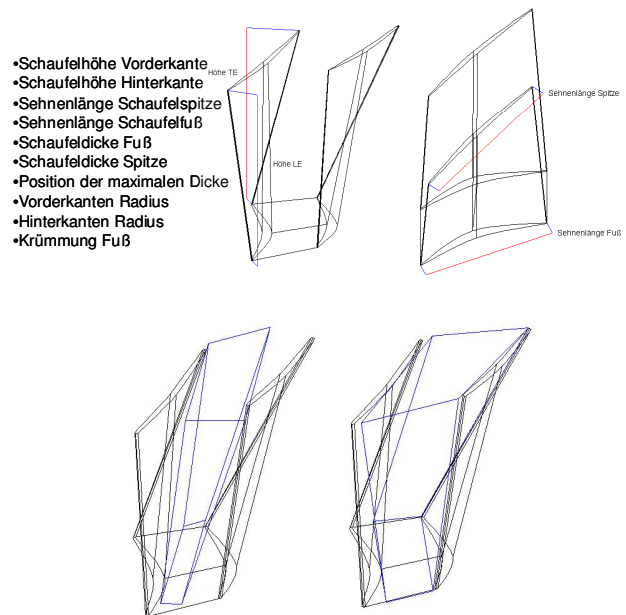


BILD 9. Vereinfachte Blisk Schaufelgeometrie als Basis für die Fräsprozessmodellierung und Volumenbestimmung für einzelne Prozessschritte

Im Rahmen des OptiFer Programms werden in Zusammenarbeit mit dem IFW der Uni Hannover die Schruppbearbeitung, Verschlichten und Schlichtbearbeitung für unterschiedliche Geometrien untersucht und verglichen. Neben Zerspanversuchen verschiedener Frässtrategien, wie z.B. dem Einsatz von Scheibenfräsern, wurden Werkzeuguntersuchungen zur detaillierten Beschreibung der Werkzeugqualität durchgeführt. Diese Ergebnisse fließen in die Modellrechnungen und anschließend in die Fräsprozesse ein und ermöglichen so das Erschließen weiterer Potentiale zur Prozessoptimierung.

Neben Standardwerkzeuggeometrien wie Schaftfräsern, Kugelpfhräser und Gesenkräser wird der Einsatz von Formfräsern zur Reduzierung der Schlichtzeiten auch an komplexen Schaufelgeometrien untersucht. Dabei ergeben sich insbesondere bei der Schlichtbearbeitung von 3D-Schaukelgeometrien Möglichkeiten zur Reduktion der Bearbeitungszeit und durch Verkürzung der notwendigen Vorschubwege durch den Einsatz von Formwerkzeugen. Diese ermöglichen eine Abbildung von 3D-Schaukeloberflächen mit wenigen Schnitten bei guter Profiltreue (Bild 10).

Mit Formfräsern
fertig gefräste 3D
Blisk-
Schaufeloberfläche

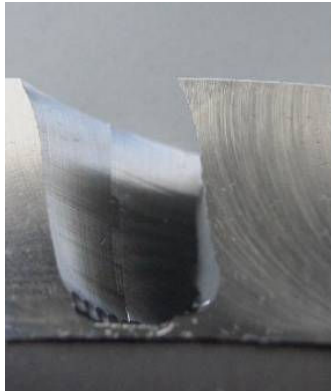


BILD 10. Fertigbearbeitung von 3D Bliskschaufeln mit Formwerkzeugen

Zur Simulation der Fräsprogramme und Verifizierung der Werkzeug- und Achsbewegungen der Maschine ist eine vollständige virtuelle Abbildung von Maschine, Vorrichtung, Bauteil und Werkzeug erforderlich. Diese ermöglicht die kinematische Analyse, Kollisionsprüfung und das Erkennen von Schwachstellen im Prozess noch während der Programmierung. Der Einsatz dieser Methoden erhöht die Prozesssicherheit und reduziert das Kollisionsrisiko in der Erprobungsphase neuer Blisk Fräsbearbeitungen. Darüber hinaus ergeben sich Hinweise auf die benötigte Bearbeitungszeit, da die vollständigen Bahnbewegungen der Werkzeugmaschine berücksichtigt werden können.

1. Simulation of machine tool movements in 5-axis milling of a titanium blisk

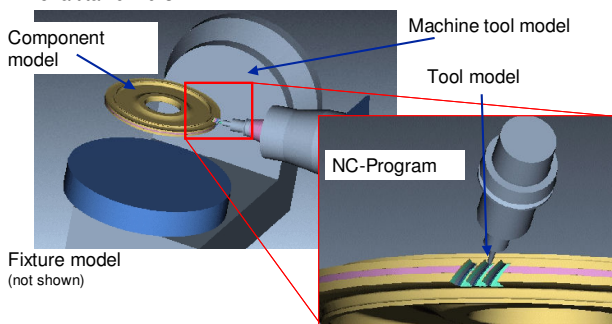


BILD 11. Simulation einer Blisk Fräsbearbeitung mit Vericut

4.4. PECM Fertigung Blisk - Fertigbearbeitung von Blisks mit gepulstem (Pulsed) ECM

Stark gekrümmte 3D-Beschaufelungen mit speziellen aerodynamischen- oder Stabilitätsanforderungen, z.B. im Bereich der Schaufelkanten oder dem sog. Filletbereich, erfordern zumeist aufwändige Schlichtvorgänge zur Erzeugung von filigranen, räumlich gekrümmten Formen. Dies kann zu einer deutlichen Zunahme der Bearbeitungszeiten führen. Eine mögliche Alternative zur Fräsbearbeitung stellt hier die ECM oder auch PECM Bearbeitung von Bliskschaufeln dar. Dabei wird die Form der Bliskschaufel durch eine Elektrode mit der fertigen Schaufelgeometrie durch elektrochemisches Abtragen erzeugt. Die Entwicklung der Anlagentechnologie und der zur Bearbeitung von Ti 6246 erforderlichen Verfahrensparameter erfolgte in Zusammenarbeit der Firmen Rolls-Royce Deutschland, Leitz Turbomaschinentechnik und den Instituten IGET der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg und IMTEK der Universität Freiburg. Grundlage für das Verfahren bildet ein gepulster Strom bei gleichzeitig oszillierender Elektrode, wodurch der Abtragsprozess und der Spülprozess zum Entfernen der Abtragsrückstände aus dem Arbeitsspalt zeitlich getrennt werden können. Eine hohe Präzision und Abformgenauigkeit sind dabei wesentliche Eigenschaften des Prozesses. In Bild 12 ist die Anlage mit dem zugehörigen Generator sowie eine durch PECM bearbeitete Blisk Schaufel dargestellt.

PECM
Anlage
mit
Gene-
rator



PECM
bearbei-
tete
Ti6246
Blisk



BILD 12. Anordnung der Blisk, Versuchsanlage und Bearbeitungsergebnis einer durch gepulstes ECM (PECM) gefertigten Blisk

Die gegenüber spanenden Verfahren weitgehende Unabhängigkeit des ECM-Prozesses von der Werkstofffestigkeit zeigt weiteres Potenzial der ECM-Bearbeitung, z.B. bei der Herstellung von Blisks aus Nickellegierungen auf. Nachteile der spanenden Bearbeitung, wie hoher Werkzeugverschleiß, lange Bearbeitungszeiten und aufwändige Glättungsprozesse insbesondere bei kleinen Bliskschaufelgrößen, können dabei vermieden werden. Von ausschlaggebender Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung der Entwicklungsziele in praktisch nutzbare Lösungen ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Anwenderfirmen, die sich hinsichtlich der jeweiligen Beiträge zum Projekt sinnvoll

4.5. NC-gesteuerte Entgratoperationen

Viele Bauteilkanten müssen mit kleinen Toleranzen gefertigt werden, die zum Teil nur 10-20% der Toleranzen des gesamten Bauteils betragen. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer adaptiven Entgrattechnologie, die bei Bedarf angewandt werden kann. In vielen Fällen ist es ratsam, die Entgratoperationen in die Operation zu integrieren, in der das jeweilige Bauteilmerkmal hergestellt wird. Als Beispiel ist hier das Fasen von Bohrungen direkt nach der Bohroperation zu nennen. Dabei wird die Position des Merkmals während der Bohroperation erzeugt und kann so in derselben Aufspannung zum Entgraten wieder genutzt werden. Die Auswahl der Entgratmethoden ist in Bild 13 gezeigt.

[illegible]

Die Firma BCT hat zur Unterstützung dieser Aufgaben eine Software entwickelt, die durch Adaption des merkmalsbezogenen NC-Programms zum Entgraten an die gemessene Geometrie des Merkmals angepasst werden kann.



BILD 15. Nicht adaptiertes und adaptiertes Entgraten einer Schaufelnut mit Winkel- und Zustellfehler

Bild 15 zeigt eine auf einer 5-achsigen NC-gesteuerten Fräsmaschine entgratete Schaufelnutkante, bei der ein Winkelfehler und ein axialer Versatz der Geometrie zu den NC-Daten vorhanden war. Das obere Bild zeigt das Ergebnis des Fräsprozesses ohne Modifikation des NC-Programms. Im unteren Bild wurde das NC-Programm an die gemessene Ist-Kontur der Schaufelnut angepasst, wodurch eine gleichmäßige Verrundung entlang der Schaufel erreicht werden konnte.

4.6. Endoskopische Reparatur von Triebwerkskomponenten

Zur Reduzierung von schadensbedingten Ausfallzeiten für den Kunden wird eine spezielle Reparaturtechnologie für Blisk-Verdichter entwickelt und erprobt. Dabei handelt es sich um boroskopische Reparatur von beschädigten Schaufeln im eingebauten Zustand. Ziel ist es, die bereits erprobte Reparatur mittels Laserauftragsschweißen zu miniaturisieren und kleinere Reparaturen an Verdichtern ohne Demontage des Triebwerks durchführen zu können. In Zusammenarbeit mit dem LLT der RWTH Aachen werden die für die jeweiligen Titanlegierungen erforderlichen Prozessparameter erprobt und validiert sowie die Anlage zum boroskopischen Laserauftragsschweißen entwickelt und aufgebaut. (Bild 16 und 17)

Reparatur einer Blisk Leading Edge mit einer herkömmlichen Anlage



BILD 16. Starrer Laserkopf zum Laser-Auftragsschweißen von Blisk-Schaufelkanten

Einsatzmöglichkeiten für eine solche Technologie ergeben sich z.B. durch Beschädigung einzelner Schaufeln durch Fremdkörper (FOD, Foreign Object Damage), wobei durch eine sogenannte „on wing“ Reparatur ein Betrieb bis zur nächsten planmäßigen Wartung ermöglicht werden könnte. Vornehmlich steht deshalb die Reparatur von Schaufelvorderkanten im Mittelpunkt der Arbeiten. Dabei wird die beschädigte Stelle zunächst mittels Boroskopie identifiziert und durch boroskopisches Schleifen entfernt, das sog. „Blending“. Anschließend folgt der Neuaufbau der Schaufelkante durch Laserauftragsschweißen. Als letzter Prozessschritt folgt wiederum ein boroskopisches Glätten bzw. Nachprofilieren der Schaufel durch spanende Verfahren.

Zur Erprobung der Auftragschweißparameter wird zunächst eine stationäre Anlage genutzt, die mit einem neuen endoskopisch nutzbaren Laserkopf erweitert wird.

Entscheidend bei der Entwicklung ist die Miniaturisierung der Komponenten, die einen sicheren Zugang des Werkzeugs zur beschädigten Stelle im Triebwerk ermöglichen muss.

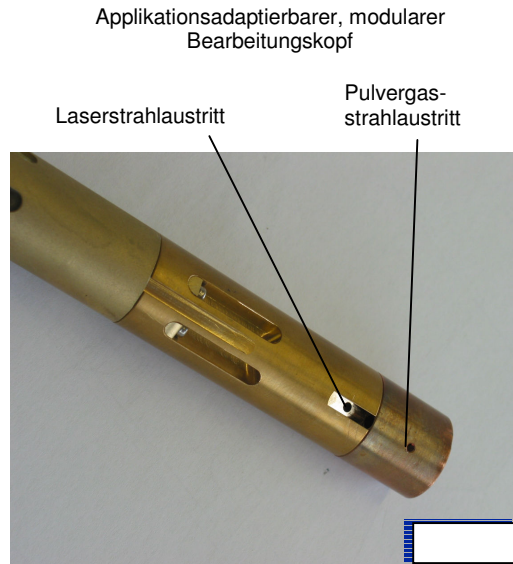


BILD 17. Stationäre Anlage am LLT zur Entwicklung der Reparaturtechnologie

5. ZUSAMMENFASSUNG

Mit den vorgestellten Arbeiten werden vorhandene Fertigungstechnologien entlang der gesamten Prozesskette Blisk-Fertigung vorangetrieben und neue Technologien entwickelt. Diese bilden eine wichtige Grundlage für die Produktion und den wirtschaftlich optimierten Einsatz von Blisks in modernen Triebwerken. Ein entscheidender Erfolgsfaktor ist dabei die interdisziplinäre Zusammenarbeit, z.B. bei der Entwicklung neuer Prozesse und Anlagentechnologien wie der gepulsten elektrochemischen Bearbeitung PECM. Aufbauend auf den Ergebnissen der Lebensdauerkostenermittlung können Entwicklungsschwerpunkte und technische Auslegungen sowie die Herstellkosten der Komponenten so optimiert werden, dass eine wirtschaftliche Fertigung entlang der gesamten Lieferkette bis zum optimierten Betrieb der Komponenten ermöglicht werden kann. Auf dieser Grundlage ergeben sich neue Chancen der Zusammenarbeit innerhalb der bestehenden Technologienetzwerke im Rahmen künftiger Produktionsprogramme. Diese basieren nicht nur auf dem gegenseitigen Wissen um Fähigkeiten und Kompetenzen, sondern auch einem besseren gemeinsamen Verständnis über technische Anforderungen und Zusammenhänge entlang der Prozesskette. Erst dadurch können Maßnahmen zur erfolgreichen Reduzierung von Arbeitsumfängen, Maßnahmen zur Erhöhung der Prozesssicherheit und die gesamte Lieferkette umfassende, übergreifende Maßnahmen wie das konturnahe Schmieden erfolgreich umgesetzt werden.

6. DANKSAGUNG

Die vorgestellten Projekte werden im Rahmen des Luftfahrtförderungsprogramms III des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) gefördert. Die Autoren danken den beteiligten Instituten und Mitarbeitern für die Mithilfe bei der Erstellung des Beitrags.

7. LITERATUR

- [1] S. Spieler*, S. Staudacher*, G. Kappmeyer, W. Lou; „Reparaturverfahren und ihre Bedeutung für die Bewertung von Blisks über den Lebenszyklus von Flugtriebwerken“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Braunschweig 6.-9.11.2006
- [2] Kelbassa, I.: „Qualifizieren des Laserstrahl-Auftragsschweißens von Blisks aus Nickel- und Titanbasislegierungen“, Dissertation, Aachen, 2006
- [3] MTU Aero-Engines GmbH (Hrsg.): „Blisk – Hochtechnologie par excellence“, München, 2006
- [4] Kappmeyer, G.: „Virtuelle Produktentstehung und Fertigungsplanung bei kritischen Triebwerksbauteilen“, Vortrag Zerspanungsseminar IFW Uni Hannover 2005