

VERBESSERTE NUTZUNG BETRIEBSBEANSPRUCHTER BAUTEILE DURCH GEZIELTE REGENERATION

O. Kleppa, M. Henke, J. Seume
Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD),
Appelstraße 9, 30167 Hannover, Deutschland

Zusammenfassung

Der Sonderforschungsbereich (SFB) 871 mit dem Titel „Regeneration komplexer Investitionsgüter“ (Kurztitel: Produkt-Regeneration) erarbeitet in 16 Teilprojekten wissenschaftliche Grundlagen für die Instandsetzung komplexer Investitionsgüter. Das Ziel ist es, hierbei möglichst viele Komponenten so zu erhalten, dass die funktionalen Anforderungen an das Investitionsgut wieder hergestellt werden oder die funktionalen Eigenschaften sogar verbessert werden. Auf Grund der hohen Komplexität eines Flugtriebwerks, wird das zivile Triebwerk als Anwendungsbeispiel verwendet.

Die technischen Anforderungen an ein regeneriertes Bauteil in einem Flugtriebwerk sind grundsätzlich so hoch wie an ein neues Bauteil. Zusätzlich ist ein Regenerationsprozess viel komplexer und anspruchsvoller als die Gestaltung und Herstellung neuer Produkte, da das Ausgangsmaterial des Regenerationsprozesses, d.h. die betriebsbeanspruchten Komponenten, stark variieren. Daher werden im SFB 871 neue und verbesserte methodische Grundlagen und Erkenntnisse erarbeitet, um diesen hohen Ansprüchen zu genügen.

Um Ressourcen zu schonen und die Instandhaltungskosten zu senken, sollten typische Regenerationsabläufe nicht durch individuelle, erfahrungsbasierte Entscheidungen, sondern durch regelbasierte Entscheidungen gesteuert werden. Die Entwicklung dieser Regeln wird ein Schwerpunkt des SFB sein.

1. EINLEITUNG

Die Triebwerksinstandhaltung nimmt weiter an Bedeutung bei den Herstellern zu, wie man am Beispiel des deutschen MRO Anbieters für Flugzeugtriebwerke, der MTU Maintenance, sehen kann. In den Jahren 2005 bis 2008 war der Anteil des zivilen Triebwerksgeschäfts in Bezug auf den Umsatzerlös höher als der der zivilen Triebwerkinstandsetzung. Im Jahr 2009 änderte sich das Verhältnis zugunsten der Instandhaltung [1].

Der bloße Ersatz verschlissener Komponenten ist nicht die einzige Option, um den ursprünglichen Zustand des Triebwerks wiederherzustellen. Die für die Instandhaltung eines Triebwerks anfallenden Kosten können in drei Bereiche aufgeteilt werden:

- Kosten für die Montage/Demontage des Triebwerks und der Komponenten
- Reparaturkosten für Einzelteile und

- Materialkosten für den Ersatz von nicht mehr reparierbaren Bauteilen [2].

Der Ersatz durch Neuteile verbraucht wertvolle Ressourcen und verursacht hohe Kosten (fast 500.000,- USD für einen Satz HDT Stufe 1 Laufschaufeln (CF6-80C2)). Insgesamt machen die Materialkosten mehr als 50% der Überholungskosten aus. Um die Instandhaltungskosten zu reduzieren, müssen auch für komplizierte Bauteile Reparaturverfahren entwickelt werden [2].

Sinnvoll ist es somit, möglichst viele der betriebsbeanspruchten, wertvollen Komponenten weiterzuverwenden. Hierbei muss aber sichergestellt werden, dass das Bauteil in einer Art und Weise regeneriert wird, die die Funktionalität des gesamten Investitionsguts erhält. Hierzu soll der SFB 871 neue, innovative Ideen und Lösungen entwickeln.

2. FORSCHUNGSPROGRAMM

Um die inhaltliche und methodische Kohärenz der Einzelprojekte im SFB 871 zu gewährleisten, wurde als gemeinsames Anwendungsbeispiel das zivile Flugtriebwerk ausgewählt. Flugtriebwerke eignen sich besonders gut als Beispiele für komplexe Investitionsgüter, da sie sehr komplex hinsichtlich der hohen funktionalen und technischen Anforderungen und deren Wechselwirkungen sind.

Der SFB 871 wird mit 16 Teilprojekten wissenschaftliche Grundlagen für die Instandsetzung von zivilen Flugtriebwerken erarbeiten. Die Ziele lassen sich aus den besonderen Anforderungen der Regeneration an die modellbasierte Produktentwicklung und Produktionstechnik ableiten:

- Frühzeitige Kenntnis der zu regenerierenden Komponenten und der möglichen Regenerationsschritte
- Kontinuierliche Berücksichtigung der sukzessive erlangten Erkenntnisse in der Planung des laufenden Regenerationsprozesses
- Verbesserte Verfahren der Regeneration (Regenerationsschritte) und deren Verketzung zu Regenerationspfaden
- Modellbasierte Vorhersage der funktionalen Eigenschaften und der produktionstechnischen Aufwendungen zur Regeneration unter besonderer Berücksichtigung
 - der erhöhten Varianz der Eigenschaften der Komponenten, die sich aus der Betriebsbeanspruchung und der Regeneration ergeben, und
 - den Wechselwirkungen zwischen dem Werkstück, dessen Eigenschaften durch die Betriebsbeanspruchung geändert wurden, und dem Regenerationsprozess selbst
- Aus den modellbasierten Vorhersagen abgeleitete regelbasierte Entscheidungen über die durchzuführenden Regenerationsschritte, die den Nutzen für den Kunden maximieren
- Integration der modellbasierten Vorhersage der produktionstechnischen Aufwendungen

und des funktionalen Nutzens auf der Ebene des gesamten Investitionsguts bzw. des gesamten Regenerationsprozesses

Derzeit entscheidet eine Fachkraft erfahrungsbasiert und individuell über die Art des Reparaturprozesses. Um die oben genannten Ziele erreichen zu können, muss der übliche Reparaturprozess (Bild 1) geändert werden.

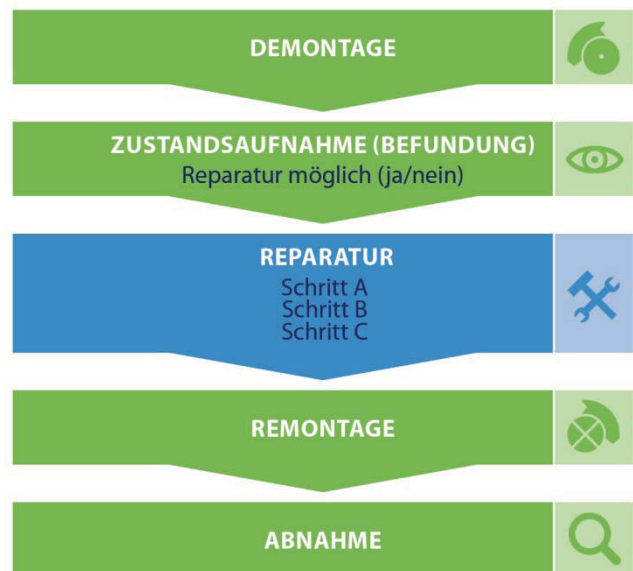


BILD 1. Heute üblicher Reparaturprozess

Die künftigen Regenerationsprozesse sollen neue technische Möglichkeiten bieten, um mehrere Komponenten zu regenerieren, und sie sollen alternative Sequenzen von Regenerationsschritten (= alternative Regenerationspfade) bieten.

Vor der Auswahl eines Regenerationspfades und der anschließenden Reparatur, soll in einem virtuellen Vorgang für alle Regenerationspfade der (produktionstechnische) Aufwand und der (funktionale) Nutzen bewertet werden, so dass aus dieser Bewertung regelbasiert die Entscheidung für den effizientesten Regenerationspfad abgeleitet werden kann (BILD 2). Die Auswahl des effizientesten Regenerationspfades richten sich nach dem Kundengeschäftsmodell und kann diesbezüglich von Kunde zu Kunde unterschiedlich sein.

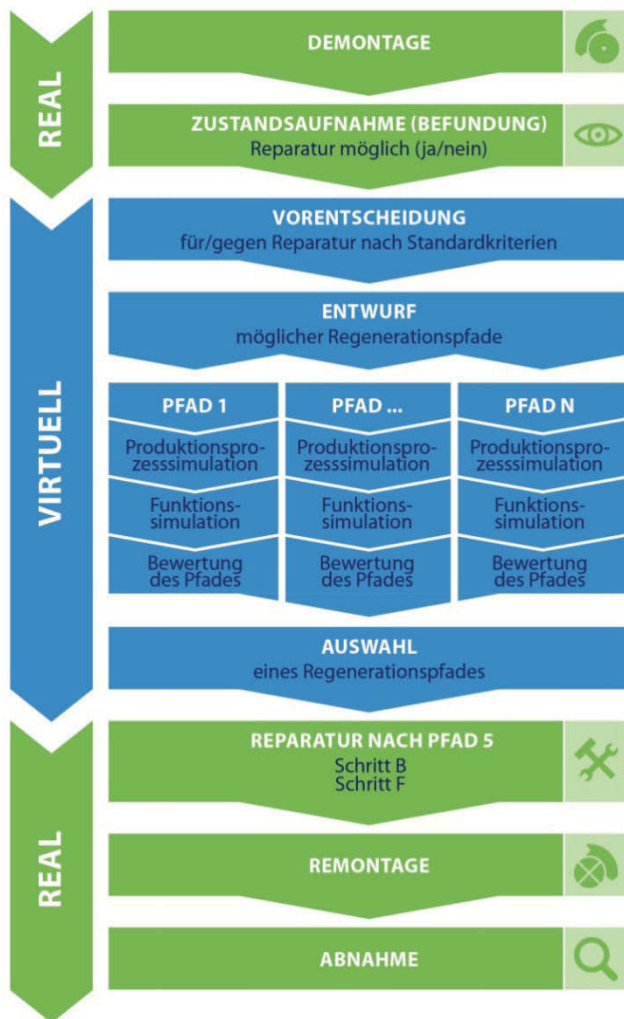


BILD 2. Künftiger Regenerationsprozess

3. PROJEKTBEREICHE UND TEILPROJEKTE

Aus der Darstellung des künftigen Regenerationsprozesses ergibt sich folgender Forschungsbedarf,

1. die Menge und Qualität der Informationen aus der Befundung, die zur Planung des Regenerationsprozesses erforderlich sind, zu verbessern,
2. die komplexen Wechselwirkungen zwischen Bearbeitungsprozessen und funktionalen Eigenschaften der Komponenten zu erfassen und zu berücksichtigen,
3. die Varianz der Materialeigenschaften und anderer funktionaler Eigenschaften, die aufgrund der Betriebsbeanspruchung des Investitionsgutes erhöht ist und die Varianz, die in der Regeneration selbst ent-

steht, in den Regenerationsprozessen handhaben zu können,

4. die ganzheitliche Steuerung der einzelnen Regenerationsschritte zu einem Gesamtprozess zu gewährleisten und die Simulation der funktionalen Eigenschaften der einzelnen Komponenten so zu integrieren, dass eine Bewertung der funktionalen Eigenschaften des gesamten Investitionsguts stattfinden kann, um diesen Gesamtprozess zu steuern.

Aus diesem Forschungsbedarf leiten sich die vier Projektbereiche ab (Bild 3):

Projektbereich A:

Zustandsaufnahme und Befundung

Projektbereich B:

Wechselwirkung der Fertigungsprozesse mit funktionalen Produkteigenschaften

Projektbereich C:

Berücksichtigung produktions- und materialbedingter Varianz in der Produktentstehung

Projektbereich D:

Ganzheitliche Steuerung der Regenerationsprozesse



BILD 3. Darstellung der Beziehungen zwischen den vier Projektbereichen

Projektbereich A „Zustandsaufnahme und Befundung“ beschäftigt sich mit der Entwicklung von neuen Technologien zur empfindlichen Zustandserfassung von Gesamttriebwerk, Bauteilen und dem Bauteil-Schichtsystem. Zusätzlich soll eine frühzeitige Ortung und Lokalisierung des Schadens ermöglicht werden. Zu diesem Projektbereich gehören folgende Teilprojekte:

A1: Charakterisierung von Beschichtungen und Werkstoffzuständen hochbeanspruchter Triebwerksbauteilen

mit dem Ziel, einer Mehrparameter-Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik zum empfindlichen Nachweis von lokalen Defekten und Werkstoffzuständen in Scantechnik zu entwickeln. Darüber hinaus soll eine neuartige Induktions-Thermographie zur schnellen bildhaften Prüfung und Bewertung geschaffen werden.

A2: Multiskalen-Geometrieerfassung von Turbinenschaufeln mittels robotergestützter, laserpositionierter Multisensortechnik

mit dem Ziel, Methoden zum Aufbau eines hochflexibel zustellbaren Multisensorsystems zu erarbeiten, das eine Messung in verschiedenen Skalenbereichen ermöglicht.

A3: Zustandsbeurteilung eines Triebwerks durch Analyse des Abgasstrahls

mit dem Ziel, eine schnellere Diagnose und Fehleridentifikation von Triebwerkskomponenten mit Hilfe von optischer Vermessung der Dichterverteilung des Abgasstrahls zu ermöglichen.

Projektbereich B „Wechselwirkung der Fertigungsprozesse mit funktionalen Produkteigenschaften“ wird sich, neben den Regenerations-technologien, hauptsächlich mit der Bildung von Methoden und Verfahren zur Charakterisierung, Bewertung und Auslegung der Funktionseigenschaften regenerierte Bauteile beschäftigen. Zu diesem Projektbereich gehören die folgenden Teilprojekte:

B1: Endkonturnahe Turbinenschaufelreparatur durch füge- und beschichtungstechnische Hybridprozesse

mit dem Ziel, die zeitaufwendige Reparatur von Turbinenschaufeln mittels Thermischen Spritzen und anschließenden Alitierens zu verkürzen.

B2: Geschickte Reparaturzelle

mit dem Ziel, eine Reparaturzelle zu entwickeln, die die Fertigungstechnologien bereitstellt und sich während des Regenerationsprozesses an die Prozessbedingungen anpasst.

B3: Einfluss komplexer Oberflächenstrukturen auf das aerodynamische Verlustverhalten von Beschaukelungen

mit dem Ziel, die Auswirkung lokaler und komplexer Oberflächenstrukturen auf Schaufeln infolge der Regeneration und der Betriebsbeanspruchung hinsichtlich der aerodynamischen Verluste und ihrer strömungsmechanischen Ursachen zu charakterisieren.

B4: Schwingungs- und Festigkeitsverhalten von Bauteilen mit regenerationsbedingten Geometrie- und Materialimperfectionen

mit dem Ziel, der Bestimmung der strukturellen Eigenschaften von Turbinenschaufelblättern unter Berücksichtigung von regenerationsbedingten Imperfectionen zu schaffen. Des Weiteren soll die stochastische Verteilung der strukturellen Eigenschaften infolge streuender Defekte ermittelt werden.

B5: Einkristallines Laserstrahlschweißen

mit dem Ziel, ein Laserstrahlschweißprozess zur Reparatur von Rissen in einkristallin erstarrten Bauteilen mit ebenfalls einkristalliner Erstarrung des Zusatzwerkstoffs zu entwickeln.

Projektbereich C „Berücksichtigung produktions- und materialbedingter Varianz in der Produktentstehung“ beschäftigt sich mit der erhöhten Varianz funktionaler Eigenschaften durch die Betriebsbeanspruchung und durch den Regenerationsprozess. Die Auswirkung dieser erhöhten Varianz muss voraussagbar sowie beherrschbar werden, sodass Abweichungen

gegenüber dem Neuzustand toleriert werden können, die heute unzulässig sind. Zu diesem Projektbereich gehören die folgenden Teilprojekte:

C1: Simulationsbasierte Prozessauslegung spanender Rekonturierungstechnologien

mit dem Ziel, innerhalb des Regenerationsprozesses und nach der prozessintegrierten Vermessung der Bauteile automatisch einen bauteilspezifischen NC-Code für die simultane, fünfschichtige Reparaturbearbeitung reparierter Bauteile zu generiert.

C2: Schnelle Prüfung komplexer Geometrien mittels inverser Streifenprojektion

mit dem Ziel, der Entwicklung und Erforschung von Methoden zur schnellen Messung von Geometrieabweichungen an komplexen Regenerationsgütern mit individuellen Geometrien.

C3: Einfluss des regenerationsbedingten Mistunings auf die Dynamik gekoppelter Bauteile

mit dem Ziel, der Entwicklung von Methoden, die eine Beurteilung des Einflusses der mechanischen Eigenschaften regenerierter Bauteile auf die Dynamik eines komplexen Gesamtsystems erlauben.

C4: Regenerationsbedingte Varianz aeroelastischer Eigenschaften von Turbinenschaufeln

mit dem Ziel, eine Berechnungsmethodik zur Vorhersage von Schaufelschwingungen und der Wechselwirkung mit der Strömung infolge der durch Betrieb und Reparatur verursachten Geometrie- und Materialvarianzen zu entwickeln.

C5: Vorhersage von Risswachstum und Dauerfestigkeit von reparierten Bauteilen

mit dem Ziel, eine Methodik zu entwickeln, mit der sich Vorhersagen zur Dauerfestigkeit und Lebensdauer eines regenerierten Bauteils treffen lassen können.

Projektbereich D „Ganzheitliche Steuerung der Regenerationsprozesse“ beschäftigt sich mit der beispielhaften Umsetzung der im SFB ge-

wonnen Erkenntnisse und methodischen Ansätze. Zu diesem Projektbereich gehören die folgenden Teilprojekte:

D1: Kapazitätsplanung und -abstimmung bei unscharfen Belastungsinformationen

mit dem Ziel, der Steigerung der logistischen Leistungsfähigkeit des Regenerationsprozesses durch eine frühzeitige Nutzung verfügbarer, zunächst aber noch unscharfer Informationen aus der Nutzung der ersten Regenerationsphasen.

D2: Einfluss von Geometrieabweichungen auf das Kennfeld einer Turbomaschine

mit dem Ziel, der Ermittlung von Korrelationen zum Einfluss von aerodynamischen Störungen auf Grund von Geometriefehlern an einzelnen Schaufeln auf die Turbine als Funktionseinheit und auf das Betriebsverhalten des Triebwerks.

D3: Auswahl effizienter Regenerationsmodi für verschiedene Kundengeschäftsmodelle

mit dem Ziel, eine betriebswirtschaftliche Theorie der operativen Regenerationsprozesse an komplexen Investitionsgütern zu entwickeln. Diese Theorie soll quantitativ-formal gefasst sein, dabei alternative Regenerationsmodi und Kundengeschäftsmodelle erfassen und somit ein hohes Präzisionsniveau ihrer Realitätsbeschreibung erreichen.

4. AUSBLICK UND TRANSFER

Die langfristigen leitenden Fragestellungen des SFB 871 können zusammengefasst werden:

1. Planung und Steuerung
Wie kann der Regenerationsprozess so gestaltet werden, dass kundenspezifisch der höchstmögliche Nutzen für den individuellen Kunden erzielt wird?
2. Produktion
Wie können modellbasiert die Schritte zur Regeneration individueller Komponenten zu einer Prozesskette integriert werden, um diesen Nutzen zu erreichen?

3. Funktionale Gestaltung

Wie muss ein ganzheitliches Modell des Gesamtsystems aussehen, dass den funktionalen Nutzen quantifiziert, der durch Regeneration erreicht wird?

Der Sonderforschungsbereich wird hierzu in maximal 12 Jahren neue und innovative Methoden und Ansätze entwickeln, die während der Laufzeit Unternehmen zur Verfügung gestellt werden und über Projekte in diese transferiert werden.

5. SCHRIFTTUM

- [1] Geschäftsbericht MTU,
URL:http://www.mtu.de/de/press/facts_and_figures/index.html (abgerufen 21. Mai 2010)

- [2] O. Rupp, Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken,
URL:http://mtu.de/de/technologies/engineering_news/others/Rupp_Instandhaltungskosten_ziviler_Strahltriebwerke.pdf (abgerufen 21. Mai 2010)