

REPARATURVERFAHREN UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE BEWERTUNG VON BLISKS ÜBER DEN LEBENSZYKLUS VON FLUGTRIEBWERKEN

S. Spieler*, S. Staudacher*, G. Kappmeyer**, W. Lou***

* Institut für Luftfahrtantriebe
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
70569 Stuttgart

** Rolls-Royce Deutschland
Hohemarkstr. 60-70
61440 Oberursel

*** Rolls-Royce plc.
Elt 16, PO Box 31
Derby DE24 8BJ
United Kingdom

ÜBERSICHT

Die Blisk-Bauweise von Teilen des Verdichters hat sich mehr und mehr als Schlüsseltechnologie zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Triebwerksherstellern hervorgetan. Die integrale Rotorbauweise ermöglicht höhere mechanische Belastungen und erlaubt dadurch bei gegebenem Bauraum die Realisierung größerer Leistungen [4] oder höhere Umfangsgeschwindigkeiten und Stufendruckverhältnisse [11]. Hiermit eröffnet sich somit ein Potential für Gewichtseinsparungen höhere thermische Wirkungsgrade und dadurch Einsparungen im Treibstoffverbrauch.

Während zahlreiche Herstellerverfahren für Blisks entwickelt wurden, sind entsprechende Reparaturverfahren noch nicht ausgereift. Die durchgeführte Untersuchung hat jedoch gezeigt, dass deren Verfügbarkeit und Anwendbarkeit eine notwendige Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit von Blisks ist. Es wurde ein probabilistisches Modell entwickelt, welches die Blisk- und die Schaufel-Scheibe-Bauweise unter Einbeziehung potenzieller Reparaturverfahren für Blisks mittels einer Differenzkostenkalkulation über den Lebenszyklus wirtschaftlich vergleicht. Neben einer ausführlichen Darstellung der wesentlichen Implikationen der Blisk-Bauweise auf die Überholung von Flugtriebwerken – und insbesondere auf die Notwendigkeit der Entwicklung von Reparaturverfahren – werden Ergebnisse der Differenzkostenkalkulation präsentiert sowie vorhandene Optimierungspotenziale aufgezeigt.

BEZEICHNUNGEN

<i>Blisk</i>	Blade Integrated Disk
<i>DOD</i>	Domestic Object Damage (Eigenkörperschaden)
<i>EGT</i>	Exit Gas Temperature (Turbinenaustrittstemperatur)
<i>FOD</i>	Foreign Object Damage (Fremdkörperschaden)
<i>JAR</i>	Joint Aviation Requirements
<i>KW</i>	Kapitalwert
<i>K</i>	Korrelationskoeffizient
<i>LLP</i>	Life Limited Part (Lebensdauerbegrenztes Teil)
<i>q</i>	Kalkulationszinsfuß
<i>t</i>	Zeit, Zeitvariable (Weibullverteilung)
<i>T</i>	Temperatur; Einsatzdauer des Triebwerks
<i>η</i>	Formfaktor (Weibullverteilung)
<i>τ</i>	Charakteristische Lebensdauer (Weibullverteilung)

1. EINFÜHRUNG

Die ständige Forderung des Marktes und des Gesetzgebers nach Luftfahrtantrieben mit geringerem Kraftstoffverbrauch, niedrigeren Emissionen und wettbewerbsfähigen Herstell- und Wartungskosten bei gleichzeitiger hoher Schubleistung und Zuverlässigkeit treibt Flugtriebwerkshersteller an, neue Antriebskonzepte und dazugehörige Schlüsseltechnologien zu entwickeln. Nach [11] kann dieser Fortschritt im Wesentlichen durch leistungsfähigere Verdichter erreicht werden, „denn die Verdichterkomponenten bestimmen etwa 50-60% der Baulänge, 40-50% des Gewichtes, 35-40% der Herstellkosten und etwa 30% der Wartungskosten eines Triebwerkes.“ Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist eine weitere Steigerung der Verdichterwirkungsgrade und Verdichterdruckverhältnisse, weshalb möglichst geringe Stufen- und Schaufelzahlen angestrebt werden. Die hierfür notwendigen höheren Stufendruckverhältnisse können über höhere Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten der Verdichterrotoren realisiert werden. Dies impliziert eine höhere Beanspruchung, welche die eingesetzten Materialien und Bauweisen an die Grenzen ihrer Belastbarkeit bringt. Aus diesem Grund kommt [11] zu der Schlussfolgerung, dass „sich mehr und mehr die Blisk-Bauweise (Blisk = Blade Integrated Disk) als Schlüsseltechnologie in den Vordergrund stellt“. Durch die integrale Rotorbauweise wird die kritische Schaufel-Scheibe-Verbindung vermieden, was eine höhere mechanische Belastung des Bauteils erlaubt. Darüber hinaus lässt sich das Bauteilgewicht im Vergleich zur konventionellen Bauweise durch den Wegfall des Schaufelfußes und der Schaufelfußaufnahme im Scheibenkrantz signifikant reduzieren.

Während für die Herstellung von Blisks eine Vielzahl von Fertigungsverfahren zur Verfügung steht¹ sind Reparaturverfahren für Blisks deutlich weniger erforscht und die damit verbundenen Kosten entsprechend mit Unsicherheit behaftet. Ziel dieser Arbeit ist deshalb mit Hilfe eines probabilistischen Modells den komplexen Einfluss der Blisk-Bauweise auf die Lebenszykluskosten unter besonderer Berücksichtigung von Reparaturverfahren zu simulieren.

¹ Hierzu gehören vor allem die Fräsbearbeitung „aus dem Vollen“, Elektrochemische Bearbeitung (ECM) und Lineares Reibschiessen der Schaufeln mit anschließendem adaptiven Fräsen des Schweißbereiches

2. MODELLIERUNG DER SCHÄDIGUNG UND DER AUSFALLZEITPUNKTE

2.1. Phänomenologische Beschreibung von Schädigungsmechanismen

Die Basis des Modells ist die Darstellung der grundlegenden Schädigungsmechanismen von Flugtriebwerken [8]. Hierbei ist die Frage zu beantworten, aus welchen Gründen eine Veränderung von Komponenten über die Betriebszeit überhaupt auftritt und welcher Zusammenhang mit der Wartungsbedürftigkeit von Komponenten besteht [12].

Als Fouling wird die Anhaftung von Partikeln auf den Schaufeln sowie Ringraum-Oberflächen bezeichnet. Die Anhaftung wird durch die Anwesenheit von Wasser- oder Ölschleieren [13] ermöglicht. Der resultierende Materialauftrag erhöht die Oberflächenrauhigkeit und verändert die Profilform zu einem bestimmten Grad. Fouling ist von den Umgebungsbedingungen (z.B. Partikel-Gehalt der Luft) und der Betriebszeit unterhalb von bestimmten Höhen stark abhängig. Fouling kann durch regelmäßiges Waschen teilweise wieder rückgängig gemacht werden [13].

Mit Heißgas-Korrasion (Hot Corrosion) wird der Materialverlust von Komponenten im Gaspfad bezeichnet, der durch chemische Reaktionen zwischen den Komponenten und bestimmten Gasbestandteilen (Salze, mineralische Säuren, reaktive Gase) hervorgerufen wird. Die Reaktionsprodukte können sich als Zunder auf den Komponenten ablagern und durch Abplatzungen weitere Schäden im Triebwerk anrichten. Hochtemperatur-Oxidation hingegen ist die chemische Reaktion zwischen metallischen Atomen der Komponenten und dem Sauerstoff des umgebenden Gases. Durch den Einsatz weitgehend korrosionsfester Werkstoffe treten die zuletzt genannten chemischen Reaktionen im Wesentlichen in Hochtemperaturbereichen (Brennkammer, Turbine) auf [9].

Für den Verdichterbereich spielen physikalische Schädigungsmechanismen die bedeutendste Rolle. Unter Fretting (Reibkorrasion) wird die Kombination aus Reibverschleiß bei hohem Kontaktdruck mit überlagerten Schwingungen oder Stößen verstanden. Bei Flugtriebwerken ist dieser Schädigungsmechanismus typischerweise zwischen Schaufelnut und -fuß festzustellen. Abrasion hingegen ist der Abrieb von Material, der im Triebwerk bspw. durch die Reibung zwischen rotierenden und feststehenden Oberflächen entsteht. Dieser Abrieb vergrößert typischerweise die Abstände zwischen Schaufel spitzen und Gehäuse oder Dichtungen. Neben ungewolltem Abrieb gibt es auch geplanter Abrieb, etwa bei Einlaufbelägen. In Abhängigkeit der Zyklenzahl wachsen solche Spaltabstände relativ schnell zu einer Größe an, ab welcher kein weiterer Abrieb mehr stattfindet [12].

Erosion ist die abrasive Entfernung von Material durch harte Partikel. Typischerweise handelt es sich hierbei um Partikel größer als $2\mu\text{m}$, die nicht mehr dem Gasstrom folgen sondern aufgrund ihrer Trägheit auf Oberflächen von Komponenten im Gaspfad treffen [12]. Während im Niederdruckbereich Erosion in erster Linie zu veränderten Schaufelprofilen, Oberflächenrauhigkeiten sowie erhöhten Spaltabständen führt, sind im Hochdruckbereich vorwiegend veränderte Schaufel spitzen, Verlust von Dichtungs-

material sowie höhere Oberflächenrauhigkeiten Folgen von Erosion [9]. Des Weiteren verändern sich die Vorderkanten von Verdichterschaufeln über die Betriebsdauer, indem sie durch auftreffende Partikel zunehmend stumpfer werden, ebenso die Hinterkanten, indem sie zunehmend verdünnen [13].

Beschädigungen können prinzipiell unterteilt werden in Fremdkörperschädigung (FOD) und Eigenkörperschädigung (DOD). Erstere resultieren aus Fremdobjekten, die mit der einströmenden Luft in das Triebwerk eindringen und dann auf Gaspfad-Komponenten treffen. Zweitere treffen ebenfalls auf Gaspfadkomponenten, entstehen jedoch triebwerksintern – sie können bspw. von abbrechenden Triebwerksteilen, Ablösungen im vereisten Einlauf oder sich loslösenden Kohlenstoffablagerungen an Brennstoffdüsen herrühren. Obwohl zwischen Erosionsschädigung und Fremdkörperschädigung keine scharfe Trennung besteht, ist jedoch mit zunehmender Masse und Größe des Partikels eher von Fremdkörperschädigung auszugehen. Aufgrund der größeren Masse und entsprechend größeren kinetischen Energie beim Aufprall sowie durch den aufgrund ihrer Vorkommenshäufigkeit singulären Charakter weisen Fremdkörperschäden ein im Vergleich zur Erosion unterschiedliches Schadensbild auf. So ist keine stetige Veränderung der Oberflächenrauhigkeit oder der Profilform festzustellen als vielmehr einzelne, sichtbare Kerben, Einschläge und Dellen, in Extremfällen sogar Abbrüche von Schaufelteilen oder gar mehreren Schaufeln (vgl. BILD 1).

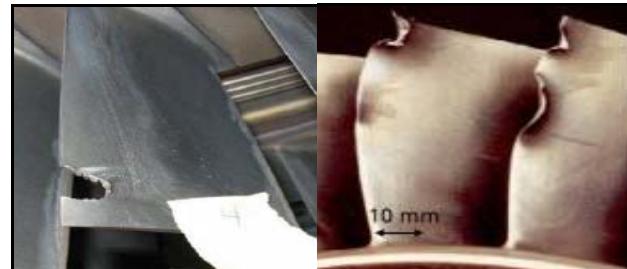


BILD 1. Beispiele von Fremdkörperschäden an Verdichterschaufeln

In erster Linie sind hierbei die vorderen Verdichterstufen betroffen, da aufprallende Partikel oder Fremdkörper nach dem ersten Aufprall signifikant an Energie verlieren sowie in der Regel beim Aufprall zerkleinert werden und somit in hinteren Stufen nur noch geringe Schädigung bewirken.

2.2. Zur Modellierung verwendete Schädigungsmechanismen

Die wesentlichen im Verdichter beobachtbaren Schädigungsmechanismen – Fouling, Erosion und Fremdkörperschädigung – hängen maßgeblich von der Triebwerks-Architektur ab. Um eine Beurteilung der BLISK Bauweise auf einer für beschaukelte Rotoren gültigen Basis durchführen zu können wird die Annahme getroffen, dass sich die beiden zu vergleichenden Architekturen – Blisk- und Schaufel-Scheibe-Bauweise im Gasstrombereich unweitlich unterscheiden und deshalb als vergleichbar anzunehmen sind. Auf dieser Annahme basierend bewegen sich potenziell anhaftende Partikel, erosiv wirkende Partikel und aufprallende Fremdkörper in beiden Fällen auf vergleichbaren Trajektorien und prallen auf bzw. haften an

vergleichbare Bereiche der Gaspfadkomponenten.

Bezüglich des abrasiven Verschleißes von Einlaufschichten und des resultierenden zunehmenden Schaufel spitzenpaltes ist von keinen Unterschieden zwischen den beiden konstruktiven Ausführungen auszugehen. Des Weiteren ist aufgrund der Konfrontation der Verdichter komponenten mit dem gleichen Gas und vergleichbaren Temperaturen von einer ähnlichen chemischen Schädigung auszugehen. Ein Unterschied besteht jedoch beim Fretting, da das durch Fretting gefährdete Merkmal Schaufelfuß bei der Blisk-Bauweise nicht mehr vorhanden ist. Dies gilt ebenfalls für die Eigenschädigung von Verdichter trommeln. Durch die deutlich geringere Teilezahl bei Blisks, vor allem durch fehlende Dämpfplatten- und ringe, ist bei Blisks von signifikant weniger häufigen DODs auszugehen. Erste Betriebserfahrungen mit Blisks bestätigen diese Annahme.

2.3. Statistische Modellierung des Schädigungs- und Ausfallverhaltens

Die statistische Modellierung der Merkmalsschädigung setzt sich zum Ziel, eine statistische Aussage über den Zeitpunkt des Ausfalls einer Komponente zu machen. Hierbei wird unter Ausfall jedoch nicht das Versagen einer Komponente verstanden als vielmehr gemäß [3] die „unzulässige Beeinträchtigung von erwünschten oder notwendigen Gebrauchseigenschaften“ sowie die „Erfüllung mindestens eines Ausfallkriteriums bei einer zu Beanspruchungsbeginn arbeits- und oder funktionsfähigen Betrachtungseinheit“. Der Ausfall ist somit Ergebnis der zuvor beschriebenen Schädigungsmechanismen, in deren Folge ein unzulässig hoher Funktionsverlust eines Merkmals durch Unterschreitung eines – i.d.R. im Wartungshandbuch – vorgegebenen Grenzwertes auftritt.

Verschlechterungsvorgänge und Komponentenausfall sind zum großen Teil durch einen stochastischen Charakter gekennzeichnet. Für die Bewertung des Zuverlässigkeit verhaltens, wie z.B. das Abschätzen der erwarteten Lebensdauer, eignen sich deshalb insbesondere statistische Methoden². In der einschlägigen Literatur zur Ausfallmodellierung sowie in der anwendungsorientierten Praxis sind deshalb überwiegend mathematisch-statistische Methoden vorzufinden. Hierbei werden Informationen über schädigungsbedingte Ausfallzeitpunkte sowohl aus der Wartungspraxis als auch aus Versuchsdaten von bestimmten Komponenten statistisch ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass das Ausfallverhalten in vielen Fällen durch eine Weibullverteilung angenähert werden kann. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Weibullverteilung gehorcht der mathematischen Vorschrift

$$(1) \quad f(t) = \left(\frac{\eta}{\tau} \right) \cdot \left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)^{\eta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)^\eta}$$

und wird durch die Variablen τ (charakteristische Le-

bensdauer), η (Formfaktor) und evtl. t_0 (zeitliche Verschiebung) charakterisiert. Nach Integration der Dichtefunktion erhält man die Verteilungsfunktion $F(t)$ mit

$$(2) \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)^\eta},$$

welche im vorliegenden Zusammenhang die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein bestimmtes Merkmal bis zum Zeitpunkt t einen vorgegebenen Grenzwert überschritten hat und somit ausfällt. Wird die der Verteilungsfunktion zugrunde liegende Datenbasis betrachtet – also die Auswertung von Ausfallzeitpunkten der jeweiligen Merkmale in einer Flotte von Triebwerken – so ist eine weitere Interpretation der Verteilungsfunktion eingänglich: sie gibt an, bei welchem Anteil der Triebwerke aus der untersuchten Flotte ein bestimmtes Merkmal zu bestimmten Zeitpunkten ausgefallen und somit wartungsbedürftig ist.

Da die in 2.1 beschriebenen Schädigungsmechanismen überwiegend auf einzelne Merkmale einer Komponente wirken, ist die statistische Modellierung der Ausfallzeitpunkte vorzugsweise merkmals- und nicht komponenten bezogen vorzunehmen. Im Modell werden entsprechend diejenigen Merkmalsschädigungen statistisch modelliert, die in der Praxis überwiegend anzutreffen sind und bei denen von einer Auswirkung auf die Triebwerksüberholung aufgrund der Bauweise auszugehen ist. Es sind dies für das betrachtete Triebwerk:

- Abstumpfung der Schaufelvorderkanten (Erosion),
- Beschädigung von Verdichterschaufeln durch auftreffende Partikel (Erosion, Fremd- und Eigenkörper schädigung),
- Verkürzung der Schaufeln (Abrasion, Erosion),
- Abnutzung der Einlaufschichten (Abrasion, Erosion),
- Eigenschädigung der Trommel (DOD, Fretting).

Zusätzlich wird bei Designs mit Schaufel-Scheibe Verbindungen die Schädigung des Schaufelfußes durch Fretting berücksichtigt. Da Fouling i.d.R. nicht zu einem Ausfall und anschließendem Austausch einer Komponente führt und des Weiteren durch die in jedem Falle notwendige Reinigung bei einer Triebwerksüberholung vollständig entfernt ist, wird Fouling in der Modellierung der Ausfallzeiten nicht berücksichtigt.

Neben dem Ausfall von Komponenten aufgrund von kontinuierlicher Schädigung ist auch ein plötzliches Versagen denkbar (z.B. Scheibenversagen aufgrund von Fatigue). Durch Lebenszeitlimitierungen und restriktiven gesetzlichen Vorschriften [4] werden diese sicherheitsrelevanten Versagensfälle durch entsprechende Wartungspläne weitgehend verhindert und werden somit für den Vergleich der Bauweisen nicht berücksichtigt. Die Auswirkung solcher extrem seltenen Vorkommnisse können jedoch in Form von Szenarien untersucht werden. Im Folgenden werden grundsätzlich nur Schäden an Komponenten ohne resultierendes Triebwerksversagen betrachtet.

² Die Kompliziertheit der Schädigungsvorgänge, die Vielzahl der Einflussfaktoren, die zahlreichen Wechselwirkungen und fehlende Werkstoffkenngrößen lassen gegenwärtig keine geschlossene deterministische mathematische Modellierung von Schädigungsprozessen zu.

3. SIMULATION VON TRIEBWERKSÜBERHOLUNGEN

3.1. Zeitpunkt der Triebwerksüberholung

Um aus den im vorigen Kapitel erläuterten Verteilungsfunktionen ableiten zu können, welcher Anteil ausgewählter Merkmale reparaturbedürftig ist, ist die Festlegung eines Zeitpunktes t notwendig. Dieser stellt in dieser Simulation den Zeitpunkt einer Triebwerksüberholung dar. Somit stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien der Zeitpunkt einer Triebwerkswartung festgelegt wird. Bei der Ursache für Triebwerksüberholungen kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen zufälligen Ereignissen, Erreichen der Lebensdauerlimitierung bestimmter Komponenten, Überschreitung von Grenzwerten beobachteter Betriebskenngrößen sowie Wartung aufgrund von fixen Wartungsintervallen.

Im Wartungshandbuch werden konkrete zufällige Ereignisse (z.B. Vogelschlag, harte Landung) aufgezählt, bei deren Eintreten bestimmte Wartungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Die zufälligen Ereignisse sind nicht vorhersehbar, können jedoch in einem Modell anhand von Eintrittswahrscheinlichkeiten nachgebildet werden. Da davon ausgegangen wird, dass diese zufälligen Ereignisse über den Lebenszyklus die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit und somit eine konstante Ausfallrate aufweisen, eignet sich hierfür eine Gleichverteilung³. Die konkreten Wahrscheinlichkeiten hierfür können aus empirischen Daten von Fluggesellschaften und Triebwerksherstellern abgeleitet werden.

Eine Lebensdauerlimitierung ist für bestimmte sicherheitsrelevante Komponenten gesetzlich vorgeschrieben [4]. Triebwerkshersteller schreiben deshalb für sog. Life Limited Parts (LLPs) maximal zulässige Zyklen- und Stundenzahlen vor. Obwohl von Betreiberseite versucht wird, diese Lebensdauer maximal auszunutzen, kann ein Austausch vor Erreichen der Grenzlebensdauer aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein, wenn dadurch die Wartungshäufigkeit minimiert und die Zeit zwischen den Wartungen maximiert wird.

Bei zustandsabhängiger Wartung wird eine Wartung nur dann durchgeführt wird, wenn ein unbefriedigender Zustand des Triebwerkes dies erfordert. Dies können zum einen wirtschaftliche Gründe sein oder aber die Annäherung oder Überschreitung eines vom Triebwerkshersteller vorgegebenen Grenzwertes. Betreiber arbeiten hier meist auf Basis von Trendfortschreibungen: ist etwa absehbar, dass bestimmte Parameter in naher Zukunft einen Grenzwert erreichen, wird das Triebwerk für eine Überholung eingeplant. Aufgrund unterschiedlicher Umwelt- und Betriebsbedingungen erreichen verschiedene Triebwerke Grenzwerte zu unterschiedlichen Zeitpunkten. In BILD 2 ist eine Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten für den in der Betriebspraxis überwiegend verwendeten Triebwerksparameter EGT (Turbinenaustrittstemperatur) dargestellt.

Diese kann auf Basis von Leistungssyntheserechnungen einer Flotte von Triebwerken abgeleitet werden.

Der zustandsabhängigen Überholung gegenüber steht die Überholung von Triebwerken im Rahmen von fixen Wartungsintervallen. Hierbei wird ein Triebwerk nach im Vorfeld festgelegten Zeitintervallen gewartet, auch wenn eine Wartung aus wirtschaftlichen Gründen oder Sicherheitsaspekten nicht unbedingt nötig wäre. Dieses Wartungskonzept kann entsprechend einfach im Modell umgesetzt werden, indem die Triebwerke nach fixen Intervallen „ausfallen“ und überholt werden müssen.

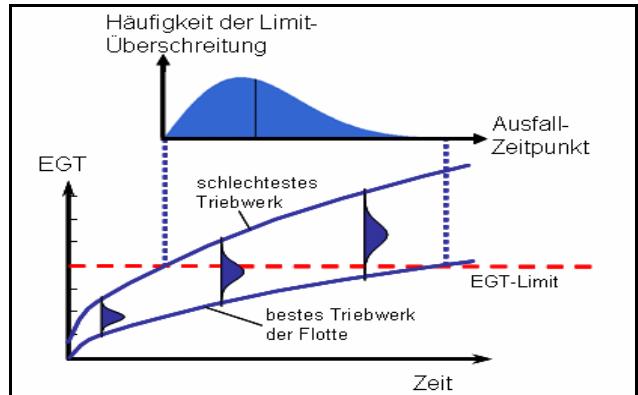


BILD 2. Prinzip der Ableitung einer Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten einer Triebwerksflotte aufgrund des Überschreitens eines EGT-Limits

Die Wartungsphilosophie des Betreibers spiegelt sich somit in vielfältiger Weise wider, etwa bei der Festlegung einer minimalen Ausnutzung der Lebensdauer von LLPs⁴, der Auswahl der Parameter und Grenzwerte, die zur Bewertung des Zustands von Triebwerken herangezogen werden als auch bei der Entscheidung zwischen einem fixen oder zustandsabhängigen Wartungsintervall. Ein Aufbau des Modells aus Betreibersicht sowie die Festlegung eines Referenzbetreibers mit konkreter Wartungsphilosophie ist deshalb Voraussetzung für eine realitätsnahe Modellierung. Im Modell wurden diesbezüglich folgende Annahmen getroffen:

- es wird von einer zustandsabhängigen Wartungsphilosophie der Triebwerksflotte ausgegangen,
- hierfür wird eine Lognormalverteilung für den Zeitpunkt der Limitüberschreitung des Triebwerksparameters EGT verwendet,
- wenn ein Triebwerk einer Überholung unterzogen wird, werden LLPs bereits nach Überschreitung von 70% ihrer zulässigen Lebensdauer ausgetauscht
- ansonsten wird durch die Lebensdauerlimitierung ein Überholungsvorgang initiiert,
- des Weiteren wird eine Triebwerksüberholung aufgrund von zufälligen Ereignissen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $3 \cdot 10^{-6}$ berücksichtigt.

3.2. Umfang von Wartungsmaßnahmen

Nach Festlegung des Wartungszeitpunktes gemäß den

³ In zahlreichen Wartungsmodellen wird für zufällige Ereignisse eine Exponentialverteilung verwendet. Diese weist entgegen weitläufiger Meinung jedoch keine konstante Ausfallrate auf sondern nur eine konstante relative Ausfallrate, also bezogen auf eine durch die Ausfälle abnehmende Population. Die Triebwerkspopulation nimmt durch besagte zufällige Ereignisse jedoch nicht ab.

⁴ Die Festlegung einer minimalen Ausnutzung der Lebensdauer von LLPs kann andererseits auch eine Zielgröße bei der Optimierung von Wartungskosten sein. Dies soll jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung sein. Es wird von einer bereits festgelegten Wartungsphilosophie ausgegangen.

Ausführungen in 3.1 ist die Bestimmung des Wartungsumfangs zu diesem Zeitpunkt notwendig. Da in dieser Betrachtung nur ein Vergleich der Blisk-Bauweise mit einem Schaufel-Scheibe-Design vorgenommen werden soll – also eine Differenzbetrachtung – können bei der Modellierung des Umfangs der nötigen Wartungsmaßnahmen alle Arbeitsschritte unberücksichtigt bleiben, die bei beiden Designs anfallen. Es sind dies insbesondere jegliche Arbeiten zwischen Demontage des Triebwerks vom Flügel bis hin zum evtl. notwendigen Eingangstest im Wartungsbetrieb sowie zwischen Abnahmetest und Remontage des Triebwerks an den Flügel. Des Weiteren jegliche Wartungsmaßnahmen an anderen Anbaugeräten und Modulen ohne Blisks. Von geringen und deshalb im Rahmen dieser Betrachtung vernachlässigbaren Unterschieden ist bei der Reinigung der Komponenten sowie bei Verwaltungs- und Gemeinkosten des Wartungsbetriebes auszugehen.

Die Blisk-Bauweise hat jedoch signifikante Implikationen auf den eigentlichen Reparatur- und Austauschprozess im Verdichterrotorbereich als auch – in geringerem Maße – auf dessen Demontage-, Befundungs- und Remontageprozess. Bei der Demontage (und umgekehrt auch bei der Remontage) des Triebwerks in Blisk-Bauweise entfallen einige Arbeitsschritte: aufgrund der festen Verbindung der Schaufeln mit der Scheibe müssen diese als auch zugehörige bauweisenbedingte Kleinteile nicht von der Trommel entfernt werden. Des Weiteren entfällt ein gewisser Mehraufwand für die entsprechende Bauteilloistik sowie -dokumentation. Bezuglich des Befundungsprozesses ist anzunehmen, dass bei Blisks durch die wegfallende Befundung des Schaufelfußes, der Schaufelnut sowie den zugehörigen Kleinteilen ein geringerer Befundungsaufwand nötig ist. Dieser Minderaufwand bei Blisks wird teilweise wieder eingeschränkt durch eine geringere Visibilität sowie schlechtere Zugänglichkeit der Schaufeln insbesondere im Annulusbereich.

Die integrale Bauweise von Blisks führt des Weiteren zu Unterschieden im Ablauf des Befundungsprozesses. Die Befundung von Blisks kann nicht mehr parallel und somit gleichzeitig an verschiedenen Komponenten erfolgen sondern muss vielmehr sequenziell durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass tendenziell mit längeren Durchlaufzeiten bei Verdichtern in Blisk-Bauweise zu rechnen ist – trotz des als geringer angenommenen Arbeitsaufwandes. Wie stark sich der gesamte Befundungsprozess verlängert hängt im Wesentlichen von der innerbetrieblichen Logistik des Wartungsbetriebes ab. Anhand von BILD 3 soll verdeutlicht werden, dass die Blisk-Bauweise nicht unbedingt eine längere Befundungsdauer zur Folge hat, etwa wenn im betrachteten Wartungsunternehmen Arbeitspakete standardmäßig sequenziell abgearbeitet werden.

Durch BILD 3 wird deutlich, dass bei weiteren verfügbaren Arbeitsplätzen und vermehrter paralleler Abarbeitung von Arbeitspaketen sich die Befundungsdauer bei der Blisk-Bauweise im Gegensatz zur Schaufel-Scheibe-Bauweise nicht weiter verkürzen würde, sondern die Befundung der Blisk den kritischen Pfad darstellen würde.

Der Anteil der modellierten Merkmale, die einen wartungsbedürftigen Zustand erreicht haben, lässt sich unmittelbar aus der in 2.3 erläuterten Modellierung der Ausfallzeitpunkte ableiten. Bei der ersten Triebwerksüberholung wird ein entsprechender Anteil von Komponenten ausgewech-

selt oder repariert. Dies hat zur Folge, dass bei der nächsten und jeder weiteren Triebwerksüberholung Komponenten unterschiedlichen Alters im Triebwerk vorhanden sind: Teile seit Inbetriebnahme des Triebwerks, bei einer Überholung eingebaute Komponenten sowie bei einer Überholung reparierte Komponenten. Für jeden Teiletyp muss deshalb nach einer Überholung eine separate Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten berücksichtigt werden. Durch anteilmäßige Überlagerung der jeweiligen Verteilungsfunktionen kann die Zusammensetzung der Komponenten im Triebwerk sowie der Anteil der zu tauschenden Komponenten unter Kenntnis des Überholungszeitpunktes analytisch errechnet werden.

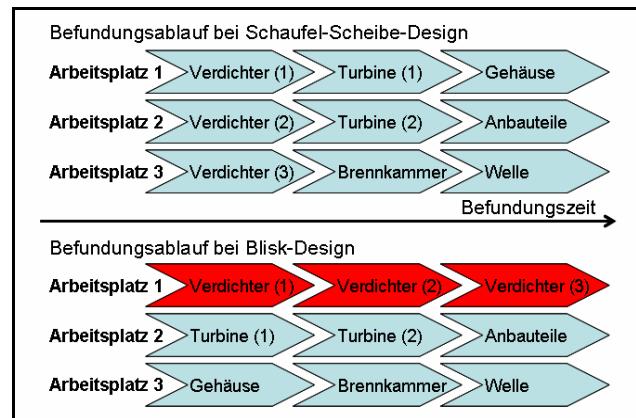


BILD 3. Möglicher vereinfachter Ablauf der Triebwerksbefundung unter der Annahme gleich großer Arbeitspakete an drei Arbeitsplätzen, rot markiert: Befundung der Blisk

In der Wartungspraxis gibt es für zahlreiche Komponenten ein sog. „Soft Life“. Darunter wird die Wartungsvorschrift verstanden, dass Komponenten, die eine vorgegebene Zeit im Triebwerk überschritten haben, bei der nächsten Triebwerksüberholung in jedem Falle ausgetauscht werden müssen.⁵ Im entwickelten Simulationsprogramm wird dies durch logische Abfragen der in die Verteilungsfunktion der Ausfallzeiten einzusetzenden Zeitpunkte simuliert.

3.3. Reparaturverfahren für Blisks

Der Austausch und Reparaturprozess von Verdichterschaufeln beim Schaufel-Scheibe-Design ist dadurch geprägt, dass an Schaufeln i.d.R. nur kleine Reparaturen vorgenommen werden und bei größerer Beschädigung keine Reparatur sondern ein Austausch der Schaufeln erfolgt.⁶ Dies macht unmittelbar den bedeutendsten Unterschied zur Blisk-Bauweise deutlich, da hier ein Austausch einzelner beschädigter Schaufeln durch reine Montage und Demontage nicht möglich ist. Da der Austausch einer kompletten Blisk oder Blisk-Trommel mit extrem hohen Kosten verbunden wäre, wird die Notwendigkeit der Entwicklung von Reparaturverfahren für Blisks deutlich. Aufgrund der besonderen Bedeutung von Reparaturverfahren für Blisks sollen im Folgenden die wichtigsten Reparaturverfahren sowie deren Einsatzspektrum vorgestellt werden.

⁵ Dies ist nicht zu verwechseln mit Lebensdauerlimits, welche in keinem Fall überschritten werden dürfen.

⁶ Ausdrücklich davon ausgenommen bleiben Bläserschaufeln, bei denen Reparaturen aufgrund ihrer Hochwertigkeit wirtschaftlich sind.

Beschädigte Schaufeln einer Blisk können hauptsächlich mit drei Verfahren repariert werden. Bei geringen Schäden wird die betroffene Schaufel an der geschädigten Stelle durch Schleifen wieder geglättet und somit ein weiteres Risswachstum verhindert (Blending). Bei größeren Schäden ist es möglich, den beschädigten Bereich der Schaufel zu entfernen und entweder über ein Auftragsschweißprozess (Cladding) wieder aufzubauen oder durch ein vorgefertigtes Stück, einen so genannten Patch, zu ersetzen (Patching).

3.3.1. Blending

Blending ist ein gängiges Verfahren bei allen Arten von Verdichterschaufeln und findet vorzugsweise bei leichten Beschädigungen Anwendung. Die durch kleine Kerben, Dellen und Verformungen auf der Schaufeloberfläche und an den Schaufelkanten beschädigte Schaufel wird hierbei unter Einhaltung festgelegter Toleranzen mittels Schleif- und Polierwerkzeugen der Kontur der Schaufel möglichst genau angeglichen (vgl. BILD 4).

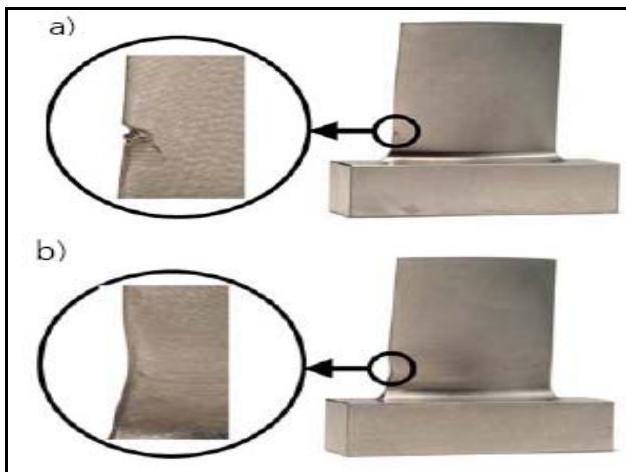


BILD 4. Beispiel der Beschädigung einer Schaufel vor (a) und nach (b) dem Blending-Prozess

Durch das Angleichen wird die Umströmung der Schaufel verbessert und vor allem einer Rissausbreitung aufgrund hoher Kerbfaktoren vorgebeugt. Während bei der konventionellen Bauweise die Schaufeln vor der Bearbeitung abmontiert und anschließend einzeln bearbeitet werden, müssen bei einer Blisk i.d.R. Maßnahmen zum Schutz benachbarter Schaufeln getroffen werden. Die Schaufeln werden deshalb mit speziellem Klebeband oder Schutzfolie vor Beschädigungen und Verschmutzung geschützt. Für den Blending-Prozess wird deshalb ein Mehraufwand von 25% in der Kostenmodellierung angenommen [9].

3.3.2. Auftragsschweißen (Cladding)

Das grundsätzliche Prinzip beim Auftragsschweißen besteht darin, mittels einer Energiequelle und eines meist pulverförmigen Zusatzwerkstoffes eine dünne Schicht auf eine Oberfläche aufzutragen und mit dieser zu verschmelzen. Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis eine gewünschte Auftragshöhe erreicht ist. Unter den unterschiedlichen Verfahren ist das Laserauftragsschweißen (Laser Cladding) das derzeit vielversprechendste Verfahren für beschädigte Blisk-Schaufeln. Es ermöglicht Reparaturen an komplexen Geometrien und kleinen Schaufeln

sowie die Regenerierung nahezu kompletter Schaufeln (vgl. BILD 5)⁷. Hierbei kann mit relativ geringem Zeitaufwand ein endkonturnaher Auftrag erreicht werden, was wiederum die Nachbearbeitungszeit deutlich verringert. [6] verweist bspw. auf eine Untersuchung, in der die Reparaturdauern verschiedener Verfahren untersucht wurden. Hierbei wurde gezeigt, dass in einer Stunde an 25-30 Turbinenschaufeln die Reparatur der Schaufelspitzen einschließlich Nachbearbeitung vorgenommen werden kann.

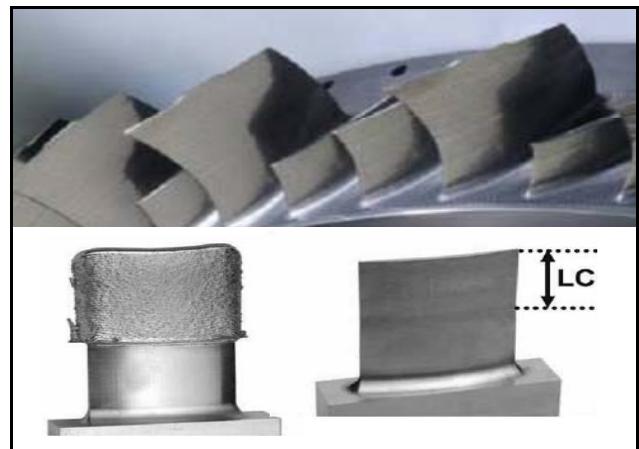


BILD 5. Beispiel des Cladding-Prozesses, oben: Schaufel nach dem Entfernen beschädigter Bereiche, unten links: nach dem Auftragsschweißen, unten rechts: wiederhergestellte Kontur nach der fräsenden Bearbeitung

Die Prozesskosten werden im Modell auf Basis von Maschinenstundensätzen, Prozessdauern sowie Materialkosten (Pulverkosten und Gaskosten) errechnet [9].

3.3.3. Flicken (Patching)

Beim Patching wird der beschädigte Bereich der Schaufel entfernt und durch einen Patch ersetzt. Der Patch ist aus dem gleichen Material wie der Grundwerkstoff und kann bspw. durch Laserschweißen an die Schaufel geschweißt werden. Die Patches können je nach Lage der Beschädigung an verschiedenen Bereichen der Schaufel angebracht werden, wobei hier jedoch Restriktionen aufgrund einer angestrebten gleich bleibenden restlichen Lebensdauer des Bauteils nach der Reparatur vorliegen.

Die zulässigen Bereiche sind u.a. abhängig von der Qualität der Schweißnaht, der Schaufelgeometrie, den Wärmeeinflüssen sowie der konkreten Schaufelbelastung während des Betriebs. Die Anwendbarkeit des Verfahrens hängt des Weiteren von Abstand, Größe und Geometrie der Schaufeln sowie der Position der Beschädigung ab. Derzeit ist dieser Prozess noch mit Unsicherheiten behaftet. Entsprechend unsicher ist die Modellierung der Prozesskosten. In Hinblick auf Prozesszeiten dauert der Schweißprozess an sich nur wenige Sekunden, eine übergeordnete Rolle spielt deshalb die Einspannung und Ausrichtung der Patches. Die auf Basis des in BILD 6 dargestellten Prozessablaufes bestimmte Prozessdauer ist in starkem Maße vom Automatisierungsgrad der Reparatur abhängig. Diese Dauer multipliziert mit dem Maschinen-

⁷ Angestrebt ist die Regenerierung von Schaufeln bis zu 2/3 ihrer Höhe [6]

stundensatz sowie addierte Materialkosten für das Patch ergeben die pro Patch erwarteten Prozesskosten.

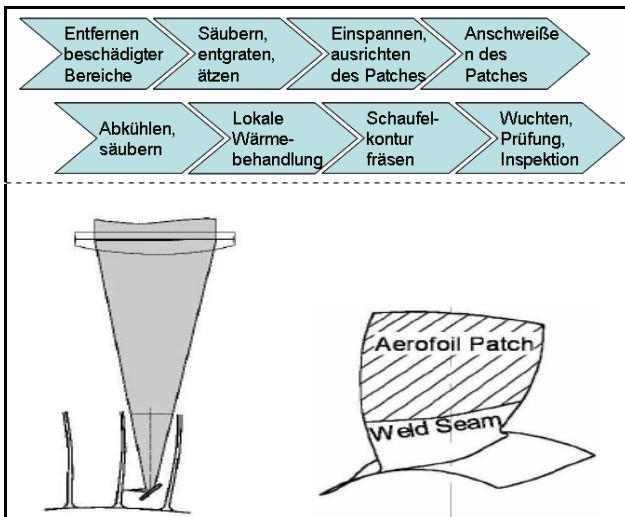


BILD 6. Prozessablauf des Patchings (oben) und schematische Darstellung des Anschweißens einer Schaufel an die Blisk mit Hilfe eines Lasers (unten)

3.3.4. Austausch einzelner Blisk-Stufen

Bei Blisk-Trommeln kann neben dem Austausch oder der Reparatur der mehrstufigen Trommel auch in Betracht gezogen werden, nur einzelne Stufen auszutauschen oder zu reparieren. Der Austausch einer Stufe würde neben dem Neupreis der Stufe zusätzlich die Kosten für das Abtrennen der beschädigten und das Anbringen der neuen Stufe enthalten, allerdings den Austausch unbeschädigter anderer Stufen vermeiden. Besonders bei geschweißten Trommeln wäre ein Austausch jedoch aufwändig. Zudem könnte die Lebensdauer der neuen Stufe nicht mehr voll ausgenutzt werden.

Die Bauweise eines Verdichters mit Blisk-Trommeln (d.h. geschraubt vs. geschweißt) spielt deshalb eine entscheidende Rolle bei der Entscheidung zum Tausch einzelner Stufen. Da sich das Verfahren des Trenns und Wiederaanschweißens von geschweißten Trommeln aus genannten Gründen noch nicht durchsetzen konnte, findet es in der durchgeführten Kostenmodellierung keine Berücksichtigung. Allerdings kann anhand des Modells eine Quantifizierung des finanziellen Nutzens der Verfügbarkeit eines solchen Verfahrens durchgeführt werden.

3.3.5. Logistische Implikationen der Reparatur von Blisk-Trommeln

Die Ausführungen in den vorigen Abschnitten machen deutlich, dass die Reparatur von Blisks neben technischen Herausforderungen mit einem deutlichen zeitlichen Mehraufwand gegenüber dem bloßen Austausch von Schaufeln bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise verbunden ist. Für die folgende wirtschaftliche Bewertung wird deshalb angenommen, dass die Reparatur der Blisk-Trommel den kritischen Pfad des gesamten Überholungsprozesses darstellt⁸ und letztlich zu einer verlängerten Durchlaufzeit

⁸ Neben dem zusätzlichen Reparaturaufwand ist bspw. anzuneh-

führt. Ähnliche Überlegungen wie zuvor bei der Befundung (vgl. BILD 3) ergeben, dass die wirtschaftlichen Auswirkungen stark von der innerbetrieblichen Logistik des Wartungsbetriebes sowie dem Flottenmanagement⁹ abhängen und aus diesem Grund nur Annahmen getroffen werden können. Im Folgenden wird angenommen, dass sich die Durchlaufzeit des Triebwerkes durch die Blisk-Bauweise um 20% erhöht (z.B. 50 auf 60 Tage).

Die innerbetrieblichen Überholungskosten werden bereits durch die Modellierung der Reparaturprozesse abgedeckt. Weitere Implikationen sind jedoch auf Betreibersseite festzustellen, da für die zusätzliche Zeit der Triebwerksüberholung mehr Ersatztriebwerke benötigt werden. Unter Kenntnis von Flottengröße und -nutzung, mittlerer Überholungshäufigkeit und -dauer sowie einem gewünschten Vertrauensniveau kann die Anzahl an benötigten Ersatztriebwerken aus einer Binomialverteilung abgeleitet werden [1]: Demnach erhöht sich der mittlere Bedarf an Ersatztriebwerken von 8,0% der vorhandenen Triebwerksflotte bei 50 Überholungstagen auf 9,2% bei 60 Überholungstagen und führt somit unter den getroffenen Annahmen zu 15,9% relativem Mehraufwand für Ersatztriebwerke aufgrund der Blisk-Bauweise.

3.4. Zuordnung von Schädigungen zu Reparaturverfahren

Für eine Modellierung des Umfangs der Triebwerksüberholung ist eine Abschätzung der erforderlichen Tätigkeiten notwendig. In einem ersten Schritt findet deshalb eine Zuordnung der implementierten Merkmalsschädigungen zu geeigneten Reparaturverfahren statt. Hierbei können grundsätzlich fünf Reparaturstufen unterschieden werden:

- 1) die Komponente ist unbeschädigt und es ist keine Reparatur notwendig,
- 2) die Beschädigung ist so gering, dass ein manuelles Polieren genügt,
- 3) die Beschädigung überschreitet vorgeschriebene Limits, kann jedoch durch einfache Reparaturverfahren (z.B. Blending) repariert werden,
- 4) die Beschädigung überschreitet das Blending-Limit, es existiert jedoch ein geeignetes Reparaturverfahren (z.B. Cladding, Patching)
- 5) die Beschädigung überschreitet weitere Limits, eine Reparatur wird aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht durchgeführt.

Für jede in 2.3 aufgeführte Merkmalsschädigung kann nun eine Zuordnung zu den genannten fünf Fällen erfolgen (vgl. TAB 1). Da Fall 1) keine Schädigung darstellt, wird dieser nicht in die Tabelle aufgenommen. Falls nun bei einem Triebwerk ein bestimmtes Merkmal ausfällt, stellt sich die Frage, welche Reparaturstufe konkret aktiviert wird. Prinzipiell stehen hierfür zwei Methoden zur Verfügung. Einerseits besteht die Möglichkeit, für jede Kombination aus Merkmalsschädigung und Reparaturstufe separate Verteilungsfunktionen zu erstellen. Andererseits kann nur eine Verteilungsfunktion für die jeweilige Merkmalsschädigung

men, dass die Fähigkeit zur Reparatur von Blisks nicht in jedem Wartungsbetrieb gegeben ist und deshalb eine – mit einem zeitlichen Mehraufwand verbundene – externe Reparatur notwendig ist.

⁹ Dies betrifft insbesondere die eventuelle Möglichkeit des Austausches von Modulen oder Komponenten zwischen Triebwerken des gleichen Betreibers.

gung erstellt werden, anschließend erfolgt erst eine Aufteilung zu Reparaturstufen nach empirisch gewonnenen Häufigkeiten. Für die durchgeführte Modellierung wurde der zweite Weg gewählt, da die Erstellung von Verteilungsfunktionen der Ausfallzeiten eine Mindestgröße der Datenbasis erfordert und diese bei weiterer Auftrennung nicht mehr gewährleistet wäre.

Reparaturstufe Merkmalschädigung	2)	3)	4)	5)
Vorderkanten-Erosion	B / S	B / S	B	S
FOD, Schaufeln	B / S	B / S	B	S
Verkürzung, Schaufeln			B	S
Fretting, Schaufelfuß				S
Fretting, Trommel			S	S
Abnutzung Einlaufschicht, Rotor/Gehäuse		B / S		
Eigenschädigung, Trommel	S	S	S	

TAB 1. Matrix der Zuordnung der Merkmalschädigungen zu den Reparaturstufen 2) - 5). (B = Blisk-Bauweise, S = Schaufel-Scheibe-Bauweise)

Bei der Modellierung der Ausfallzeiten und entsprechender Reparatur von Merkmalen ist die Beachtung der Korrelationen zwischen den Merkmalschädigungen zu beachten, falls für eine Komponente mehrere Schädigungsmechanismen relevant sind. In der hier beschriebenen Ausfallmodellierung werden für Verdichterschaufeln vier verschiedene Merkmalschädigungen simuliert (vgl. TAB 1). Zum Zeitpunkt t sollen als Beispiel nun folgende Ausfälle auftreten:

- 1) $x_1=20\%$ der Schaufeln aufgrund der Erosion der Vorderkanten
- 2) $x_2=15\%$ der Schaufeln durch FOD / DOD
- 3) $x_3=30\%$ der Schaufeln durch Abrasion
- 4) $x_4=5\%$ der Schaufeln durch Fretting des Schaufelfußes

Es stellt sich nun die Frage, ob einzelne Schaufeln nun aufgrund des gleichzeitigen Ausfalls mehrere Merkmale ausgetauscht werden müssen oder ob die Schädigungsmechanismen jeweils bei unterschiedlichen Schaufeln wirken. Je nach Korrelation der Schädigungsmechanismen müssten bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise mit oben genannten Zahlen zwischen 30% (Maximum der oben genannten ausgefallenen Merkmale) und 70% (Summe der oben genannten ausgefallenen Merkmale) der Schaufeln ausgetauscht werden. Hierfür wurde ein entsprechender Schädigungs-Korrelationskoeffizient K eingeführt: bei $K = 1$ wirken alle Schädigungsmechanismen auf die gleichen Schaufeln. Wird nun eine Schaufel aufgrund eines Mechanismus ausgetauscht, so ist die Reparatur bzw. der Austausch von Schaufeln aufgrund eines anderen Mechanismus hinfällig, da die Schaufel durch ein anderes ausgefallenes Merkmal bereits ausgetauscht wurde. Bei $K = -1$ hingegen schließen sich die Schädigungsmechanismen an einzelnen Schaufeln gegenseitig aus und es muss die Summe der durch verschiedene Merkmale ausgefallenen Schaufeln getauscht werden.

Obige Ausführungen treffen jedoch nur bei der Möglichkeit eines Austausches von Komponenten zu. Falls, wie bei

Blisks, kein Austausch möglich ist, so sind in jedem Falle alle ausgefallenen Merkmale zu reparieren. Ob sich die ausgefallenen Merkmale an der gleichen Schaufel befinden, spielt für die Notwendigkeit ihrer Wartung keine Rolle. Dies hat letztlich zur Folge, dass bei Blisks deutlich mehr Schaufeln repariert als bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise ausgetauscht werden müssen.

4. WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG ÜBER DEN LEBENSZYKLUS

4.1. Kapitalwertkriterium

Im Folgenden wird ein wirtschaftliches Verfahren präsentiert, mit dem eine Bewertung der Blisk-Bauweise über den Lebenszyklus von Flugtriebwerken aus Sicht des Betreibers (i.d.R. Fluggesellschaft) ermöglicht wird.

In der einschlägigen Literatur häufig genannte und in der anwendungsbezogenen Praxis sehr gebräuchliche Verfahren sind die sog. statischen Bewertungsverfahren¹⁰. Da diese tendenziell zu mit der Bewertungsdauer zunehmenden rechnerischen Fehlern neigen – die Lebensdauer eines Flugtriebwerkes erstreckt sich i.d.R. über mehrere Jahrzehnte – findet hier das zwar anspruchsvollere, finanzmathematisch jedoch exakte Verfahren der Kapitalwertberechnung Anwendung. Zur vergleichenden wirtschaftlichen Bewertung zweier Szenarien, bzw. im vorliegenden Fall zweier Bauweisen, eignet sich die Anwendung des Kapitalwertkriteriums auf Basis von Differenzzahlungsreihen [1]. Der gemäß (3) errechnete Kapitalwert quantifiziert hierbei die Vorteilhaftigkeit einer der beiden zu bewertenden Bauweisen gegenüber der anderen über den Lebenszyklus, indem die Differenz der bauweisenindividuellen Kapitalwerte errechnet wird. Falls $\Delta KW > 0$ gilt, gebührt im Falle der Rechnung gemäß (3) der Blisk-Bauweise der Vorzug.

$$(3) \Delta KW = KW_B - KW_S = \sum_{t=0}^T (e_{B,t} - e_{S,t}) \cdot q^{-t}$$

Einfluss findet hierbei jeglicher Zahlungsstrom über den Lebenszyklus des betrachteten Flugtriebwerks. Der jeweilige Abzinsungsfaktor ergibt sich aus dem Zeitpunkt des Zahlungsstroms t sowie dem in Abhängigkeit des betrachteten Unternehmens angesetzten Kalkulationszinsfuß q. Der Vorteil der Betrachtung einer Differenzzahlungsreihe im Vergleich zur Bestimmung der bauweisenindividuellen Kapitalwerte ist offensichtlich: alle Zahlungsströme, die bei beiden Bauweisen in gleicher Weise anfallen, können außer Betracht bleiben, da sie sich bei der Bildung der Differenz gemäß (3) ohnehin aufheben würden. Dadurch kann der Rechnungs- und Modellierungsaufwand signifikant reduziert werden.

4.2. Monte Carlo Simulation

Aufgrund zahlreicher probabilistischer Einflussgrößen im

¹⁰ Als Beispiel sei die Kostenvergleichsmethode oder die Amortisationsmethode genannt, die u.a. anhand von linearen Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen auf die durchschnittliche Mittelbindung einen Vergleich zwischen alternativen Projekten vornehmen.

Modell ist eine analytische Berechnung, etwa auf Basis von Erwartungswerten, wenig zielführend und aussagekräftig. Vielmehr eignet sich für die Berechnung der Differenzkosten eine Monte Carlo Simulation (MCS). Eine MCS zeichnet sich dadurch aus, dass bei jeder Modellrechnung anstatt mit einem fest vorgegebenen Wert mit einer generierten Zufallszahl gerechnet wird. Diese Zufallszahl entspricht in ihrer Häufigkeit einer vom Anwender vorgegebenen Dichtefunktion. Mit zunehmender Zahl an Wiederholungen der Modellrechnung werden die vorgegebenen Dichtefunktionen immer besser angenähert. Auf diese Weise kann die Auswirkung von probabilistischen Einflussgrößen auf gewünschte Ergebnisparameter erfasst werden.

Die Durchrechnung einer Vielzahl von Fällen (im vorliegenden Modell i.d.R. 10.000) ermöglicht des Weiteren die Berechnung von Korrelationen zwischen Eingabe- und Ergebnisparametern. Dies erlaubt eine Identifikation der Größen, welche auf den jeweiligen Ergebnisparametern einen bedeutenden Einfluss haben und somit die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse.

4.3. Ergebnisse der Modellierung

Bei der Betrachtung der modellierten Kosten über den Lebenszyklus (vgl. BILD 7) fällt auf, dass der überwiegende Teil der Kosten sowohl bei der Blisk-Bauweise als auch bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise von der Trommel herührt. Aufgrund der deutlich höheren Herstellkosten einer Blisk-Trommel im Vergleich zu einer Trommel ohne Schaufeln ist dies bei der Blisk-Bauweise ausgeprägter. Die Kosten fallen aufgrund des Erreichens der Lebenslimierung der jeweiligen Scheiben an.

Bei der Betrachtung der Kosten für den Austausch bzw. der Reparatur der Schaufeln sind zwei Effekte zu beobachten, die sich im angenommenen Szenario annähernd ausgleichen. Kostensenkend für die Blisk wirken sich die unter den getroffenen Annahmen geringfügig niedrigeren Reparaturkosten aus (verglichen mit dem Austausch von Schaufeln), des Weiteren werden Blisk-Schaufeln häufiger erneuert (aufgrund der Tatsache, dass diese bei Erreichen des Lebenslimits der Trommel mit ausgetauscht werden) und sind somit im Mittel weniger abgenutzt. Andererseits wirkt sich kostenerhöhend aus, dass jedoch mehr Schaufeln repariert als bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise ausgetauscht werden müssen (vgl. 3.4).

Die bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise erhöht angenommene Wahrscheinlichkeit für Eigenschädigung sowie die Schädigung aufgrund von Fretting in der Schaufelnut tragen zu mäßigen Mehrkosten gegenüber der Blisk-Bauweise bei. Kosten für die Wartung der Einlaufschichten fallen in beiden Bauweisen in nahezu gleicher Höhe an, geringfügige Mehrkosten entstehen bei Blisks durch aufwändige Schutzmaßnahmen der Schaufeln. Die zusätzlich anfallende Reparatur des Schaufelfußes bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise schlägt geringfügig zu Buche. Unter dem Punkt „Sonstiges“ in BILD 7 sind im Wesentlichen Mehrkosten für Ersatztriebwerke bei der Blisk-Bauweise, bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise geringe Mehrkosten für einen erhöhten Befundungsaufwand subsumiert.

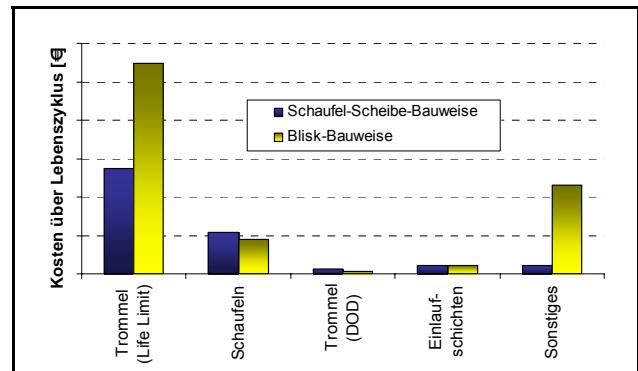


BILD 7. Vergleich der über den Lebenszyklus anfallenden Kosten nach Kostenverursacher

Um weitere Einflussgrößen auf die Vorteilhaftigkeit der bewerteten Bauweisen zu identifizieren wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die in BILD 8 aufgeführten Einflussgrößen wurden hierbei um 10% verändert und die relative Änderung des Mittelwertes der Differenzkosten erfasst.

Neben den oben bereits erläuterten Herstellkosten für Blisks wurde die angenommene Erhöhung der Durchlaufzeiten als maßgeblicher Kostentreiber identifiziert. Würde sich diese anstatt 10 Tage nur um 4 Tage erhöhen, so würden sich die Differenzkosten um 18,2% verringern. Ein weiterer maßgeblicher Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit von Blisks ist die Zeit bis zum Erreichen des EGT-Limits als auch die Flugdauer (nicht separat dargestellt). Beide Einflussgrößen hängen mit der Intensität des Flugbetriebes zusammen: je stärker die Schädigung des Triebwerkes desto schneller wird die EGT-Margin aufgebraucht. Dies hat letztlich zur Folge, dass die Komponenten häufiger repariert bzw. ausgetauscht werden müssen und dass die Lebensdauergrenze von LLPs schneller erreicht wird. Letzteres trägt über den dadurch notwendigen häufigeren Wechsel von Blisk-Trommeln über deren Herstellkosten zu höheren Kosten bei.

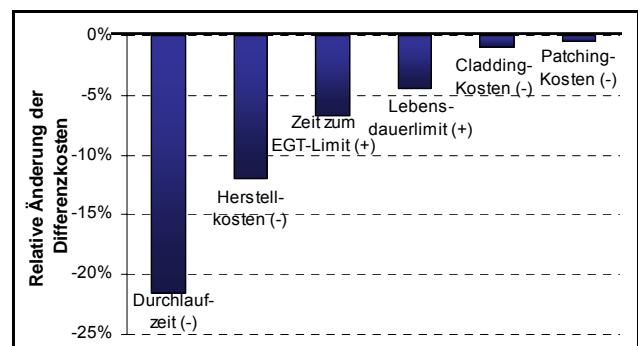


BILD 8. Relative Änderung der Differenzkosten (Blisk – Schaufel-Scheibe) durch Senkung (-) bzw. Erhöhung (+) der jeweiligen Parameter um 10%

Eine Erhöhung des Lebensdauerlimits der Scheiben bzw. Blisks würde dementsprechend zu einer Senkung der Differenzkosten beitragen, was wiederum mit den hohen Herstellkosten der Blisks zusammenhängt. Eine Senkung der Reparaturkosten (Cladding und Patching) trägt demgegenüber nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Blisks bei.

FAZIT

Die durchgeführte Kostenmodellierung unter den getroffenen Annahmen¹¹ machen deutlich, dass die Verfügbarkeit und Anwendbarkeit von entsprechenden Reparaturverfahren eine notwendige Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit von Blisks sind. Ohne Reparaturverfahren müssten Blisks quasi bei jeder Triebwerksüberholung ausgetauscht werden, was mit äußerst hohen Kosten verbunden wäre. Die Kosten der Anwendung der Reparaturverfahren haben hingegen einen relativ geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Unter der Annahme der Verfügbarkeit von entsprechenden Reparaturverfahren sind die Kosten für die aufgrund ihrer Lebenszeitlimitierung mehrmals im Leben eines Triebwerks auszutauschenden Blisks der maßgebliche Kostentreiber. Wirtschaftliche Optimierungsmaßnahmen sollten deshalb in erster Linie bei der Blisk-Herstellung ansetzen um die Herstellkosten zu senken. Des Weiteren kommt der Festlegung des Lebensdauerlimits der Blisk-Trommel aus denselben Gründen ein hoher Stellenwert zu.

Bei Reparaturverfahren steht neben der Sicherstellung ihrer grundsätzlichen Anwendbarkeit vor allem das Ziel im Vordergrund, trotz ihrer Anwendung die Gesamtüberholungsdauer von Triebwerken in Blisk-Bauweise nicht zu erhöhen. Dieser Sachverhalt könnte beim Patching bspw. zur Wahl eines höheren Automatisierungsgrades führen, da damit trotz höheren Prozesskosten i.d.R. eine kürzere Prozessdauer verbunden ist. Die im Modell angenommene längere Durchlaufzeit bei der Überholung von Triebwerken in Blisk-Bauweise führt zu einem erhöhten Bedarf an Ersatztriebwerken auf Betreiberseite. Alternativ wäre der Einsatz von deutlich kostengünstigeren Ersatz-Blisktrommeln denkbar, welche innerhalb einer Triebwerksflotte ausgetauscht werden können. So würden nur die Mehrkosten für zusätzliche Blisk-Trommeln anstatt für zusätzliche Ersatztriebwerke anfallen.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse macht zudem deutlich, dass die Anwendung von Blisks bei Langstreckenflugzeugen sowie bei geringerer Betriebsintensität (z.B. mit Derate, Umgebung mit geringer Luftpartikeldichte und geringeren Temperaturen) wirtschaftlicher sein kann. Ferner ist von einem Einsatz von erosionsverringernden Maßnahmen (z.B. Schutzschichten) bei Blisks ein höherer wirtschaftlicher Nutzen als bei der Schaufel-Scheibe-Bauweise zu erwarten.

Die Entwicklung von Reparaturverfahren für Blisks hat neben der Begünstigung der Anwendbarkeit von Blisks weitere Folgen. Bspw. können die neu entwickelten Verfahren aufgrund ihrer zunehmenden Wirtschaftlichkeit in ähnlicher Weise auch für herkömmliche Verdichterschaufeln angewendet werden und begünstigen dadurch wiederum die Schaufel-Scheibe-Bauweise. Darüber hinaus ist auch denkbar, die entwickelten Reparaturverfahren derart weiter zu entwickeln, dass diese auch bei der Produktion von Blisks eingesetzt werden können.

DANKSAGUNG

Dieses Modell wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Rolls-Royce Deutschland im Rahmen des Projektes OptiFer des Luftfahrtforschungsprogrammes III entwickelt. Im Kern des Vorhabens steht die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Zustands einer Flotte von Triebwerken über die Zeit um darauf aufbauend ein Modell zur Vorhersage von Betriebskosten über den Lebenszyklus zu erstellen. Die Autoren danken der Mithilfe zahlreicher Mitarbeiter der Firma Rolls-Royce Deutschland sowie Rolls-Royce plc.

LITERATUR

- [1] Bergin, P.: "Balancing an Airlines Spare Engine Portfolio", 11th Annual Aero Engine Leasing, Trading & Finance Conference, Amsterdam, Mai 2006
- [2] Bitz, M.: „Finanzwirtschaft und Banken – Investitionsmanagement“, Hagen, 2005
- [3] Fleischer, Gröger, Thum: Verschlechterung und Zuverlässigkeit, VEB Verlag Technik Berlin, 1980
- [4] Förstemann, M.: "Optimierung der Architektur moderner ziviler Flugtriebwerke zur Verbesserung der Lebenswegkosten. Dissertation Universität Stuttgart, 2004
- [5] Joint Aviation Authorities: „Joint Aviation Requirements, JAR-E, Engines, Amendment 13“, Hoofddorp, Niederlande, 2004
- [6] Kelbassa, I.: „Qualifizieren des Laserstrahl-Auftragsschweißens von Blisks aus Nickel- und Titanbasislegierungen“, Dissertation, Aachen, 2006
- [7] Kozuch, M.: „Entwicklung eines Lebenszykluskostenmodells für eine Blisk in zivilen Triebwerken“, Universität Stuttgart, 2006
- [8] Kunz, R., Brun, K., „Degradation in Gas Turbine Systems“, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Bd. 123, S. 70-77, 2001
- [9] Möbius, M.: „Ökonomische Bewertung von Reparaturverfahren für Blisks über den Nutzungszeitraum von Flugzeugtriebwerken“, Universität Stuttgart, 2006
- [10] Rossmann, A.: „Die Sicherheit von Flugtriebwerken“, 1. Auflage, Karlsfeld, 2000
- [11] Steffens, K.: "Triebwerksverdichter-Schlüsseltechnologie für den Erfolg von Luftfahrtantrieben", MTU Aero Engines GmbH, abrufbar über www.mtu.de/de-technik/technikberichte/ [21.08.2006]
- [12] Zaita, A. V., Buley, G., Karlsons, G., „Performance Deterioration Modelling in Aircraft Gas Turbine Engines“, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Bd. 120, S. 344-349, 1998
- [13] Tarabrin, A.P., Bodrov, A.L., Schurovsky, V.A., Stalder, J.P.: „An Analysis of Axial Compressor Fouling and a Cleaning Method of Their Blading“, ASME 96-GT363, 1996

¹¹ Es sind dies insbesondere die Verfügbarkeit, Anwendbarkeit und Gewährleistung der Zugänglichkeit von Reparaturverfahren, des Weiteren die Gewährleistung hoher Qualitätsstandards und Werkzeuge, um Beschädigungen beim Umgang mit Blisks zu vermeiden etc.