

PROBABILISTISCHE MODELLIERUNG DES EINFLUSSES VARIIERENDER UMWELT- UND BETRIEBSBEDINGUNGEN AUF DIE TRIEBWERKSINSTANDHALTUNG

M. Müller*, S. Staudacher*, W.-H. Friedl**, R. Köhler**, M. Weißschuh**

*Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart

**Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow

Zusammenfassung

Die Instandhaltungskosten und Zuverlässigkeit von Turboflugtriebwerken werden erheblich von den Umwelt- und Betriebsbedingungen beeinflusst, unter denen diese operieren. Zur Berücksichtigung dieses Zusammenhangs wurde ein probabilistisches Instandhaltungsmodell entwickelt, das die Schädigung der Bauteile und die Leistungsverschlechterung des Triebwerks simuliert. Die Zeitpunkte der Triebwerksüberholungen sowie die dabei durchgeführten Arbeiten werden im Modell durch die Abfrage verschiedener Kriterien festgelegt. Dazu gehören beispielsweise das Erreichen eines unzulässigen Schädigungszustands eines Bauteils und vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen.

Bei der Modellierung der Bauteilschädigung erfolgt eine Trennung der Streuungseinflüsse. Die Variation der Bauteilbelastbarkeit wird durch verschiedene Verteilungsfunktionen modelliert, die für jedes Bauteil die Wahrscheinlichkeit eines Versagens in Abhängigkeit der Zahl äquivalenter Referenzzyklen angeben. Die Modellierung der Belastungsstreuung erfolgt durch eine Zyklengewichtung. Das eingebundene Leistungsrechnungsmodell liefert die dafür benötigten physikalischen Triebwerksleistungsparameter.

Durch die Anwendung der Monte-Carlo Methode wird im Modell eine Flotte an Triebwerken simuliert. Die Wechselwirkung zwischen der Bauteilschädigung, der Leistungsverschlechterung und den Instandhaltungsmaßnahmen wird durch die Simulation des gesamten Triebwerkslebens berücksichtigt. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele wird gezeigt, dass das Modell den Einfluss der Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die Instandhaltung abbildet sowie eine Beurteilung von potentiellen Verbesserungen ermöglicht.

NOMENKLATUR

b	zyklischer Spannungsexponent, [-]	N_{kum}	kumulierte äquivalente Referenzzyklenzahl
c	zyklischer Dehnungsexponent, [-]	N_A	Zahl der Lastzyklen bis zum Anriss
c_{Partikel}	Partikelkonzentration, [g/m^3]	$N_{\text{Austausch}}$	Referenzzyklenzahl bis zum Austausch
e	Nenndehnung, [-]	$N_{\text{Reparatur}}$	Referenzzyklenzahl bis zur Reparatur
n, n'	zügiger, zyklischer Verfestigungsexponent, [-]	$N_{\text{Sicherheit}}$	Sicherheitsabschlag, [Referenzzyklen]
q	Kalkulationszinsfuß, [-]	N_{Versagen}	Referenzzyklenzahl bis zum Versagen
t	Zeit, [s]	O	Auszahlung, [€]
t_{Zyklus}	Verweildauer bei betrachteter Temperatur, [s]	R_m	Zugfestigkeit, [N/m^2]
ATOW	Zeit zwischen zwei Überholungen	S	Nennspannung, [N/m^2]
D_{Zyklus}	Gewichtungsfaktor, [-]	T	Betriebsdauer
E	Elastizitätsmodul, [N/m^2]	TET	Turbineneintrittstemperatur, [K]
$\text{Eff}_{\text{Reparatur}}$	Reparatureffektivität, [-]	α_K	Formfaktor, [-]
HCF	Hochzyklische Ermüdung	ε	örtliche Dehnung, [-]
I	Einzahlung, [€]	ε'_f	zyklischer Dehnungskoeffizient, [-]
ISA	Internationale Standardatmosphäre	σ	örtliche Spannung, [N/m^2]
K, K'	zügiger, zyklischer Spannungskoeffizient, [-]	σ'_f	zyklischer Spannungskoeffizient, [-]
KW	Kapitalwerte, [€]	ΔKW	Differenz der Kapitalwerte, [€]
L	Bauteillebensdauer, [Stunden]	Φ	Wellendrehzahl, [s^{-1}]
LCF	Niederzyklische Ermüdung		
LLP	lebensdauerbegrenztes Bauteil		
LV	Leistungsverschlechterung		
$N_{\text{akzeptabel}}$	Referenzzyklenzahl bis zu der ein Bauteil für den weiteren Betrieb akzeptabel ist	Indizes	
N_{echt}	Zahl der tatsächlich geflogenen Zyklen	a	Amplitude
		amb	Umgebung
		ref	Referenzwert

1. EINFÜHRUNG

Die Instandhaltung moderner Turboflugtriebwerke verursacht einen erheblichen Teil der direkten Betriebskosten eines Flugzeugs. Hinsichtlich der Instandhaltungskosten lassen sich für verschiedene Betreiber eines Triebwerkstyps große Unterschiede feststellen. Diese Unterschiede werden im Wesentlichen durch die variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen verursacht, unter denen die Triebwerke operieren. Eine entscheidende Voraussetzung für ein effizientes Triebwerksmanagement ist eine zuverlässige Vorhersage der Überholungszeitpunkte und des Ersatzteilbedarfs. Hierfür ist ein weitreichendes Verständnis des Triebwerksverhaltens unter verschiedenen Randbedingungen unabdingbar.

Heutzutage werden zunehmend flugstundengetriebene Verträge wie z.B. "Power By The Hour"™ zwischen den Triebwerksbetreibern und den Triebwerksherstellern abgeschlossen [1]. Bei diesen Verträgen zahlt der Kunde einen vereinbarten Betrag je Flugstunde an den Hersteller. Im Gegenzug stellt dieser ein einsatzfähiges Triebwerk bereit und führt alle notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen durch. Das Risiko unerwartet hoher Instandhaltungskosten liegt damit auf Seiten des Triebwerksherstellers. Aus diesem Grund soll das entwickelte Instandhaltungsmodell eine zuverlässige Abschätzung der zu erwartenden Instandhaltungskosten je Flugstunde in Abhängigkeit der betriebs-typischen Umwelt- und Betriebsbedingungen ermöglichen.

Neben der verbesserten Vorhersage des Instandhaltungsumfanges verlangt der zunehmende Kostendruck auf die Luftfahrtindustrie weitere Kosteneinsparungen. Zu diesem Zweck wird eine Anpassung der Instandhaltungsstrategie an den jeweiligen Kunden angestrebt. Durch die Anpassung soll eine verbesserte Ausnutzung der jeweils zur Verfügung stehenden maximal möglichen Betriebsdauer erreicht werden, ohne dass dies einen negativen Einfluss auf die operationelle Zuverlässigkeit hat [2]. An dieser Stelle zeigt sich die thematische Nähe zum Bereich der Überwachung des Lebensdauer-Verbrauchs [3][4]. Dabei wird mithilfe der vom Triebwerksüberwachungssystem gelieferten Daten die Schädigung der einzelnen Triebwerkskomponenten berechnet. Das hier vorgestellte Modell verwendet einen ähnlichen Ansatz basierend auf den Ausgabegrößen eines Leistungsrechnungsmodells.

1.1. Schädigungsmechanismen und Streuungseinflüsse

Triebwerkskomponenten sind während des Betriebs verschiedenen Schädigungsmechanismen ausgesetzt. Die wesentlichen Mechanismen sind niederzyklische Ermüdung (Low Cycle Fatigue, LCF), hochzyklische Ermüdung (High Cycle Fatigue, HCF), thermomechanische Ermüdung, Kriechen, Korrosion, Erosion und Reibverschleiß [5]. Die Mechanismen führen zu einem Verbrauch der Bauteillebensdauer und einer Reduktion der Leistungsfähigkeit des Triebwerks [6]. In der Regel sind die Triebwerkskomponenten mehreren Mechanismen gleichzeitig ausgesetzt, sodass parallel verschiedene Schädigungsformen an den Bauteilen auftreten. Eine Übersicht über die verschiedenen

Schädigungsformen einer Turbinenschaufel wird in [1] gezeigt. Im Vergleich mit der Einzelwirkung der Schädigungsmechanismen kann es bei gleichzeitiger Einwirkung mehrerer Mechanismen zu einer deutlichen Reduktion der Bauteillebensdauer kommen. Vernachlässigt man die Wechselwirkung der verschiedenen Schädigungsmechanismen entscheidet der dominierende Schädigungsmodus über die Lebensdauer des Gesamtbauteils. Eine Veränderung der Randbedingungen (z.B. Temperatur) kann dazu führen, dass eine andere Schädigungsform über die Bauteillebensdauer entscheidet [1]. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass alle Schädigungsarten bei der Modellierung berücksichtigt werden, die hinsichtlich der variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen lebensdauerlimitierend sein können.

Die Betriebsdauer nach der ein Bauteil versagt oder einen unzulässigen Zustand erreicht hängt von zahlreichen Einflussgrößen ab. Diese lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen. Die eine Gruppe beeinflusst die Bauteilbelastung, die andere Gruppe die Bauteilbelastbarkeit. Die Bauteilbelastbarkeit variiert aufgrund von streuenden Materialeigenschaften und Fertigungstoleranzen. Die Bauteilbelastung wird durch die Variation der Umwelt- und Betriebsbedingungen beeinflusst. Zu den Umweltbedingungen zählen die Umgebungstemperatur und der Umgebungsdruck. Auch die Feuchtigkeit und der Gehalt an Partikeln, wie z.B. Sand oder Meersalz der Umgebungsluft, wirken sich auf den Lebensdauerverbrauch der Bauteile aus. Zu den Betriebsbedingungen mit Einfluss auf die Bauteilbelastung gehören die Schubanforderung und die Flugdauer.

Der maximal zur Verfügung stehende Schub wird durch das verwendete Rating in Abhängigkeit der Umgebungs- und Betriebsbedingungen festgelegt [7]. Da nicht immer das maximale Startgewicht oder ungünstige atmosphärische Bedingungen vorliegen, wird häufig nicht der gesamte mögliche Schub benötigt, sodass eine Schubreduzierung vorgenommen werden kann [8]. Diese Schubminderung erweist sich unter anderem im Hinblick auf die Instandhaltungskosten als vorteilhaft [9].

Für die genannten Umwelt- und Betriebsbedingungen lassen sich mithilfe von Triebwerksüberwachungsdaten und Angaben zu den angeflogenen Flughäfen charakteristische Verteilungen für die einzelnen Betreiber angeben [10]. Neben den Umwelt- und Betriebsbedingungen bewirken auch die Leistungsstreuung und -verschlechterung eine Variation der Bauteilbelastung. Aufgrund eines verschlechterten Wirkungsgrades muss ein Triebwerk bei höheren Temperaturen und Drehzahlen laufen um den geforderten Schub zu liefern. Die Zunahme der Leistungsver-schlechterung wird wiederum durch die Umwelt- und Betriebsbedingungen beeinflusst, unter denen das Triebwerk operiert.

1.2. Modellierungsmöglichkeiten

Für die Modellierung der Schädigung eines Bauteils gibt es verschiedene Möglichkeiten. Durch die statistische Analyse von Felddaten lassen sich Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen erstellen [11]. Diese Funktionen beschreiben beispielsweise die Wahrscheinlichkeit eines Bauteilversagens in

Abhängigkeit der geflogenen Stunden oder Zyklen. Bei diesem Vorgehen werden die physikalischen Ursachen, die zur Streuung des Versagenszeitpunkts führen, nicht berücksichtigt. Der Vorteil dieser Methode der Schädigungsmodellierung ist, dass ihre Anwendung vergleichsweise wenig Eingabedaten und Rechenleistung benötigt. Physikalische Schädigungsmodelle dagegen verlangen häufig umfangreiche Eingabedaten und Rechenkapazitäten, sowie ein fundiertes Verständnis der auftretenden Schädigungsmechanismen (z.B. [12]). Für bekannte Randbedingungen bietet ein physikalisches Modell jedoch gegenüber einer auf Felddaten beruhenden statistischen Modellierung die Möglichkeit einer echten Lebensdauervorhersage.

Neben diesen beiden gegensätzlichen Modellierungsansätzen gibt es eine Reihe an Zwischenformen. Zu diesen gehören zum Beispiel die Response Surface Methode [13], die neuronalen Netze und die Fuzzylogik [14]. Die hier beschriebene Modellierungsmethodik stellt ebenso einen hybriden Ansatz dar, da sie sowohl datengetriebene wie auch physikalische Elemente enthält.

Zur Berücksichtigung von variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen werden in Instandhaltungsmodellen häufig Kennfelder verwendet [9] [15]. Diese Kennfelder beschreiben direkt den Zusammenhang zwischen den Randbedingungen, wie z.B. der Schubminderung, und dem Bauteilleben. Diese Vorgehensweise vernachlässigt zahlreiche Einflussgrößen und ist daher unzureichend, um eine weitere Verbesserung der Modellierungsgüte zu erreichen.

Die Leistungsverschlechterung eines Triebwerks kann durch die Veränderung zahlreicher Merkmale simuliert werden (z.B. Schaufelspitzenspalt in Abhängigkeit der Flugzyklenzahl) [6]. Mithilfe von Sensitivitätsparametern wird dabei die Veränderung eines Merkmals mit den Komponentencharakteristiken eines Leistungsrechnungsprogramms verknüpft. Diese Methodik wird beim hier vorgestellten Modell angewendet, um die Produktionsstreuung und Verschlechterung der Triebwerksleistung zu simulieren.

2. MODELLIERUNGSMETHODIK

Die Beschreibung der Modellierungsmethodik beginnt mit einer Übersicht über die Gesamtstruktur des modular aufgebauten Modells. Anschließend werden wesentliche Aspekte der verwendeten Methodik genauer erläutert.

2.1. Modellstruktur

In BILD 1 ist der Aufbau des Gesamtmodells dargestellt. Zu Beginn der Modellierung wird der Produktionszustand eines individuellen Triebwerks im Zustandsmodell festgelegt. Dabei werden für die Belastbarkeit der Bauteile und für die leistungsrelevanten Merkmale unter Berücksichtigung der vorgegebenen Verteilungen zufällige Werte generiert. Ebenso werden für die Umwelt- und Betriebsbedingungen Zufallswerte festgelegt. Für diesen Satz an Eingabegrößen wird eine Leistungsrechnung durchgeführt. Dies kommt einer Simulation des Erstflugs des Triebwerks gleich. Der Aufruf des Leistungsrechnungsmodell liefert neben den globalen Leistungsparametern (z.B. spezifischer Treibstoff-

verbrauch) auch die Drücke, Temperaturen und Drehzahlen der verschiedenen Triebwerksebenen als Ergebnis. Die Drücke, Temperaturen und Drehzahlen dienen als Grundlage für das sich anschließende Schädigungsmodell. Ebenso gehen die Umwelt- und Betriebsbedingungen, die nicht bereits im Leistungsrechnungsmodell berücksichtigt wurden, wie z.B. die Partikelkonzentration, als direkte Eingangsgrößen in das Schädigungsmodell mit ein.

Im Schädigungsmodell wird in Abhängigkeit der simulierten Bauteilbelastungen eine Gewichtung des Flugzyklus hinsichtlich dessen Schädigungswirkung vorgenommen. Die auftretende Bauteilbelastung wird dabei sowohl von den Umwelt- und Betriebsbedingungen als auch von der individuellen Leistungsfähigkeit des simulierten Triebwerks beeinflusst.

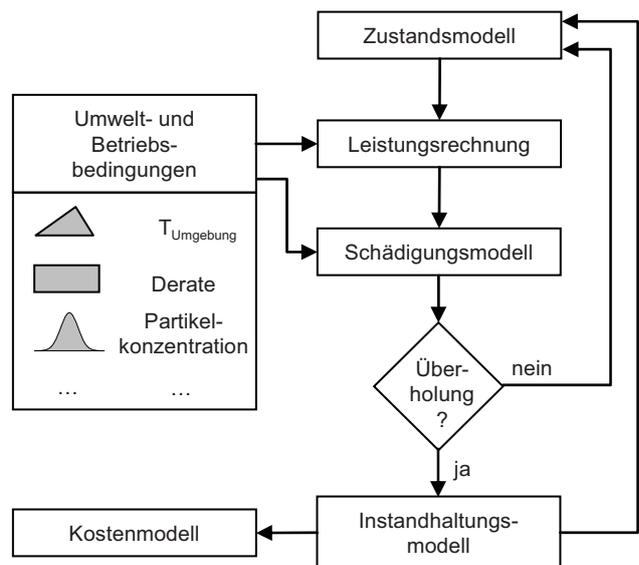


BILD 1. Aufbau des Gesamtmodells mit Darstellung des Berechnungsablaufs

Nach Berechnung der Schädigungswirkung wird überprüft, ob infolge des absolvierten Flugs eine Triebwerksüberholung notwendig ist. Dazu werden verschiedene Kriterien abgefragt. Beispielsweise erfolgt für die Bauteile eine Überprüfung, ob es aufgrund der Schädigung zu einer Überschreitung der Belastbarkeit und damit zu einem Versagen gekommen ist. Für den Fall, dass keine Triebwerksüberholung durchgeführt wird, erfolgt ein erneuter Aufruf des Zustandsmodells. Der Zustand des Triebwerks hat sich aufgrund des absolvierten Flugs verändert. Infolge von Bauteilveränderungen (z.B. Oberflächenrauigkeit) hat sich die Leistungsfähigkeit des Triebwerks verschlechtert. Dies wird durch veränderte Modulkenngößen beim erneuten Aufruf des Leistungsrechnungsprogramms berücksichtigt [6].

Für die Simulation des zweiten Flugzyklus werden neue Umwelt- und Betriebsbedingungen festgelegt. Nach Durchführung der Zyklengewichtung im Schädigungsmodell wird der Schädigungseffekt des zweiten Flugzyklus zur bereits vorhandenen Bauteilschädigung addiert. Die Simulation variierender Flugzyklen mit Berechnung der daraus resultierenden Bauteilschädigung und Leistungsverschlechterung wird

solange wiederholt bis die zwischengeschaltete Abfrage eine Triebwerksüberholung zum Ergebnis hat. In diesem Fall wird das Instandhaltungsmodell aufgerufen.

Im Instandhaltungsmodell wird in Abhängigkeit der Bauteilschädigung und Wartungsphilosophie die Überholung des Triebwerks modelliert. Durch verschiedene logische Abfragen wird entschieden, welche Bauteile inspiziert, ausgebaut und repariert oder ausgetauscht werden. Als Folge der Überholungsarbeiten werden im Zustandsmodell die Leistungsver schlechterung des Triebwerks und die Belastbarkeit der reparierten und ausgetauschten Bauteile neu festgelegt. Ausgehend von diesen angepassten Werten werden weitere Flugzyklen entsprechend dem beschriebenen Vorgehen simuliert. Der gesamte Modellierungsprozess wird solange wiederholt bis das Triebwerk das Ende seiner Betriebsdauer (z.B. 70000 Zyklen) erreicht hat.

Die Wartungsumfänge aller simulierten Triebwerksüberholungen stellen die Basis für das Kostenmodell dar. In diesem Modul werden sämtliche Arbeiten mit den zugehörigen Kosten multipliziert. Die Kosten je Triebwerksüberholung und die Kosten je Flugstunde werden durch Summation der Einzelkosten berechnet.

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht die Modellierung der gesamten Betriebsdauer eines individuellen Triebwerks mit den zugehörigen Instandhaltungsarbeiten. Die Wechselwirkungen zwischen der Leistungsver schlechterung, der Schädigung und den Instandhaltungsmaßnahmen werden durch die Modellstruktur berücksichtigt. Die Monte-Carlo Methode wird angewendet um eine gesamte Triebwerksflotte zu simulieren. Durch eine statistische Auswertung der Simulationsergebnisse lässt sich der Einfluss der Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die Zuverlässigkeit der Triebwerksflotte und deren Instandhaltungskosten abbilden.

2.2. Datengetriebene Modellierung der Streuung der Bauteilbelastbarkeit

Die Belastbarkeit eines Bauteils wird durch drei verschiedene Verteilungen modelliert (vgl. BILD 2). Die Verteilungen beschreiben die Wahrscheinlichkeitsdichte einer Reparatur, eines Austauschs und eines Versagens in Abhängigkeit der Zahl der äquivalenten Referenzzyklen oder -stunden. Ein Referenzzyklus ist definiert als ein Flugzyklus unter festgelegten nominalen Umwelt- und Betriebsbedingungen. Unter Annahme eines Triebwerks mit durchschnittlicher Leistungsfähigkeit stellt er eine definierte Belastungseinheit für die Bauteile dar. Die durch die Verteilungen abgebildete Streuung der Bauteilbelastbarkeit wird somit ausschließlich durch die Materialvariationen und Fertigungstoleranzen des Bauteils verursacht. Da die physikalischen Streuungsursachen nicht im Modell berücksichtigt werden, wird dieses Vorgehen als datengetrieben bezeichnet.

Ein Bauteil weist meist mehrere Schädigungsformen auf. Daher werden für jeden dieser Modi die entsprechenden Verteilungsfunktionen hinterlegt. Durch die erhöhte Modellierungsgenauigkeit ist es möglich, den Einfluss der Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die verschiedenen Schädigungsmechanismen zu simulieren.

Die Simulation eines Triebwerks beginnt mit der Festlegung von $N_{\text{Reparatur}}$, $N_{\text{Austausch}}$ und N_{Versagen} für jeden Fehlermodus und jedes Bauteil gemäß den Verteilungen. Die Größen geben an, nach wie vielen Referenzzyklen ein Bauteil während des Flugs versagt, beziehungsweise im Falle einer Triebwerksüberholung repariert oder ausgetauscht werden muss. Ausgehend von einer gleichverteilten Zufallszahl für jedes Bauteil werden die Größen $N_{\text{Reparatur}}$, $N_{\text{Austausch}}$ und N_{Versagen} durch eine mathematische Transformation berechnet. Zum Beispiel wird die gleichverteilte Zufallszahl in einen Wert transformiert, der einer Weibull-Verteilung unterliegt. Durch dieses Vorgehen wird erreicht, dass ein Bauteil, das z.B. eine relativ geringe Lebensdauer bis zum Versagen besitzt, auch eine relativ geringe Lebensdauer bis zur Reparatur und zum Austausch aufweist.

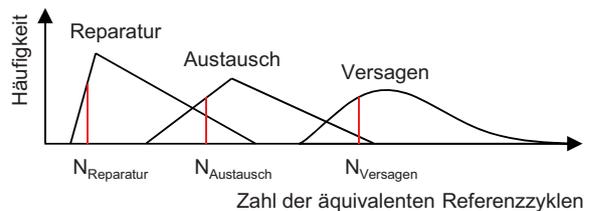


BILD 2. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die Reparatur, den Austausch und das Versagen eines Bauteils in Abhängigkeit der Zahl der äquivalenten Referenzzyklen

2.3. Physikalische Modellierung der Bauteilbelastung

Die Variation der Bauteilbelastung wird durch eine Gewichtung der jeweiligen Flugzyklen berücksichtigt. Für jedes Bauteil und jeden Fehlermodus wird die Schädigungswirkung des simulierten Flugzyklus auf die Schädigungswirkung des festgelegten Referenzflugzyklus bezogen [3]. Die Definition des Gewichtungsfaktors D_{Zyklus} wird in Gl. (1) angegeben.

$$(1) D_{\text{Zyklus}} = \frac{\text{Schädigungszunahme infolge des Flugzyklus}}{\text{Schädigungszunahme infolge des Referenzflugzyklus}}$$

Die mechanische Schädigung eines Bauteils wird durch zahlreiche Größen beeinflusst. Zu den wesentlichen Parametern gehören die Spannungs- und Temperaturverteilungen im Bauteil sowie deren zeitliches Auftreten und Zusammenwirken. Ebenso wirken sich die Präsenz von Substanzen wie Schwefel oder Meersalz in der Umgebungsluft negativ auf die Lebensdauer der Bauteile aus [16].

Das vorgestellte Instandhaltungsmodell berücksichtigt eine große Zahl an verschiedenen Triebwerksbauteilen. Um die Handhabbarkeit des entwickelten Programms sicherzustellen sind daher einige Vereinfachungen notwendig. Zunächst wird der Modellierungsaufwand dadurch reduziert, dass nur die Größen mit dominierendem Einfluss auf die Schädigung berücksichtigt werden. Des Weiteren wird der Flugzyklus vereinfacht dargestellt. Der Anteil an der Gesamtschädigung unterscheidet sich stark für die verschiedenen

Flugphasen. Die höchsten Temperaturen und Drehzahlen treten während der Startphase auf. Aus diesem Grund verursacht dieser Flugabschnitt die größte Bauteilschädigung, obwohl er lediglich einen geringen zeitlichen Anteil des gesamten Flugs einnimmt [17]. Die Zyklengewichtung wird daher für einen definierten Betriebspunkt der Startphase durchgeführt. Das Leistungsrechnungsprogramm liefert für diesen Betriebspunkt die Drehzahlen, Drücke und Temperaturen der verschiedenen Triebwerksebenen, anhand derer die Zyklengewichtung durchgeführt wird.

2.3.1. Beispiel: Schädigung durch Oxidation

Das beschriebene Vorgehen wird nun anhand eines einfachen Beispiels veranschaulicht. Die Schädigung durch Hochtemperatur-Oxidation begrenzt die Lebensdauer der Bauteile im Heißgasbereich eines Triebwerks und wird im Wesentlichen durch die Temperatur beeinflusst. In BILD 3 ist der Zusammenhang zwischen der Lebensdauer eines durch Oxidation geschädigten Turbinenwerkstoffs $L_{Oxidation}$ und der Abweichung der Turbineneintrittstemperatur TET von ihrem Nominalwert dargestellt [18].

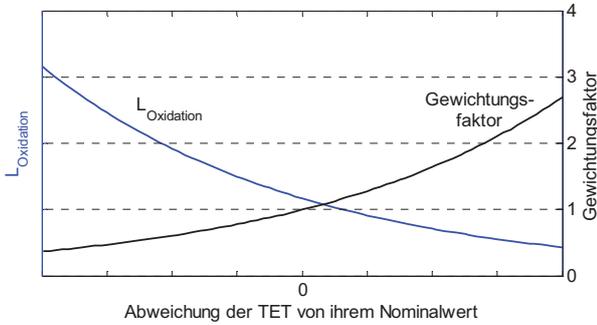


BILD 3. Lebensdauer und Gewichtungsfaktor für die Schädigung durch Oxidation eines Turbinenwerkstoffs in Abhängigkeit der Abweichung der Turbineneintrittstemperatur von ihrem Nominalwert¹

Durch Anwendung von Gl. (1) lässt sich der Gewichtungsfaktor D_{Zyklus} vom vorhandenen Lebensdauer-Temperatur-Zusammenhang ableiten. Die Verweildauer bei der betrachteten Temperatur t_{Zyklus} wird dazu für jeden Zyklus als gleich angenommen. Gemäß der linearen Schadensakkumulation durch die Miner-Regel [19] wird die Schädigungswirkung eines Flugzyklus definiert als Anteil an der Gesamtlebensdauer beim zugehörigen TET-Wert. Somit berechnet sich der Gewichtungsfaktor mithilfe von Gl. (2). In BILD 3 ist der Verlauf des Gewichtungsfaktors in Abhängigkeit der Temperaturabweichung dargestellt.

$$(2) D_{Zyklus} = \frac{t_{Zyklus}}{L_{Oxidation, ATET}} \Bigg/ \frac{t_{Zyklus}}{L_{Oxidation, ref}}$$

Nach der Berechnung des Gewichtungsfaktors D_{Zyklus} für die verschiedenen Komponenten wird der gesamte Lebensdauerverbrauch der individuellen Bauteile gemäß Gl. (3) aufsummiert. Zur bereits vor dem Flug vorhandenen Schädigung wird der Gewichtungsfaktor des simulierten Flugs addiert. Die Zahl der akkumulierten

¹ aus Datenschutzgründen ohne Zahlenwerte

äquivalenten Referenzzyklen N_{kum} charakterisiert somit den Grad der Bauteilschädigung.

$$(3) N_{kum}(t = N_{echt} + 1) = N_{kum}(t = N_{echt}) + D_{Zyklus}$$

2.3.2. Beispiel: Niederzyklische Ermüdung

Gegenüber dem vorherigen Beispiel der Oxidationsschädigung stellt sich die Modellierung der niederzyklischen Ermüdung deutlich aufwendiger dar. Die LCF-Schädigung eines Bauteils wird vorrangig durch die örtlich wirkende Gesamt-Dehnungsamplitude bestimmt [19]. Für die Simulation dieser Schädigungsform ist es notwendig den Zusammenhang zwischen den Größen des Leistungsrechnungsprogramms und der Dehnungsbeanspruchung ε an der kritischen Stelle des untersuchten Bauteils (z.B. Kerbe) herzustellen.

Niederzyklische Ermüdung beeinflusst zum Beispiel die Lebensdauer von Turbinenrotorschaukeln. Mithilfe von Gl. (4) lässt sich aus der Wellendrehzahl Φ die Belastung der Schaukeln aufgrund der Zentrifugalkraft in Form der Nennspannung S berechnen. Die Belastung der Schaukeln durch den Gasstrom wird dabei vernachlässigt.

$$(4) S = S_{ref} \cdot (\Phi / \Phi_{ref})^2$$

Die örtliche Spannungsbeanspruchung σ des ersten Belastungszyklus kann durch Kombination der Neuber-Regel (Gl. (5)) und der Ramberg-Osgood-Beziehung (Gl. (6)) für die zügige Beanspruchung aus Gl. (7) berechnet werden [20].

$$(5) \sigma \cdot \varepsilon = \alpha_K^2 \cdot S \cdot e$$

$$(6) \varepsilon = (\sigma / E) + (\sigma / K)^{1/n}$$

$$(7) (\sigma^2 / E) + \sigma \cdot (\sigma / K)^{1/n} = (\alpha_K \cdot S)^2 / E$$

Für die nachfolgenden Belastungszyklen wird Gl. (5) mit der Ramberg-Osgood-Beziehung für zyklische Beanspruchung (Gl. (8)) kombiniert, sodass sich Gl. (9) ergibt.

$$(8) \varepsilon_a = (\sigma_a / E) + (\sigma_a / K')^{1/n'}$$

$$(9) \sigma_a^2 / E + \sigma_a \cdot (\sigma_a / K')^{1/n'} = (\alpha_K \cdot S_a)^2 / E$$

Neben der bauteilspezifischen Formzahl α_K werden die Größen n' und K' für die Berechnung benötigt. Diese lassen sich gemäß Gl. (10) und (11) aus den zyklischen Materialkenngrößen ableiten.

$$(10) n' = b/c$$

$$(11) K' = \sigma'_f \cdot \varepsilon'_f{}^{-n'}$$

Mithilfe der aus Gl. (9) gewonnenen Spannungsamplitude σ_a und Gl. (5) kann die örtliche Dehnungsamplitude ε_a berechnet werden. Der Schädigungsanteil eines Flugzyklus lässt sich damit durch Kombination der Dehnungswöhlerlinie (Gl. (12)) mit Gl. (1) bestimmen.

$$(12) \varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_A)^b + \varepsilon'_f \cdot (2N_A)^c$$

Neben der Drehzahl nimmt auch die Temperatur Einfluss auf die niederzyklische Ermüdung. Da für die zyklischen Kennwerte σ'_f und ε'_f keine temperaturabhängigen

Angaben vorliegen, werden Schätzformeln für deren Berechnung verwendet. Für die Zugfestigkeit R_m und den Elastizitätsmodul E liegen Werte in Abhängigkeit der Temperatur vor, sodass mithilfe von Gl. (13) und (14) die Temperaturabhängigkeit der gesuchten Größen abgeleitet werden kann. Die dargestellten Schätzformeln für die zyklischen Kennwerte sind unter dem Namen „Modified Universal Slopes Equation“ bekannt und für alle Werkstoffe anwendbar [19].

$$(13) \sigma'_f = 0,623 \cdot R_m^{0,832} \cdot E^{0,168}$$

$$(14) \varepsilon'_f = 0,0196 \cdot D^{0,156} \cdot (R_m/E)^{-0,53}$$

Beim vorgestellten Verfahren wird ausgehend von Gleichungen der Betriebsfestigkeit sowohl der Effekt der Drehzahl als auch der Temperatur bei der Zyklengewichtung berücksichtigt.

2.4. Festlegung des Zeitpunkts der Triebwerksüberholung

Nach der Berechnung und Akkumulation der Bauteilschädigung erfolgt die Abfrage, ob eine Triebwerksüberholung notwendig ist. Dazu sind im Modell verschiedene Ursachen für eine Triebwerksüberholung abgebildet:

- Bauteilversagen infolge der auftretenden Schädigungsmechanismen
- Austausch lebensdauerbegrenzter Bauteile
- Fehlerfund bei einer Inspektion
- Überschreiten zulässiger Betriebsgrenzen
- Bauteilversagen infolge zufälliger Ereignisse
- vorbeugende festgelegte Überholungen.

Die einzelnen Überholungsursachen und deren Modellierung werden im Folgenden kurz erläutert.

Die Entscheidung, ob ein Bauteil infolge der auftretenden Schädigungsmechanismen während eines simulierten Flugs versagt, erfolgt anhand eines Vergleichs der kumulierten Referenzzyklen mit der Zahl der Referenzzyklen bis zum Versagen für jeden Fehlermodus. Eine ungeplante Triebwerksüberholung wird somit simuliert, wenn Gleichung

$$(15) N_{\text{kum}} \geq N_{\text{Versagen}}$$

erfüllt ist.

Die lebensdauerbegrenzten Bauteile (Life Limited Part, LLP) dürfen eine vorgeschriebene maximale Betriebsdauer nicht überschreiten. Sie müssen spätestens bei Erreichen ihrer maximal zulässigen Betriebsdauer ausgetauscht werden und können somit eine Triebwerksüberholung verursachen.

Der Zustand der installierten Triebwerke wird in festgelegten Zeitintervallen durch verschiedene Inspektionen überprüft. Im Modell werden diese Inspektionen mit dem jeweiligen Arbeitsumfang simuliert. Für jedes Bauteil wird eine Inspektionseffektivität festgelegt. Die Inspektionseffektivität beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der ein vorhandener Fehler bei einer Inspektion erkannt wird [21][22]. Da diese Wahrscheinlichkeit mit zunehmendem Schädigungsgrad ansteigt, wird die Inspektionseffektivität als Funktion der

kumulierten Referenzzyklen im Modell angegeben. Neben der Inspektionseffektivität muss ein weiteres Kriterium definiert werden. Dieses legt fest, ob der Schädigungszustand eines Bauteils für den weiteren Betrieb akzeptabel ist oder im Rahmen einer Triebwerksüberholung verbessert werden muss. Die Zahl der akzeptablen Referenzzyklen $N_{\text{akzeptabel}}$ wird durch Gl. (16) festgelegt.

$$(16) N_{\text{akzeptabel}} = N_{\text{Versagen}} - N_{\text{Sicherheit}}$$

Der Wert des Sicherheitsabschlags $N_{\text{Sicherheit}}$ für das jeweilige Bauteil hängt von der maximalen Schädigungszunahme innerhalb der Dauer zwischen zwei Inspektionen ab.

Neben der Überprüfung des Triebwerkszustands durch Inspektionen werden verschiedene Leistungsparameter überwacht. Ein Beispiel hierfür ist die Turbineneintrittstemperatur TET. Einerseits können aus diesen Größen Rückschlüsse auf den Verschlechterungszustand des Triebwerks gezogen werden, andererseits gibt es für einige Betriebsparameter festgelegte Grenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Infolge der Leistungsverschlechterung des Triebwerks verringert sich der Abstand zu diesen Grenzwerten mit der Zeit. Wenn eine Betriebsgrenze erreicht ist, muss eine Triebwerksüberholung durchgeführt werden, um die Leistungsfähigkeit des Triebwerks wieder zu verbessern.

Fremdkörper, wie zum Beispiel Vögel, die mit der eingesaugten Luft in das Triebwerk gelangen, können eine Schädigung des Triebwerks verursachen und eine Überholung notwendig machen. Die Modellierung dieser zufälligen Ereignisse erfolgt durch eine Gleichverteilung. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit an mit der während eines Flugzyklus ein zufälliges Ereignis eintritt.

Neben den beschriebenen zustandsabhängigen Entscheidungskriterien werden je nach Instandhaltungsphilosophie auch vorbeugende Triebwerksüberholungen durchgeführt. Die Triebwerke werden in diesem Fall unabhängig von ihrem Zustand nach festgelegten Betriebszeiten einer Überholung unterzogen.

2.5. Instandhaltungslogik

Im Falle einer Triebwerksüberholung entscheiden verschiedene Kriterien über den Umfang der durchgeführten Arbeiten. Die dazu im Modell implementierte Instandhaltungslogik wird in [23] beschrieben. An dieser Stelle werden lediglich einige wesentliche Punkte dargelegt.

Die umgesetzten Instandhaltungsmaßnahmen haben zum Ziel, dass das überholte Triebwerk eine festgelegte Mindestbetriebsdauer bis zur nächsten Triebwerksüberholung ohne Unterbrechung erreicht. Neben den notwendigen korrektiven Arbeiten werden auch vorbeugende Aktivitäten umgesetzt. Ein Teil der vorbeugenden Überholungsstrategie wird durch die Festlegung von „Soft Lives“ für die Bauteile realisiert [24]. Ein Soft Life ist eine Begrenzung der Zahl an Flugstunden oder -zyklen, die nur Anwendung findet, wenn das Triebwerk überholt wird. Dann werden im Falle einer Überschreitung des Soft Lives unabhängig vom

Bauteilzustand zuvor definierte Arbeiten, wie zum Beispiel eine Reparatur, durchgeführt.

Die Entscheidung, ob ein Bauteil aufgrund seines Schädigungszustands repariert, ausgetauscht oder für den weiteren Betrieb verwendet werden kann, wird anhand von Gl. (17) und (18) gefällt. Die Gleichungen werden für jedes Bauteil und jeden Schädigungsmodus überprüft.

$$(17) N_{\text{kum}} \geq N_{\text{Reparatur}}$$

$$(18) N_{\text{kum}} \geq N_{\text{Austausch}}$$

Nach der Reparatur und dem Austausch von Bauteilen muss deren Bauteilbelastbarkeit neu festgelegt werden. Für die charakteristischen Größen der neuen Bauteile werden gemäß den Verteilungen zufällige Werte angenommen. Die Kenngrößen der reparierten Bauteile werden unter Berücksichtigung der Reparatureffektivität berechnet. Die Reparatureffektivität $Eff_{\text{Reparatur}}$ gibt die Bauteilbelastbarkeit eines reparierten Bauteils im Vergleich zu einem neuen Bauteil an [22]. Zum Beispiel berechnet sich die Zahl der Referenzzyklen bis zum Austausch für ein repariertes Bauteil durch

$$(19) N_{\text{Austausch, neu}} = Eff_{\text{Reparatur}} \cdot N_{\text{Austausch, alt}}$$

Die Reparatur und der Austausch der einzelnen Bauteile verändern die Leistungsfähigkeit des Triebwerks. Auch beeinflusst die Triebwerksdemontage aufgrund der Montagetoleranzen die Triebwerksleistung. Ausgehend von den Änderungen der leistungsrelevanten Merkmale werden die Modulkenngrößen für das Triebwerksleistungsrechnungsprogramm angepasst.

3. MODELLANWENDUNG

3.1. Variation der Umwelt- und Betriebsbedingungen

Am Beispiel verschiedener Größen wird in den folgenden Abschnitten gezeigt, wie der Einfluss variierende Umwelt- und Betriebsbedingungen durch das Modell abgebildet wird.

3.1.1. Einfluss auf die Schädigungszunahme

Die Zahl der kumulierten Zyklen charakterisiert die Schädigung eines Bauteils und ist daher für eine Untersuchung des Einflusses der Umwelt- und Betriebsbedingungen auf den Lebensdauerverbrauch geeignet. Am Beispiel einer Turbinenleitschaufel, deren Lebensdauer im Wesentlichen durch die Turbineneintrittstemperatur beeinflusst wird, soll der Einfluss der Umgebungstemperatur veranschaulicht werden. In BILD 4 ist dazu die Differenz zwischen den kumulierten Referenzzyklen und den echten Flugzyklen in Abhängigkeit der Betriebsdauer dargestellt. Damit die Vergleichbarkeit der dargestellten Verläufe gewährleistet ist, wurden für die Berechnungen die übrigen Randbedingungen konstant gehalten und eine durchschnittliche Leistungsverschlechterung des Triebwerks angenommen. Des Weiteren wurde für jede Umgebungstemperatur eine Simulation ohne Modellierung der Leistungsverschlechterung durchgeführt, um deren Einfluss zu verdeutlichen.

Man erkennt deutlich, dass die Leistungsverschlechterung eine zusätzliche Schädigung des Bauteils verursacht. Speziell bei hohen Umgebungstemperaturen führt die weitere Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur infolge der Leistungsverschlechterung zu einer beachtlichen Zunahme der kumulierten Referenzzyklen. Grund hierfür ist die zunehmende Sensitivität des Bauteils gegenüber einer Temperaturzunahme bei höheren Temperaturen (vgl. BILD 3).

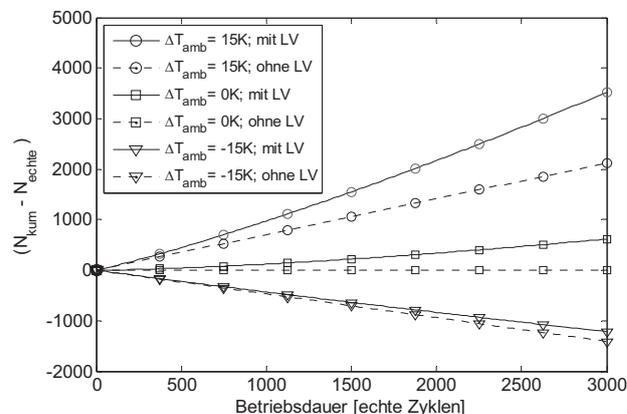


BILD 4. Differenz zwischen der kumulierten Referenzzyklenzahl und der echten Zyklenzahl in Abhängigkeit der Betriebsdauer für verschiedene Umgebungstemperaturen mit und ohne Leistungsverschlechterung (LV)

3.1.2. Einfluss auf die Reparatur- und Austauschraten der Bauteile

Neben der Belastung beeinflusst auch die Belastbarkeit die Austauschbedürftigkeit eines Bauteils. Das Ergebnis einer Untersuchung, die beide Einflussfaktoren berücksichtigt, ist in BILD 5 dargestellt. Für das bereits in BILD 4 verwendete Bauteil wird in BILD 5 der Effekt der Umgebungstemperatur auf die Austauschrate für einen festgelegten einheitlichen Überholungszeitpunkt nach 5000 Zyklen gezeigt. Zusätzlich zum Verlauf der mittleren Austauschrate wird die Streubreite durch die angegebenen Randkurven veranschaulicht.

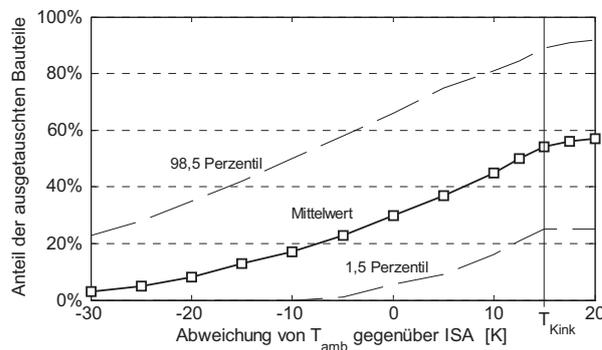


BILD 5. Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Austauschrate einer Turbinenleitschaufel nach 5000 Flugzyklen

Die Streuung der Zahl der ausgetauschten Bauteile je Triebwerksüberholung ergibt sich aus der Variation der weiteren Umwelt- und Betriebsbedingungen, der Streuung

der Leistungsver schlechterung und der Belastbarkeitsstreuung. Die mittlere Austauschrate steigt bis zur Umgebungstemperatur T_{Kink} progressiv an und flacht dann ab. Grund dafür ist der Einfluss des Triebwerkregelungssystems. Gemäß dem verwendeten „Flat Rating“ [10] wird ab einer festgelegten Umgebungstemperatur der bis dahin konstant gehaltene Schub reduziert, um ein weiteres Ansteigen der Temperaturen im Triebwerk zu verhindern.

3.1.3. Einfluss auf die Kosten und Zuverlässigkeit

Am Beispiel einer Variation der angewendeten Schubminderung wird die Auswirkung veränderlicher Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die Instandhaltungskosten und Zuverlässigkeit einer Triebwerksflotte veranschaulicht. Die Kosten je Triebwerksüberholung und die Kosten je Flugstunde sind zentrale Kenngrößen von besonderem Interesse. Zur Beschreibung der Zuverlässigkeit lassen sich die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Triebwerksüberholungen (Average Time On Wing, ATOW) und die Anteile der verschiedenen Kategorien an den Überholungen (z.B. Überholungen aufgrund eines Bauteilversagens) heranziehen.

In BILD 6 sind die Verläufe der Kosten je Flugstunde und der durchschnittlichen Zyklenzahl zwischen zwei Überholungen in Abhängigkeit der verwendeten Schubminderung dargestellt. Die Schubminderung wirkt sich sowohl auf die Kosten als auch auf die Zuverlässigkeit positiv aus und sollte daher soweit möglich konsequent angewendet werden.

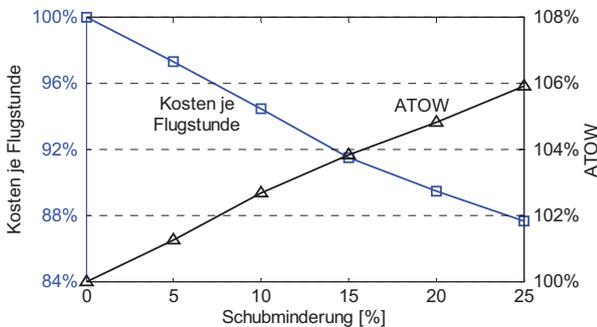


BILD 6. Einfluss der Schubminderung auf die durchschnittlichen Kosten je Flugstunde und die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Triebwerksüberholungen

3.2. Szenarien

Anhand verschiedener Szenarien werden im Folgenden einzelne Aspekte der Modellierungsergebnisse genauer erläutert. In TAB 1 sind die qualitativen Angaben der verwendeten Umwelt- und Betriebsbedingungen für die einzelnen Szenarien zusammengefasst. Im Vergleich zu Szenario 1 werden bei Szenario 2 eine erhöhte Umgebungstemperatur und eine reduzierte Schubminderung angenommen. Bei Szenario 3 wird zusätzlich eine erhöhte Partikelkonzentration simuliert.

	T_{amb}	Schubminderung	$C_{Partikel}$
Szenario 1	niedrig	hohe	niedrig
Szenario 2	hoch	gering	niedrig
Szenario 3	hoch	gering	hoch

TAB 1. Festlegung der Umwelt- und Betriebsbedingungen für die drei Szenarien

In BILD 7 sind verschiedene Ergebnissenkenngrößen der einzelnen Szenarien dargestellt. Die Angaben sind über die Gesamtbetriebsdauer gemittelt. Sie sind jeweils auf das Szenario 1 bezogen. Im Vergleich zu Szenario 1 verringert sich bei Szenario 2 die durchschnittliche Dauer zwischen zwei Überholungen und die Kosten je Flugstunde steigen an. Infolge der erhöhten Umgebungstemperatur und der verringerten Schubminderung nehmen die Drehzahlen und Temperaturen im Triebwerk zu. Besonderes negativ wirkt sich die thermische Belastungszunahme auf den Bereich der Turbine aus. Dies zeigt sich dadurch, dass die mittlere Reparatur- und Austauschrate der Bauteile der Turbine im Vergleich zum Verdichter stärker zunimmt.

Die Erhöhung der Partikelkonzentration in Szenario 3 führt zu einer weiteren Abnahme der durchschnittlichen Dauer zwischen zwei Triebwerksüberholungen und einer Zunahme der Kosten je Flugstunde. Da insbesondere die Verdichterbauteile der Schädigung durch Erosion [25] ausgesetzt sind, nimmt deren mittlere Reparatur- und Austauschrate stark zu. Auch im Bereich der Turbine bewirken die eingesaugten Partikel eine zusätzliche Bauteilschädigung, da sie durch ein Zusetzen der Kühlluftbohrungen eine Verschlechterung der Kühlungseffektivität verursachen.

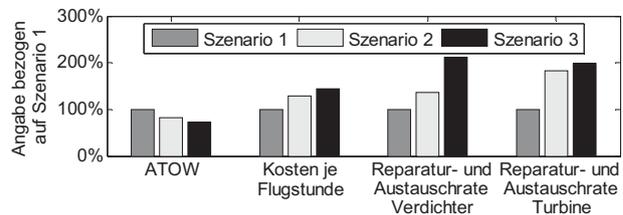


BILD 7. Angabe verschiedener Ergebnisgrößen bezogen auf Szenario 1 für die einzelnen Szenarien

In BILD 8 ist der Anteil der verschiedenen Ursachen an den Triebwerksüberholungen für die einzelnen Szenarien dargestellt. Für Szenario 1, das die geringste Triebwerksbelastung darstellt, wird der überwiegende Teil der Überholungen durch den notwendigen Austausch der lebensdauerbegrenzten Bauteile verursacht. Aufgrund der zunehmenden Belastung steigt für Szenario 2 und 3 der Anteil der Triebwerksüberholungen infolge eines Bauteilversagens an. Dies bewirkt im Gegenzug eine Verringerung des Anteils der durch die lebensdauerbegrenzten Bauteile verursachten Überholungen.

Der Anteil der durch eine Inspektion begründeten Triebwerküberholungen ist für Szenario 2 größer als für Szenario 3. Da der Verdichter weniger häufig inspiziert wird als der Heißgasbereich, wird die starke Beschädigung der Verdichterbauteile in Szenario 3 nur selten entdeckt.

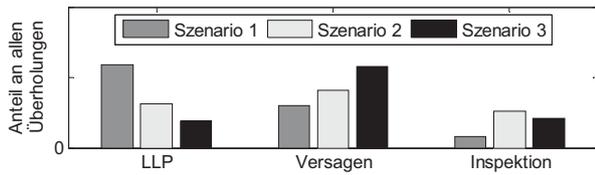


BILD 8. Veränderung der Ursachen der Triebwerksüberholungen für die verschiedenen Szenarien

Für die Simulation der Szenarien wurden unveränderte Inspektionsintervalle angenommen. Um den Anteil der außerplanmäßigen Triebwerksüberholungen zu verringern, werden in der Praxis die Inspektionsintervalle an die Betreiberbedingungen angepasst.

3.3. Bewertung von Verbesserungsoptionen

Um eine Reduktion der Instandhaltungskosten und eine Steigerung der Betriebszuverlässigkeit zu erreichen, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Im Folgenden wird gezeigt, wie diese mithilfe des Modells bewertet werden können.

3.3.1. Anpassung der Instandhaltungsstrategie an die Betreiberbedingungen

Ein verändertes Inspektionsintervall stellt eine Möglichkeit der Anpassung der Instandhaltungsstrategie an den Betreiber dar. In BILD 9 ist der Anteil der Überholungen infolge eines Bauteilversagens in Abhängigkeit der Dauer des Inspektionsintervalls für zwei verschiedene Betreiber dargestellt.

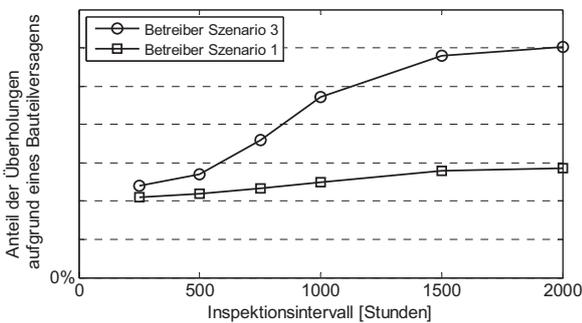


BILD 9. Einfluss der Dauer des Inspektionsintervalls auf den Anteil der Überholungen aufgrund eines Bauteilversagens für zwei verschiedene Betreiber

Für einen Betreiber, der unter den Bedingungen von Szenario 1 (vgl. TAB 1) operiert, nimmt bei einer Verlängerung des Inspektionsintervalls der Anteil der Überholungen infolge eines Bauteilversagens nur relativ gering zu. Im Gegensatz dazu steigt deren Anteil bei einem Betrieb unter den Bedingungen von Szenario 3 stark an. Grund dafür sind die im Vergleich zu Szenario 1 größeren Belastungen, die eine schnellere Zunahme der Bauteilschädigung verursachen. Da bei einer Inspektion am Flügel nicht alle Bauteile vollständig überprüft werden können, nähert sich der Anteil der Überholungen aufgrund eines Versagens bei einer Verkürzung des Inspektionsintervalls einem Grenzwert an.

Anhand der Verläufe in BILD 9 kann für die einzelnen Betreiber beurteilt werden, ob die zunehmenden Kosten

und Betriebsunterbrechungen infolge einer Verkürzung des Inspektionsintervalls mit einer verbesserten Zuverlässigkeit gerechtfertigt werden können.

3.3.2. Verbesserte Bauteileigenschaften

Das Modell bietet auch die Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit möglicher Neukonstruktionen von Bauteilen zu bewerten. Durch eine Verlängerung der Bauteillebensdauer kann eine Reduktion der Instandhaltungskosten über die Betriebsdauer erreicht werden. Dieser Kosteneinsparung stehen jedoch die Investitionskosten für die Verbesserung des Bauteils gegenüber. Da sich die Einsatzdauer eines Flugtriebwerks in der Regel über mehrere Jahrzehnte erstreckt, wird das finanzmathematische Verfahren der Kapitalwertberechnung zur Bewertung der Investition verwendet [26]. Neben der Höhe der Zahlungsströme fließen dabei auch deren Zeitpunkte t durch Abzinsung mit dem angesetzten Kalkulationszinsfuß q mit in die Berechnung ein (Gl. (20)).

$$(20) \text{KW} = \sum_{t=0}^T (I_t - A_t) \cdot q^{-t}$$

Ob die Neukonstruktion eines Bauteils wirtschaftlich sinnvoll ist, lässt sich anhand von Gl. (21) beurteilen. Dabei werden gemäß dem Prinzip der Differenzzahlungsreihen die Kapitalwerte der Neukonstruktion und des Referenzfalls voneinander abgezogen. Die Anwendung der Differenzzahlungsreihe hat den Vorteil, dass alle Zahlungsströme, die in beiden Fällen gleich sind, bei der Berechnung entfallen und somit nicht mit berücksichtigt werden müssen.

$$(21) \Delta \text{KW} = \text{KW}_{\text{Neukonstruktion}} - \text{KW}_{\text{Referenz}}$$

Das Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel einer Neukonstruktion einer Turbinenscheibe veranschaulicht. In BILD 10 ist die Änderung des Kapitalwerts ΔKW infolge einer Neukonstruktion des Bauteils in Abhängigkeit der erreichten Lebensdauerverbesserung dargestellt.

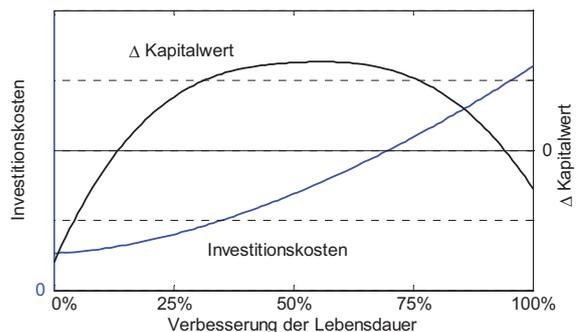


BILD 10. Investitionskosten und Änderung des Kapitalwerts in Abhängigkeit der Lebensdauerverlängerung durch eine Bauteilneukonstruktion

Eine geringe Verlängerung der Lebensdauer ist bereits mit relativ hohen Investitionskosten verbunden, bringt aber nur eine geringe Abnahme der anfallenden Instandhaltungskosten mit sich. Dies führt dazu, dass erst ab einer gewissen Lebensdauerverbesserung eine positive Änderung des Kapitalwerts erreicht wird und damit die Investition vorteilhaft ist. Nach Erreichen einer maximal gewinnbringenden Lebensdauerverlängerung nimmt die

Änderung des Kapitalwerts wieder ab und wird schließlich negativ. Der Grund hierfür ist die Annahme, dass die Kosten der Entwicklung und der vorgeschriebenen Zulassungstests für eine verbesserte Turbinenscheibe in Abhängigkeit der gewonnenen Lebensdauer progressiv zunehmen (vgl. BILD 10).

4. FAZIT

Die Umwelt- und Betriebsbedingungen, sowie die Leistungsverschlechterung beeinflussen die Instandhaltung und Zuverlässigkeit von Turboflugtriebwerken. Die Instandhaltungsmaßnahmen wirken sich wiederum auf die Leistungsverschlechterung und Zuverlässigkeit aus. Diese Interaktionen werden durch die Struktur des entwickelten Modells berücksichtigt.

Durch Anwendungsbeispiele wurde gezeigt, dass das Modell die Einflüsse der Randbedingungen auf die Instandhaltungsbedürftigkeit und Zuverlässigkeit wiedergibt. Das Modell bietet zusätzlich die Möglichkeit die Instandhaltungsstrategie an die jeweiligen Betreiber anzupassen, wodurch die Instandhaltungskosten gesenkt und die Zuverlässigkeit erhöht werden können.

DANKSAGUNG

Dieses Modell wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Rolls-Royce Deutschland im Rahmen des Projektes „MechaMod – Vorhersage von Wartungskosten“ des Luftfahrtforschungsprogramms IV entwickelt (Förderkennzeichen 20T0605). Die Autoren danken der Mithilfe zahlreicher Mitarbeiter der Firma Rolls-Royce Deutschland.

LITERATUR

- [1] Bagnall, S.M., Shaw, D.L. und Mason-Flucke, J.C., 1999, „Implications of ‘Power by the Hour’ on Turbine Blade Lifting“, RTO-MP-37 Design for Low Cost Operation and Support, Ottawa, Kanada.
- [2] Zakrajsek, J., et. al., 2006, „Rotorcraft Health Management Issues and Challenges“, NASA/TM-2006-214022.
- [3] Broede, J. und Köhl, M., 1998, „Methods of Modern Lifting Concepts Implemented in On-Board Life Usage Monitoring Systems“, RTO-MP-7 Exploitation of Structural Loads/Health Data for Reduced Life Cycle Costs, Brüssel, Belgien.
- [4] Guo, T.H. und Chen, P., 2003, „Sensor Based Engine Life Calculation – A Probabilistic Perspective“, NASA/TM – 2003-212499.
- [5] Eady, C., 2000, „Modes of Gas Turbine Component Life Consumption“, RTO-TR-028 Recommended Practices for Monitoring Gas Turbine Engine Life Consumption.
- [6] Spieler, S., Staudacher, S., Fiola, R., Sahm, P. und Weißschuh, M., 2007, „Probabilistic Engine Performance Scatter and Deterioration Modeling“, ASME GT2007-27051, Montreal, Kanada.
- [7] Bartel, M. und Young, T.M., 2008, „Simplified Thrust and Fuel Consumption Models for Modern Two-Shaft Turbofan Engines“, Journal of Aircraft **45** (4), 1450-1456.
- [8] Scheiderer, J., 2008, „Angewandte Flugleistung“, Springer-Verlag.
- [9] Rupp, O., 2001, „Instandhaltungskosten bei zivilen Turboflugtriebwerken“, DGLR-JT2001-008.
- [10] Gräter, F., Staudacher, S. und Weißschuh, M., 2010, „Engine Monitoring Through Model-based Deterioration Prognosis“, ASME GT2010-22496, Glasgow, UK.
- [11] Cole, G.K., 1998, „Practical issues relating to statistical failure analysis of aero gas turbines“, Journal of Aerospace Engineering, 212(3), 167-176.
- [12] Weiss, T., Voigt, M., Schlums, H., Mücke, R., Becker, K.-H. und Vogeler, K., 2009, „Probabilistic Finite-Element Analyses on Turbine Blades“, ASME GT2009-59877, Orlando, Florida, USA.
- [13] Liu, Z., Volovoi, Z. und Mavris, D.N., 2002, „Probabilistic Remaining Creep Life Assessment for Gas Turbine Components under Varying Operating Conditions“, AIAA-2002-1277.
- [14] Roemer, M.J., Byington, C.S., Kacprzynski, G.J. und Vachtsevanos, G., 2006, „An Overview of Selected Prognostic Technologies with Application to Engine Health Management“, GT2006-90677.
- [15] Day, M. und Stahr, R., 1979, „A Technique for Engine Maintenance Cost Forecasting“, AIAA Paper 79-7007.
- [16] Eliaz, N., Shemesh, G. und Latanision, R.M., 2002, „Hot corrosion in gas turbine components“, Engineering Failure Analysis, 2002, **9**(1), 31-43.
- [17] Mahashabde, A., 2006, „Assessing Selected Technologies and Operation Strategies for Improving the Environmental Performance of Feature Aircraft“, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [18] Witschonke, C., 2009, „Investigation of particular turbine components with regard to maintainability and life assessment“, Diplomarbeit, Universität Stuttgart.
- [19] Haibach, E., 2006, „Betriebsfestigkeit“, 3. Auflage, Springer-Verlag.
- [20] Naeem, M., Singh, R. und Probert, D., 1999, „Implications of engine deterioration for a high-pressure turbine-blade’s low-cycle fatigue (LCF) life-consumption“, International Journal of Fatigue **21** (1999) 831-847.
- [21] Crocker, J., 1999, „Effectiveness of maintenance“, Journal of Quality in Maintenance, **5**(4), 1999, 307-313.
- [22] Burkett, M.A., 2006, „DM-Trade – A Rolls-Royce Tool to Model the Impact of Design Changes and Maintenance Strategies on Lifetime Reliability and Maintenance Cost“, ASME GT2006-90023, Barcelona, Spanien.
- [23] Müller, M., Staudacher, S., Friedl, W.-H., Köhler, R. und Weißschuh, M., 2010, „Probabilistic Engine Maintenance Modeling for Varying Environmental and Operating Conditions“, ASME GT2010-22548, Glasgow, UK.
- [24] Crocker, J. und Kumar, U.D., 2000, „Age-related maintenance versus reliability centred maintenance: a case study on aero-engines“, Reliability Engineering and System Safety **67** (2000), 113-118.
- [25] Immarigeon, J.P., et al., 2001, „Life Cycle Management Strategies for Aging Engines“, RTO-MP-079(II) Life Management Techniques for Ageing Air Vehicles, Manchester, UK.
- [26] Spieler, S., Staudacher, S., Kappmeyer, G. und Lou, W., 2006, „Reparaturverfahren und ihre Bedeutung für die Bewertung von Blisks über den Lebenszyklus von Flugtriebwerken“, DGLR-JT2006-160.