

DER ROLLS-ROYCE ANSATZ FÜR LEBENSZYKLUSKOSTENMODELLIERUNG VON TRIEBWERKEN FÜR DEN GESCHÄFTS-, KURZ- UND MITTELSTRECKENFLUGZEUGMARKT

H. Erol, W.-H. Friedl
Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG
Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow, Deutschland

Zusammenfassung

Die Instandhaltungskosten und Zuverlässigkeit von turbinengetriebenen Flugtriebwerken im Betrieb werden erheblich von Umwelt- und Betriebsbedingungen beeinflusst. Triebwerke die von Rolls-Royce hergestellt und betreut werden, werden zunehmend unter Servicevereinbarungen mit Flugstundenrate betrieben. Die Wartungskosten sind dabei die dominierenden Kosten für das Flottenmanagement. Dabei liegt der Fokus auf der Reduzierung der Wartungskosten ohne Zuverlässigkeit einzubüßen, z.B. durch Optimierung von Inspektionsintervallen und Abnutzungsgrenzwerten, Reparaturen statt Neuteile und neue zuverlässigere Bauteile. Wartungsverträge mit festen Preisen und bis zu 20 Jahren Laufzeit sind heutzutage nicht unüblich und werden teils vor der Triebwerkszulassung mit den Triebwerksbetreibern vereinbart. Mit einer Triebwerkskonstruktion bedient man heutzutage viele unterschiedliche Benutzerprofile, von Kurz- bis Langstreckenflügen mit bis zu 10 Starts und Landungen pro Tag bis hin zu Flugdauern von über 10 Stunden, wobei die Wartungsintervalle bei 5 Jahren und mehr liegen. Dabei können die Betriebsbedingungen und deren Auswirkungen auf den Triebwerkszustand zwischen großen kommerziellen Fluggesellschaften, regionalen Fluglinien und privaten Geschäftsflugzeugbetreibern weit auseinanderliegen. Deshalb ist es erforderlich eine umfangreiche und gleichzeitig flexible Instandhaltungs- und Wartungsstrategie anzuwenden. In diesem Artikel wird die Rolls-Royce Deutschland Strategie für die Lebenszykluskostenmodellierung von Geschäfts-, Kurz- und Mittelstreckenflugzeugmarkt dargestellt. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Strategie zur detaillierten Modellierung und verbesserte Methoden der „On-Wing“ Instandhaltung gelegt. Dabei wird der Interaktion von Verschleißmechanismen, Einsatzbedingungen, Inspektions- und Wartungsaufwand, Zuverlässigkeitskennwerten, Reparaturmöglichkeiten, und deren Auswirkungen auf die Betriebskosten ein hohes Augenmerk gewidmet.

NOMENKLATUR

BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BRD	Business Requirements Document
DMC	Direct Maintenance Cost
D&V	Design & Validation
EHM	Equipment Health Monitoring
FHA	Fleet Hour Agreement
FSD	Full Scale Development
HCF	High Cycle Fatigue
LCC	Life Cycle Cost
LCF	Low Cycle Fatigue
LLP	Life Limited Parts
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
MRO	Maintenance Repair Overhaul
MTBF	Mean Time Between Failures
MTBR	Mean Time Between Removals
NPV	Net Present Value
PAD	Product Attributes Document
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
RDT&E	Research, Development, Technology & Experimental
SFC	Specific Fuel Consumption
TCP	Total Care Package
T&M	Time & Materials

1. EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren hat sich das Geschäftsmodell für Triebwerkhersteller grundsätzlich verändert. In der zivilen sowie militärischen Luftfahrt verlangen die Flugzeugbetreiber immer bessere Leistung bei einer höheren Zuverlässigkeit und damit verbunden die Verfügbarkeit der Triebwerke nach Plan, welches ein wichtiges Kriterium für die Hersteller darstellt.

Wo früher die Fluggesellschaften den Betrieb ihrer Triebwerke in Eigenregie durchgeführt haben und der Triebwerkshersteller nach dem Verkauf vorwiegend Umsatz im Ersatzteilgeschäft gemacht hat (Time & Material Business – T&M), verbreiten sich mehr und mehr Flottenverträge (Fleet Hour Agreements - FHA), bei denen Wartung und Einsatzbereitschaft durch den Anbieter sichergestellt wird. Rolls-Royce bietet diese Art von Wartungsverträgen für Fluggesellschaften unter dem Namen Total Care® und für Geschäftsreiseflugzeuge unter dem Namen Corporate Care® an.

In den letzten 15 Jahren hat Rolls-Royce bei der überwiegenden Mehrheit der neu verkauften Triebwerke langfristige Wartungsverträge abgeschlossen. Die Hauptvorteile für den Betreiber liegen in den Punkten Risikominimierung, da geplante wie ungeplante Wartungsarbeiten durch die Zahlung

der Flugstundenrate abgeglichen sind, und gut planbaren, kontinuierlichen Zahlungsströmen. Rolls-Royce übernimmt die technischen wie finanziellen Risiken, die sich aus dem Betrieb der Triebwerke ergeben. Zusätzlich profitiert der Betreiber in dem Punkt der Einsatzplanung dadurch, dass Rolls-Royce im Rahmen der Wartungsverträge den Zustand der Triebwerke mittels Equipment Health Monitoring – EHM überprüft, um Beeinträchtigungen des Betriebs zu minimieren.

Da die Verträge über lange Zeiträume gehen und zum Teil bereits in den frühen Entwicklungsphasen abgeschlossen werden, ist es für Rolls-Royce wichtig ein gutes Verständnis für die Betriebskosten so wie über deren potentielle Entwicklung über die Zeit zu haben. Neben der Lebensdauer der einzelnen Komponenten sind hier auch z.B. die Preisentwicklung auf dem Rohstoffmarkt zu nennen. Die Modellierung der wichtigsten Kostenelemente ist deshalb von großer Wichtigkeit für den langfristigen Erfolg und Fortbestand der Firma.

Bild 1 [1] zeigt einen schematischen Vergleich der Einnahmen die über einen längeren Zeitraum für beide Kundentypen anfallen. Ebenso wie für den Triebwerksbetreiber ist es für Rolls-Royce von Vorteil die Einnahmenseite besser planen zu können und über die Planung der Wartungsaufenthalte die Kapazitäten zielgerichteter vorhalten zu können.

2. LEBENSZYKLUSKOSTEN

Lebenszykluskosten bzw. Life-Cycle-Cost (LCC) sind die Gesamtkosten die anfallen, beginnend bei dem Entwurf, der Entwicklung, der Beschaffung, dem Betrieb, der Logistik, der Instandhaltung bis hin zur Außerbetriebnahme eines Produkts oder Systems, also von der "Wiege bis zur Bahre". Die Betrachtung der Lebenszykluskosten hat in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts im militärischen Bereich Einzug gefunden und konnte dort in einer gesamtheitlichen Sicht umgesetzt werden, da der Staat die gesamten Ausgaben kontrollierte. Die Kosten für Entwicklung, Produktion und Betrieb wurden aus einem Budget bezahlt.

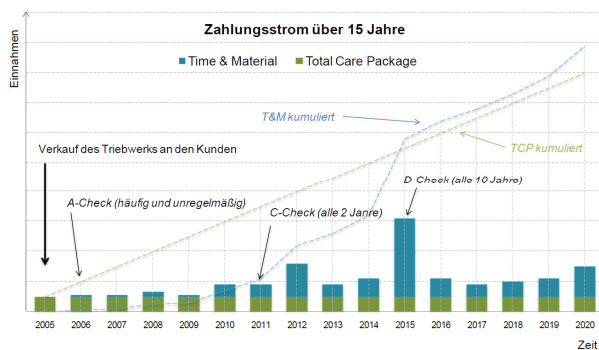


BILD 1. Vergleich der Zahlungsströme zwischen T&M und TCP Kunden (ohne Verkaufseinnahmen)

In der zivilen Luftfahrt ist die Lage anders. Die Entwicklung eines Produkts wird in der Regel vom Hersteller vorfinanziert und nicht vom Kunden. Die Kosten des Betriebs werden abhängig vom an-

gewendeten Geschäftsmodell, wie z.B. T&M oder FHA, vom Kunden getragen. Und zusätzlich sind Kosten nicht gleich Kosten, da die Kosten des Kunden die Preise des Herstellers sind.

Wenn von Lebenszykluskosten gesprochen wird, muss der Kontext klar sein und definiert werden, welche Kosten berücksichtigt werden.

Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung der Hauptkostenblöcke, die sich aus einer gesamtheitlichen Perspektive ergeben.

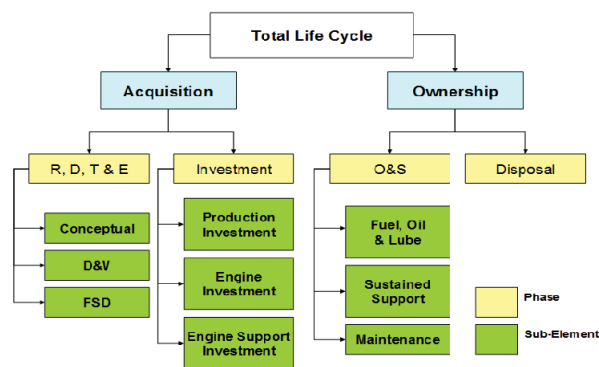


BILD 2. Phasen der Lebenszykluskosten

Der Hauptanteil der anfallenden Gesamtkosten liegt beim Betrieb der Triebwerke. Die Treibstoffkosten machen dabei einen wesentlichen Anteil aus. Sie werden in der Regel während der Entwurfs- und Entwicklungsphase durch die Spezifikation des SFC (spezifischer Brennstoffverbrauch) im Rahmen der existierenden Technologie bzw. der Technologieentwicklung berücksichtigt. Die Treibstoffkosten werden im Betrieb stark schwanken, abhängig von der Weltwirtschaftslage und der Politik der OPEC Länder. Nach der Beschaffung der Triebwerke und der Einführung in den Betrieb ist es meist sehr kostenaufwendig den SFC weiter zu reduzieren, da sich dieser durch den Verschleiß der Bauteile im Betrieb typischerweise verschlechtert. Sofern es möglich ist, werden allerdings durch Instandhaltungsmaßnahmen an den Triebwerken die Verbrauchswerte wieder auf den Zustand von neugebauten Triebwerken gebracht.

Um die Betriebskosten überschaubar und planbar zu halten und um weitere Ausgaben im Service durch Ausfälle zu vermeiden ist es wichtig, dass die Triebwerke sehr zuverlässig funktionieren und dass ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen die Ausnahme bleiben. Rolls-Royce betreibt deshalb seit gut 7 Jahren erfolgreich eine 'Zero Toleranz Politik (PROJECT ZERO – Zero tolerance to operational disruption) gegen Betriebsstörungen. Ein sogenannter 'Betriebsstörungsindex', der sich aus gewichteten Auswirkungen von Betriebsstörungenarten, wie z.B. Startabbrüchen, Ausfällen im Flug, Flugabbrüchen, Flugverspätungen, Stornierungen usw. zusammensetzt, wird regelmäßig errechnet. Die verschiedenen Betriebsstörungen haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Betrieb. Das Verhalten der Triebwerke wird

technisches Verständnis hat, sowie über eine eigene Wartungsorganisation verfügt, unterscheidet sich ein Betreiber eines Geschäftsreiseflugzeugs deutlich. Daraus ergeben sich für den Triebwerks-hersteller erhöhte Aufwände für technische Unterstützung, Bereithaltung von Ersatztriebwerken und Organisation der Wartung der Triebwerke, welche über eine geringere Nutzungsdauer amortisiert werden müssen.

All diese Einflüsse müssen mit hinreichender Genauigkeit in die LCC-Modellierung einfließen. Es soll nicht nur der Status Quo beschrieben werden, sondern nach Möglichkeit die Entwicklungen des Markts und deren Einflüsse auf die Kosten vorhergesehen und berücksichtigt werden.

3. LEBENSZYKLUSKOSTEN-MODELLIERUNG

3.1 Zielsetzung der Modellierung

Um auf Abweichungen eines Merkmals von einem gewünschten Wert reagieren zu können muss es möglich sein den gegenwärtigen Zustand gegenüber dem Zielwert zu messen um Korrekturmaßnahmen einzuleiten. In den meisten Fällen kann man die besagten Merkmale nicht direkt messen. Diese müssen durch Synthese über messbare, bezugsrelevante Parameter erfasst werden.

Basierend auf dem gegenwärtigen Zustand muss man vorhersagen können wie ein Merkmal sich in der Zukunft verhält. Dabei ist es wichtig zu verstehen welche Parameter einen Einfluss auf ein bestimmtes Merkmal haben.

Service Merkmale sind das Resultat einer komplizierten und nicht-linearen Interaktion von physikalischen Schädigungen, operationeller Nutzungsweise, Historie der Triebwerkskomponenten, Instandhaltung und Inspektionsrichtlinien, Designstandard, Reparierbarkeit u.v.a. Faktoren. Diese Komplexität erfordert Modellierung um die Folgen von Entscheidungen zu verstehen. Nur sorgfältig getroffene und auf Daten beruhende Entscheidungen generieren für die Organisation einen Wert.

Somit ist der Modellierungsprozess vollendet wenn dessen Resultate effektiv kommuniziert wurden und zu Entscheidungen und Handlungen geführt haben.

3.2 LCC Modellierungslandschaft

LCC Modelle werden heute schon bei der Identifizierung von Marktgelegenheiten bis hin zur Betriebseinführung erstellt. BILD 4 stellt dieses schematisch dar.

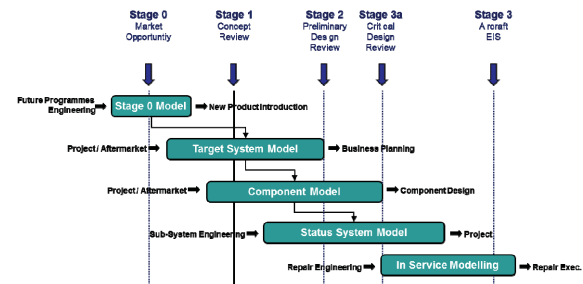


BILD 4. LCC Modelle durch den Lebenszyklus

Mit jeder Phase der Lebenszyklusanalyse erweitern sich die Modelle und werden dadurch komplizierter. Im ‚Stage Zero‘ Modell werden die direkten Wartungskosten (DMC – Direct Maintenance Cost) anhand von Anforderungen des Flugzeugherstellers und den Angaben der Entwicklungsabteilung für einen DMC Zielwert abgeschätzt. Dazu werden in das Modell Daten über Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Material- und Reparaturkosten etc. eingegeben. Die DMC Schätzwerte die in dieser Phase entstehen gehen in das PAD und das BRD (Business Requirements Document) ein die wiederum als Quelle für ein Systemzielmodell dienen. Diese resultieren in NPV Kostenschätzungen die dann wiederum als Quelle für die nächste Modellebene, das ‚Komponentenmodell‘, und die Projekt-, Sub-System- und Komponenten Anforderungsdokumente dienen. Dieser Modellierungsprozess wiederholt sich mit vergleichbaren, zunehmend akkurateren Parametern dann im ‚Status System Modell‘ und letztendlich im ‚System In-Service Modell‘. Die NPV Kostenschätzungen zusammen mit dem relevanten projektbezogenen PAD ermöglichen dann Rolls-Royce eine Abschätzung der Risiken im Anschlussmarkt. Ein detaillierter Ablauf der unterschiedlichen ineinander übergreifenden LCC Modelle ist in BILD 5 dargestellt.

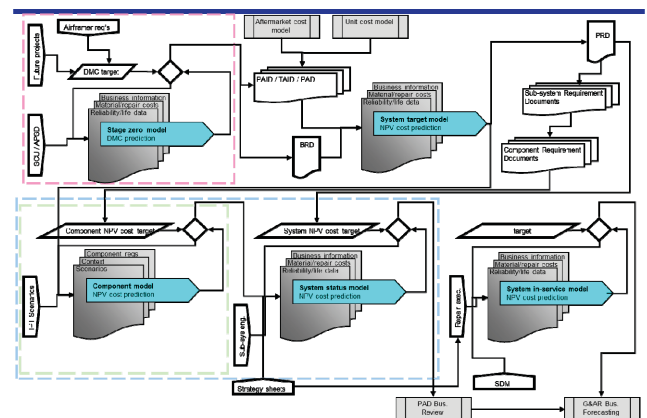


BILD 5. LCC Modellierungsprozesslandschaft

Key LCC Drivers	Corporate	Regional	LCC Impact
Triebwerksmuster (Beispiel)	BR710, Tay, AE3007 etc.	BR715, Tay, Spey, AE3007 etc.	
Eigentübertyp	Einzelflugzeug von Personen oder Firmen	Regionale Fluggesellschaften von kleinen bis mittelgroßen Flotten	Flugesellschaften haben eigene Ersatztriebwerke Geschäftsreiseflugzeuge Ersatztriebwerke vom OEM
Technische Infrastruktur	Kunden haben keine Infrastruktur	Kunden haben begrenzte Infrastruktur	Erhöhter Betreuungsaufwand für Betreiber von Geschäftsreiseflugzeugen
angeflogene Ziele	Variiert von großen Flughäfen bis entlegenen liegenden Landebahnen ohne oder begrenzte Infrastruktur (kein Streckennetz)	Variiert von großen Flughäfen mit guter Infrastruktur zu mittelgroßen Flughäfen mit begrenzter Infrastruktur	Geschäftsflugzeugbetreiber brauchen mehr Vor-Ort Unterstützung
Triebwerkdurchlaufzeiten in der Wartung	Kritisch für den OEM unter 'Care' Verträgen	Kritisch für den OEM unter 'Care' Verträgen	Geschäftsflugzeugbetreiber wollen Ihre eigene Bauteile wieder ins Triebwerk eingebaut sehen. Dies hat dann eine Wirkung auf LCC in Form von erhöhten Durchlaufzeiten oder Austausch mit neuen Teilen.
Managementaufwand	Mittelmäßig bis hoher Aufwand für Einzelflugzeugbetreiber wegen mangelndem Organisationsstruktur (kein Einkauf, Engineering etc.)	Mittelmäßiger Aufwand	hoher administrativer Aufwand für den 'Care' Anbieter um Einzelflugzeugbetreiber zu verwalten
Nutzung	max. 1-2 Landungen pro Tag, 1-2 Stunden pro Tag (in der Regel <500 Stunden Jährlich)	6-12 Landungen pro Tag (12-14 Stunden Betrieb), ungefähr 3000-3500 Stunden Jährlich	Kostenaufteilung zwischen OEM und Anschlussmarkt ist unterschiedlich zwischen Geschäftsflugzeug- und Regionalen Betreibern
Fähigkeit zur technischen Instandhaltung am Flügel	Keine eigenen Möglichkeiten zur technischen Instandhaltung am Flügel	Eigene Organisation zu technischen Instandhaltung am Flügel	Geschäftsflugzeugbetreiber brauchen Unterstützung durch Wartungszentren
Logistik	Keine Ersatzteile oder Triebwerksinventar, Zugang auf Ersatzteile durch global verteilte Logistikzentren des OEM	Begrenzte Ersatzteile oder Triebwerksinventar, Zugang auf Ersatzteile durch global verteilte Logistikzentren des OEM	'Care' Anbieter hält Ersatzteile auf Lager für Geschäftsflugzeugbetreiber, Regionale Fluggesellschaften dagegen haben üblicherweise die am häufigsten benutzten Ersatzteile auf Lager, Regionale benötigen Zugang zu einem global vernetzten MRO Netzwerk

Tabelle 1 LCC Treiber Marktvergleich

3.3 Bedeutung des Servicebereichs

In 2011 hat der Rolls-Royce Konzern 53% des Jahresumsatzes (£5.572 Mio) durch Dienstleistungen erzielt.

Ein Großanteil der Flotte ist mit Langfristigen Serviceverträgen abgedeckt, die Garantien auf Zuverlässigkeit, Kosten und Verfügbarkeit geben, die bei Nicht-Einhaltung der gesetzten Zielwerte finanzielle Folgen mit sich tragen. Darum ist es wichtig für den zukünftigen Geschäftserfolg die relevanten Service Merkmale mit einer gewissen Genauigkeit vorhersagen zu können und die Fähigkeit zu besitzen, das Design des Produkts so zu beeinflussen, dass diese Zielwerte erreicht werden können.

3.4 Wichtige Merkmale

Im Dienstleistungssegment gibt es gewisse Merkmale die den Service prägen. Wichtige Servicemerkmale für das Dienstleistungssegment von Rolls-Royce:

- Haben einen messbaren Einfluss auf den Erfolg von Rolls-Royce in Form von Einkünften für Dienstleistungen.
- Können durch Engineering Aktivitäten beeinflusst werden.

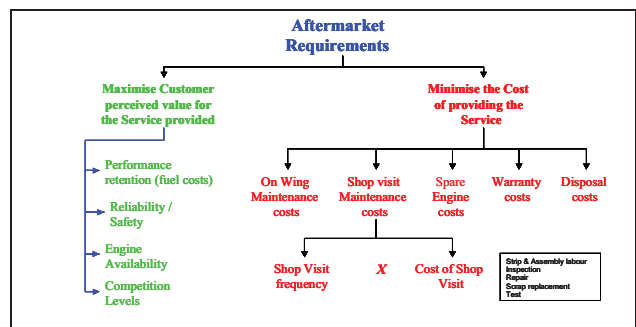


BILD 6. Schlüsselmerkmale für den Dienstleistungssegment

Diese Merkmale sind u.a. Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Lebenszykluskosten und Betriebsstörungen. BILD 6 repräsentiert die wichtigsten Merkmale im Anschlussmarkt die vom Engineering beeinflusst werden können. Indem die zukünftigen Kosten besser verstanden werden, können Maßnahmen ergriffen werden, um diese zu beeinflussen um langfristig die Konkurrenzfähigkeit zu sichern.

3.5 Anforderungen an LCC Modellierungsapplikationen

Die Anforderungen an LCC Modellierungsapplikationen sind vielseitig. Die angewendeten Programme sollen [2]:

- Wachstum des Modells durch den Produktlebenszyklus vorsehen,
- Adaptierbar und flexibel sein gegenüber unterschiedlichen Wartungskonzepten,
- Verständlich und transparent sein,
- Integrierte Kostenschätzungen ausführen, wobei die Kosten innerhalb des vorgesehenen Wartungsmodells akkumuliert werden,
- Die Logistik für das Triebwerksflottenmanagement repräsentieren,
- Alterungsvorhersagen von Triebwerksmodulen und -komponenten machen
- und leicht zu bedienen sein.

Dabei ist es wichtig dass die Inputs die in die Modellierung eingehen validiert und von standardisierten Dokumenten oder Datentabellen entnommen sind. Die Outputs sollten die Input Daten wiedergeben und im erwünschten Format graphisch, numerisch oder tabuliert die Ergebnisse der Modellierung präsentieren.

3.6 LCC Modelle (Wartungskostenmodelle)

Um zukünftige Wartungskosten modellieren zu können muss man ein tiefgehendes Verständnis über Schädigungsmechanismen entwickeln, die an einem Triebwerk Wartungsbedarf, entweder am Flügel oder in einen Instandhaltungsbetrieb, generieren. Es gibt die verschiedensten Schädigungsmechanismen wie niederzyklische Ermüdung (Low Cycle Fatigue, LCF), hochzyklische Ermüdung (High Cycle Fatigue, HCF), thermomechanische Ermüdung, Kriechen, Korrosion, Erosion und Reibverschleiß. Die Wechselwirkung zwischen mehreren Schädigungsmechanismen reduzieren über die Betriebsdauer das Bauteilleben in unterschiedlichen Schädigungsformen und die Leistung des Triebwerks nimmt dadurch ab (z.B. werden die Spalte zwischen den Schaufelspitzen und dem Gehäuse immer größer, was dann zu einer SFC Erhöhung führt). Verändern sich die Umwelt- (z.B. Betrieb in Sulfat- oder Chlorhaltiger Umgebung) oder Betriebsbedingungen (z.B. hohe Außentemperaturen) hat das meist eine Auswirkung auf die Bauteillebensdauer durch die dominierenden Schädigungsmechanismen. Bei zu hohen Temperaturen werden die Turbinenteile im Heißbereich durch thermomechanische Belastung und Kriechen betroffen. Bei zu hohem Sulfatgehalt in der Luft wiederum tritt Korrosion im Gesamttriebwerk als dominierender Schädigungsmechanismus auf. Darum ist es wichtig bei der Modellierung alle Schädigungsarten zu berücksichtigen die hinsichtlich der variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen lebensdauerlimitierend sein können.

Generell gibt es 2 Arten von LCC Modellen für die Instandhaltung [4]. Eine auf der Makroebene mit der ‚Top-Down‘ Methode um reale Wartungsaktivitäten zu simulieren, wobei man z.B. auf der Triebwerkebene anfängt und es in Module oder Untermodule zerlegt, sobald diese in die Reparaturbetriebe aufgenommen werden. Diese Methode ist für eine grobe Planung gut geeignet.

In der ‚Top-Down‘ Methode basieren die Modelle auf statistischen Versagensvorhersagen (Weibullverteilung-

en) und die Felddaten sind häufig unscharf. Typischerweise sind das Punktdaten wie z.B. Triebwerksalter, Abbaugrund (u.a. Betriebsstörung) und Konfiguration, die beim Triebwerksabbau aufgenommen werden. Die Ausfallwahrscheinlichkeit individueller Triebwerkskomponenten kann damit statistisch beschrieben werden, allerdings kann man die Ursache der Ausfälle nicht ableiten.

Dagegen gibt es die ‚Bottom-Up‘ Methode welche die Zuverlässigkeit und Kosten von der individuellen Komponentenebene aufnimmt und es bis zu den gesamten Wartungskosten für das Triebwerk hochrechnet. Es benötigt große Datenmengen, liefert aber dafür bessere Ergebnisse.

Physikalisch basierte Schadensmodellierung rückte in den letzten Jahren immer mehr ins Rampenlicht, um dem Bottom-Up Modellierungsansatz eine bessere Adaption an unterschiedliche Betriebsbedingungen zu ermöglichen. In einem weiteren Schritt kann durch Berücksichtigung der Interaktionen zwischen mechanischer Schädigung und Leistungsverschlechterung, sowie der Rückwirkung der Instandhaltungsmaßnahmen auf die Leistungsverschlechterung noch mehr Physik in die Modellierung gebracht werden. Die Produktionsstreuung liefert eine Aussage über die Belastbarkeit der Bauteile durch Streuung in den Materialeigenschaften und den Fertigungstoleranzen. Dazu haben die Umwelt- und Betriebsbedingungen wie Partikelkonzentration in der Luft und Umgebungstemperaturen und Drücke einen erheblichen Einfluss auf die Wartungskosten und die Zuverlässigkeit der Triebwerke. Diese repräsentieren die Belastungsstreuung für die Bauteile. Eine schematische Darstellung dieser Methode wird in BILD 7 gezeigt die in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart und Rolls-Royce Deutschland im Rahmen des ‚Optifer‘ Programms entstand [4]. Eine Erweiterung des Kostenmodells auf die Flotte erfolgt durch eine statistische Auswertung mit der Anwendung der Monte-Carlo Methode. Die Modellierung der Bauteilschädigung erfolgt durch eine Felddatenanalyse in Kombination mit einer Analyse der physikalischen Zusammenhänge.

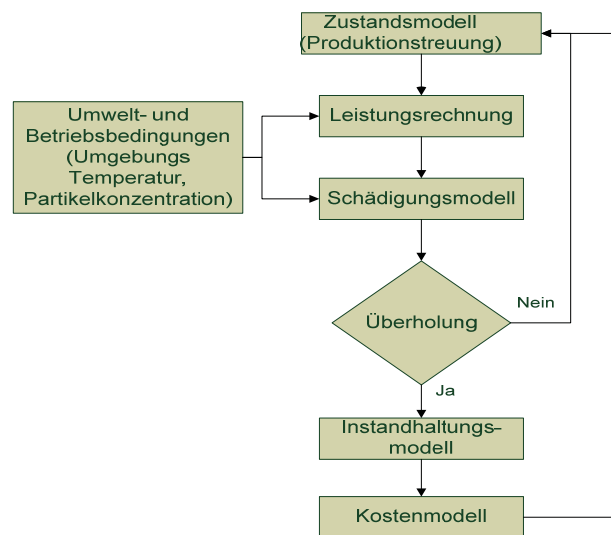


BILD 7. Schema zur Kopplung von Leistungsrechnung und Schädigungsmodellierung

4 GEGENWÄRTIGE PROZESS-ANFORDERUNGEN & -ABWEICHUNGEN

Eine vereinfachte Darstellung der Modellierung von Service Merkmalen ist in BILD 8 dargestellt. Dieses Modell unterteilt den Modellierungsprozess in die folgenden fünf Aktivitäten [5]:

- Festlegung von Merkmalsanforderungen
- Vorhersagbare Statusmodellierung
- Überwachen der Soll-Ist Vergleiche
- Rückführung von Erkenntnissen
- Bewertung von Sensitivitäten und Szenarien

In den folgenden Paragraphen werden die Anforderungen, Fähigkeiten und die Strategien für Verbesserungen dieser fünf Aktivitäten bei Rolls-Royce beschrieben.

4.1 Festlegung von Merkmalsanforderungen

Die Systemzielanforderungen werden in deren Bestandteile d.h. Module und Komponenten unterteilt. Die Summe der Anforderungen für jedes der Bestandteile ergeben schließlich die Gesamtanforderungen die das Triebwerk als System zu erfüllen hat. Dabei ist zu beachten dass die Anforderungen für jeden Bestandteil konsistent gegeneinander sein müssen. Die Festlegung von Anforderungen sollte vom Anfang der LCC Modellphasen (siehe BILD 4), der Konzeptentwurfphase bis hin zur Inbetriebnahme der Triebwerke durchgängig erfolgen, mit dem Ziel die Modelle in jeder Phase weiter zu optimieren. Dafür bedarf es einer geschickten systemanalytischen Denkweise. Wichtig ist das Anforderungsmodell durch die Lebenszyklusphasen aktuell zu halten um eine Neukalibrierung der Bestandteileziele durchzuführen, wenn systemseitig Designänderungen vorgenommen werden.

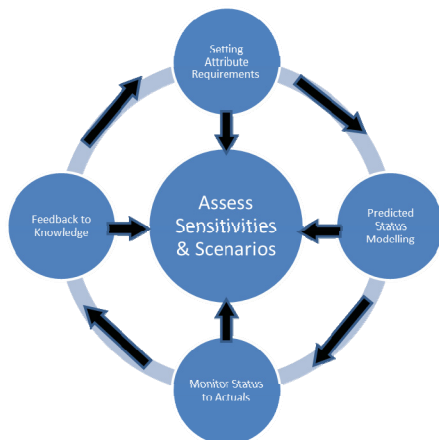


BILD 8. Modellierung von Service Merkmalen

Zurzeit existieren keine Methoden die sich für die Festlegung von Servicemerkmalanforderungen durchgesetzt haben. Ein Prozess zur Optimierung dieser Merkmale existiert nicht. Folgende Fähigkeiten müssen in diesem Zusammenhang gewonnen werden:

- a) Die Anwendung von Systemanalytischen Denkweise (Systems Engineering) für die Festlegung von Serviceanforderungen
- b) Eine Bibliothek mit generischen LCC Modellen
- c) Eine Bibliothek mit Service Daten die die LCC Modellierung während der Konzeptphase unterstützen
- d) Einzelne oder mehrere Servicemerkmale unter

Berücksichtigung der Änderungen in der Triebwerksleistung und Betriebsbedingungen.

4.2 Vorhersagbare Statusmodellierung

Der vorhersagbare Stand der Servicemerkmale muss modellierbar sein damit die Triebwerksprojekte diese dann gegenüber Zielwerten vergleichen können und bei Abweichungen Maßnahmen einleiten, die den Abstand zu den Zielwerten schließen. Dieses ermöglicht zudem eine Sensitivitäts- bzw. Unsicherheitsanalyse.

Die vorhersagbare Statusmodellierung muss des Weiteren in der Lage sein sich mit dem Zielmodell vergleichen zu lassen ohne dass die Resultate von der Modellkalkulation selbst beeinflusst werden. In anderen Worten die Art und Weise der Modellerrechnung sollte keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Die Modellierungssoftware und die angewendete Methode in den verschiedenen Phasen der Modellierung sollten identisch sein und lediglich mehr Details in den weiteren Phasen der LCC Modellierung in Form von Modellinputs enthalten. Es reicht in den frühen LCC Modellierungsphasen zum Beispiel aus, wenn man mit einer einfachen Logik die Wartungsstrategie repräsentierte und wenige Zuverlässigkeitstreiber beanspruchte. Reifere Flottenmodelle in späteren Phasen der LCC Modellierung dagegen benötigen in der Regel mehr Zuverlässigkeitstreiber mit Serviceerfahrung und einer komplexeren Abbildung der Wartungsstrategie. Die Modellierungssoftware sollte zudem auch flexibel sein um die Vorhersagen in verschiedenen Formaten darstellen zu können.

4.3 Überwachen der Soll-Ist Vergleiche

Ein Soll-Ist Vergleich ist nötig um die vorhergesagten Service Merkmalszustände gegenüber den aktuell erreichten Werten zu vergleichen. Damit können Abweichungen adressiert und gegebenenfalls mit einer revidierten Vorhersage korrigiert werden falls die vorherige unzureichend sein sollte. Die Genauigkeit der Vorhersagen ist dabei ein wichtiges Kriterium.

4.4 Rückführung von Erkenntnissen

Jede Erkenntnis die während des Modellierungsprozesses der Komponenten, Module oder gar Systeme gewonnen wird sollte in die Modelle wieder zurückfließen, um die Modelle weiter zu verfeinern und die Wissensbasis zu verstärken. Die ganze Modellierungsschleife über die LCC Phasen ist sehr zeitraubend und datenintensiv, so dass man es sich unbedingt zum Ziel machen sollte von den Serviceerfahrungen zu lernen um bei der nächsten Modellierungsiteration daraus zu profitieren. Wenn Serviceerfahrungen bei der Einführung einer neuen Komponente mit einfließen, kann man treffsicherere LCC Abschätzungen ausführen. Diese Erfahrungen werden bei Rolls-Royce in „parametrischen Verteilungsbibliotheken“ erfasst und für zukünftige Analysen bereit gestellt.

4.5 Bewertung von Sensitivitäten und Szenarien

Die Modellierung von Servicemerkmalen sollte eine Analyse auf deren Sensitivität unter unterschiedlichen Szenarien beinhalten. Das Ziel dabei ist es die Auswirkungen von Entscheidungen auf alle Servicemerkmale zu ermitteln, die aus den Ergebnissen der Modellierung entstanden sind. Die Ergebnisse der Bewertung durch Szenarioanalysen von einzelnen Merkmalen müssen zudem miteinander

vergleichbar sein. Z.B. wenn man Gewicht, SFC, Emissionen oder Wartungskosten miteinander vergleicht, müssen diese über einen gemeinsamen Nenner wie eine Währungseinheit (z.B. €) verglichen werden können.

Allerdings werden die meisten Servicemerkmale einzeln und voneinander unabhängig bewertet und damit versäumt man die Möglichkeit die Interaktion von einzelnen Merkmalen miteinander auszubalancieren um das Design der Komponenten insbesondere in der Entwicklungsphase zu optimieren. Deshalb ist es erforderlich eine integrierte Modellierungsfähigkeit zu erlangen mit der wir die Bauteilschädigung modellieren können und damit die Auswirkungen auf die diversen Servicemerkmale wie Zuverlässigkeit, SFC, Wartungskosten etc. miteinander vergleichen können.

5 ROLLS-ROYCE DEUTSCHLAND LCC MODELLIERUNGSSTRATEGIE

Das Ziel der Modellierung ist vorrangig die Verbesserung des Flottenmanagements von Flugzeugtriebwerken. Dadurch soll erreicht werden, dass die Einsatzplanung der Triebwerke unter Berücksichtigung der spezifischen Einsatzbedingungen optimiert werden kann. Dies impliziert eine bessere Vorhersagefähigkeit des Wartungsbedarfs, insbesondere von Schädigungsmechanismen, die einen unmittelbaren Einfluss auf die Verfügbarkeit bedeuten, das Anpassen von Überholungsintervallen unter Beibehaltung der Zuverlässigkeit und letztendlich die Reduzierung der Betriebskosten.

5.1 Stand der Technik

Die Vorhersage von Betriebskosten basiert derzeit vorwiegend auf der statistischen Verarbeitung von Betriebsdaten einer Triebwerksflotte oder der Übertragung von Betriebsdaten anderer Triebwerksprogramme mittels Expertenschätzungen. Über einen statistisch relevanten Zeitraum verändern sich jedoch in der Regel bereits die Randbedingungen, in denen die Daten entstehen, z.B. durch Komponentenmodifikationen, was zu einer Verzerrung der Verteilungen führt.

Die angestrebte LCC Modellierung sollte Unsicherheitsfaktoren aus den statistischen Verteilungen eliminieren, indem Verschleißdaten unter kontrollierten Randbedingungen gewonnen werden, die dann durch die Modellierung der geometrisch-physikalischen Zusammenhänge, z.B. für Erosion, Oxidation und Reibverschleiß, für die Vorhersage des Verschleißverhaltens unter anderen Betriebsbedingungen und für andere Geometrien zugänglich gemacht werden können.

Sowohl die Interaktion zwischen der Leistungsverlechterung und Bauteilschädigung als auch die Berücksichtigung physikalischer Schädigungsmodelle ist in der neuesten Generation von Triebwerksverhaltensmodellen implementiert. Für den produktiven Einsatz der neuen Modellierungsfähigkeiten fehlen noch adäquate physikalische Schädigungsmodelle. Außerdem wird dem immer größer werdenden Feld an in-situ Reparaturen Rechnung getragen, in dem in die Triebwerksverhaltensmodellierung zusätzlich zu den Wartungskosten im Instandhaltungsbetrieb auch die Kosten der Wartung am Flügel berücksichtigt werden.

5.2 Bisherige Projekte von RR im LCC Bereich

Im Bereich der betriebsorientierten Forschung sind in den letzten 5 Jahren von Rolls-Royce Deutschland mehrere Vorhaben durchgeführt worden. Viele dieser Projekte sind durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des vierten Aufrufs des vierten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo IV) unterstützt worden. In ‚Optifer Plus‘ und ‚Verdemod (LuFo IV)‘ sind statistische Ansätze für Schadensmodellierung von Verdichterschaufeln untersucht worden. In ‚Holisturb‘ und ‚Interturb (LuFo IV)‘ wurde dieser Ansatz auf die Turbinenbeschauelung ausgeweitet. Im Rahmen von ‚Mechamod (LuFo IV)‘ wurde das im Rahmen von Optifer aufgebaute Leistungsrechnungsmodell, das probabilistische Ansätze für Produktionsstreuung und Degradation ermöglicht, durch ein Wartungskostenmodell erweitert [4], um die Wechselwirkung zwischen Betriebsbedingungen und Wartungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Innovation Clusters MRO sollen in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer Gesellschaft (u.a.) in-situ Reparaturmethoden für Komponenten im Hauptgaspfad vorangetrieben werden.

Zusätzlich kommen aus der Erfahrung mit dem Triebwerksbetrieb neue Erkenntnisse über das Langzeitverhalten von Komponenten, die einer wissenschaftlichen Untersuchung bedürfen, um über eine Modellierung der physikalischen Effekte eine breite Anwendbarkeit zu ermöglichen.

5.3 Die Rolls-Royce Deutschland Strategie

Die Strategie sieht im wesentlichen vier Hauptarbeitsbereiche vor:

- Charakterisierung von Komponentenverschleiß
- Triebwerksverhaltensmodellierung
- Betreiberspezifische Optimierung der Wartungskosten
- Steigerung der Zuverlässigkeit mit minimalem Wartungsaufwand

5.3.1 Charakterisierung von Komponentenverschleiß

Material- und Schädigungsmodelle von ausgewählten Bauteilen sollen identifiziert werden. Ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Schädigungsvorgänge ist dafür erforderlich. Die Erarbeitung dieser Modelle soll anhand von Mikrostrukturuntersuchungen geschehen die die Bauteilbelastbarkeit durch die erfassten Streuungen ergeben. Die aktuelle Bauteilbelastung im Vergleich zu der Bauteilbelastbarkeit hat einen direkten Einfluss auf die Zuverlässigkeit der einzelnen Bauteile und auf die Gesamtlebenszykluskosten des Triebwerks. Anschließend sollen die relevanten mechanischen Kennwerte durch gezielte Experimente (z.B. Zugversuche, Kriechexperimente, Risswachstumsexperimente, Korrosionsversuche) ermittelt werden, falls sie vom Werkstoffhersteller für die ausgewählten Werkstoffe in den selektierten Bauteile nicht bekannt sind. Ausgehend von diesen Daten sollen dann realistische Verteilungen der Materialeigenschaften und der potentiellen Schädigungen festgelegt werden.

Im Betrieb sind die Schaufeln im Verdichter- und Turbinenbereich hohen Belastungen in Form von Drücken, Temperaturen, Fliehkräften, Partikelkonzentrationen usw. ausgesetzt. Diese führen dazu, dass die Schaufeln sich durch Erosion, mechanischen Kontaktverschleiß und Kriechen geometrisch verändern. Dazu kommen noch Ablagerungen und Einschlagskerben auf den Schaufeloberflächen die eine weitere Änderung der Schaufelgeometrie verursachen. Eine Vermessung und Charakterisierung der geometrischen Veränderungen die die Schaufeln aufweisen, soll erfolgen.

Erste Vermessungsergebnisse aus einer Zusammenarbeit zwischen der Universität Dresden und Rolls-Royce Deutschland haben gezeigt, dass die statistische Auswertung von neuen Verdichterschaufeln gegenüber im Betrieb gelaufener Schaufeln nicht eindeutig ist. Der Verschleiß durch den Betrieb lag in diesem Fall in der gleichen Größenordnung wie die Produktionsstreuung. Um bessere, aufschlussreichere Ergebnisse zu liefern werden nun von einer statistisch relevanten Anzahl von Verdichterschaufeln die geometrischen Daten der Neuteile erfasst um diese mit Messwerten nach einer gewissen Laufzeit vergleichen zu können. Damit wird eine Auswertung über die aktuellen Materialabtragsrate im Betrieb möglich, die wiederum aufschlussreiche Erkenntnisse über das nutzbare Leben der Verdichterschaufeln verschaffen.

Die erworbenen Messresultate sollen als Eingabe in leistungsfähigen Rechnern benutzt werden um die Auswirkungen auf die Gesamttriebwerksleistung und die Lebensdauerverteilungen zu ermitteln.

5.3.2 Triebwerksverhaltensmodellierung

Aus der Perspektive der Lebenszykluskostenmodellierung bezieht sich die Modellierung des Triebwerksverhaltens primär auf die Zuverlässigkeit, die Auswirkungen auf die erreichbaren Betriebszeiten bis zur Wartung hat, sowie auf den Zustand des Triebwerks, was Auswirkungen auf den Wartungsumfang hat. Für ein neues Triebwerk hat alleine das Ausfallverhalten der Komponenten einen Einfluss auf die Betriebszeiten. Für die Zeit zwischen den späteren Wartungsaufenthalten ist der Wartungsumfang bei den einzelnen Wartungsaufenthalten mitentscheidend für die erreichbaren Betriebszeiten.

Der Umfang der Wartungsmaßnahmen ergibt sich aus dem Alter der einzelnen Komponenten und dem Grund für den Wartungsaufenthalt. Bei geplanten Wartungsaufenthalten wird der Wartungsumfang durch Arbeiten mit festgelegten Intervallen, sowie Arbeiten nach Zustand der Komponenten bestimmt. Bei ungeplanten Wartungsaufenthalten können darüber hinaus Arbeiten durch Primär- und Sekundärschäden verursacht werden.

Der Detaillierungsgrad der Triebwerksverhaltensmodellierung kann je nach Aufgabenstellung stark variieren. Das Modell kann auf Triebwerks-, Modul- oder Komponentenebene oder einer Kombination daraus aufgebaut werden. Die Zuverlässigkeit kann durch durchschnittliche Laufzeiten, statistischen Lebensdauerverteilungen oder parametrischen Funktionen in Abhängigkeit der Belastungsgrößen bestimmt werden. Mit zunehmendem Komplexitätsgrad der Modellierung kann die Interaktion zwischen Leistungsver schlechterung und Komponentenbelastung sowie die Rückwirkung der Wartungsmaßnahmen auf die Leistungsfähigkeit des Triebwerks sinnvoll berücksichtigt

werden.

Die Ergebnisse der Triebwerksverhaltensmodellierung können in Abhängigkeit des Detaillierungsgrads variieren. Als wichtigstes Ergebnis ist die Verteilung der Betriebszeiten zu nennen, aus denen sich die Kapazitäten für Wartungsaufenthalte ergeben und sich Aussagen zu Zuverlässigkeit und Häufigkeit von Betriebsstörungen ableiten lassen. Über den Wartungsumfang können die Aufwände für Reparaturen und der Ersatzteilbedarf bestimmt werden. Über die Verknüpfung mit den Kosten für Ersatzteile, Arbeitsaufwand und andere Kostenelemente lassen sich die Wartungskosten vorhersagen.

Die Triebwerksverhaltensmodellierung kann insbesondere in den frühen Projektphasen einen großen Einfluß auf das Triebwerksdesign haben. Auf Basis der Modelle lassen sich die Sensitivitäten der Wartungskosten auf verschiedene Konstruktionsentwürfe ermitteln und so zu einer Optimierung des Gesamtkonzepts führen. In weiteren Entwicklungsphasen wird dann über den fortschreitenden Detaillierungsgrad die Optimierung auf Modul und Komponentenebene unterstützt.

5.3.3 Betreiberspezifische Optimierung der Wartungskosten

Triebwerke sind aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Fluggesellschaften an den Einsatz der Flugzeuge verschiedensten Belastungen ausgesetzt. Diese sind unterschiedlichen Schubanforderungen und Umweltbedingungen geschuldet. Einsatzlängen, klimatische Bedingungen, Kabinenkonfigurationen, Partikelkonzentrationen und vieles mehr können einen Einfluß auf die Belastung der einzelnen Komponenten haben.

Dadurch können Triebwerke mit der gleichen Komponentenkonfiguration stark variierende Betriebszeiten und Verschleißverhalten zeigen. In der Vergangenheit wurden die Wartungsintervalle nach den Betreibern mit den stärksten Belastungen gesetzt. Das führte dazu, dass viele Triebwerke nicht die Möglichkeiten ihrer Komponenten ausnutzen konnten. Man ist dann dazu übergegangen verschiedene Flugprofile zu definieren, denen unterschiedliche Wartungsintervalle zugewiesen wurden. Dadurch lassen sich die Wartungsintervalle besser an die wirkliche Leistungsfähigkeit der Triebwerke anpassen, aber mit nur einer Hand voll Flugprofilen ist immer noch ein großes Potenzial zur Optimierung vorhanden.

Durch die steigenden Möglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung und -übermittlung sowie durch verbessertes Verständnis der Schädigungsmechanismen wird es möglich die Wartungsintervalle und -umfänge für die Belastungen der einzelnen Fluggesellschaften zu optimieren. Die parametrisch aufgebauten, physikalisch basierten Schädigungsfunktionen helfen die realisierbaren Betriebszeiten der Komponenten in den einzelnen Modulen zu bestimmen und die Wartungsumfänge an die Optimierungsfunktionen einzelner Betreiber anzupassen.

Die Optimierung kann dann in Abhängigkeit der Kostenbasis der beteiligten Parteien unter Berücksichtigung aller Randbedingungen durchgeführt werden.

Bei einem vereinfachten Beispiel seien nur Lebensdauer begrenzte Bauteile in Verdichter und Turbine vorhanden. Das Flugzeug- und damit Triebwerksleben sei mit 50000 Zyklen veranschlagt. Für den durchschnittlichen Betreiber

haben der Verdichter ein Leben von 20000 Zyklen und die Turbine von 10000 Zyklen. Mit 4 Wartungsaufenthalten, bei denen 4 mal die Turbinenteile gewechselt werden und 2 mal die Verdichterteile, kommt das Triebwerk durch das Flugzeugleben und außer den Bauteilen fallen keine weiteren Kosten an. Ein anderer Betreiber benötigt weniger Schub, das Triebwerk kann kälter laufen und das Leben der Bauteile erhöht sich, allerdings reagieren Verdichter und Turbine unterschiedlich. Das Leben der Verdichterteile erhöht sich auf 22000 Zyklen, das Leben der Turbinenteile auf 14000 Zyklen. Der Betreiber hat jetzt die Möglichkeit mit 3 Wartungsaufenthalten (3 x 14000 Zyklen) über das Triebwerksleben zurecht zu kommen. Jedesmal wenn die Turbine erneuert wird, muss auch der Verdichter erneuert werden und damit werden 24000 Zyklen Verdichterteile weggeworfen. Eine andere Möglichkeit ist mit 4 Wartungsaufenthalten über das Triebwerksleben zurecht zu kommen, bei z.B. 14, 22, 36 und 44 Tausend Zyklen. Dabei werden 12000 Zyklen Turbinenteile weggeworfen. Um in dieser Situation die kostengünstigere Option zu wählen muss man die Verdichter- und Turbinenteilekosten kennen.

Die Problematik ist im realen Leben ungleich komplexer und ohne physikalisch basierte Schädigungsfunktionen ist die Übertragung auf betreiberspezifische Optimierung der Wartungskosten mit Unsicherheiten behaftet.

5.3.4 Steigerung der Zuverlässigkeit mit minimalem Wartungsaufwand

Die Zuverlässigkeit des Triebwerks kann durch ein ausgereiftes Triebwerksüberwachungssystem und gezielte in-situ Inspektionen und Reparaturen erhöht werden. In-situ Reinigung ist ebenfalls eine Möglichkeit die in Erwägung gezogen wird.

Die Triebwerksüberwachung ermöglicht eine vorhersehbare Wartungsplanung. Durch die Übertragung von im Betrieb aufgenommenen Daten und deren Auswertung durch ausgeklügelte Softwareprogramme können Vorhersagen über das zukünftige Triebwerksverhalten gemacht werden. Sensorik wie z.B. Druck- und Temperatursensoren, Wellendrehzahlmesser, Schwingungsaufnehmer usw. nehmen die wichtigsten Triebwerksparameter kontinuierlich auf. Diese Daten werden mit den Sollwerten des Triebwerksmodells verglichen um Abweichungen im Triebwerksverhalten frühzeitig zu entdecken.

Durch in-situ Inspektionen, Reinigung und Reparaturen erreicht man eine optimale Ausnutzung des Triebwerks in dem man es länger am Flügel behält und Kosten bis zu einem später geplanten Zeitpunkt verzögern kann. Rolls-Royce hat auf diesem Gebiet in den letzten Jahren innovative Technologien eingeführt wie z.B. fluoreszierende Eindringprüfung mit Boroskopie bei der man auf Schaufeln im Hauptstrombereich eine Rissprüfung durchführt (BILD 9, [6]). Meistens ist es für das menschliche Auge schwierig reale Risse von Erscheinungen durch Unreinheiten und Lichtreflexionen unterscheiden zu können. Mit dieser Methode erhöht sich die Genauigkeit der Zustandsbestimmung im Betrieb und die Entscheidung ob ein Triebwerkaustausch erforderlich ist.

Eine weitere Technologie ist z.B. das ‚Boro-Blending‘ bei der man Oberflächenbeschädigungen wie z.B. Einschlagskerben usw. mechanisch herausarbeitet (BILD 10, [7]) um potentielle Oberflächenspannungen zu reduzieren. Die

Methode existiert zwar für starre Boroskope schon seit geraumer Zeit und wird in der Industrie als Standard eingesetzt, um mit minimiertem Wartungsaufwand weiteren Betrieb zu ermöglichen. Allerdings hat Rolls-Royce als einziger Hersteller das ‚flexible Boro-Blending‘ eingeführt, mit dem man auch schwer zugängliche Bereiche im Triebwerk erreichen kann, und setzt es seit Jahren erfolgreich ein.

Bei beiden Verfahren handelt es sich um miniaturisierte, intrusive Inspektions- und Reparaturverfahren die sich als eine sehr kostengünstige Maßnahme erwiesen haben und heute zum Standardrepertoire der Rolls-Royce ‚Care‘ Programme gehören und auch unseren T&M Kunden angeboten werden.

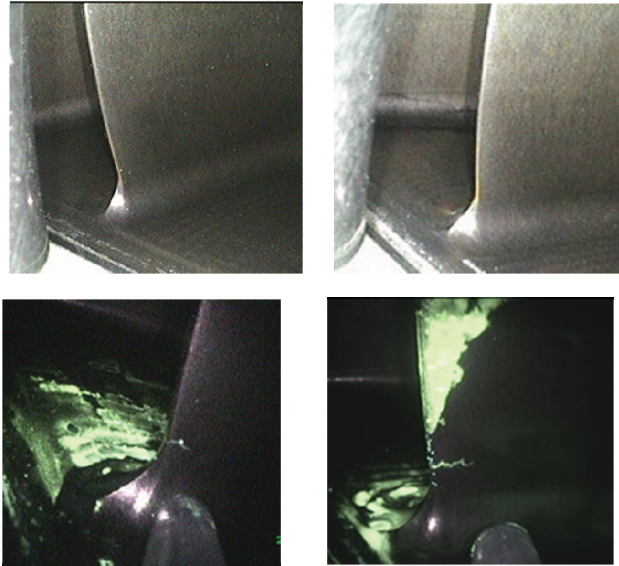


BILD 9. Fluoreszierende Eindringprüfung durch Boroskopie

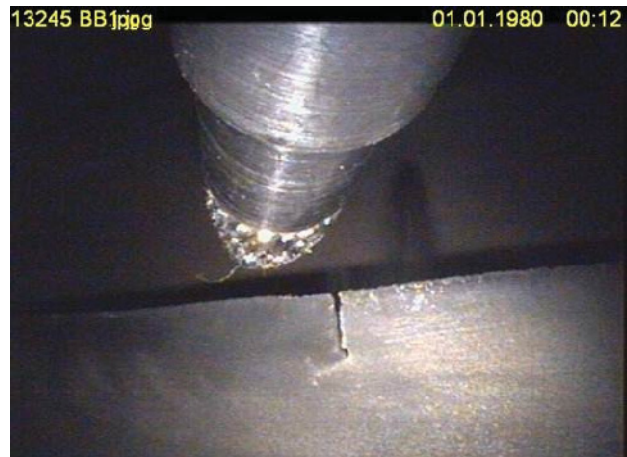




BILD 10. Boroskopieschleifen

Allerdings ist in dieser Hinsicht noch viel Potential im Zuge der technologischen Entwicklungen hinsichtlich Miniaturisierung der Optik, Elektronik und mechanischen Vorrichtungen vorhanden. Zur Zeit laufen im Bereich der in-situ Inspektions-, Reinigungs- und Reparaturmethoden Projekte an denen Rolls-Royce zusammen mit Universitäten und anderen Forschungsinstituten zusammenarbeitet.

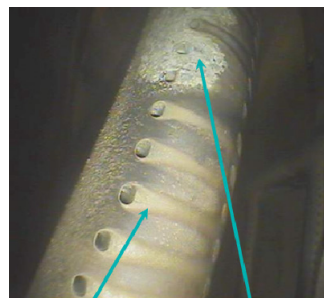
Eines dieser Verfahren bezieht sich auf die in-situ Wiederherstellung der Anstreifschichten auf Verdichterroten, die im Betrieb durch den Kontakt dieser mit den Leitschaufelkranzspitzen in Axialverdichtern abgetragen werden. Da sich die Verdichtertrommel im Kern eines Turbinenstrahltriebwerks befindet, ist eine Wartungsarbeit um die Verdichtertrommel sehr Kosten- und Ressourcenaufwendig und kann nur in Betrieben ausgeführt werden, die für die Instandhaltung des besagten Triebwerksmusters ausgestattet sind. BILD 11 [8] zeigt eine verschlissene Einlaufschicht im Vergleich zu einer Intakten Schicht.



BILD 11. Verschleißbeispiel einer Verdichtertrommeleinlaufschicht

Eine der vorwiegenden Herausforderungen für Triebwerke sind Ablagerungen die entstehen, wenn Luftpartikel im Massenstrom durch den Verbrennungsprozess in der Brennkammer zuerst schmelzen und sich auf den Turbinenschaufeln, während der Expansion und Kühlung des Massenstroms, wieder absetzen. Die Partikel

kommen dabei zusammen und formen Klumpen wenn sie wieder einen festen Aggregatzustand annehmen. Dieser zyklische Zustand führt letztendlich zur Verstopfung der Luftkühlbohrungen an Turbinenlaufschaufeln und Turbinenleitschaufeln und damit zu einer Reduzierung der Kühlungseffizienz. BILD 12 zeigt eine typische Turbinenschaufel mit Ablagerungen.



Ablagerungen im Massenstrom
Verstopfte Kühlbohrungen

BILD 12. Turbinenschaufel mit Ablagerungen

Die Entwicklung eines effektiven in-situ Reinigungsprozesses von Kühlbohrungen an Turbinenschaufeln ist deshalb notwendig. Rolls-Royce arbeitet seit einiger Zeit auch auf diesem Gebiet mit Universitäten und Forschungsinstituten an der Entwicklung und Validierung geeigneter Prozesse sowie der Manipulatoren und deren Steuerung bis zur Demonstration an Mockups.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Mit den neuen Geschäftsmodellen die über Langzeitserviceverträge mit fest vereinbarten Stundenraten laufen ist die Lebenszykluskostenmodellierung von Triebwerken über deren gesamten Lebensweg von der Entwurfsphase bis hin zur Außerdienststellung eine sehr wichtige Aufgabe für den Triebwerkshersteller. Da die Einnahmen aus Langzeitverträgen weitgehend festgelegt sind, erhält die Optimierung der Betriebskosten der Triebwerke durch erhöhte Zuverlässigkeit, Planbarkeit, flexible Wartungskonzepte und ein breites Angebot an in-situ Reparaturen einen hohen Stellenwert.

Die in diesem Artikel dargestellte Rolls-Royce Strategie über die Modellierung der Lebenszykluskosten ist eine komplizierte, aber realitätsnahe Methode deren Grundlagen in vorangegangenen Studien [4], [9] aufgezeigt wurden.

Die angestrebte LCC Modellierung soll Unsicherheitsfaktoren aus den statistischen Verteilungen, durch physikalisch basierte Verschleißfunktionen eliminieren. Durch die Modellierung der geometrisch-physikalischen Zusammenhänge, z.B. für Erosion, Oxidation und Reibverschleiß, soll die Vorhersage des Verschleißverhaltens unter anderen Betriebsbedingungen und für andere Geometrien zugänglich gemacht werden.

Im Bereich der Triebwerksverhaltensmodellierung sollen Schädigungsmodelle auf Basis physikalischer Mechanis-

men erarbeitet werden, um das Gesamttriebwerksmodell auf andere Umgebungsbedingungen übertragen zu können. Darüber hinaus sollen Entwicklungsarbeiten für in-situ Reparaturen im Strömungspfad neue Fähigkeiten schaffen, die zur Minimierung von Betriebsunterbrechungen und zur weiteren Ausdehnung der Wartungsintervalle führen.

LITERATUR

- [1] Özdemir, G., 2010, „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Bereich der Instandsetzung von Triebwerkskomponenten bei der Rolls-Royce Deutschland Ltd Co & KG“, Diplomarbeit, Hochschule for Technik und Wirtschaft Berlin.
- [2] Bond, N.R., 2006, „Requirements of Life Cycle Cost models based on Defence Aerospace product practices“, Rolls-Royce Bristol, Rolls-Royce Interner Technischer Bericht.
- [3] Mason, D., 2008, „Life Cycle Cost Analysis Presentation“, Rolls-Royce Corporation. Rolls-Royce Interner Technischer Bericht.
- [4] Müller, M., Staudacher, S., Friedl, W.-H., Köhler, R., Weißschuh, M., 2008, „Probabilistische Modellierung des Einflusses Variierender Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die Triebwerksinstandhaltung“, Universität Stuttgart und Rolls-Royce Deutschland.
- [5] Bayley, F., 2011, „Modelling Service Attributes Strategy Paper“, Rolls-Royce Interner Technischer Bericht.
- [6] Litzenberg, H., 2011, „On-wing Penetrant Inspection“ Präsentation, Rolls-Royce Deutschland Ltd Co & KG, Rolls Royce Interne Präsentation.
- [7] Litzenberg, H., 2012, 'Flexible Boro-Blending', Rolls-Royce Deutschland Ltd Co & KG
- [8] Rautenberg, J., 2012, „Repair Technology at RRD“ Präsentation, Rolls-Royce Deutschland Ltd Co & KG, Rolls Royce Interne Präsentation.
- [9] Gräter, F., Staudacher, S., 2008, „Unterstützung des Triebwerk-Monitorings durch eine Modellebasierte Alterungsvorhersage, Universität Stuttgart und Rolls-Royce Deutschland, Rolls Royce Interne Präsentation.