
Dr. Peter Wehle

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

**Zustandsabhängige und vorausschauende
Instandhaltung bei Triebwerken**

Einleitung

Rolls-Royce Deutschland ist der einzige deutsche Flugzeugtriebwerkshersteller mit Zulassung für die Entwicklung, Herstellung und Instandhaltung moderner ziviler und militärischer Turbinentriebwerke.

An den Standorten Dahlewitz bei Berlin und Oberursel bei Frankfurt/Main beschäftigt Rolls-Royce Deutschland über 3.500 Mitarbeiter.

Am Standort Dahlewitz befindet sich die Entwicklung und Endmontage aller BR700 Triebwerke. Die Erfolgsgeschichte der Triebwerke dieser Baureihe spiegelt sich in mehr als 16 Millionen akkumulierten Betriebsstunden wider. Als Kompetenzzentrum für Zweiwellentriebwerke ist der Standort Dahlewitz außerdem für die Triebwerksbaureihen Tay, Spey und Dart verantwortlich. Am Standort Dahlewitz befindet sich auch eine Endmontagelinie für das IAE V2500 Triebwerk. Das V2500 ist ein Zweiwellen-Triebwerk für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge und wird im Airbus A319, A320 und A321 sowie im A319 Corporate Jet eingesetzt.

Der Standort Oberursel hat sich im Rolls-Royce Konzern als anerkannter Produktionsstandort etabliert. Mit modernster Fertigungstechnologie werden dort High-Tech-Komponenten für zahlreiche Rolls-Royce Triebwerksprogramme hergestellt. Der Standort ist zudem Instandhaltungs- und Wartungszentrum für Kleingasturbinen für zahlreiche militärische und zivile Anwendungen.

Vor 20 bis 30 Jahren bestand das Geschäftsmodell für Service bei Triebwerken darin, Ersatzteile zu verkaufen und Information wie Handbücher und Training anzubieten. In der Zwischenzeit werden die meisten Triebwerke bei Rolls-Royce unter einer Servicevereinbarung mit Flugstundenraten verkauft. Dabei zahlt der Kunde pro Flugstunde und Rolls-Royce verdient nur, wenn das Triebwerk im Betrieb ist und die Servicekosten die Einnahmen nicht übersteigen. Rolls-Royce stellt das Triebwerk zur Verfügung, übernimmt die Überwachung mithilfe von während des Betriebes gemessenen Parametern und plant und führt die Instandsetzung, Überholung bzw. Reparatur der Triebwerke durch. Für den Betreiber ist dies eine Risikominimierung, da sämtliche Instandhaltungsaufwände in der Stundenrate enthalten sind. Rolls-Royce übernimmt technische und finanzielle Risiken.

Dieses Geschäftsmodell setzt daher ein robustes und effektives Flottenmanagement im Betrieb (On-Wing) und bei der Überholung (Off-Wing) voraus.

Das Operations Centre Dahlewitz ist das Zentrum der On-Wing Flottenbetreuung von Rolls-Royce Deutschland für mehr als 7700 Triebwerke. Ein Team von Spezialisten steht den Kunden rund um die Uhr bei technischen Fragen zur Verfügung, unterstützt das Flottenmanagement sowie Engine Health Monitoring. Das Team koordiniert und plant Wartung und Überholung als auch die Bereitstellung von Ersatzteilen und -triebwerken. Für den Kunden bietet dies viele Vorteile. Neben einem täglichen Status der Flotte ermöglicht vor allem das konzentrierte Fachwissen in einem Raum Entscheidungen auf Basis aller relevanten Daten in Echtzeit treffen zu können.

1 Kundenanforderung und Wettbewerb

Der Kunde bzw. Betreiber erwartet einen zuverlässigen Triebwerksbetrieb und geringe Betriebskosten. Neben einem geringen Treibstoffverbrauch und geringen Instandhaltungskosten spielen die Vermeidung unerwarteter Betriebsstörungen und eine hohe Verfügbarkeit wesentliche Rollen bei der Auswahl neuer Produkte auf dem Markt. Diese Anforderungen steigen kontinuierlich. Wer schon einmal am Flughafen auf einen verspäteten Abflug gewartet hat oder die Erfahrung machen musste, dass der Flug ausgefallen ist, kann vielleicht nachvollziehen, dass die Toleranz mit der Schnelligkeit der heutigen Zeit geringer geworden ist. Eine Fluglinie mit einer Flotte von Flugzeugen und Ersatztriebwerken hat bei entsprechender Vorlaufzeit eventuell noch Möglichkeiten bei technischen Problemen flexibel zu reagieren. Ein Besitzer eines Geschäftsreiseflugzeuges, für den Zeit sehr kostbar ist und der mehr als 60 Millionen Dollar für das Flugzeug bezahlt hat, um unabhängig zu sein, hat dies nicht, erwartet aber auch eine 100% Verfügbarkeit.

Nur durch die fortwährende Entwicklung neuer Technologien zur Reduktion von Brennstoffverbrauch, Emissionen und Gewicht sowie zur Vereinfachung und Verbesserung der Planbarkeit der Instandhaltung können wir diesem Anspruch gerecht werden.

2 Konzepte der Instandsetzung

Produkte haben keine unendliche Lebensdauer und zeigen Abnutzung und Verschleiß im Betrieb und müssen gewartet und instandgesetzt werden. Bei Flugzeugtriebwerken ist die Instandhaltung und hier vor allem der Aufwand in einem Überholungsbetrieb ein wesentlicher Kostenfaktor.

Bei der Instandhaltung gibt es abhängig vom Produkt und der verfügbaren Information unterschiedliche Vorgehensweisen. Die einfachste Variante ist die störungsabhängige, bei der beim Auftreten eines Fehlers reagiert wird, wie zum Beispiel das Wechseln einer Glühbirne. Eine weitere Möglichkeit ist es zeitabhängige Wartungsintervalle vorzugeben. Diese schöpft aber nicht das volle Potenzial des Produktes aus und deshalb wurde die zustandsabhängige (On-Condition) Instandhaltung entwickelt. Dabei werden mit Hilfe gemessener Parameter und Ergebnissen von Inspektionen die Wartungsintervalle für jedes einzelne Triebwerk individuell festgelegt. Dies erfordert einen höheren logistischen Aufwand, führt aber zu niedrigeren Gesamtkosten. Trotzdem kann es bei den durchgeführten Inspektionen zu unerwarteten Resultaten kommen, die den Ersatz eines Triebwerkes erfordern und dadurch eine ungeplante Betriebsstörung hervorrufen. Eine Weiterentwicklung des On-Condition-Modells ist die vorausschauende Instandhaltung, bei der Fehler und Störungen vorausgesagt werden und die Produktverwendung bei hoher Betriebssicherheit maximiert wird.

3 Vorausschauende Instandhaltung

Bei der vorausschauenden Instandhaltung unterscheiden wir einerseits zwischen den On-Wing Aktivitäten, die Inspektionen sowie Wartungsarbeiten inklusive den Ersatz von Komponenten und Baugruppen beinhalten, die vor Ort durchgeführt werden können. Rechtzeitige Information, eindeutige Fehlerursachen und klar definierte Korrekturmaßnahmen sind gefordert.

Andererseits umfasst eine vorausschauende Wartung auch den Off-Wing Bereich, wenn das Triebwerk zur Überholung in einen Betrieb gebracht wird. Hier sind ein auf Kosten und Zuverlässigkeit optimierter Arbeitsumfang und Planbarkeit wesentliche Faktoren.

3.1 Voraussetzungen für eine vorausschauende Instandhaltung

Voraussetzungen für eine vorausschauende Instandhaltung sind genaue Kenntnisse des Triebwerkszustandes, der Triebwerksbedingungen, der Verschleiß- und Beschädigungsmechanismen und des Triebwerksverhaltens.

Der Triebwerkszustand ergibt sich aus den Informationen über den Ist-Zustand des Antriebs unter Berücksichtigung der Bauakte, die Informationen enthält, welche Teile verbaut wurden. Des Weiteren sind die neuesten Daten und Ergebnissen von Inspektionen über den physikalischen Zustand der Komponenten und Systeme sowie während des Betriebes gemessene thermodynamische und mechanische Parameter berücksichtigt.

Zu den Triebwerksbedingungen gehören die Umweltbedingungen wie aktuelle Temperaturen und Umgebungstemperaturprofile, die für alle Flughäfen der Welt zur Verfügung stehen, die aktuelle Luftverschmutzung, als auch Flugprofile, die Informationen über den Einsatz wie Dauer der jeweiligen Flugzustände und den zeitlichen Verlauf der Zustandsänderungen aufzeigen.

Anhand von Modellen über Verschleiß- und Beschädigungsmechanismen können zum Beispiel Erosionsverhalten, Korrosionsverhalten und Ermüdung abgeschätzt werden. Solche Modelle basieren auf statistischen Auswertungen von gemessenen Werten an Bauteilen aus dem Betrieb oder Komponententests und dem physikalischen Verständnis. Geometriedaten von Bauteilen mit Verschleiß durch Erosion und veränderte Spaltgrößen bei Dichtungen oder zwischen Laufschaufeln und Gehäusen sind die Grundlage für die aerodynamische Sensitivitätsanalyse, mit der die Leistungsfähigkeit eines Triebwerkes überprüft werden kann.

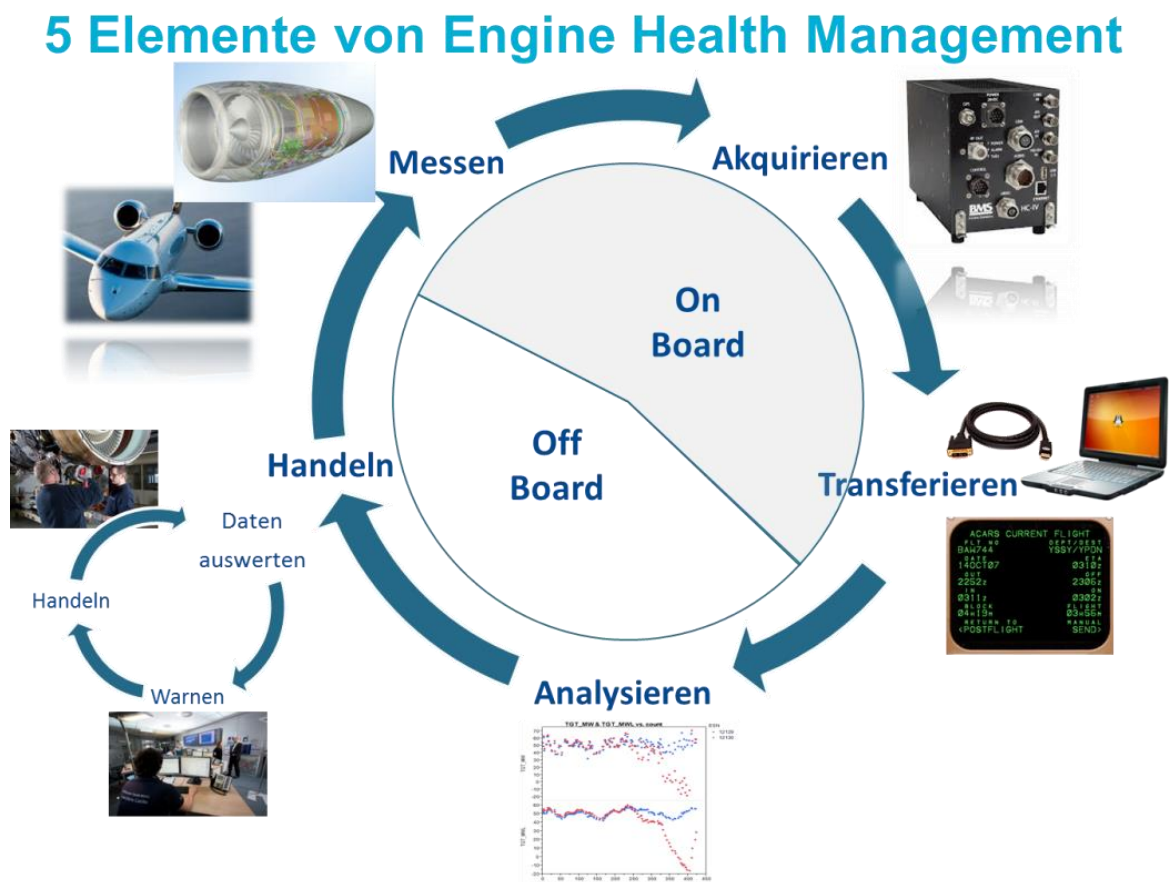
Eine weitere Voraussetzung für eine vorausschauende Instandsetzung ist die Kenntnis über das Triebwerksverhalten. Die Betriebsfähigkeit kann über das Startverhalten, wie schnell die Reaktionen auf Schubhebeländerungen erfolgen und den Brennstoffverbrauch beurteilt werden. Als Vergleich dient oftmals das zweite Triebwerk desselben Flugzeuges. Gab es eine Leistungsverschlechterung, wird versucht diese auf Veränderungen in einem Subsystem oder wenn möglich auf eine Komponente zu reduzieren.

Die oben beschriebenen Voraussetzungen erfordern eine kontinuierliche Triebwerksüberwachung und Auswertung des physikalischen Zustands von Komponenten und Systemen unter Einbeziehung thermodynamischer und mechanischer Parameter. Ein Triebwerksmodell zur Vorhersage des Lebenszyklusverhaltens hinsichtlich Betriebsfähigkeit und Zuverlässigkeit liefert eine Aussage über das zu erwartende Betriebsverhalten und ermöglicht eine vorausschauende On-Wing und Off-Wing Wartung, um Betriebsstörungen zu vermeiden.

Ein wesentlicher Einflussfaktor der vorausschauenden Instandsetzung ist die Qualität und der Umfang von aktuellen Betriebsdaten. Diese Daten werden über das Engine Health Management System gesammelt und verarbeitet.

3.2 Fünf Elemente von Engine Health Management

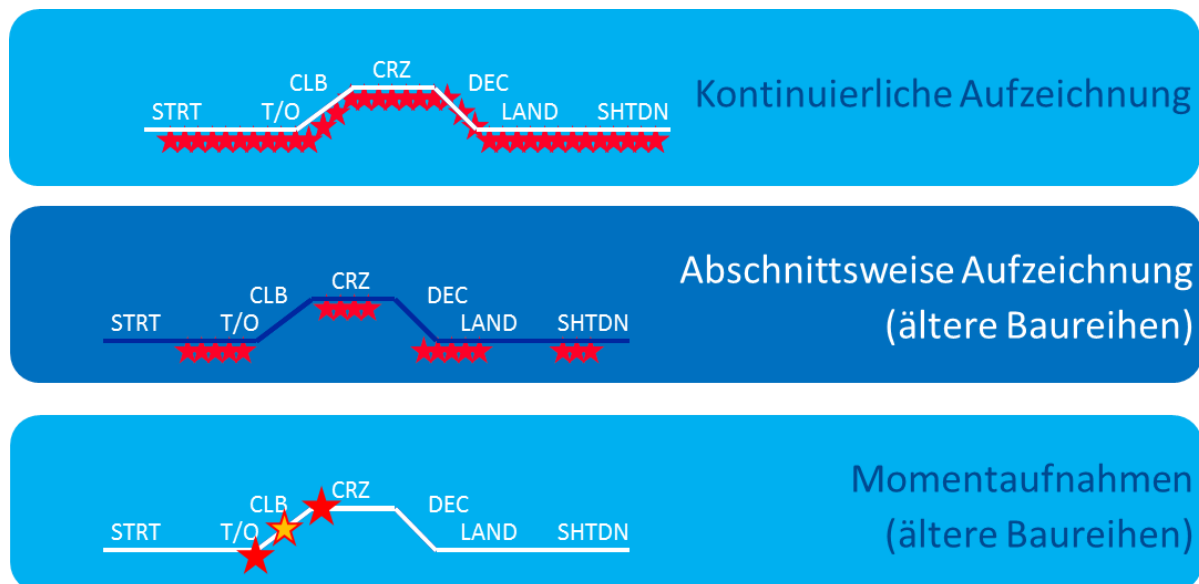
Die fünf Elemente von Engine Health Management sind Messen, Akquirieren, Transferieren, Analysieren und Handeln



Fünf Elemente von Engine Health Management

In einem Flugzeugtriebwerk werden hunderte Parameter gemessen und überwacht. Dazu gehören Triebwerksleistungsdaten wie Drücke, Temperaturen im Gaspfad sowie Kraftstoffverbrauch, Beschleunigung und Drehzahl. Diese Informationen finden Ergänzung durch mechanische Informationen über Schwingungen und Druck- und Temperaturdaten vom Luft- und Ölsystem. Die Ölverschmutzung, die über ein Ölpartikelmeßsystem ermittelt wird, liefert weitere Hinweise zum Verschleiß. Zusätzlich erfolgt eine Aufzeichnung einiger Flugzeugparameter, die für eine Auswertung des Triebwerkzustandes benötigt werden. Bei den neuesten im Betrieb befindlichen Baureihen von Rolls-Royce Deutschland stehen mehr als 200 Parameter mit einer Messfrequenz von einem Hertz für das Engine Health Management zur Verfügung.

Die Daten werden von der Triebwerksregelung, der Triebwerksüberwachungseinheit, dem Flugzeugcomputer bzw. der Flugzeugüberwachung gesammelt und für die weitere Verarbeitung aufbereitet. Je nach Baureihe kommen unterschiedliche Methoden zur Anwendung.



Unterschiedliche Möglichkeiten der Datenaufzeichnung

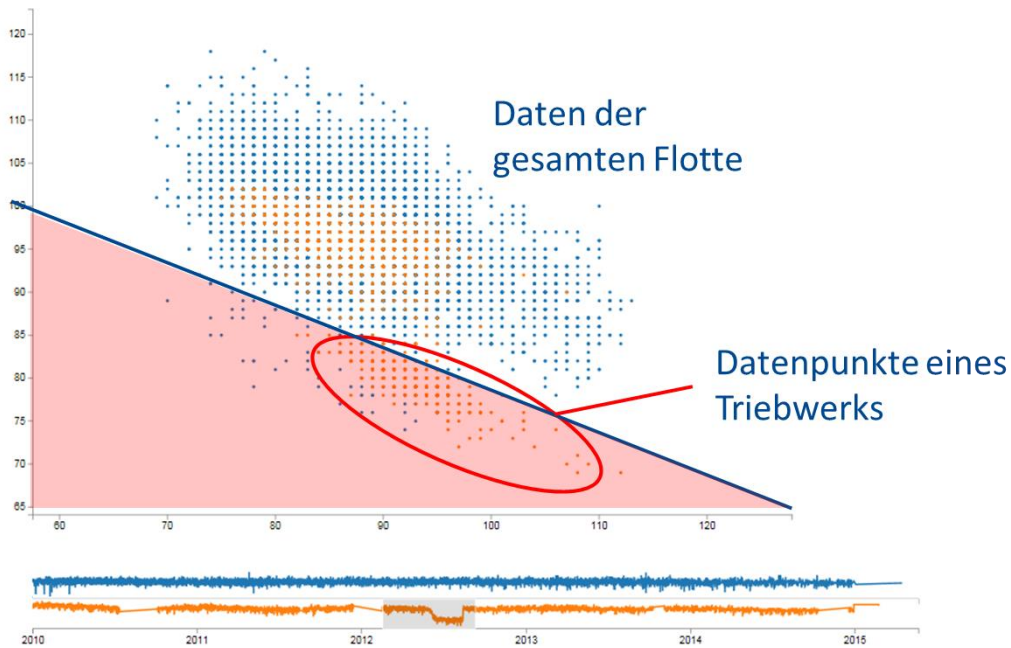
Bei der kontinuierlichen Aufzeichnung sind die Informationen über den gesamten Flugzyklus vom Start (STRT), Take-Off (T/O), Steigflug (CLB), Reiseflug (CRZ), Sinkflug (DEC), Landung (LAND) und Abschalten (SHTDN)

verfügbar. Bei älteren Triebwerken, die noch nicht über eine Datenaufzeichnung der neuesten Generation verfügen, werden einzelne Abschnitte wie Take-Off, Reiseflug, Landung und Abschalten gespeichert. Eine weitere Möglichkeit ist die Momentaufnahme von genau definierten Flugzuständen.

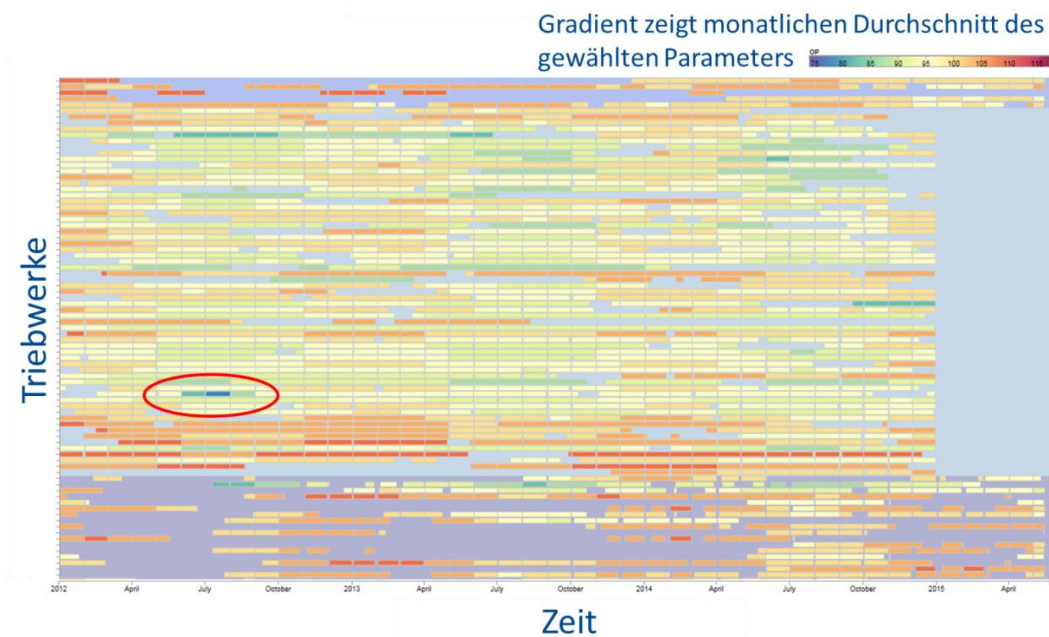
Zusätzliche Informationen von On-Wing Inspektionen und Instandsetzungen sind für die Interpretation der Daten notwendig. Ein Austausch eines Ventils könnte eine sprunghafte Änderung eines Messwertes verursachen und nur mit diesem Wissen kann der Ingenieur die Veränderung eindeutig zuordnen.

Der Datentransfer erfolgt in Echtzeit über Satellit oder UKW, jeweils nach der Landung automatisch drahtlos am Boden über ein lokales Funknetz wie WLAN, das Mobilfunknetz oder bei älteren Baureihen über Kabel vom Flugzeug auf ein Computernetzwerk.

Das Triebwerksleistungsmodell angepasst an die jeweiligen Betriebsstunden des betrachteten Triebwerks dient als „Sollwert“-Vergleich mit den aktuell gemessenen Parametern. Ein Abgleich des einzelnen Triebwerks mit der Flotte und mit anderen Triebwerken desselben Flugzeuges ergibt weitere Informationen, die eine Einschätzung der Abnutzung ermöglichen. Sollten sich Abweichungen ergeben, lässt sich damit eventuell ein abnormales Verhalten identifizieren und löst den nächsten Bearbeitungsschritt, eine Bewertung von Risiken aus. Beim ersten Auftreten von Abweichungen führt der Ingenieur eine Ursachenanalyse durch, definiert Abstellmaßnahmen und erstellt eine Prognose über das weitere Betriebsverhalten. Die kontinuierliche Verbesserung der Diagnose- und Prognosemethoden durch Einarbeiten der „neuen“ Ereignisse erlaubt dann einen weitgehend maschinellen Überwachungsbetrieb mit automatischer Störmeldung. Im Element Analysieren erfolgt auch die Instandsetzungsplanung über Termin und Umfang einer Überholung.



Analysieren: Vergleich Triebwerk mit Flotte



Analysieren: Überblick Flotte

Im letzten Schritt des Engine Health Managements findet die Umsetzung der Maßnahmen und Anweisungen statt. Das Operations Centre informiert Betreiber, Kunden, Servicepersonal und leitet, wenn erforderlich, die Kommunikation mit dem Überholungsbetrieb ein. Das aus dem Engine Health Management gewonnene Verständnis des Triebwerkzustandes ist die Grundlage für die Optimierung der Instandhaltung. Die Erfassung und Verarbeitung von Triebwerksdaten in Echtzeit erlaubt es schneller zu reagieren

und es kommt immer öfter vor, dass Ersatzteile bereits am Flughafen eingetroffen sind, bevor das Flugzeug gelandet ist.

3.3 Umsetzung der Instandhaltung

Die On-Wing Instandhaltung umfasst Wartung und Inspektionen aber auch Reparaturen zum Beispiel mechanische Bearbeitung von Verdichterschaukeln mithilfe eines Boroskops oder den Austausch von Bauteilen.

Der sogenannte Engine Management Plan definiert den Arbeitsumfang für die Triebwerksüberholung, die in einem dafür autorisierten Betrieb erfolgt. Dieser Plan wird basierend auf dem Triebwerkstandard und der Informationen über von Inspektionen und der Überwachung bekannten Verschleiß und Abnutzungserscheinungen erstellt. Er berücksichtigt die Zuverlässigkeit und verbleibende Lebensdauer von Bauteilen, zieht Reparaturmöglichkeiten in Betracht und optimiert die Lebenszykluskosten und stellt damit den besten Kompromiss zwischen Kosten und Anzahl der einzelnen Überholungen sicher. Weniger Überholungen mit hohen Kosten ergeben eventuell geringere Lebenszykluskosten als mehrere Überholungen mit geringen Kosten.

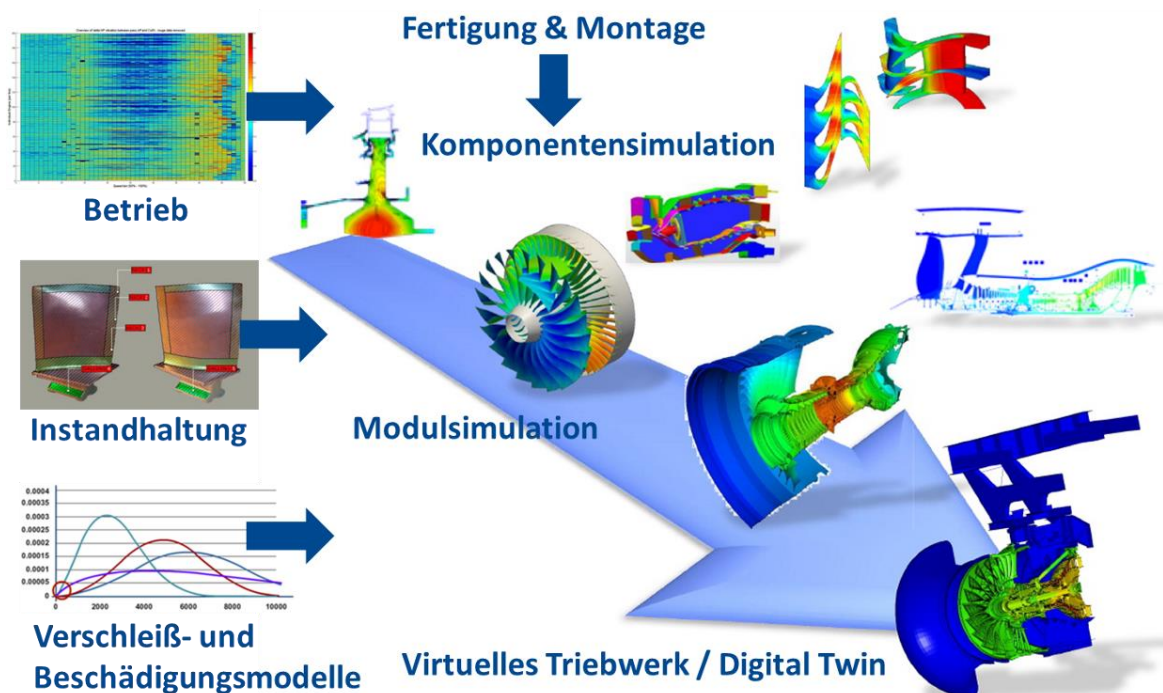
4 Triebwerksmanagement und Instandhaltungsmodelle

Seit vielen Jahren ist Rolls-Royce führend bei der Entwicklung und beim Bereitstellen von umfangreichen Serviceangeboten für den gesamten Lebenszyklus der Triebwerke. Der Kunde bezahlt eine feste Rate pro Flugstunde und damit sind die Zuverlässigkeit und die Einsatzzeit maßgebliche Faktoren für den Gewinn für beide, den Kunden und dem Produkthersteller. Dieses Konzept, das als TotalCare® bei Airlinekunden, als CorporateCare® bei Geschäftsreiseflugzeugen und als MissionCare® im militärischen Bereich vermarktet werden, beinhaltet die Bereitstellung eines Triebwerks mit einem voll integrierten Service, das Flottenmanagement, Logistik, Inspektionen, Wartung, Instandsetzung und laufende Verbesserungen des Produktes On-Wing und Off-Wing beinhaltet. Das Risiko für zum Beispiel Betriebsstörungen, hohe Instandhaltungskosten oder schlechte Leistungsfähigkeit des Triebwerks trägt Rolls-Royce. Nur ein effektives Lebenszyklusmanagement kann dieses Risiko minimieren. Dies beginnt mit einem

Triebwerk basierend auf bewährter und ausgereifter Technik, das bereits im Entwicklungsprogramm seine Zuverlässigkeit demonstriert hat. Im Betrieb ist eine effektive Überwachung und schnelle Reaktion bei Problemen wie oben angeführt über das Engine Health Management erforderlich. Darüber hinaus ist eine vorausschauende Planung notwendig, um Störungen zu vermeiden und Kosten für die Instandsetzung zu minimieren. Weitere Voraussetzungen sind geschulte Mitarbeiter und entsprechende Werkzeuge und Ersatzteile vor Ort zur Verfügung zu stellen. Ein sehr wichtiger Punkt ist die Berücksichtigung der Serviceerfahrung der aktuellen Produkte bei der Entwicklung neuer Triebwerke für zukünftige Anwendungen.

5 Ausblick – Generisches Lebenszyklusmodell

Bei der Konstruktion werden immer mehr detailliertere Computermodelle wie Modellierungen und Simulationen eingesetzt. Zusätzlich stehen im zunehmenden Umfang Daten aus der Fertigung, Montage und Betrieb der Bauteile und Systeme zur Verfügung. Es liegt also nahe, all diese Informationen zu verknüpfen und ein computerbasiertes Modell des physikalischen Produktes zu erstellen, das alle Information des gesamten Lebenszyklus repräsentiert. Ein solches Modell wird auch als “Digital Twin” bezeichnet.



Ausblick - Generisches Lebenszyklusmodell

Für 10000 Triebwerke im Service hätte man 10000 Computermodelle, die sämtliche Informationen von der Konstruktion über Fertigung der einzelnen Bauteile, Montage, Abnahmeprüflauf und der Daten aus dem Betrieb beinhalten und diese mit einem physikalisch-basierten Verschleiß- und Beschädigungsmodell zur Vorhersage des Lebenszyklusverhaltens integriert. Im Rahmen von Forschungsprogrammen arbeitet Rolls-Royce an der Verwirklichung dieser Vision. Informationen und Technologien aus „Industrie 4.0“ Projekten, die die Vernetzung von Maschinen, Herstellungsprozessen und Logistikmanagement vorantreiben werden im Digital Twin eingebettet.

Ein Digital Twin kann zur Überwachung, Diagnose bei Störfällen und zur Prognose für die vorausschauende Instandhaltung eingesetzt werden. Ein solches Triebwerksmodell macht es möglich, noch mehr Entscheidungen für Produkte im Betrieb in Echtzeit treffen zu können wie zum Beispiel welche On-Wing Instandsetzung wann erforderlich ist. Bei der Triebwerküberholung könnte der Arbeitsumfang wesentlich genauer vorab definiert werden.

Ein generisches Lebenszyklusmodell im Sinne eines Digital Twins wird den Entwicklungsaufwand neuer Produkte reduzieren, Möglichkeiten bieten, die Konstruktion noch weiter zu optimieren, eine vorausschauende Instandsetzung und einen kostenreduzierten und somit ressourcenschonenden Betrieb erlauben.