

# **Anwendung einer Strategie zur Validierung komplexer Finite Elemente Modelle auf das Gesamtmodell eines modernen Flugzeugtriebwerks**

Dr.-Ing. **Carsten Schedlinski**, ICS Engineering GmbH, D-63206 Langen,  
Dipl.-Ing. **Karl-Heinz Dufour**, Dr.-Ing. **Gerald Paysan**, Rolls-Royce  
Deutschland Ltd & Co KG, D-15827 Blankenfelde-Mahlow

## **1. Kurzfassung**

Die zielsichere Validierung von FE-Modellen hoher Komplexität bereitet auch heute noch vielfach Schwierigkeiten. In dieser Veröffentlichung wird daher eine systematische Strategie basierend auf experimenteller Modalanalyse und computerunterstützter Modellanpassung vorgestellt, die es ermöglicht, diese Schwierigkeiten zu beseitigen. Zur Illustration wird die konsequente Anwendung auf das Gesamtmodell eines modernen Flugzeugtriebwerks gezeigt.

## **2. Einleitung**

Zur Unterstützung des gesamten Entwicklungsprozesses und der Zulassung werden statische und dynamische Berechnungen zur Beurteilung des mechanischen Triebwerksverhaltens durchgeführt. Betrachtet werden dabei sowohl normale Betriebslastfälle, z. B. infolge von Flugmanövern, als auch transiente Sonderlastfälle, wie Schaufelverlust oder Vogelschlag. Wesentliches Analyseinstrument ist das auf der Methode der Finiten Elemente (FEM) basierende Gesamttriebwerksmodell. Aufgrund der hohen Komplexität dieses modular aufgebauten Modells und der damit einhergehenden notwendigen Vereinfachungen, ist eine Modellvalidierung unabdingbar.

Bisherige Validierungsmethoden stützen sich meist auf experimentelle Modalanalysen am Gesamttriebwerk und ermöglichen so eine Überprüfung der globalen Eigenformen. Eine physikalisch interpretierbare Modellanpassung wird in der Regel jedoch nicht erreicht, da mit der hohen Komplexität auch eine hohe Anzahl an unsicheren Parametern einhergeht, und da der Versuch immer nur eine begrenzte Anzahl an Informationen liefern kann. Aus diesem Grund wurden bislang zusätzlich Statikversuche an einzelnen Komponenten durchgeführt, auf deren Basis eine Vorvalidierung erfolgte. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie für eine dynamische Validierung ungeeignet sind, da die Massenverteilung unberücksichtigt bleibt. Zudem entsteht durch die Notwendigkeit spezieller Prüfstände ein sehr hoher Zeit- und Kostenaufwand.

In dieser Veröffentlichung wird deshalb eine Validierungsstrategie an Hand einer aktuellen Triebwerksneuentwicklung vorgestellt, bei der das Gesamttriebwerksmodell systematisch mit Hilfe der computerunterstützten Modellanpassung (CMA) validiert wird, um die erforderliche hohe Güte und physikalische Interpretierbarkeit der FE-Modelle zu gewährleisten. Hierbei werden Daten experimenteller Modalanalysen genutzt.

### 3. Strategie zur Modellvalidierung

Die Grundidee der hier vorgestellten Strategie ist es, das Gesamtsystem Schritt für Schritt zu validieren („Bottom-Up“ Strategie: Bild 1).

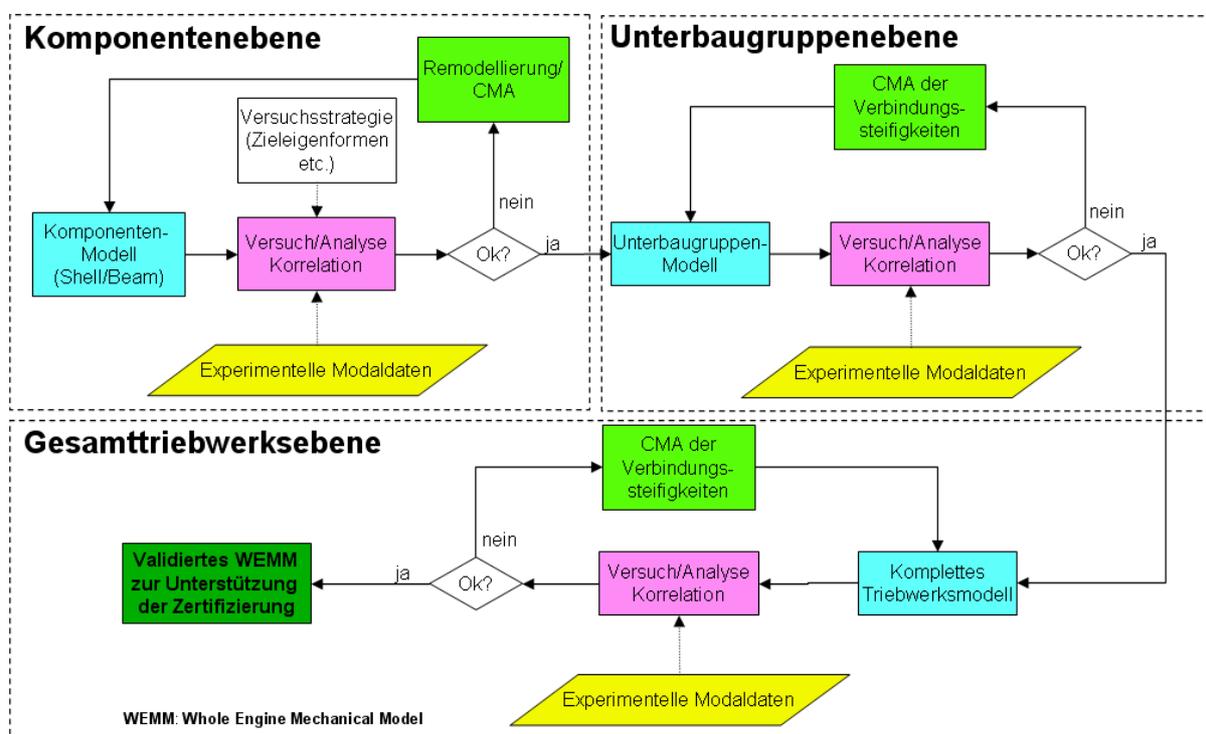


Bild 1: Überblick über die verwendete Validierungsstrategie

Zunächst erfolgt eine Validierung der FE-Modelle von Komponenten. Danach werden Unterbaugruppen betrachtet, wobei hier die Validierung der Schnittstellen im Vordergrund steht. Schließlich wird das Gesamtsystem validiert, einerseits um verbleibende Schnittstellen anzupassen, andererseits um das globale Verhalten des Gesamtsystems zu überprüfen. Insgesamt ist dabei darauf zu achten, dass die Anzahl der pro Validierungsschritt zu berücksichtigenden Parameter möglichst gering gehalten wird.

Die Modellvalidierung selber erfolgt mittels CMA. Dabei werden im ersten Schritt lediglich die physikalischen Steifigkeits- und Trägheitseigenschaften betrachtet und die Abweichungen zwischen identifizierten und analytischen Eigenfrequenzen und Eigenformen minimiert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass alle auftretenden Abweichungen zwischen Versuch und Analyse allein durch Ungenauigkeiten im FE-Modell begründet sind.

Um die in Realität unvermeidlichen Unsicherheiten aus dem Versuch so gering wie möglich zu halten, und um eine adäquate Datenbasis für die nachfolgenden Validierungsaufgaben zu erhalten, ist eine sorgfältige Versuchsplanung und Versuchsdurchführung integraler Bestandteil der Validierungsstrategie. Die Versuchsplanung erfolgt auf Basis eines vorhandenen FE-Modells, was nicht nur die Versuchsauslegung selber ermöglicht, sondern auch die spätere Korrelation mit den Analyseergebnissen erheblich erleichtert (FE-Modell und Versuchsmodell „passen“ zueinander). Die Versuchsplanung sollte dabei insbesondere die Auswahl relevanter Zieleigenformen sowie die Auswahl von Messfreiheitsgraden und Erregerpositionen beinhalten. Auch sollten Aussagen zur Versuchsführung selber (z. B. erforderliche Frequenzauflösung) getroffen werden.

Zur Versuchsplanung und zur CMA von Steifigkeits- und Trägheitseigenschaften wird ein spezielles Matlab-Programmpaket für die Modellvalidierung verwendet (**ICS.sysval**, [1]). Dieses Programmpaket nutzt unter anderem die Analysekapazitäten von MD/MSC.Nastran, wodurch die Handhabung von FE-Modellen industrieller Größenordnung ermöglicht wird.

Nach erfolgreicher Anpassung der Steifigkeits- und Trägheitseigenschaften können in einem weiteren Schritt noch physikalische, strukturelle oder modale Dämpfungsparameter angepasst werden, wobei hier die Abweichungen in den Resonanzbereichen zwischen gemessenen und analytischen Frequenzgängen minimiert werden. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung (siehe hierzu zum Beispiel [2-4]).

#### **4. Anwendung**

Die Anwendung wird am Beispiel der Validierung des Gesamttriebwerksmodells des von der Europrop International GmbH (EPI) entwickelten TP400-D6 Triebwerks vorgestellt (Bild 2). Das Triebwerk ist ein als Turboprop ausgeführtes Dreiwellentriebwerk, welches im Transportflugzeug A400M Verwendung findet. Es leistet ca. 11.000 Wellen-PS (8.200 kW) und besteht aus einem fünfstufigen Mitteldruckverdichter, einem sechsstufigen Hochdruckverdichter, sowie einer jeweils einstufigen Hoch- und Mitteldruckturbine. Eine dreistufige Nie-

derdruckturbine treibt über ein mechanisches Getriebe den achtblättrigen Propeller (5,3 m Durchmesser) an.



Bild 2: Überblick über das TP400-D6 Triebwerk

Innerhalb von EPI ist Rolls-Royce u. a. für die Integration, Validierung und Analyse des mechanischen FE-Modells des Gesamttriebwerks verantwortlich. Die Analysen, die hiermit durchgeführt werden (Randlastermittlung der Komponenten, Rotordynamik, Gehäuse-schwingungen, dynamisches Antwortverhalten im Falle eines Schaufelverlustes etc.), unterstützen dabei die Triebwerkszertifizierung. Ein validiertes Gesamttriebwerksmodell ist dafür Voraussetzung

#### **4.1. Komponentenebene**

Beispielhaft für die Validierung auf Komponentenebene wird im Folgenden das Zwischengehäuse vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein integrales Strukturbauteil, welches die Lagerkammern für zwei der Rotorfestlager aufnimmt.

Für das Zwischengehäuse wurde zunächst eine dedizierte Versuchsplanung durchgeführt. Hierbei wurde auf Basis des FE-Modells ein Versuchmodell mit insgesamt 222 Messknoten entwickelt. Zum Nachweis der Eignung der Messknoten und der zugehörigen Messfreiheitsgrade wird die Matrix der MAC-Werte (siehe auch [5]) der mit sich selbst verglichenen Zieleigenformen betrachtet (Auto-MAC-Matrix, Bild 3 links). Ziel ist es, eine möglichst diagonale Form zu erreichen, damit die Zieleigenformen an den gewählten Messfreiheitsgraden ausreichend unterscheidbar sind. Die Zweckmäßigkeit der Erregerfreiheitsgrade wird mit Hilfe von Modeindikatorfunktionen (MIF, [5]) bewertet (Bild 3 rechts). Ein MIF-Wert von Null bedeutet,

dass die zugehörige Eigenform am gewählten Erregerfreiheitsgrad perfekt angeregt werden kann, ein Wert von Eins, dass keinerlei Anregung möglich ist. Ziel ist es, dass alle Zieleigenformen an mindestens einem der gewählten Erregerfreiheitsgrade angeregt werden kann.

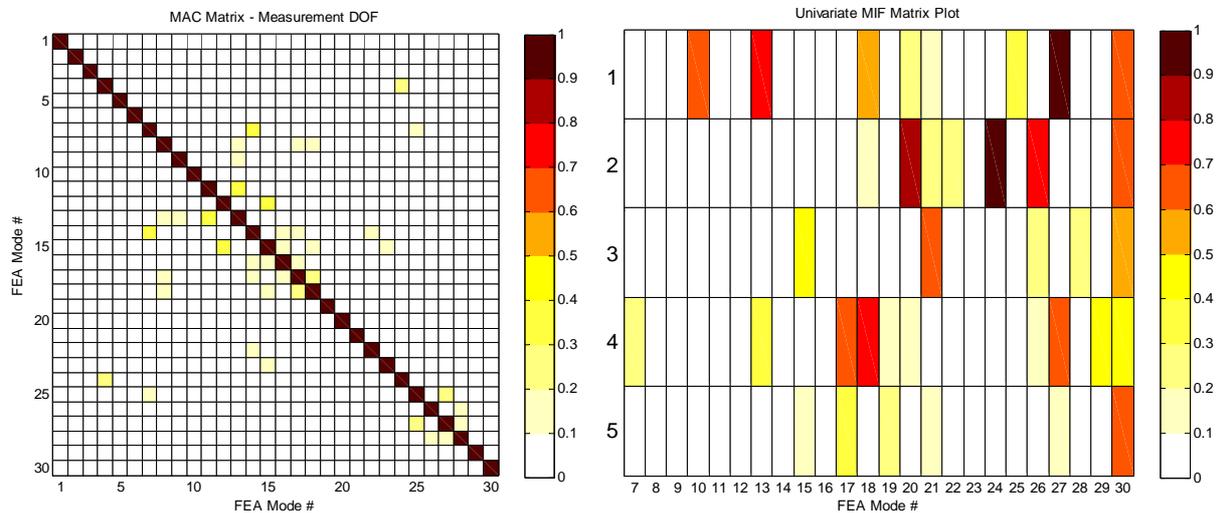


Bild 3: Links: Auto-MAC-Matrix, rechts: MIF-Matrix der selektierten Erregerpositionen

Im Anschluss an die Versuchsplanung folgte der Versuch unter quasi frei/freien Randbedingungen (elastische Lagerung, siehe auch Bild 4 links). Diese Randbedingungen sind vorteilhaft, da für den Versuch kein spezifischer Prüfstand benötigt wird und sie leicht in der Analyse reproduziert werden können.

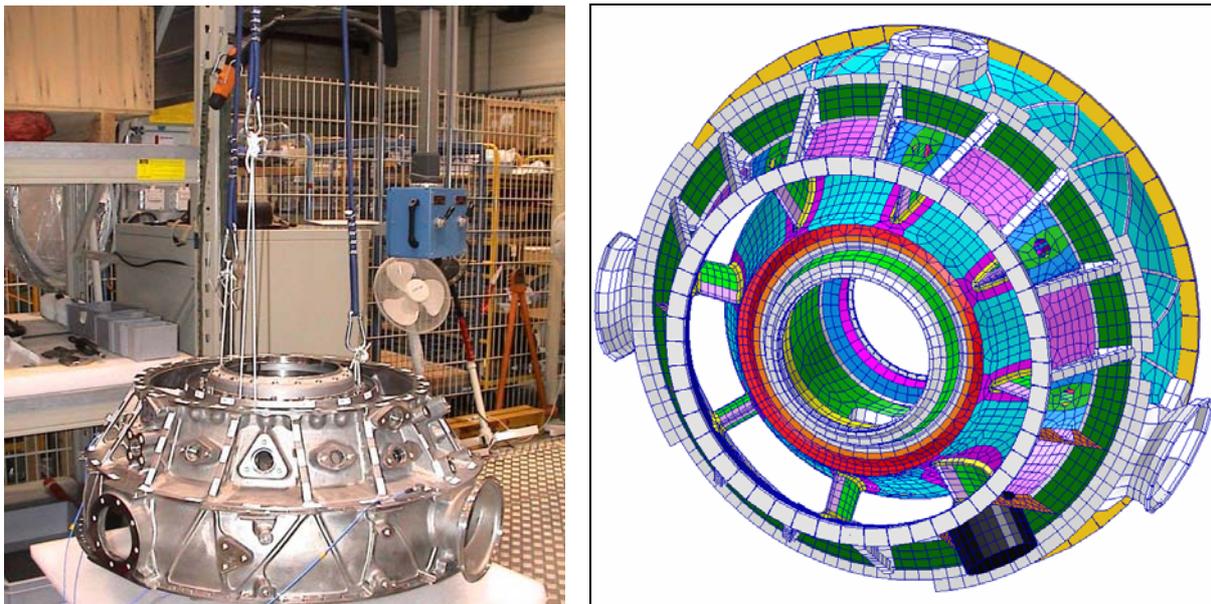


Bild 4: Zwischengehäuse, links: Versuch, rechts: FE-Modell mit CMA-Parameterregionen

Bild 4 rechts zeigt das zugehörige FE-Modell des Zwischengehäuses. Farblich gekennzeichnet sind die Regionen, die mit Hilfe der CMA angepasst wurden. Parameter waren hierbei im Allgemeinen Schalendicken, wobei die zugehörigen Dichten invers angepasst wurden, um eine Massenänderung durch die CMA zu vermeiden. Insgesamt können vor der CMA neun, nach der CMA 16 Eigenformen zugeordnet werden. Darüber hinaus weisen alle Eigenfrequenzen nach der CMA Frequenzabweichungen von kleiner als 3% auf, siehe auch Bild 5. Insgesamt kann die Güte des FE-Modells durch die CMA also deutlich verbessert werden.

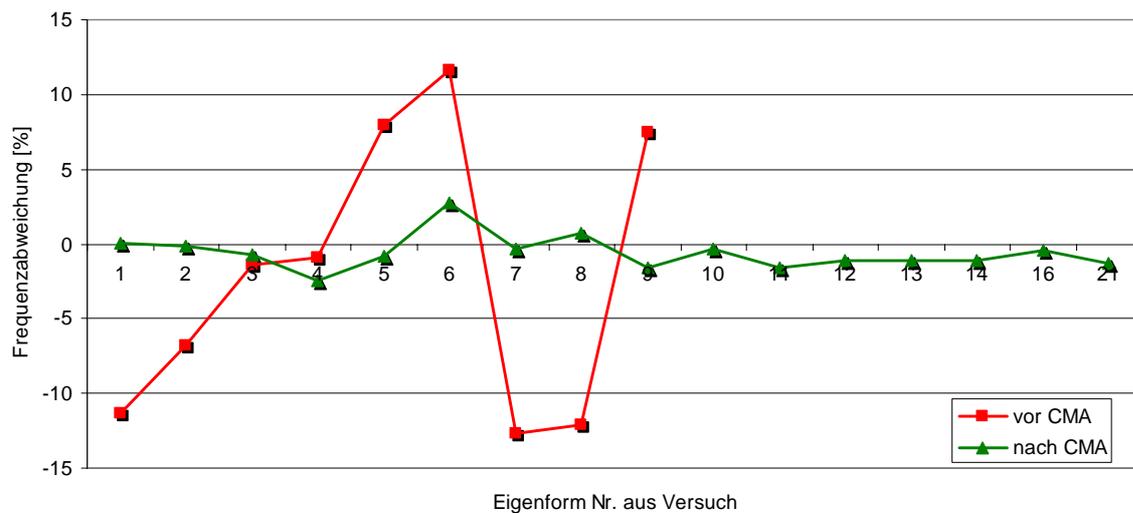


Bild 5: Zwischengehäuse: Frequenzabweichungen vor/nach CMA

#### 4.2. Unterbaugruppenebene

Im Anschluss an die Validierung der einzelnen Komponenten erfolgte die Validierung von Unterbaugruppen. In diesem Rahmen wurden insgesamt vier Aufbauzustände untersucht, nämlich eine vordere, mittlere und hintere Triebwerksbaugruppe sowie deren als Karkassenbaugruppe bezeichnete Kombination.

Die Untersuchung der Unterbaugruppen diente in erster Linie der Untersuchung der Flanschverbindungen. Für die mittlere Baugruppe wurde zusätzlich mit einer Zusatzmasse gearbeitet, um die Torsionssteifigkeit des Zwischengehäuses im Verbund zu validieren. Typische Versuchsaufbauten (alle mit elastischer Aufhängung) sind in Bild 6 gezeigt.

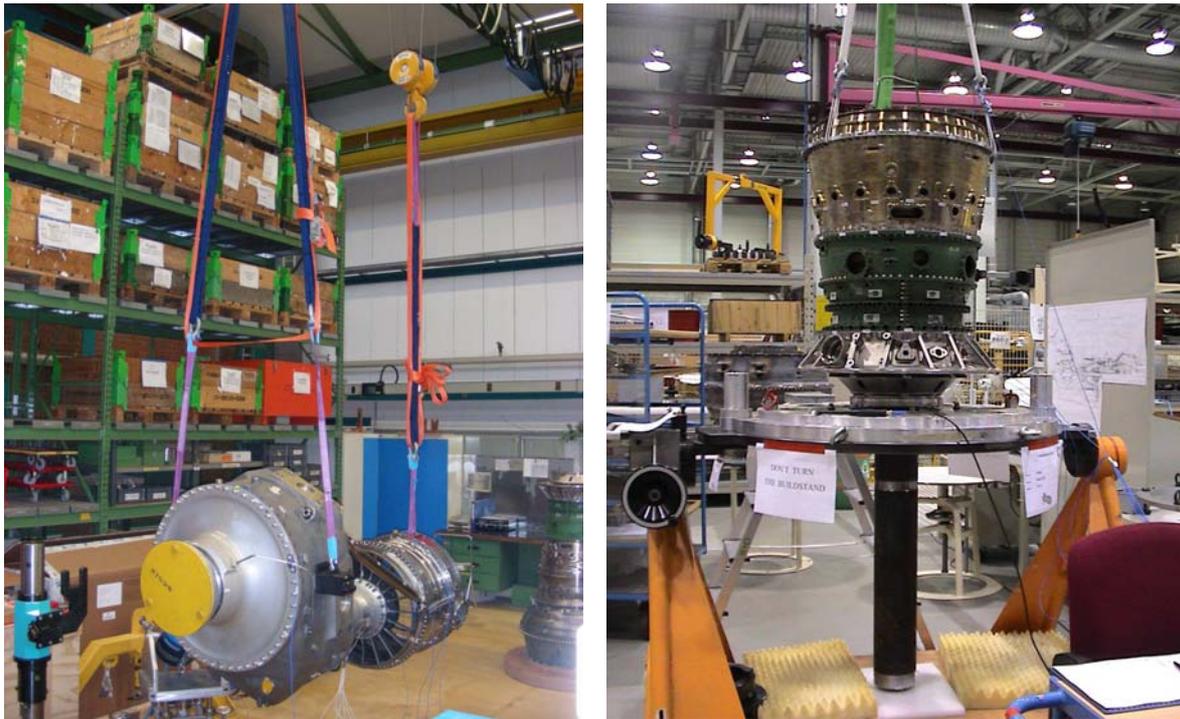


Bild 6: Unterbaugruppen, links: vordere, rechts: mittlere Baugruppe mit Zusatzmasse

#### 4.3. Gesamttriebwerksebene

Den Abschluss der Validierungskampagne bildete das Gesamttriebwerk. Bei einer Gesamtmasse von ca. 1,5 t stellte die sichere elastische Aufhängung hier eine besondere Herausforderung dar, die mit Hilfe spezieller Elastomerseile gemeistert wurde (Bild 7 links).

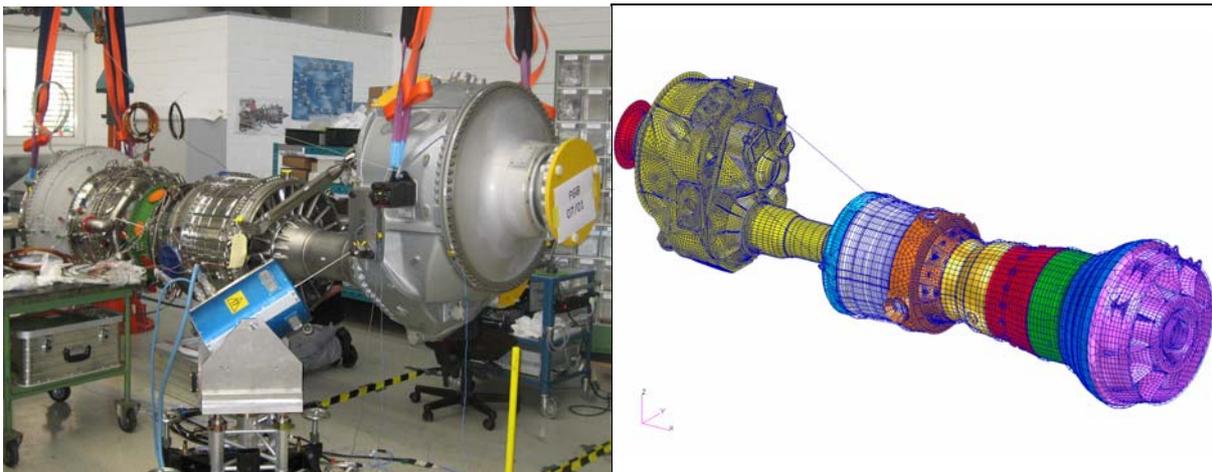


Bild 7: Gesamttriebwerk, links: Versuch, rechts: FE-Modell

Für die Validierung des FE-Modells des Gesamttriebwerks (Bild 7 rechts) stand der Abgleich der globalen Biegungs- und Torsionseigenformen im Vordergrund. Insgesamt konnte, unter

Berücksichtigung der Komplexität des Gesamtmodells sowie des relativ hohen Abstraktionsgrads der gewählten Schalenmodellierung, eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Die typischen Frequenzabweichungen lagen dabei im Bereich bis ca.  $\pm 5\%$ .

#### 4.4. Verifikation der Validierungsstrategie und Verwendung des validierten Modells

Für die Triebwerkszertifizierung muss unter anderem nachgewiesen werden, dass ein Schaufelverlust (z. B. Core-Blade-Off) keine Gefahr für die Integrität des Triebwerks darstellt. Speziell bei dem hier vorgestellten Triebwerk haben Analysen mit dem validierten Gesamttriebwerksmodell gezeigt, dass bei einem Schaufelverlust an der Niederdruckturbinen der Quetschöldämpfer (QOD) der Turbinenlagerung in Anschlag geht. Hierbei ist ein Frequenzanstieg der Resonanz von etwa 10 Hz gegenüber dem im Normalfall laufenden Rotor zu beobachten (Bild 8). In einem speziellen Triebwerksversuch wurde nachfolgend das Unwuchtverhalten nach dem Schaufelverlust simuliert, indem eine entsprechend hohe Unwucht an der Turbinenscheibe angebracht und der entsprechende QOD auf Block gesetzt wurde. Es konnten sowohl die Resonanzstelle als auch der Frequenzanstieg experimentell bestätigt werden, was die sehr gute Übereinstimmung zwischen Analyse und Versuch unterstreicht.

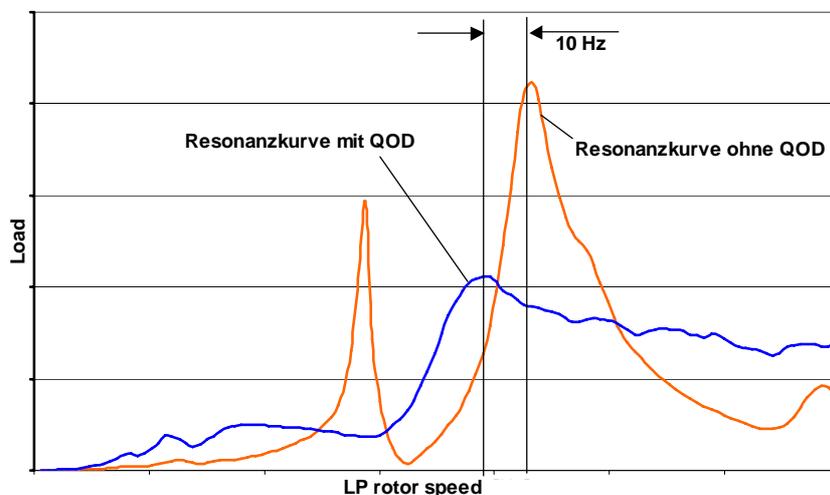


Bild 8: Resonanzverhalten des LP-Rotors mit/ohne QOD

In einer weiteren Anwendung sollte in einem statischen Belastungsversuch die analytisch ermittelte Durchbiegung des Triebwerks unter einer am Propellerflansch angebrachten Last verifiziert werden. Das Triebwerk wurde dabei so fixiert, dass das Getriebe und der vordere Teil der Karkasse überkragend auf die Aufhängung wirkten. Mit Hilfe von Photogrammetrie wurde die Triebwerksdurchbiegung unter der Last gemessen (Bild 9). Insgesamt ist auch hier eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Analyse und Versuch zu erkennen.

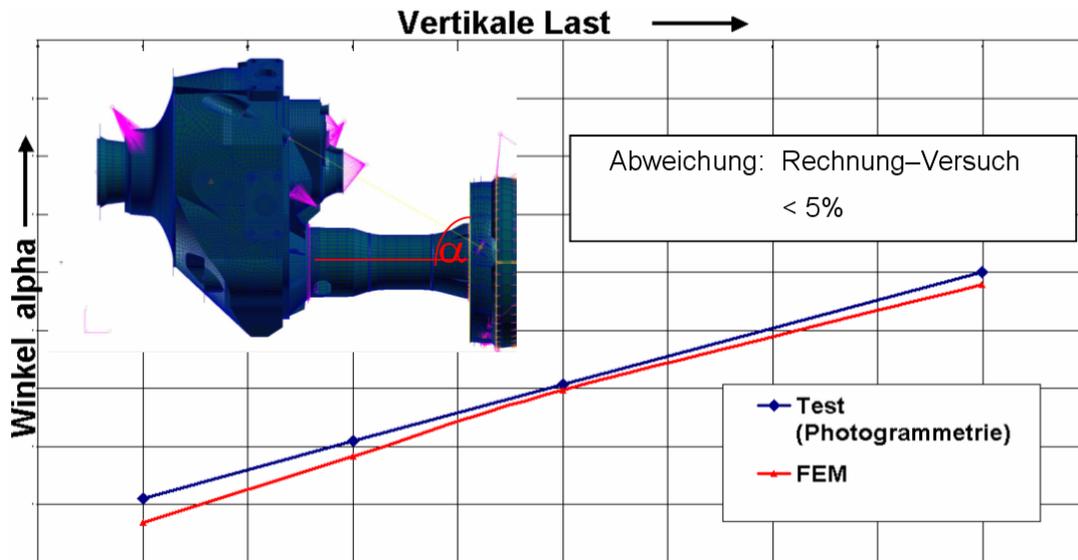


Bild 9: Vergleich Rechnung–Versuch unter statischer Belastung

#### 4.5. Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wurde am Beispiel eines modernen Flugzeugtriebwerks eine spezielle, versuchsgestützte „Bottom-Up“ Strategie zur Validierung von Gesamttriebwerksmodellen vorgestellt, wie sie bei Rolls-Royce Deutschland im Rahmen der Neuentwicklung von Triebwerken eingesetzt wird. Der systematische Ansatz, ausgehend von der Komponentenebene, über die Unterbaugruppenebene bis hin zur Gesamttriebwerksebene, führt zu einer signifikanten Verbesserung der Vorhersagegüte des Gesamttriebwerksmodells. Dies bestätigen zusätzliche Triebwerksversuche, die zur Überprüfung der Güte des validierten Modells genutzt wurden. Die damit verbundene Erhöhung des Vertrauens in die Analyseergebnisse ist nicht nur von zentraler Bedeutung für die Triebwerkszulassung, sondern auch für die Beurteilung von späteren Triebwerksmodifikationen.

#### 5. Literatur

- [1] Schedlinski, C: ICS.sysval; ICS Internet-Auftritt; <http://www.ics-engineering.com>; 2009
- [2] Schedlinski, C./Seeber, I.: Computerunterstützte Modell Anpassung von Finite Elemente Modellen industrieller Größenordnung; MSC Anwenderkonferenz; Weimar; 1999
- [3] Schedlinski C.: Computational Model Updating of Large Scale Finite Element Models; IMAC 18; San Antonio, TX, USA; 2000
- [4] Schedlinski C.: Computational Model Updating of Structural Damping and Acoustic Absorption for Coupled Fluid-Structure-Analyses of Passenger Cars; ISMA 2008, Leuven, Belgien; 2008
- [5] Mehlhorn, G. (Hrsg.): Der Ingenieurbau/Baustatik, Baudynamik; Ernst & Sohn, Berlin; 1995