

DAS ZUSAMMENSPIEL ZWISCHEN BERECHNUNG UND VERSUCH – DIE OPTIMALE VORGEHENSWEISE IM ENTWICKLUNGSPROZESS ZUM NACHWEIS DER BAUTEILFESTIGKEIT AM BEISPIEL EINER ZENTRALEN STRUKTURKOMPONENTE DES TP400-D6 FLUGTRIEBWERKS

R. Best, IMA GmbH Dresden
M. Gräber, Rolls Royce Deutschland Ltd & Co KG
M. Sachse, IMA GmbH Dresden

ÜBERSICHT

Die behördliche Zulassung von Flugtriebwerken erfordert einen Festigkeitsnachweis für hoch beanspruchte Triebwerkskomponenten. Dieser Nachweis wird für neue Konstruktionen im Allgemeinen experimentell erbracht. Ein enges Zusammenspiel zwischen Berechnung und Versuch hat sich hierbei im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse einerseits und auf die Wirtschaftlichkeit der Versuchsdurchführung andererseits als optimale Vorgehensweise erwiesen. Diesen Ansatz verfolgt Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG beim Festigkeitsnachweis für das Verdichterzwichengehäuse im TP400-D6 Flugtriebwerk. Der IMA GmbH Dresden wurde die Vorbereitung und Durchführung des statischen Versuchsprogramms und des Ermüdungsversuchs übertragen.

Die Funktion des Verdichterzwichengehäuses als zentrale Strukturkomponente im Flugtriebwerk TP400-D6 wird im nachfolgenden Beitrag beschrieben. Es werden die Möglichkeiten und die Grenzen des rechnerischen Festigkeitsnachweises als Element des Entwicklungsprozesses dargestellt und die Notwendigkeit einer experimentellen Nachweisführung der Bauteilfestigkeit wird hieraus abgeleitet. Es wird gezeigt, wie die für die Versuchsdurchführung notwendigen Kraftvektoren und Lastfolgen aus dem Finite-Elemente-Gesamtriebwerksmodell unter Zuhilfenahme eines Finite-Elemente-Prüfstandsmodells generiert werden. Das Erreichen äquivalenter statischer Beanspruchungszustände und Ermüdungsschädigungen im Bauteilversuch wird durch den Vergleich mit den Beanspruchungen im Gesamttriebwerk unter Betriebsbedingungen nachgewiesen. Die Umsetzung des entwickelten Versuchskonzepts mit der Konstruktion der Lasteinleitung und der Auswahl der Mess- und Regeltechnik wird vorgestellt. Die Lösung des Widerspruchs zwischen der geforderten realitätsnahen Steifigkeit und der notwendigen Festigkeit angrenzender, lasteinleitender Ersatzstrukturen mit dem Ziel der Erlangung betriebsnaher Beanspruchungen im Prüfling wird behandelt. Das Versuchsprogramm bestehend aus den statischen Lastfällen, dem Ermüdungsversuch sowie dem Inspektionsprogramm wird erläutert. Die auch für vergleichbare Projekte gültigen typischen Zielkonflikte, die sich aus dem laufenden Entwicklungsprogramm für das Triebwerk und dem geforderten Zeitplan für den Komponentenversuch ergeben, werden vorgestellt.

1. EXPERIMENTELLER NACHWEIS DER BAUTEILFESTIGKEIT

Die Versuche an Triebwerkskomponenten wie dem Verdichterzwichengehäuse des TP400-D6 sind, neben den Versuchen am gefeuerten Gesamttriebwerk, wesentlicher Bestandteil des Produktentwicklungsprogramms. Das generelle Ziel der Versuche ist der Nachweis der Funktion und der Zuverlässigkeit, der wiederum Voraussetzung für die Triebwerkszertifizierung durch die internationalen Luftfahrtbehörden ist.

Der Nachweis der Bauteilfestigkeit für das Verdichterzwichengehäuse des TP400-D6 wird folglich durch behördliche Forderungen initiiert und auf experimentellem Weg erbracht. Das Versuchsprogramm besteht im Wesentlichen aus den Lastfällen mit statischer Belastung und aus dem Ermüdungsversuch.

Um für den Zulassungsprozess gültige experimentelle Aussagen über die Bauteilfestigkeit machen zu können, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt werden:

- 1) Für den Test muss ein repräsentativer Prüfling verwendet werden. Werkstoff, Geometrie, Herstellungstechnologie usw. müssen dem erwarteten Serienstandard entsprechen.
- 2) Die verschiedenen Belastungen des Prüflings im Versuch müssen in einer Art und Weise erzeugt werden, die sicherstellt, dass alle schädigungsrelevanten Beanspruchungsmechanismen in der Struktur simuliert werden können.
- 3) Die Versuchseinrichtung wiederum muss in der Lage sein, diese Belastungen hinreichend genau zu erzeugen und in den Prüfling einzuleiten. Im Verlaufe des Versuches wird die Einhaltung dieser Bedingung durch den Vergleich von berechneten Beanspruchungen unter Versuchsbedingungen und berechneten Beanspruchungen unter Betriebsbedingungen im Gesamttriebwerk sichergestellt. Hierbei muss die Gültigkeit der zugrunde liegenden jeweiligen Berechnungsmodelle nachgewiesen werden.

2. DAS VERDICHTERZWISCHENGEHÄUSE

2.1. Funktion

Das Verdichterzwichengehäuse des TP400-D6 Triebwerkes besteht aus Titan-Präzisionsguss und stellt ein zentrales Strukturbauteil im Kerntriebwerk dar (Abbildung 1).

Neben seiner Funktion als Bindeglied zwischen dem Mitteldruck- und dem Hochdruckverdichtergehäuse werden über das Zwischengehäuse auch die Mitteldruck- und die Hochdruckwellen gelagert. Das Verdichterzwichengehäuse nimmt jeweils die Festlager auf. Ferner ist am Zwischengehäuse das Hilfsaggregategetriebe befestigt, das über eine im Zwischengehäuse gelagerte Radialwelle mit der Hoch-

druckwelle verbunden ist.

Neben seiner Strukturfunktion stellt das Zwischengehäuse auch eine Reihe von Schnittstellen, beispielsweise für Zapfluft, Ölzu- und rücklauf, Sperrluft, sowie für diverse Messsensoren zur Verfügung.

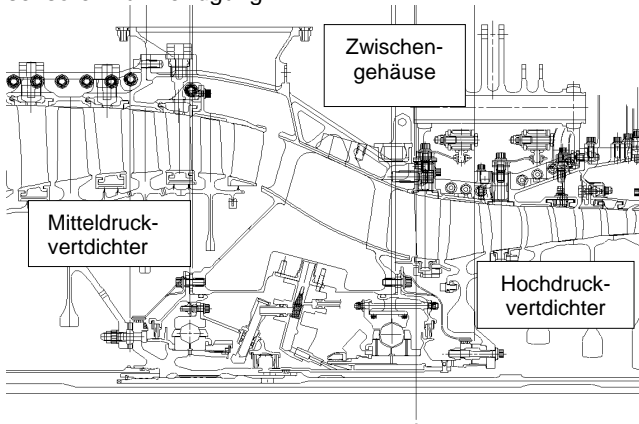


Abbildung 1: Schnittbild Verdichterzwischengehäuse mit Nachbarkomponenten im TP400-D6 Triebwerk

2.2. Belastungsmerkmale

Die strukturellen Belastungen des Zwischengehäuses werden sowohl durch die vom Triebwerk erzeugten Schublasten einschließlich der damit verbundenen Propeller-Biegemomente bestimmt, wie auch durch vom Flugzeug ausgehende Beschleunigungslasten, die durch Flugmanöver, Windböen oder den Landestoß erzeugt werden. Für einen hohen Grad an Beanspruchung sorgt hierbei insbesondere auch die Position der Komponente im Lastpfad zwischen vorderer und hinterer Triebwerksaufhängung, im Übergang vom größeren Durchmesser des Mitteldruckverdichters auf den kleineren Durchmesser des Hochdruckverdichters.

2.3. Festigkeitsnachweis mittels numerischer Simulation und Versuch

Im Zuge des Entwicklungsprozesses für komplexe Strukturbauteile wie das Verdichterzwischengehäuse des TP400-D6 Triebwerkes spielen rechnergestützte Simulationsmethoden, insbesondere die Methode der Finiten Elemente, eine wichtige Rolle. Enorm gestiegene Rechnerleistungen haben die Verwendung von immer komplexeren Finite-Elemente-Modellen ermöglicht. Im Hinblick auf den Festigkeitsnachweis für hoch beanspruchte Komponenten ist jedoch auch auf absehbare Zeit nicht davon auszugehen, dass alle relevanten Einflüsse mit ausreichender Zuverlässigkeit über rechnerische Simulationen abgedeckt werden und damit Versuche vollständig durch rechnerische Simulation ersetzt werden können.

Die inhomogene und bauteilspezifische Verteilung der festigkeitsrelevanten Eigenschaften in einem komplexen Gussbauteil ist beispielsweise eine Einflussgröße, die in wesentlichem Maße die Festigkeit des Gesamtbauteiles bestimmt und jedoch nicht oder nur unzureichend über numerische Methoden ermittelt werden kann. Somit stellt der Bauteilversuch, dessen Definition, Durchführung und Auswertung in engem Zusammenspiel mit der Anwendung von numerischen Simulationsmethoden erfolgt, die optimale Vorgehensweise für den Festigkeitsnachweis dar.

3. ERMITTLUNG DER VERSUCHSLASTEN

3.1. Gesamttriebwerkslasten unter Betriebsbedingungen

Basis der Ermittlung der Versuchslasten ist die Bauteilbe-

anspruchung im Gesamttriebwerk, die mittels eines Finite-Elemente Gesamttriebwerksmodells (WEMM, Abbildung 2) ermittelt wird. Dieses Modell repräsentiert sowohl das Triebwerk an sich wie auch die angrenzenden Flugzeugstrukturen und ist ein zentrales Werkzeug zur Vorhersage von mechanischen Bauteillasten und damit zur Steuerung des Entwicklungsprozesses. Im Zuge dieses Entwicklungsprozesses wird das WEMM mittels verschiedener statischer und dynamischer Versuche validiert und dient damit nach dem „Einfrieren“ der Konstruktion auch als Grundlage für die Ermittlung von Bauteillasten für den Festigkeitsnachweis.

Die für den Festigkeitsnachweis zu berücksichtigenden Lasten untergliedern sich in unterschiedliche Lasttypen. Hierzu zählen die statischen Grenzlasten innerhalb des erlaubten Betriebsbereiches („Limit Loads“), die ohne bleibende Schädigung des Bauteiles sicher ertragen werden müssen, und die statischen Bruchlasten („Ultimate Loads“), die ertragen werden müssen, ohne dass es zum vollständigen Bauteilversagen kommt. Ferner sind Ermüdungslasten zu berücksichtigen, die die typische Bauteilbelastung während eines Fluges repräsentieren, und die während der vorgesehenen Bauteillebensdauer ertragen werden müssen, ohne dass es zur Rissbildung kommt.

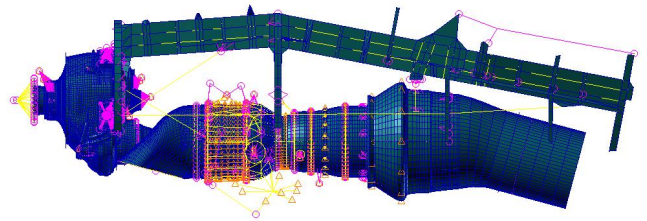


Abbildung 2: Finite-Elemente Gesamttriebwerksmodell (WEMM)

3.2. Beschreibung von Beanspruchungszuständen und Umsetzung in eine Versuchsanordnung

Zur Beschreibung eines Beanspruchungszustands wird das zu einem Lastfall gehörende jeweilige Spannungstensorfeld des Zwischengehäuses verwendet. Zur Beurteilung des Beanspruchungszustands werden aus den Spannungstensoren an den jeweiligen Positionen skalare Vergleichspannungen, zumeist nach von Mises, berechnet.

Zur Beschreibung der zugehörigen Lastfälle (äußere Belastung) haben sich die mit dem Gesamttriebwerksmodell vorhergesagten resultierenden Kräfte und Momente an den Bauteilschnittstellen, z.B. den Flanschen, als geeignet erwiesen. Eine Versuchsanordnung ist damit so zu konstruieren, dass an den Bauteilschnittstellen die korrekten Schnittlasten eingestellt werden können.

Neben den korrekten Schnittlasten ist an statisch überbestimmten Schnittstellen, beispielsweise an Flanschen, auch eine möglichst präzise Nachbildung der korrekten Schnittlastverläufe, beispielsweise über den Umfang des Flansches, notwendig, um einen repräsentativen Beanspruchungszustand im Prüfling zu erreichen. Im Idealfall müssten hierzu neben dem Prüfling selbst auch dessen Nachbarkomponenten in die Versuchsanordnung mit aufgenommen werden. Sofern dieses aus Kostengründen, vor allem aber aufgrund von mangelnder Bauteilverfügbarkeit während der Entwicklungsphase nicht durchführbar ist, werden in der Versuchsanordnung speziell konstruierte Ersatzstrukturen („Dummys“) vorgesehen, die im Einflussbereich der jeweiligen Schnittstelle die Steifigkeitsverteilung der Nachbarkomponente nachbilden und die Lasteinleitung sicherstellen.

Außer den Lasten an den Bauteilschnittstellen, die direkt von der Versuchsanordnung simuliert werden können, sind für das Verdichterzwischengehäuse des TP400-D6 Triebwerkes zwei weitere Belastungsquellen von zwar untergeordneter, aber nicht in jedem Fall vernachlässigbarer Bedeutung zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um den, wenn auch in seiner Größe moderaten, Innendruck und die auftretenden Temperaturgradienten. Eine direkte Berücksichtigung dieser Belastungen würde eine erheblich komplexere und damit kostenintensivere Versuchsanordnung notwendig machen, deren Mehraufwand in keinem vertretbaren Verhältnis zur Bedeutung dieser Lastquellen im Vergleich zur Gesamtbelastung stünde. Um aber die Wirkung von Innendruck und Temperaturgradienten dennoch angemessen im experimentellen Festigkeitsnachweis zu berücksichtigen, werden die in der Versuchsanordnung aufgetragenen Schnittstellenlasten leicht modifiziert, sodass sich letztendlich in den hochbeanspruchten Bereichen des Zwischengehäuses ein gleichwertiger Spannungszustand wie unter Betriebsbedingungen (einschließlich Innendruck und Temperaturgradienten) einstellt. Diese Erhöhung der äußeren Belastungen im Versuch kann zur Folge haben, dass weniger beanspruchte Bereiche des Zwischengehäuses unter Umständen höheren Beanspruchungen ausgesetzt werden, als sie unter realen Betriebsbedingungen erfahren würden. Solange hierdurch die festigkeitsbestimmenden Bereiche des Zwischengehäuses im Versuch nicht überlastet werden, wird jedoch ein solcher Kompromiss in Kauf genommen.

Um diese Vorgehensweise zur Definition der Versuchsanordnung, zur Konstruktion von Ersatzstrukturen, und zur Definition und Feinjustierung der Versuchslasten umzusetzen, wird ein Finite-Elemente-Gesamtprüfstandsmodell (WRM, Abbildung 3) erstellt. Dieses WRM ist damit analog zum WEM ein zentrales Werkzeug zur Steuerung des Entwicklungsprozesses für die Versuchsdefinition und Prüfstandskonstruktion. Weiterhin liefert das WRM nach dem „Einfrieren“ der Prüfstandskonstruktion und der Validierung des WRM, die durch Dehnungs- und Verformungsmessungen während des Versuches selbst erfolgt, auch die Basis für den rechnerischen Nachweis. Die Beanspruchungen des Prüflings im Versuch müssen denen des Zwischengehäuses unter Betriebsbedingungen entsprechen.

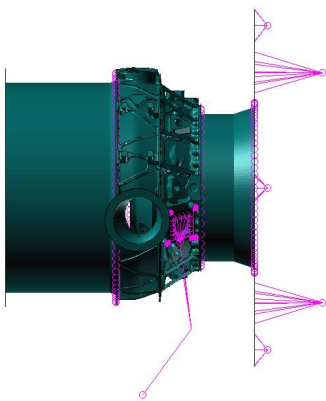


Abbildung 3: Finite-Elemente Gesamtprüfstandsmodell (WRM)

Auf der Basis der Ergebnisse von WEM-Modellrechnungen und nach Bestätigung mittels der entsprechenden WRM-Analyses wurde für den experimentellen Festigkeitsnachweis für das Verdichterzwischengehäuse des TP400-D6 Triebwerkes folgender Aufbau definiert:

- Lagerung und Anbindung über den Mitteldruckverdichterflansch (IPC), bei repräsentativer Steifigkeitsverteilung am Flansch

- Aufbringung von 3 resultierende Kraft- und 3 resultierenden Momentenkomponenten über den Hochdruckverdichterflansch (HPC), bei repräsentativer Steifigkeitsverteilung am Flansch
- Aufbringung von jeweils 3 Kraftkomponenten an den Positionen von Mitteldruckwellen- und Hochdruckwellenfestlager (B3 und B4), bei repräsentativer Steifigkeit der Lagergehäuseflansche
- Aufbringung von 3 Kraftkomponenten an der Schwerpunktposition des Hilfsaggregategetriebes (AGB), bei repräsentativer Aufhängung einer AGB-Ersatzstruktur

3.3. Beschleunigter Ermüdungsversuch mittels äquivalenter Schädigung

Eine repräsentative Simulation der statischen Lastfälle („Limit Loads“ und „Ultimate Loads“) ist mit der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise gewährleistet.

Für den Ermüdungsversuch sind darüber hinaus die jedem Lastfall zugeordneten Zyklenzahlen zu betrachten. Ermüdungslastfälle mit den zugehörigen Zyklenzahlen werden zu Flugmissionen gruppiert, die die während eines einzelnen Fluges auftretenden Lastzyklen beschreiben. Im Allgemeinen besteht eine solche Flugmission aus einer sehr großen Anzahl von Lastzyklen, von denen ein Großteil allerdings nur sehr geringe Schädigung hervorruft. Um die Dauer des Ermüdungsversuches und damit dessen Durchführungskosten zu begrenzen, werden Lastzyklen mit sehr geringer Schädigung und hoher Zyklenzahl zu Lastzyklen auf höherem Lastniveau und damit pro Zyklus höherer Schädigung, dafür aber mit entsprechend geringerer Zyklenanzahl zusammengefasst. Dieses Zusammenfassen erfolgt auf der Grundlage äquivalenter Schädigung gemäß der linearen Schadensakkumulationshypothese und ermöglicht eine signifikante Beschleunigung und Vereinfachung des Ermüdungsversuches.

4. VERSUCHSEINRICHTUNG

4.1. Entwicklung des Versuchskonzeptes

Das konstruktive Versuchskonzept - die Art und Weise der Lagerung des Prüflings sowie die verwendeten angrenzenden Baugruppen und die Position der Kraftvektoren – muss den Forderungen der ermittelten Versuchslasten gerecht werden. Die durch Hydraulikzylinder aufgetragenen, diskreten Kräfte erzeugen die globalen Versuchslasten in bestimmten Bereichen des Verdichterzwischengehäuses. Hierzu gehören:

- 1) der Flansch zum Mitteldruckverdichter
- 2) der Flansch zum Hochdruckverdichter
- 3) der Flansch für Wellenlager B3
- 4) der Flansch für Wellenlager B4
- 5) die Anschlusspunkte des Hilfsaggregategetriebes

Das Versuchskonzept für das Verdichterzwischengehäuse sieht vor, den Gesamtaufbau von Prüfling und Dummy-Strukturen einseitig auf einer soliden Platte zu fixieren. Das einfachste mechanische Modell ist demzufolge ein einseitig eingespannter Balken, an dessen freiem Ende alle Balkenschnittlasten aufzubringen sind (Abbildung 4).

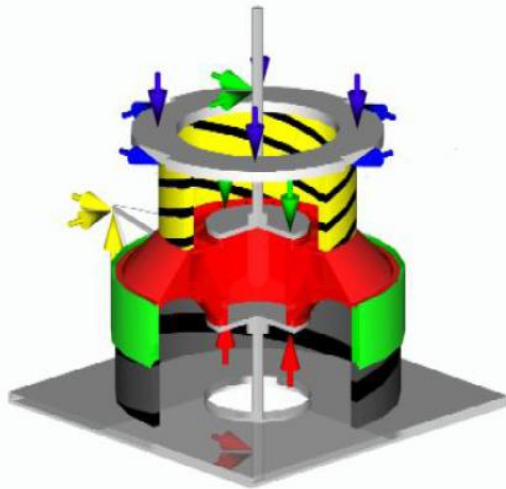


Abbildung 4: Versuchskonzept

Der Versuchsaufbau muss auch die korrekte Verteilung der Schnittlasten im Bereich der Flansche sicherstellen. Dies ist notwendig, da die Flansche zu den kritischen Bereichen der Struktur zählen. Die korrekte Verteilung der Schnittlasten wird durch spezielle Dummy-Strukturen erreicht, welche die diskreten Kräfte der Hydraulikzylinder in geeigneter Weise in die zu prüfende Struktur übertragen. Eine diskrete Lasteinleitung im Bereich der Flansche würde zu einer lokalen und unrealistischen Überbeanspruchung führen. Diese ist in jedem Falle zu vermeiden.

Das Versuchskonzept sieht die Verwendung der Hardware sowohl für das statische Versuchsprogramm als auch für den Ermüdungsversuch vor. Beide Szenarien haben deutlich unterschiedliche Maximallasten.

4.2. Konstruktion des Prüfstands

4.2.1. Prinzipieller Aufbau

Die Konstruktion des Prüfstandes gliedert sich in folgende Hauptgruppen:

- 1) das Versuchsgerüst
- 2) die Lasteinleitungselemente
- 3) die Dummies zur Lastverteilung
- 4) das von der Belastung entkoppelte Verformungsmesssystem

4.2.2. Versuchsgerüst

Das Versuchsgerüst dient als Lastrahmen für alle Hydraulikzylinder. Es gestattet eine genaue Positionierung der Fußpunkte, um die gewünschten Kraftrichtungen genau einstellen zu können. Dabei ist auf ausreichende Steifigkeit der Gesamtkonstruktion zu achten, um eine Verschiebung der Lasteinleitungspunkte und damit eine Veränderung der Kraft zu minimieren (Abbildung 5).

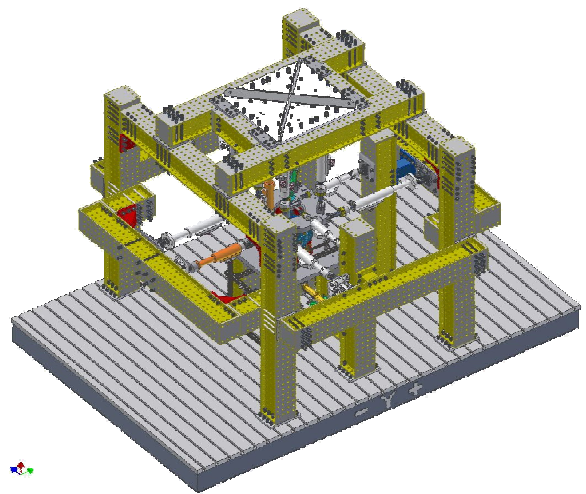


Abbildung 5: Gesamtprüfstand mit Versuchsgerüst

Der Lastrahmen besteht dabei aus Profilen standardisierter Geometrie, die auf verschiedenste Art und Weise verbunden werden können (Baukastenprinzip). Dadurch werden die Kosten für diesen temporären Prüfaufbau minimiert.

4.2.3. Lasteinleitungselemente

Die geforderten Belastungsvektoren machen spezielle Lasteinleitungselemente erforderlich:

- 1) Lastring zur Erzeugung aller Balkenschnittkräfte
- 2) Pendelbalken zur Realisierung Belastungen an Positionen mit geringem Bauraum

Der Lastring dient dabei der Erzeugung aller 6 Balkenschnittlasten am freien Ende des Dummy-Prüfling-Dummy-Aufbaus. Dazu sind an diesem soliden Ring 8 Hydraulikzylinder befestigt. Die symmetrische Anordnung vereinfacht die Berechnung der einzelnen Zylinderkräfte aus den geforderten Schnittlasten (Abbildung 6).

Die Pendelbalken dienen der Realisierung von Radiallasten an den Flanschen für die Lagergehäuse 3 und 4. Die Position der Flanschflächen innerhalb des Prüflings macht eine direkte Belastung des jeweiligen Dummies unmöglich.

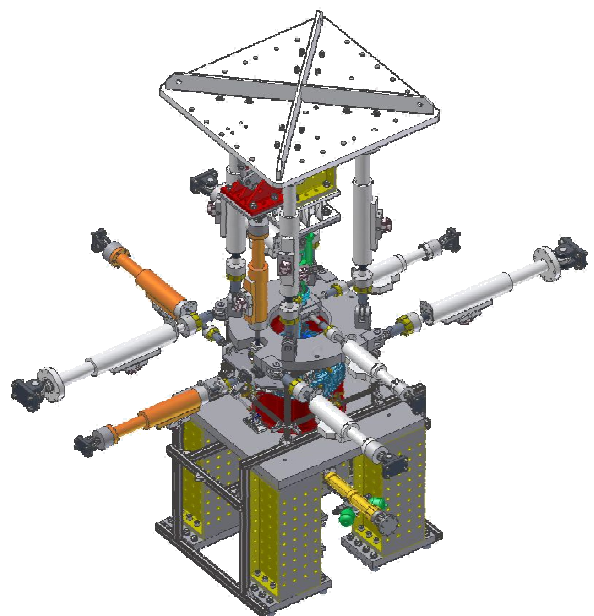


Abbildung 6: Lasteinleitungselemente und Hydraulikzylinder

4.2.4. Dummies zur Lastverteilung

Wesentliche Bestandteile des Prüfstandes sind die Dummies zur Lasteinleitung und -verteilung:

- 1) IPC Dummy (Mitteldruckverdichtergehäuse)
- 2) HPC Dummy (Hochdruckverdichtergehäuse)
- 3) BRG 3 Dummy (Lagergehäusedummy Lager 3)
- 4) BRG 4 Dummy (Lagergehäusedummy Lager 4).

Diese Ersatzstrukturen kommen zum Einsatz, da der Entwicklungsprozess der originalen Triebwerkskomponenten parallel zur Entwicklung des Verdichterzwischengehäuses verläuft und folglich die Verfügbarkeit eines Originalbauteils für die jeweilige Position zum Zeitpunkt des Versuchs nicht sichergestellt werden kann. Die Festigkeit und die Steifigkeit aller Dummies orientiert sich an den Vorgaben der jeweiligen Originalbauteile, wobei nicht zwangsläufig auch die Werkstoffe der Originalbauteile Verwendung finden.

Alle Dummies wurden so konstruiert, dass die lokalen Steifigkeiten an den Flanschflächen zum Verdichterzwischengehäuse denen der Originalbauteile entsprechen. Damit wird eine wirklichkeitsgetreue Beanspruchung auch dieser Bereiche gewährleistet. Für die Lagergehäusedummies und die HPC Ersatzstruktur ist eine Kopie der Originalgeometrie in den Bereichen der Lastübertragung ausreichend, da die zugehörigen Bauteile ebenfalls aus Stahl gefertigt werden.

Das IPC-Gehäuse hingegen besteht aus Titan. Um eine wirklichkeitsgetreue Steifigkeit für die Ersatzstruktur aus Stahl zu erreichen, ist eine Geometrieanpassung erforderlich. Für den ersten Entwurf wurde von der Gleichheit der Zugsteifigkeiten des Zylindermantels ausgegangen:

$$t_{St} = \frac{E_{Ti}}{E_{St}} \cdot t_{Ti}$$

Die folglich resultierenden geringen Wandstärken bedingen die Auswahl eines hochfesten Materials, um die erforderlichen Festigkeiten zu gewährleisten. Außerdem spielt für die Längsbelastung des Dummies die Stabilitätsproblematik eine Rolle. Beide Phänomene wurden während der Entwicklungsphase des Dummies durch FEM berechnet, anschließend bewertet und bei der konstruktiven Ausführung berücksichtigt.

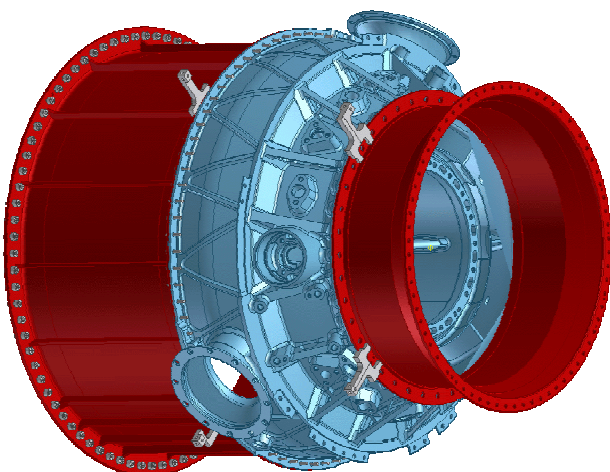


Abbildung 7: IMC Prüfling mit Dummies (IPC und HPC)

Ein weiterer Dummy sorgt für die Einleitung der simulierten

Trägheitskräfte in das Zwischengehäuse, die die Masse des Hilfsaggregategetriebes verursacht. Das Hilfsaggregategetriebe ist statisch bestimmt mit dem Triebwerk verbunden. Zwei Punkten der Anbindungspunkte befinden sich am Verdichterzwischengehäuse. Folglich ist eine Anpassung an originale Steifigkeiten nicht erforderlich und eine relativ einfache Baugruppe gewährleistet die Lasteinleitung in den Prüfling (Abbildung 8).

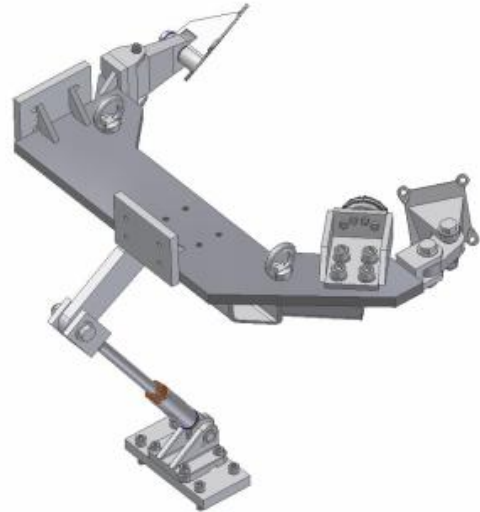


Abbildung 8: AGB Dummy

4.2.5. Verformungsmesssystem

Während der Versuchsdurchführung unter Last messen Wegaufnehmer die Verformungen des Prüflings im Bereich der Flansche. Dazu wurden pro Flansch 4 Messpunkte definiert, deren Deformation in allen 3 Raumrichtungen durch je einen induktiven Wegaufnehmer erfasst und anschließend aufgezeichnet wird.

Vorbetrachtungen haben gezeigt, dass diese Messungen einen vom Kraftfluss des Versuchsaufbaus entkoppelten Hilfsrahmen, an dem die Wegaufnehmer befestigt werden, fordern. Diese Forderung wurde mit Hilfe einer separaten Struktur zur Befestigung der Wegaufnehmer erfüllt (Abbildung 9).

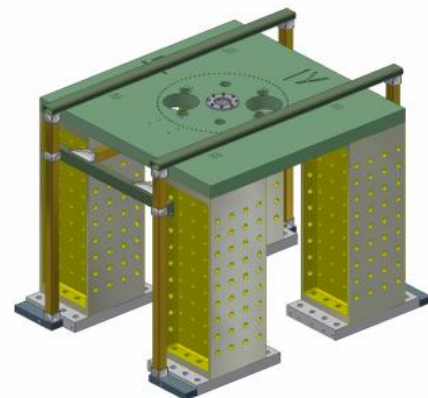


Abbildung 9: Grundplatte mit entkoppeltem Hilfsrahmen für Wegaufnehmer

4.3. Regeltechnik

Die Regeltechnik stellt die korrekte Belastung des Verdichterzwischengehäuses durch die Hydraulikzylinder während der statischen Versuche und bei dem Ermüdungsversuch sicher. Dazu müssen alle Hydraulikzylinder die geforderten äußeren Lasten phasengleich aufbringen. Die Steifigkeiten des Prüfgestells, des Prüflings und der Dummies beeinflus-

sen das dynamische Verhalten jedes einzelnen Regelkreises. Um ein optimiertes und sicher arbeitendes System schon vor dem Einbau des Prüflings zur Verfügung zu haben, wurde für die Regelkreisoptimierung eine weitere Ersatzstruktur bereitgestellt. Diese wird an Stelle des Dummy-Prüfling-Dummy-Aufbaus im Prüfaufbau montiert. Sie hat alle Schnittstellen zu den Hydraulikzylindern, die auch der endgültige Prüfaufbau aufweist (Abbildung 10).

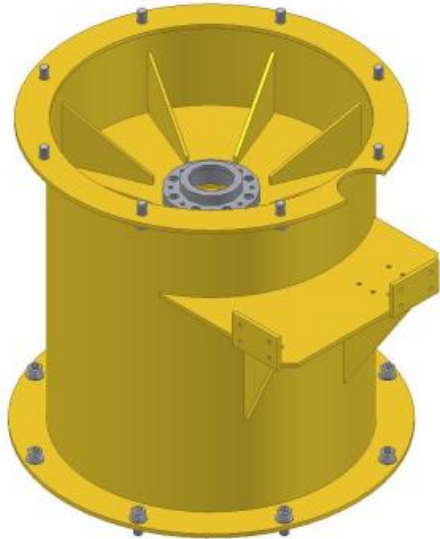


Abbildung 10: Ersatzstruktur

Mit Hilfe dieser Ersatzstruktur kann das Zusammenspiel der Regelkreise überprüft und optimiert werden, ohne bereits schädigungsrelevante Beanspruchungen im Prüfling zu erzeugen. Dieses Vorgehen stellt eine Steigerung der Sicherheit des Versuches für das Bauteil dar und dient der Reduzierung der Versuchszeit.

Das statische Versuchsprogramm und der Ermüdungsversuch unterscheiden sich signifikant in der Höhe der aufzubringenden Maximallasten. Die relative Regelgenauigkeit sinkt beim Ermüdungstest. Um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen, ist eine sehr gute Abstimmung der einzelnen Regelkanäle aufeinander notwendig.

Die Überwachung der korrekten Beanspruchung des Verdichterzwischengehäuses während des Tests erfolgt durch Dehnungs- und Verformungsmessungen.

4.4. Messtechnik

Die Messtechnik wird zur simultanen Aufzeichnung der äußeren Belastung (aufgebrachte Kräfte der Hydraulikzylinder) und der Systemantwort (Verformungen und Dehnungen) genutzt. Die Messergebnisse dienen der Bewertung der Konstruktion des Zwischengehäuses und dem Vergleich mit den Ergebnissen der FE-Berechnungen.

5. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1. Typische Zielkonflikte

Die Versuchsdurchführung wird von einer Reihe von Zielkonflikten geprägt, die typisch für ein Flugtriebwerksentwicklungsprogramm sind, und die durch ingenieurmäßige Kompromisse (z.B. mittels Sicherheitsfaktor) gelöst werden müssen. Beispielsweise sind für die Nachweisversuche Bauteile zu verwenden, die repräsentativ für den Serienstandard sind. Das bedeutet unter anderem, dass der Prüfling aus einem Prozess mit stabiler Herstellungstechnologie entstammt und für den Serienstandard repräsentative Werkstoffeigenschaften aufweist. Mit steigender Komplexität des Bauteiles nimmt das Erreichen eines stabilen Herstellungsprozesses jedoch eine

gewisse Vorlaufzeit in Anspruch. Ein in allen Details der Serie entsprechender Prüfling steht gewöhnlich erst relativ spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung. Demgegenüber werden die durch die Versuche zu erbringenden Nachweise bereits zu einem relativ frühen Zeitpunkt benötigt, damit eine zeitgerechte Triebwerkszulassung sichergestellt ist, oder auch um eine rechtzeitige Freigabe des Bauteiles für die Flugerprobung zu gewährleisten.

Die Gültigkeit der dem Versuch zugrundeliegenden Berechnungsmodelle wird über verschiedene Validierungsversuche nachgewiesen. Die Ergebnisse dieser Modellvalidierung liegen jedoch aus offensichtlichen, projekttechnischen Gründen vor dem Beginn des Festigkeitsversuches noch nicht komplett vor. Mit einem validierten WRM beispielsweise wird nachgewiesen, dass während des Versuches im Prüfling ein für die Betriebsbedingungen im Gesamttriebwerk repräsentativer Beanspruchungszustand erzeugt wird. Eine endgültige Validierung des WRM erfolgt jedoch erst im Rahmen des Versuches selbst, siehe auch Abschnitt 5.2. Hiermit ergibt sich das Risiko, aufgrund von unerwarteten Messergebnissen, Versuche mit korrigierten Lasten wiederholen oder gar den Versuchsaufbau ändern zu müssen, was mit zusätzlichen Kosten und vor allem einer zeitlichen Verzögerung verbunden ist. Durch eine enge Verzahnung von Versuchskonzeption und Prüfstandskonstruktion einerseits und begleitender numerischer Simulation andererseits wird dieses Risiko minimiert.

5.2. Modellvalidierung und Versuchsüberwachung mittels Messdaten

Vor dem eigentlichen Festigkeitsversuch wird im Rahmen einer Serie von Vorversuchen eine Reihe von einfachen Lastfällen aufgebracht, die den Prüfling in jeweils nur einer einzelnen Schnittstellenkomponente belasten. Der Vergleich von Dehnungs- und Verformungsmessdaten mit den entsprechenden Vorhersagen des WRM dient der Validierung des WRM und der Kontrolle des Verhaltens des gesamten Versuchsaufbaus.

Bei dem Ermüdungsversuche dienen die Messdaten, die während des gesamten Versuches aufgezeichnet werden, auch der Versuchsüberwachung und frühestmöglichen Erkennung eventuell auftretender Schäden am Versuchsaufbau oder Prüfling.

5.3. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm besteht aus den bereits o.g. statischen Lastfällen zur Validierung des WRM und den zur Zertifizierung des Verdichterzwischengehäuses geforderten statischen Limit Load und Ultimate Load Lastfällen. Diese Belastungen werden stufenweise aufgebracht, wobei die einzelnen Lastniveaus für eine bestimmte Zeit gehalten werden. Während dieser Haltezeit erfolgt die Messung der aufgebrachten Kräfte und der sich einstellenden Dehnungen und Verformungen. Für alle statischen Versuche steht ein Prüfling zur Verfügung. Ein Inspektionsprogramm definiert die durchzuführenden zerstörungsfreien Prüfungen (Rissinspektionen) und die Kontrollen der Dimensionen des Prüflings vor und nach erfolgter Belastung.

Anschließend erfolgt die Durchführung des Ermüdungsversuchs als Folge von Lastfällen mit einem neuen Prüfling. Auch hier werden, einem Inspektionsprogramm folgend, zerstörungsfreie Prüfungen des Verdichterzwischengehäuses in Abhängigkeit von der Anzahl der aufgebrachten Lastzyklen durchgeführt.

Die Dauer der Durchführung des gesamten Versuchsprogramms setzt sich folglich aus der notwendigen Zeit für die Belastung an sich und der Inspektionszeit einschließlich der

notwendigen Demontagen und Montagen der Prüflinge zusammen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein enges Zusammenspiel von Berechnung und Versuch hat sich beim Festigkeitsnachweis für zentrale Strukturkomponenten von Flugtriebwerken als die optimale Vorgehensweise herausgestellt. Analytische Berechnungsmethoden, insbesondere die Methode der Finiten Elemente, bieten effiziente und flexible Anwendungsmöglichkeiten, um von der Definition der Versuchsanforderungen über die Konzeption des Versuchs und die Optimierung der Prüfstands konstruktion bis zur Versuchsdurchführung, Versuchsüberwachung sowie Versuchsauswertung den Zeit- und Kostenaufwand so gering wie möglich zu halten. Dabei wird gleichzeitig das Risiko eines unerwarteten Versuchsausganges minimiert.

Aufgrund der großen Anzahl von Einflussgrößen und Mechanismen, die Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften eines Bauteiles haben, kann ein Festigkeitsnachweis für zentrale Strukturkomponenten auch in absehbarer Zukunft mit hinreichender Sicherheit bei vertretbarem Auf-

wand nur im Versuch erbracht werden. Die weitere Entwicklung von rechnergestützten numerischen Simulationsmethoden wird jedoch dazu beitragen, dass solche Versuche die relevanten Betriebsbedingungen mit immer höherer Präzision nachbilden werden, und dass dabei gleichzeitig das Risiko eines unerwarteten Versuchsausganges weiter verringert wird.

Die Kooperation in dem vorgestellten Projekt zwischen der Rolls Royce Deutschland Ltd & Co KG, einem Systemhersteller mit vollständiger Systemfähigkeit zur Entwicklung, Zulassung und Herstellung von Strahltriebwerken, und der IMA GmbH Dresden, einem mittelständischen Unternehmen im Bereich der industrienahen Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen, ist ein Beispiel für die erfolgreiche und innovative Zusammenarbeit im Entwicklungsprozess von Flugtriebwerken.

...