

INTERDISZIPLINÄRE UNTERSUCHUNGEN AN TRIEBWERKSNEBENSTROMSYSTEMEN

Olaf Lenk, Rolls-Royce Deutschland
Dr. Frank Arnold, Rolls-Royce Deutschland
Stephan Herzog, Rolls-Royce Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Die Auslegung von Luftfahrzeugen und Triebwerken erfordert die Berücksichtigung sowohl technischer als auch ökonomischer Gesichtspunkte. Um diese umzusetzen wurde in der Vergangenheit im Bereich der Triebwerke das Hauptaugenmerk auf eine Optimierung des thermodynamischen Kreisprozesses und dessen Umsetzung in der Kerntriebwerkstruktur gelegt, was zu signifikanten Erfolgen geführt hat.

Im Hinblick auf die Schubentwicklung eines Triebwerks jedoch ist das Verhalten des Nebenstromsystems von ebensolcher Bedeutung. Dabei agiert der Nebenstromkanal nicht nur zur Führung des Luftstromes, sondern unterliegt einer Vielzahl von Funktionen und Zusatzanforderungen, welche in gegenseitiger Abhängigkeit stehen. Der Nebenstromkanal bietet dabei im Triebwerk ein besonders großes Potential zur Optimierung, da diese Triebwerkskomponente in der Vergangenheit kaum ein Thema interdisziplinärer systemorientierter Untersuchungen gewesen ist.

Um diese Interaktionen quantitativ beurteilen und aktiv nutzen zu können, wurde ein umfangreiches Forschungsvorhaben aufgesetzt, welches sich mit den strukturellen, aerodynamischen und akustischen Eigenschaften von Nebenstromsystemen beschäftigt.

1. KOMPONENTEN DES NEBENSTROMSYSTEMS

Das Vorhaben zielt auf die Entwicklung neuartiger Methoden und Maßnahmen ab, den Nebenstromkanal mit all seinen Bestandteilen hinsichtlich verschiedener Kriterien zu optimieren. Die Formgebung des Nebenstromkanals sowie die Positionierung und Formgebung der einzelnen Komponenten beeinflusst in hohem Maße das Gewicht, die Effizienz und die Schallabstrahlung des Triebwerks. In Abbildung 1 sind verschiedene mögliche Komponenten des Nebenstromkanals dargestellt.

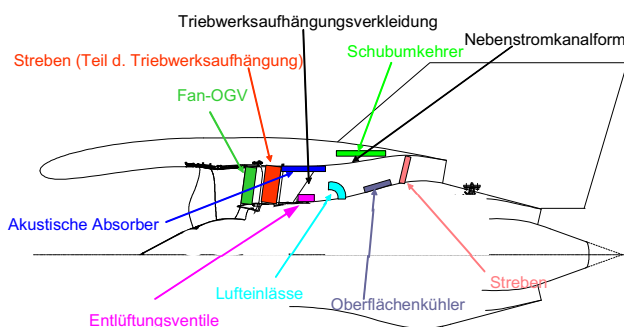


Abb. 1 Komponenten im Nebenstromkanal

Diese Komponenten unterliegen den nachfolgenden Gesichtspunkten:

- Die Form des Nebenstromkanals wird im Wesentlichen durch die geometrischen Abmessungen des Kerntriebwerks bestimmt.
- Der Fan eines Triebwerks induziert stromab eine Rotationsbewegung der Nebenstromkanalströmung um die Längsachse des Triebwerks. Durch die Leitbeschaukelung der Fan Leitschaukeln wird die Strömung in Axialrichtung des Triebwerks umgelenkt.
- Das Kerntriebwerk ist mit der Triebwerksgondel durch Streben verbunden. Der Triebwerksschub wird über die verkleidete Triebwerksaufhängung und die Streben auf das Flugzeug übertragen.
- Die akustischen Absorber im Nebenstromkanal reduzieren die Schallabstrahlung des Triebwerks in bestimmten Frequenzbereichen.
- Bei bestimmten Betriebszuständen wird aus dem Verdichter des Kerntriebwerks Luft abgelassen, um die Stabilität des Verdichters sicherzustellen. Diese Luft gelangt durch Entlüftungsventile in den Nebenstromkanal.
- Lufteinlässe dienen zur Kühlung des Kerntriebwerkgehäuses und der Versorgung unterschiedlicher Komponenten mit relativ kalter Nebenstromkanalluft.
- Die Einbauten des Schubumkehrers wie Streben oder Aufhängungspunkte dienen seiner mechanischen Befestigung an der Triebwerksgondel.
- Das Getriebeöl sowie andere Betriebsflüssigkeiten können durch Oberflächenkühler im Nebenstromkanal gekühlt werden.
- Einbauten am Kerntriebwerk, wie beispielsweise ein am Kerntriebwerk angebrachtes Getriebe können einen stark S-förmigen Nebenstromkanal zur Folge haben.

Die Arbeiten werden sich darauf konzentrieren, Ursachen von Schallerzeugung und Druckverlusten zu erkennen und zu reduzieren, Einflüsse auf das Strömungsprofil zu untersuchen sowie die Schallausbreitung im Nebenstromkanal sowie die strukturellen Komponenten zu optimieren. Die zur Verfügung stehenden messtechnischen und rechnerischen Methoden sollen zum Verständnis der Aerodynamik, Akustik und Strukturmechanik im Nebenstromkanal beitragen sowie zum Entstehen eines akustisch, aerodynamisch und strukturell optimierten Nebenstromkanals führen.

2. STRUKTURELLE AUSLEGUNG

Der Nebenstromkanal, dabei vor allem die Frontstruktur, dienen der Übertragung von Schubkräften zur Triebwerksaufhängung. Aerodynamische und aeroakustische Variationen von Position und Form dieser Komponenten müssen daher in einem strukturell-mechanischen sinnvollen Bereich stattfinden. Ebenso muss die strukturelle Optimierung aerodynamisch und akustisch sinnvoll sein.

2.1. Frontstruktur

Nach dem Passieren der Fan-Schaufeln hat die strömende Luft einen Drallvektor in Umfangsrichtung, der nicht schubwirksam ist. Zur Umlenkung der verdrehten Strömung in axiale Richtung sind stromab des Fan Leitschaufeln (Outlet Guide Vane – OGV) installiert (siehe Abb. 2). Diese Leitschaufeln können separat vor dem Zwischengehäuse (Intermediate Casing – IMC) angebracht sein, als auch mit den Streben des Zwischengehäuses kombiniert werden. Anzahl, Anordnung und Profil dieser Leitschaufeln sind für die aerodynamische und schallabsorbierende Wirkung entscheidend.

Innerhalb der Untersuchung werden verschiedene Anordnungen von Leitschaufeln untersucht. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf integrierte, strukturelle Leitschaufeln gelegt, da diese so eine hohe Funktionsdichte aufweisen. Diese Leitschaufeln können sowohl gleiche konstruktive Merkmale aufweisen als auch individuell auf die Einbausituation angepasst werden. Dabei ist die Integration der radialen Antriebswelle des Getriebes als auch die Durchleitung von Aufhängungslasten zu nennen. Um die Gesamtsteifigkeit des Triebwerkes zu erhöhen, werden unterschiedliche Leitschaufelanordnungen, Profildimensionen und Anstellwinkel untersucht.

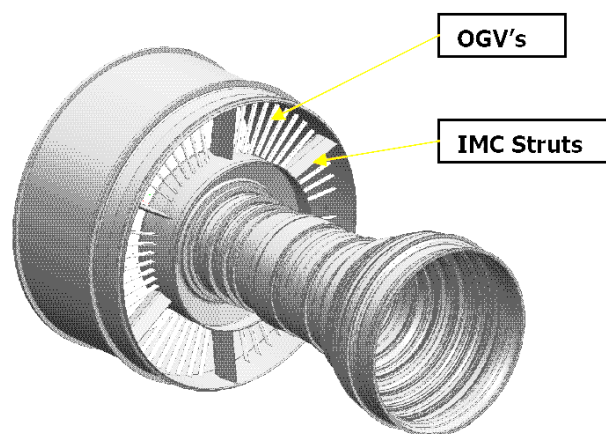


Abb. 2 Frontstruktur

2.2. Innere Nebenstromwandung

Der Nebenstromkanal wird durch eine äußere und innere Wand gebildet. Der so entstehende Ringraum erlaubt eine Durchleitung hoher, vom Fan verdichteter Luftmassen, die hauptsächlich für die Schuberzeugung des Triebwerkes verantwortlich sind. Dabei übernimmt die Stromlinienführung die Aufgabe, eine möglichst verlustarme Durchleitung zu ermöglichen und zum Ende des Kanals zu beschleunigen. Zusätzlich dient die innere Wand der Verkleidung des Kerntriebwerkes und bildet so einen geschützten Einbauraum für benötigte Triebwerksaggregate (z.B. Aktuatoren, evtl. Getriebe, Generator, siehe Abb. 3). Mit der Anzahl, Größe und der Lage dieser Aggregate verändern sich die Anforderungen an diesen Bauraum, sodass die Formgebung diesen Anforderungen genügen muss. Darauf angepasst muss auch die Kontur der äußeren Wand abgestimmt sein. Die Ausdehnung der inneren Wand ergibt eine natürliche Verbindung zwischen der vorderen und hinteren Triebwerksaufhängung. Im Rahmen der strukturellen Untersuchungen wird ein Lastpfad durch die Wand realisiert, welcher die Biegesteifigkeit des Triebwerkes erhöht und somit das Kerntriebwerk entlastet. Die Erhöhung der Biegesteifigkeit kann durch Variation der Formsteifigkeit oder Materialsteifigkeit getrieben werden. Für die Materialsteifigkeit soll die Verwendung optimierter Faserverbundkonstruktionen berücksichtigt werden. Die Formsteifigkeit lässt sich vor allem durch geeignete Bauformen wie Spante und Stringer aber auch über die Variation der Wandkrümmung beeinflussen. Zusätzlich soll bei der Untersuchung auf konstruktive Aspekte eingegangen werden, um eine lasteinleitende Anbindung an die Triebwerksstruktur zu realisieren. Die von den aerodynamischen und aeroakustischen Untersuchungen aufgestellten Randbedingungen werden dabei berücksichtigt.

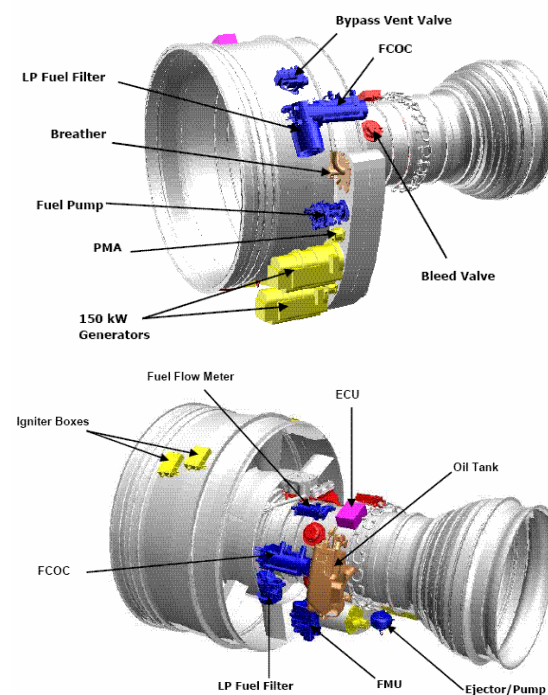


Abb. 3 Aggregate am Triebwerk

2.3. Äußere Nebenstromwandung

Angepasst an die Konturierung der inneren Wand muss auch die äußere Wand derart geführt werden, dass den aerodynamischen Anforderungen genügt wird. Zusätzlich bildet die äußere Wand die Begrenzung der Triebwerksverkleidung, welche den Bauraum für die Komponenten des Schubumkehrers bildet. Desweiteren wird die Schubdüse geformt.

Im Rahmen der Untersuchungen werden Bauformen gefunden, welche eine höhere Formstabilität unter allen Betriebslasten bieten. Diese höhere Formstabilität soll nicht durch zusätzlich eingebrachte Komponenten, sondern durch Optimierung der Konturierung und Funktionalitätserweiterungen erreicht werden.

3. AERODYNAMISCHE AUSLEGUNG

Die aerodynamischen Untersuchungen haben zum Ziel, den Einfluss der Fan-Leitschaufeln, des Nebenstromkanals und dessen Komponenten auf die Schallerzeugung, Schallausbreitung und den Druckverlust im Nebenstromkanal zu untersuchen.

Dabei stehen sowohl Gestaltungsmöglichkeiten einzelner Komponenten im Mittelpunkt als auch deren Interaktion.

3.1. Frontstruktur

Der Nachlauf der Frontstruktur trifft stromab auf Triebwerksaufhängungskomponenten und andere Nebenstromkanalkomponenten. Die Stromaufwirkung dieser Komponenten und deren Interaktion mit den Leitschaufeln kann den Druckverlust im Nebenstromkanal und die Funktion der Schaufeln beeinflussen. Durch die genaue Kenntnis dieser Interaktionen und Abhängigkeiten soll der Nebenstromkanaldruckverlust reduziert werden. Instationäre Strömungssimulationen sollen Aufschluss über die Schallerzeugungsmechanismen an den Leitschaufeln geben und detaillierte Informationen zum Druckverlust liefern.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Aspekte werden konventionelle als auch innovative Varianten für Leitschaufeln entwickelt. Die Leitschaufeln haben dabei sowohl eine rein aerodynamische Funktion als auch zusätzlich strukturelle Funktionen. Der Druckverlust zwischen Leitschaufeleintritt und -austritt dient als Kenngröße für die aerodynamische Bewertung der jeweiligen Konfiguration. Besonders die Eigenschaften von sogenannten strukturellen Leitschaufeln, bei denen die Funktion der Triebwerksaufhängung integriert ist, werden untersucht. Für zukünftige Triebwerksprojekte soll damit eine Datenbasis geschaffen werden, inwieweit der Einsatz von strukturellen Leitschaufeln das Triebwerksgewicht sowie die aerodynamischen und akustischen Eigenschaften des Triebwerks beeinflusst.

3.2. Nebenstromkanal

Die Formgebung des Nebenstromkanals beeinflusst in großem Maße das Strömungsbild im Kanal. Starke Krümmungen können zu hohen lokalen Übergeschwindigkeiten führen, die wiederum den Druckverlust erhöhen können. Die Krümmungen und Querschnitts-

veränderungen werden detailliert aufgelöst und rechnerisch untersucht.

Als Grundlage der Untersuchungen des Einflusses der Nebenstromkanalformgebung auf den Druckverlust dient die konventionelle Nebenstromkanalform eines Zweiwellentriebwerks. An dieser Form werden CFD-Studien zur notwendigen Netzfeinheit durchgeführt, um für alle weiteren Simulationen ein Maximum an qualitativ hochwertigen Ergebnissen zu erreichen. Weitere Nebenstromkanalformen werden mit Hilfe von CFD-Simulationen untersucht, die aufgrund verschiedener geometrischer Voraussetzungen des Getriebes und des Schubumkehrers entstehen. Im Mittelpunkt der CFD-Simulation steht dabei der Druckverlust aufgrund der Nebenstromkanalformen sowie die resultierenden Grenzschicht- und Strömungsprofile.

Die Verwendung unterschiedlicher Turbulenzmodelle zur Simulation der Strömung im Nebenstromkanal kann höchst unterschiedliche Ergebnisse zur Folge haben. Durch eine Parameterstudie der Modelle und Turbulenzgrade wird eine Datenbasis geschaffen, um durch den Vergleich mit Messergebnissen das optimale Modell mit den optimalen Einstellungen auswählen zu können, das für zukünftige Simulationen verwendet wird.

Der Einfluss der dreidimensionalen Effekte auf die Strömung im Nebenstromkanal wird durch den Vergleich von 2D- und 3D-CFD-Simulationen des Nebenstromkanals untersucht. Darüber hinaus dient die Analyse der Bewertung des Einflusses von Komponenten der Triebwerksaufhängung auf die Strömung im Nebenstromkanal. Auch hier werden dreidimensionale CFD-Simulationen durchgeführt.

Akustische Absorber beeinflussen zusätzlich die Grenzschicht im Nebenstromkanal. Diese Einflüsse werden genauer identifiziert und Möglichkeiten gesucht, wie dies in CFD-Simulationen beispielsweise durch zusätzliche Wandrauigkeiten berücksichtigt werden kann.

Die durch die CFD-Simulationen gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluss der Nebenstromkanalform auf den Druckverlust werden in ein eindimensionales Tool übertragen, um für zukünftige Triebwerksprojekte die Möglichkeit zu schaffen, den Druckverlust aufgrund der Nebenstromkanalform schnell und einfach abschätzen zu können.

4. AKUSTISCHE AUSLEGUNG

Unter Verwendung der zuvor bestimmten Rechenverfahren wird der Einfluss der Kanalgeometrie auf die Schallausbreitung und -absorption untersucht.

Insbesondere die Auswirkung der Kanalkrümmung auf die Schallausbreitung ist von Interesse. Es ist zu vermuten, dass an stärkeren Krümmungen die Schallwellen reflektiert und somit am Austritt in die Umgebung gehindert werden. Es ist zu untersuchen, ob und wie dieser Effekt zur Geräuschminderung genutzt werden kann. Desweiteren hat die Formgebung des Kanals einen großen Einfluss darauf, welche Flächen schallabsorbierend ausgekleidet werden können. Dies soll bei den Berechnungen und der akustischen Bewertung über entsprechende Randbedingungen berücksichtigt werden.

Basierend auf den stationären aerodynamischen Rechnungen werden aero-akustische Simulationen durchgeführt, die die Schallausbreitung im Nebenstromkanal vorhersagen.

Dabei soll getestet werden, welche Codes in Hinblick auf Effizienz und Leistungsvermögen die gestellten Anforderungen am besten erfüllen können. Als Kriterien seien hierbei beispielhaft 2D- bzw. 3D-Probleme genannt sowie die mögliche Anpassung akustischer Randbedingungen an der Wand, um akustische Absorber zu berücksichtigen.

5. MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG

An die analytischen Untersuchungen anschliessend sollen Messdaten erfasst werden, um das Verständnis der Aerodynamik und Aeroakustik im Nebenstromkanal zu verbessern und rechnerische Vorhersagemethoden zu validieren. Sowohl stationäre als auch instationäre Messverfahren kommen zur Anwendung. Die experimentellen Arbeiten werden von Anecom Aerotest und dem DLR am neuen Modular Fan Rig durchgeführt.

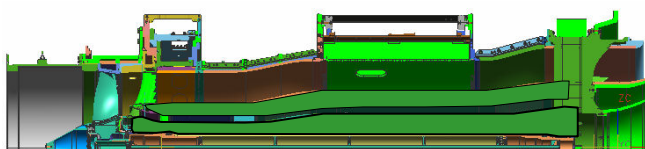


Abb. 4 Querschnitt durch die Messstrecke des Modular Fan Rig

Das Modular Fan Rig ermöglicht erstmals systematische Untersuchungen stromab von Fan und der Leitschaufeln an einem realistischen Nebenstromkanal (siehe Abb. 4). Der Maßstab des Prüfstands erlaubt Messungen bei Reynoldszahlen, die etwa denen entsprechen, die im Reiseflug bei Triebwerken der für Rolls-Royce Deutschland relevanten Schubklasse erreicht werden. Damit können Messungen unter für den Kraftstoffverbrauch relevanten Bedingungen durchgeführt werden. Für die Akustik ist hauptsächlich der Betrieb in Bodennähe und die Machzahl relevant, wobei im Modell ausreichend große Machzahlen erwartet werden. Aber auch die Reynoldszahlen sind genügend groß, damit Ähnlichkeit vorausgesetzt werden kann.

Es werden zwei unterschiedliche Nebenstromkanalformen untersucht, die jeweils unterschiedliche Einbauten enthalten. Als Nebenstromkanalgrundform wird die Modular Fan Rig Standard-Geometrie verwendet, die einem konventionellen Zweiwellen-Triebwerk entspricht. In diesem Nebenstromkanal werden verschiedene Einbauten getestet. Die zweite Nebenstromkanalvariante ist eine modifizierte und optimierte Form eines Zweiwellen-Triebwerks. In der zweiten Variante werden veränderte und optimierte Einbauten getestet.

6. ABSCHLUSSBETRACHTUNG

Das Ziel der Untersuchungen ist die akustischen Optimierung hinsichtlich der Lärmreduktion des Gesamttriebwerks als auch die Verbesserung seiner Leistungscharakteristik. Durch die Untersuchungen am Nebenstromkanal wird ein besonderes Potential zur Optimierung erschlossen, da diese Triebwerks-

komponente in der Vergangenheit kaum ein Thema interdisziplinärer systemorientierter Untersuchungen gewesen ist. Durch die im Projekt angestrebte strukturelle Verbesserung des Nebenstromkanals sowie die damit einhergehende Gewichts- und Treibstoffersparnis werden eine Kostenersparnis und damit eine verstärkte Wettbewerbsfähigkeit erreicht.

7. DANKSAGUNG

Die beschriebenen Untersuchungen setzten einen starken Fokus auf die interdisziplinäre Bearbeitung der verschiedenen Teilaspekte. Unser Dank gilt den Forschungspartnern dem DLR (Institut für Antriebstechnik), der BTU Cottbus und Anecom Aerotest Wildau für ihr hohes Engagement.

Besondere Erwähnung gebührt dem Land Brandenburg, welches durch seine Forschungsförderung dieses Projekt und dessen regionalen Bezug stärkt.

8. REFERENZEN

- [1] Wegner, M., Lieser, J.A., Mundt, C.: Lärm- und Leistungsoptimierter Strahlmischer. DGLR-JT99-82, DGLR Jahrestagung 1999
- [2] Lieser, J. A.: Reibungsfreie Berechnung von Flugzeugkonfigurationen mit Variation der Triebwerksposition. STAB Symposium, DLR Göttingen, 1997
- [3] Beaumont, A.: Realisation of a by-pass duct pre conception program. Industrial placement report, Ecole National Supérieure Valenciennes, 1997
- [4] Mundt, C. et al.: Abschlußbericht zum E3E-Vorhaben Lärm- und Leistungsoptimierter Strahlmischer. RR-Bericht, 1999
- [5] Mundt, C. Lieser, J.A.: Performance Improvement of Propulsion Systems by Optimization of the Mixing Efficiency and Pressure Loss of Forced Mixers. 8. European Propulsion Forum: "Affordability and the Environment-Key Challenges for Propulsion in the 21st Century", March 2001 in Nottingham
- [6] Lieser, J.A., Spieweg, R.: Strahl lärm berechnung für gemischte Triebwerkstrahlen mit Hilfe akustischer Analogie. DGLR Jahrestagung DGLR-2003-067, 2003
- [7] Tschirner, T.: Optimierung der Nebenstromkanal-Leitschaufelreihe zur Minimierung der induzierten Verluste und der Stromaufwirkung der Triebwerksaufhängung. Diplomarbeit TU Braunschweig, 2000