

Die Gruppe der Luftsysteme umfasst die Systeme zur Kühlluftzufuhr, Dichtluftzufuhr und zur Verdichterregelung. Das Zapflußsystem (bleed air system) zur Versorgung des flugzeugseitigen Druckluft-Systems gehört nicht zu den Triebwerksluftsystemen. Es gehört zum Druckluft-System des Flugzeugs. Um einen Überblick über die verschiedenen Luftsysteme des Triebwerks zu bekommen, ist es sinnvoll, sie in zwei Gruppen aufzuteilen: In interne Luftsysteme und externe Luftsysteme [1].

2.1 Interne Luftsysteme

Um die Luftströmungen des internen Luftsystems zu führen, werden die zahlreichen Hohlräume im Inneren des Rotors und die Hohlräume zwischen den Rotorkomponenten und Gehäusen verwendet. Die Luft für die verschiedenen Verwendungszwecke wird an dafür ausgewählten Verdichterstufen aus dem Hauptgasstrom entnommen und in diese Hohlräume eingeleitet. Da die benötigten Drücke und Temperaturen der Luft im internen Luftsystem von der jeweiligen Triebwerkskonstruktion vorgegeben werden, unterscheiden sich die internen Luftsysteme verschiedener Triebwerkstypen. Die unterschiedlichen Designs der internen Bauteile führen ebenfalls zu unterschiedlichen internen Luftsystemen. Um die Beschreibung möglichst einfach zu halten, stammen die im Folgenden beschriebenen Beispiele von Zweiwellen-Triebwerken.

2.1.1 Kühlung der Bauteile und Abdichtung

Ein großer Anteil der Luftmenge des internen Luftsystems wird für die Kühlung von Bauteilen verwendet. Betrachten wir den Gasstrom von vorn nach hinten durch das Triebwerk, dann wird erkennbar, dass die Notwendigkeit, Bauteile zu kühlen, im Bereich des Hochdruckverdichters beginnt (bei Betrachtung eines Zweiwellen-Triebwerks). Die Luft tritt

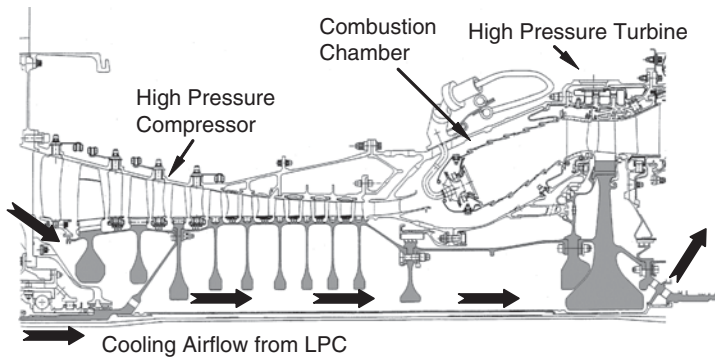


Abb. 2.1 Interner Kühlluftfluss in einem CFM56-7B. (© CFM)

am vorderen Ende des HPC-Rotors oder an einer der weiter hinten liegenden Stufen des HPC in den inneren Hohlraum des Hochdruckrotors ein. Im Inneren der Rotortrommel strömt die Kühlluft nach hinten und kühlt dort auch die Scheiben der Hochdruckturbinen (HPT) in ihrem Bohrungsbereich. Nachdem dieser Kühlluftstrom die Hochdruckwelle hinten verlassen hat, wird er verwendet, um die Scheiben der Niederdruckturbinen (LPT) zu kühlen. Hinter der LPT verlässt diese Luft dann den Innenraum des Rotors in Richtung Hauptgasstrom. Abbildung 2.1 zeigt einen solchen Kühlluftverlauf [7].

Um für ein bestimmtes Triebwerksbauteil den richtigen Kühleffekt zu erzielen, wird Luft mit der dazu passenden Temperatur und dem passenden Druck benötigt. Daher muss der Konstrukteur sorgfältig die richtige Verdichterstufe als Quelle für die Kühlluft eines Bauteiles wählen.

An der letzten Verdichterstufe kann Luft aus dem Hauptgasstrom in den Spalt zwischen Hochdruckrotor und Brennkammergehäuse eintreten. Um eine Leckage aus dem Hauptgasstrom zu vermeiden, ist bei einigen Triebwerkstypen eine Dichtung zwischen Hochdruckrotor und Brennkammergehäuse (combustion case, diffuser case) eingebaut. Diese Dichtung wird als CDP Seal (compressor discharge pressure seal) oder Thrust Balance Seal bezeichnet. Abbildung 2.2 zeigt ein CDP Seal, das als Labyrinthdichtung ausgeführt

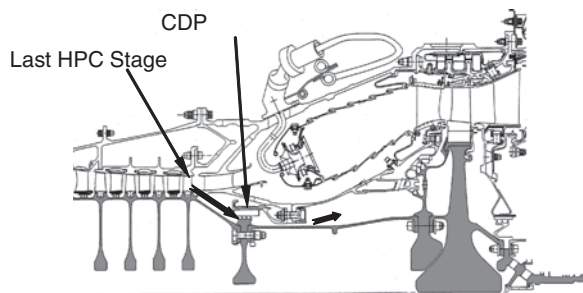


Abb. 2.2 Das CDP Seal hinter dem Verdichteraustritt. (© CFM)

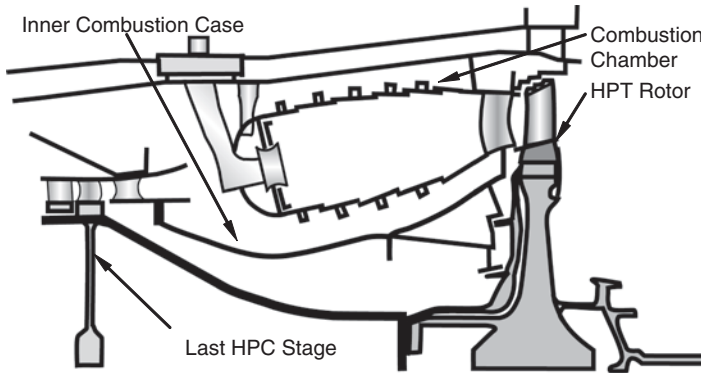


Abb. 2.3 Verdichteraustritt ohne CDP Seal im Trent 500 (vereinfacht dargestellt)

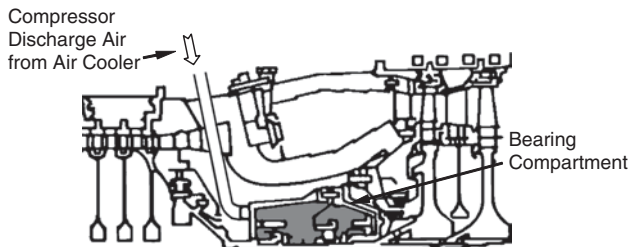


Abb. 2.4 Lagergehäuse im Brennkammergehäuse eines V2500

ist [7]. Es kann aber auch als Bürstendichtung (Brush Seal) ausgeführt werden. Beide Arten von Dichtungen haben gemeinsam, dass nur wenig Luft durch sie hindurch strömen kann. Daher strömt eine geringe Luftmenge durch das CDP Seal in den Hohlraum zwischen Brennkammergehäuse und Rotor. Der Luftdruck ist dort geringer als der Druck am Verdichteraustritt, da das CDP Seal als Drossel wirkt.

Diese Luft wird weiter hinten für Kühl- und Dichtzwecke an der Hochdruckturbine verwendet. Wenn ein Lagergehäuse (Lagersumpf) im Inneren des Brennkammergehäuses angeordnet ist, dann wird die durch das CDP Seal geströmte Luft auch zur Abdichtung dieses Lagergehäuses verwendet. In einigen Triebwerkstypen, wie in Abb. 2.3 gezeigt, ist kein CDP Seal vorhanden. Hier erreicht der Druck vom Verdichteraustritt die Vorderseite der HPT-Rotorscheibe (HPT disk) [6].

Ein Lagergehäuse im inneren Hohlraum des Brennkammergehäuses muss gekühlt werden, um die Wandungen des Lagergehäuses so kühl zu halten, dass die Bildung von Ölkohle verhindert wird. In Abb. 2.4 ist die Zuführung von Kühlluft zu solch einem Lagergehäuse dargestellt. Die Kühlluft wird über ein außenliegendes Rohrsystem durch einen Kühler (air cooler, buffer air cooler) zugeführt. Nachdem diese Luft die Kühlpassagen des Lagergehäuses passiert hat, strömt sie in den internen Luftstrom des Brennkammergehäuses [10].

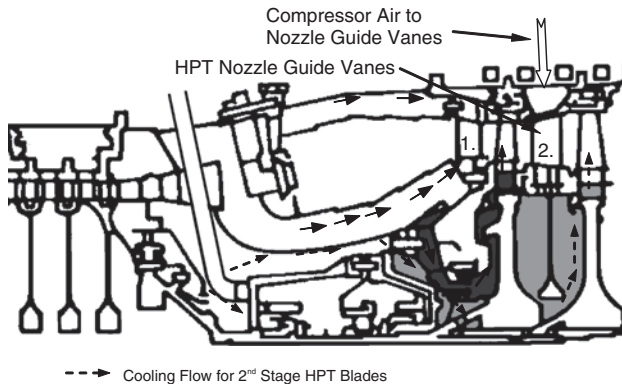


Abb. 2.5 Kühlluftversorgung der Hochdruckturbinen in einem V2500

Der nächste bedeutende Bereich für den Einsatz von Kühlluft ist die Hochdruckturbinen. Die in Turbofan-Triebwerken verwendeten Hochdruckturbinen haben nicht mehr als zwei Stufen. Hier werden die Schaufeln und die Leitschaufeln von beiden Stufen gekühlt. Abbildung 2.5 zeigt die Kühlung der Hochdruckturbinen in einem V2500-A5 [10].

Für die Kühlung der ersten Stufe wird Luft aus dem Brennkammersekundärluftstrom verwendet. Der Kühlluftanteil dieses Luftstroms für die Turbinenleitschaufeln tritt direkt hinter der Brennkammer in die Leitschaufeln (nozzle guide vanes) der ersten Turbinenstufe ein. Für die Kühlung der Turbinenschaufeln im Rotor wird ein Teil des Brennkammersekundärluftstromes durch eine ringförmige Luftführung an der inneren Brennkammergehäusewandung in Richtung des Turbinenrotors geleitet. Am hinteren Ende dieser Luftführung sind die Austrittsöffnungen so angeordnet, dass die Luft dort mit einem Impuls ausströmt, der auch einen Vektor in die Drehrichtung der Turbinen hat. So wird gewährleistet, dass die Luft ohne große Verluste in die Kühlluftbohrungen des Rotors einströmt. Um die Luft im Rotor zu den Schaufeln der ersten Stufe zu leiten, wird bei den meisten Konstruktionen der Hohlraum zwischen der Turbinenscheibe und der darauf befestigten Dichtungsscheibe (rotating air seal) benutzt. Dort kann die Luft radial nach außen zu den Schaufelfüßen strömen, wo sie in die Schaufeln eintritt.

Für die Kühlung der Schaufeln der zweiten Stufe wird kühlere Luft aus der letzten Verdichterstufe verwendet. Diese Luft strömt durch das CDP Seal und durch den inneren Hohlraum des Brennkammergehäuses. Von dort strömt sie durch Bohrungen im Rotor der ersten Turbinenstufe in den Hohlraum, der sich zwischen den beiden Turbinenscheiben befindet. Aus diesem Raum strömt sie in die Kühlkanäle der Schaufeln ein und durchströmt diese.

Die Kühlluft für die Leitschaufeln der zweiten Turbinenstufe wird von einer dafür geeigneten Stufe des Hochdruckverdichters in seinem hinteren Bereich entnommen. Daher muss die Luft von dort durch außenliegende Rohre zu dem Hochdruckturbinengehäuse geleitet werden. Die Kühlluft strömt dort ins Gehäuse ein und wird den Leitschaufeln zugeführt, die sie dann von außen nach innen durchströmt. Bei einigen Triebwerkstypen

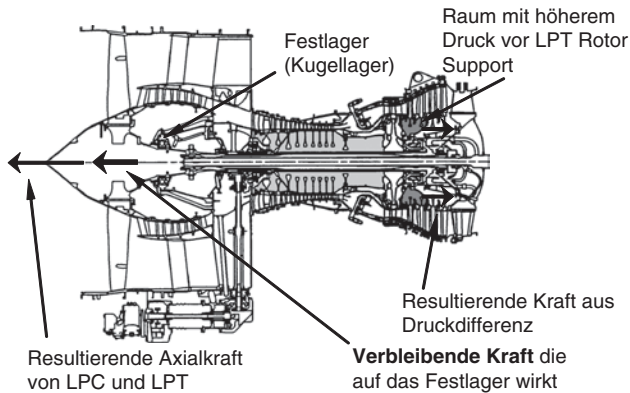


Abb. 2.6 Prinzip des Axialkraftausgleichs. (© CFM)

wird diese Kühlluftzufuhr im Reiseflug ganz oder teilweise abgeschaltet. In dieser Flugphase ist die Gastemperatur geringer als beim Betrieb mit hoher Schubeinstellung bei Start und Steigflug. Dieser Umstand erlaubt das teilweise Abschalten der Kühlluft, um den thermischen Wirkungsgrad des Triebwerkes zu erhöhen.

Vor und hinter einem Turbinenrotor muss der jeweilige Spalt zwischen dem Rotor und der statischen Struktur abgedichtet werden. Hierfür sind dort Labyrinthdichtungen installiert, um das Eindringen von Heißgas in die inneren Hohlräume zu verhindern. Die für diese Abdichtungen erforderliche Luft kommt aus dem inneren Hohlraum des Brennkammergehäuses und aus dem Innenraum des Hochdruckrotors.

2.1.2 Axialkraftausgleich an den Rotoren

Der Verdichter und die Turbine leiten große Axialkräfte in das entsprechende Rotorsystem eines Turbinentriebwerks ein. Der Verdichter leitet eine nach vorn gerichtete Kraft und die Turbine eine nach hinten gerichtete Kraft ein. Die daraus resultierende Kraft ist eine nach vorn gerichtete Kraft, die auf das Festlager des Rotorsystems wirkt. Um für die beabsichtigte Lebensdauer kleinere Festlager verwenden zu können, verkleinern die Konstrukteure diese resultierende Axialkraft, indem sie dazu Druckdifferenzen auf den Rotor wirken lassen. Abbildung 2.6 zeigt dieses Prinzip am Beispiel des N1-Rotors.

Durch eine Druckdifferenz, die auf eine Rotorscheibe oder einen Rotor-Support wirkt, entsteht eine nach hinten gerichtete Kraft. Um dieses Prinzip umzusetzen, werden hauptsächlich die Rotorscheiben und Wellenkomponenten der Turbinen genutzt. Die so erzeugte Axialkraft verringert die auf das Festlager wirkende Kraft. Diese ist damit kleiner als ohne Axialkraftausgleich, aber nicht Null. Die verbleibende, auf das Festlager wirkende Axialkraft muss noch groß genug sein, um eine einwandfreie Funktion des meist als Kugellager ausgeführten Lagers zu gewährleisten. Die Kugeln der verwendeten Lager sind relativ groß, weil die auf das Lager wirkenden Axialkräfte höher sind als die Radialkräfte.

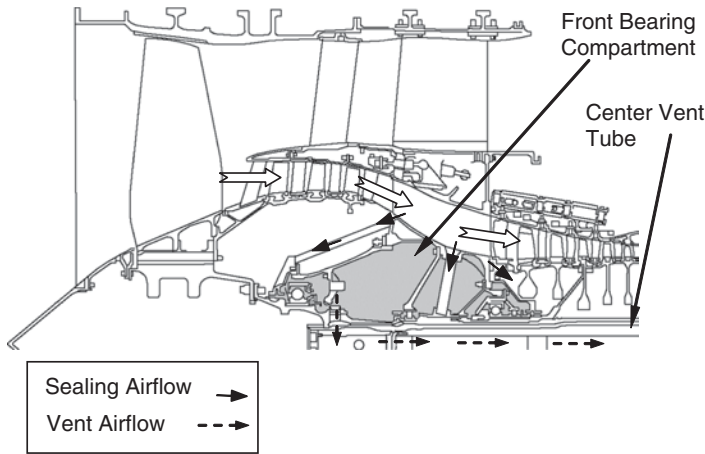


Abb. 2.7 Druckbeaufschlagung eines Lagersumpfes. (© CFM)

Die minimal vorhandene Axialkraft muss so bemessen sein, dass die Kugeln noch abrollen können. Ist die wirkende Kraft zu klein, so können die Kugeln auf den Lagerringen ins Gleiten kommen (Skidding), da ihre Drehzahl zu klein wird. Dies führt zu Schäden an den Lagerringen und zu frühzeitigem Lagerversagen [13].

2.1.3 Druckbeaufschlagung von Lagersümpfen

Die Abdichtung von Lagergehäusen oder Lagersümpfen (bearing compartment, bearing sump) erfolgt mit Luft. Zur sicheren Funktion der Wellenabdichtungen zwischen Welle und Gehäuse muss Luft durch die Abdichtung in den Lagersumpf einströmen. Dies gilt unabhängig von der gewählten Dichtungsbauart (Labyrinthdichtung und Kohleringdichtung). Die Dichtluft für den vorderen und den hinteren Lagersumpf wird dem Hauptgasstrom üblicherweise zwischen den beiden Verdichtern entnommen. Wenn ein Lagersumpf im Inneren des Brennkammergehäuses vorhanden ist, dann wird dafür Luft aus dem Raum hinter dem CDP Seal als Dichtluft benutzt.

Um den Luftfluss durch die Dichtungen in den Lagersumpf aufrecht zu erhalten, muss der Lagersumpf entlüftet werden. Dazu ist das Entlüftungssystem (vent system, breather system) vorhanden. Es ist aber üblicherweise ein Subsystem des Schmierstoffsystems. Dieses Entlüftungssystem kann aus Entlüftungsröhrleitungen bestehen, die von jedem Sumpf durch die Gehäuse nach außen geführt werden. Es kann aber auch ein Entlüftungsröhr in der Niederdruckwelle eingebaut sein (center vent tube). Diese Variante kommt bei Triebwerken von GE und CFM zur Anwendung und ist in Abb. 2.7 gezeigt. Die Luft aus beiden Lagersümpfen verlässt das Triebwerk durch die Center Vent Tube am hinteren Ende der Niederdruckwelle. Dadurch sind am Triebwerk keine externen Entlüftungsleitungen notwendig [7].

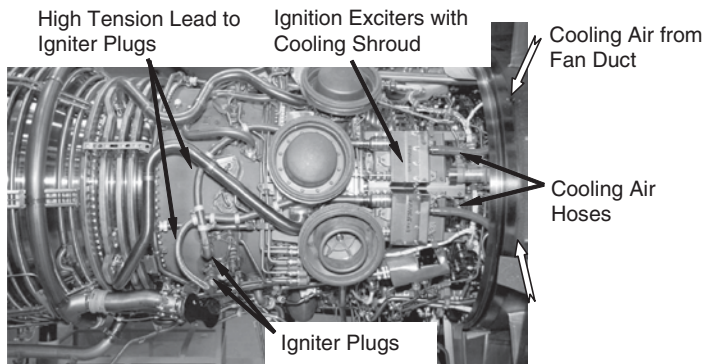


Abb. 2.8 Kühlung des Zündsystems am V2500. (© LTT)

Alle weiteren Details eines Entlüftungssystems sind in Kap. 3, Schmierstoffsystem, beschrieben.

2.2 Externe Luftsysteme

Die Luftsysteme, die außen am Triebwerk angebaut sind und wichtig für den Triebwerksbetrieb sind, werden als externe Luftsysteme (external air systems) bezeichnet. Zu dieser Gruppe gehören die Kühl- und Belüftungssysteme (cooling and ventilation systems), die Systeme zur aktiven Spaltkontrolle (active clearance control systems) sowie die Systeme der Verdichtersteuerung (compressor control systems).

2.2.1 Kühl- und Belüftungssysteme

Diese Gruppe der Kühlsysteme umfasst alle Luftsysteme zur Kühlung von Triebwerksgeräten und Zusatzgeräten. Für die Kühlung von Triebwerksgeräten wird die Kühlluft aus dem Fan-Luftstrom durch einfache Rohre und Schläuche zu den Geräten geleitet. Abbildung 2.9 zeigt den Verlauf solcher Rohre auf der linken Seite eines PW4000.

Von der Zündanlage ist fast immer das Hochspannungskabel gekühlt. Zusätzlich werden die Zündgeräte (ignition exciter) mit Luft gekühlt, wenn sie am Core Engine angebaut sind. Abbildung 2.8 zeigt diese Ausführung. Die Kühlluft strömt hier durch den Spalt, der sich zwischen dem Gehäuse des Zündgerätes und dem umgebenden Blechmantel befindet. Die Luft verlässt diesen Bereich durch die Kühlluftpassage des Hochspannungskabels. Diese Passage befindet sich zwischen der Hochspannungsisolierung und dem außen liegenden Stahlgewebe des Hochspannungskabels [11, 5].

Die Belüftungssysteme werden verwendet, um den Bereich zwischen den Triebwerksverkleidungen (cowlings) und den Triebwerksgehäusen zu belüften. Diese Belüftung ist

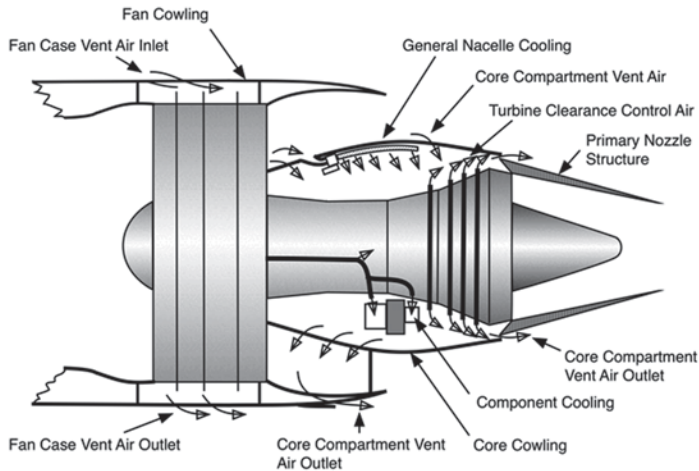


Abb. 2.9 Belüftung der Cowling-Innenräume und Kühlung der Geräte

notwendig, um die Kühlung der am Triebwerk angebauten Geräte zu gewährleisten und um bei Flüssigkeitsleckagen die Ansammlung von brennbaren Dämpfen in diesen Bereichen zu verhindern.

Die Verkleidungen, die das Triebwerk umgeben, bilden zwei oder mehr Hohlräume mit den Triebwerksgehäusen. Einer dieser Räume befindet sich zwischen Fan Cowling und Fan Case; der andere befindet sich zwischen Core Cowling und den Gehäusen des Core Engine sowie der Niederdruckturbine (LPT). Der Raum im Bereich der Fan Cowling wird mit Umgebungsluft der Außenströmung belüftet. Sie tritt durch Lufteinlässe in der Oberfläche der Verkleidung in den Innenraum ein und verlässt diesen durch Luftauslässe, die 180° versetzt zu den Einlässen angeordnet sind. Das Beispiel in Abb. 2.9 zeigt dieses Prinzip für die Belüftung der Fan Cowling.

Der Innenraum der Core Cowling wird mit Luft aus dem Fan-Kanal belüftet (Sekundärluftstrom des Triebwerks). Die Luft tritt durch Lufteinlässe oder einfache Bohrungen in der Verkleidung in den Innenraum ein. Sie verlässt diesen Bereich entweder durch einen Spalt zwischen der Core Cowling und der Primärdüse oder durch den Bereich, in der 0600 Uhr-Position, in dem die Verschlüsse der Cowling angeordnet sind. Wie groß die Kühlluftmenge ist, die diesen Bereich durchströmt, hängt von der Druckdifferenz zwischen Fan-Kanal und Umgebungsluft ab.

Um die Kühlung im Fluge in niedrigen Flughöhen zu intensivieren, gibt es an einigen Triebwerkstypen Kühlluftventile, die in diesem Flugzustand geöffnet werden. Dadurch wird der Zufluss von Kühlluft in den Innenraum der Cowling verstärkt. Die Luftströmung durch so ein System ist in Abb. 2.9 als General Nacelle Cooling bezeichnet [4].

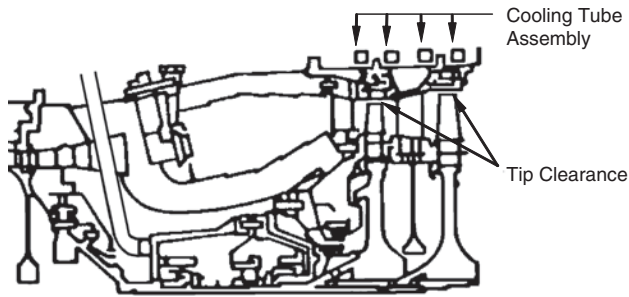


Abb. 2.10 Prinzip der Kühlung eines Active Clearance Control-Systems

2.2.2 Active Clearance Control-Systeme

Im Betrieb eines Turbinentriebwerkes werden der Turbinenrotor und das Turbinengehäuse aufgeheizt. Die Energie dazu kommt aus dem Hauptgasstrom des Triebwerks. Dessen Gastemperatur ändert sich jedoch in Abhängigkeit von Schubeinstellung und Umgebungstemperatur (outside air temperature, OAT). Aufgrund des unterschiedlichen Wärmedehnungsverhaltens von Turbinenrotor und Turbinengehäuse ändert sich bei Änderung der Gastemperatur das Spitzenspiel (tip clearance) zwischen den Turbinenschaufeln und dem Gehäuse. Ein größeres Spitzenspiel verringert den Wirkungsgrad der Turbine. Dadurch kommt es zu einem höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch (thrust specific fuel consumption, TSFC) und zu höheren Gastemperaturen, da das Regelsystem den geringeren Wirkungsgrad durch mehr Kraftstoff kompensiert. Ein zu kleines Spitzenspiel der Turbine kann zum Anlaufen der Schaufeln am Gehäuse und zu den damit verbundenen Schäden führen.

Um diese unerwünschten Effekte zu verhindern, ist eine Steuerung der Wärmedehnung des Gehäuses notwendig. Diese wird durch ein Kühlsystem mit variabler Kühlwirkung erreicht, der aktiven Spaltkontrolle (active clearance control system, ACC). Als Kühlmedium wird Luft aus dem Hochdruckverdichter oder aus dem Fan-Kanal verwendet und von außen auf die Oberfläche des Turbinengehäuses geblasen. Abbildung 2.10 zeigt die dazu notwendige Anordnung der Kühlluftrohre am Turbinengehäuse. Ein Controller steuert das System, damit für den jeweiligen Betriebszustand das optimale Spitzenspiel gewährleistet ist. Ein Nebeneffekt dieser gezielten Kühlung ist die Verringerung der Gehäusestemperatur, was die Lebensdauer des Gehäuses erhöht.

Um diese Kühlung auch bei einem Systemausfall zu gewährleisten, haben einige Triebwerkstypen Steuerventile für die Active Clearance Control, die in der geschlossenen Stellung (Fail Safe-Stellung des Ventils) noch einen Minstdurchfluss von Kühlluft ermöglichen. Dieses Design verhindert, dass die Werkstofftemperaturen der dünnwandigen Niederdruckturbinengehäuse, in einer Betriebsphase mit ausgefallenem Steuerungssystem, zu hoch werden.

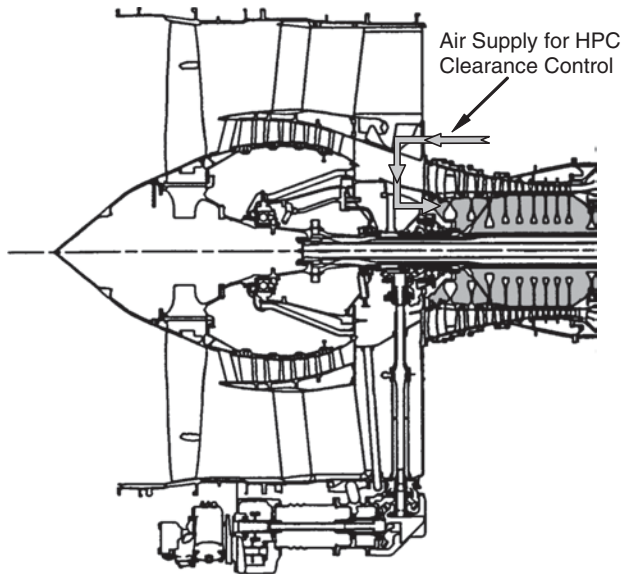


Abb. 2.11 Prinzip der HPC Clearance Control. (© CFM)

Der Wirkungsgrad des Hochdruckverdichters hat einen großen Einfluss auf den TSFC eines Triebwerks. Daher ist es sinnvoll, das Spitzenspiel der Schaufeln zu minimieren, um den Wirkungsgrad zu maximieren. In den meisten Triebwerken wird der HPC-Rotor von einem unregelmäßigen Kühlluftstrom permanent durchströmt. Das Ausdehnungsverhalten des Gehäuses ist dem des Rotors so angepasst, dass das Spitzenspiel bei größer werdender Drehzahl und zunehmendem Druckverhältnis kleiner wird. Die Bauteile des Verdichters müssen so konstruiert sein, dass bei dem sich einstellenden Spitzenspiel noch ein Sicherheitsabstand zwischen Rotor und Gehäuse bleibt. Dadurch wird das Anlaufen der Schaufeln am Gehäuse vermieden. Der Wirkungsgrad des Hochdruckverdichters kann weiter gesteigert werden, wenn dieser Sicherheitsabstand im Steigflug und Reiseflug reduziert wird, um das Spitzenspiel noch weiter zu verringern. Dies kann mit einem System erreicht werden, das den HPC-Rotor während dieser Flugphasen mit warmer Luft aus dem Verdichter aufheizt oder den internen Kühlluftstrom des HPC-Rotors absperrt. Das CFM56-5C ist ein Triebwerk mit einem Clearance Control-System für den HPC. Bei diesem Triebwerk wird es als Rotor Active Clearance Control System bezeichnet und es steuert den Zufluss von warmer Luft aus dem Hochdruckverdichter in den Innenraum des HPC-Rotors. In Abb. 2.11 ist der Weg der warmen Luft aus diesem System in den HPC-Rotor dargestellt [13].

2.2.2.1 Bauteile eines Clearance Control-Systems

Die Kühlluft wird aus dem Fan-Kanal oder einer geeigneten Stufe des HPC entnommen. In dem Luftkanal, der die Luft zum Turbinengehäuse führt, ist ein Steuerventil installiert. Mit diesem Turbine Clearance Control Valve wird die Luftmenge gesteuert, die zum Tur-

Systeme von Turbofan-Triebwerken
Funktionen der Triebwerkssysteme von
Verkehrsflugzeugen

Linke-Diesinger, A.

2014, XI, 240 S. 157 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-44569-3