



KONZEPTION UND ENTWICKLUNG VON FLUGZEUGKLIMATISIERUNGSANLAGEN

Verfasser: W. Lehle
Vortragender: Alfred Sauterleute
Liebherr Aerospace Lindenberg GmbH
88153 Lindenberg, Pfänderstr. 52

1. INHALT

Flugzeugklimatisierungsanlagen sind für den erfolgreichen und sicheren Passagierverkehr eine obligatorische Notwendigkeit, stellen damit aber auch einen der größten sekundären Leistungsverbraucher im Flugzeug dar. Deren Komplexität wird aufgrund des geforderten Einsatzbereiches und der funktionellen Anforderungen oft unterschätzt, ebenso die Wechselwirkungen mit den verbundenen Systemen. Dieser Beitrag befaßt sich mit dem Klimatisierungssystem aus der Sicht des Flugzeuges im Allgemeinen und mit dem Klimatisierungsaggregat im Speziellen. Es werden die Funktionen und deren Architekturen sowie die Besonderheiten bei der Konzeption und Auslegung dargestellt. Hierbei werden neben den eingesetzten Turbomaschinen und Wärmetauschern auch Subsysteme wie die der Stauluftkühlung oder Entfeuchtung angesprochen. Eine kurze Darstellung der gegenwärtigen Entwicklungstendenzen runden den Beitrag ab.

2. EINFÜHRUNG

Im Wesentlichen hat das Klimatisierungssystem die Aufgabe, die Frischluftzuführung, die Bedruckung und die Temperierung der Kabine sicherzustellen. In der Regel wird Frischluft aus dem Triebwerk entnommen, über Wärmetauscher und Expansion auf Kabinendruck konditioniert und der Kabine zugeführt. Die Druckhaltung der Kabine wird über das kontrollierte Ablassen von verbrauchter Kabinenluft realisiert.

In Passagierflugzeugen wird diese Aufgabe ausschließlich von luftgestützten offenen Prozessen erfüllt. Der Einsatz von geschlossenen Kältemittelprozessen findet vorwiegend dort Anwendung, wo hohe Rezirkulationsraten vorherrschen, wie bei Avionikkühlungen und galley cooling systems. Neuerdings werden auch Hybridsysteme zur Konditionierung von Kabine und Avionik in Kampfflugzeugen eingesetzt.

3. ANFORDERUNGEN

Die Hauptanforderungen innerhalb der sicherheitsrelevanten Regularien der FAA und JAA sind die Auslegung des Systems auf 0,55 lb/min Frischluft pro Person, was im Reiseflug 4,7 l/s (10 CFM) entspricht. 73 % diesen Wertes dürfen im Betrieb auch im Fehlerfall nicht unterschritten werden. Diese Durchsatzwerte stellen einen der wichtigen Auslegungseckpunkte dar, insbesondere im Sinkflug bei niedrigen Triebwerksdrücken. Für die Ventilierung der Kabine ist diese Frischluft allerdings nicht ausreichend, deshalb wird ein Umluftanteil beigemischt, der die notwendigen

Luftgeschwindigkeiten bezüglich des Kabinenkomforts sicherstellt. Dieser Rezirkulationsstrom beträgt in der Regel 40 – 50 % des Gesamtluftstromes.

Für die Kabinentemperaturen werden seitens der Behörden 35 °C gefordert, die bei einer längeren Verweildauer als 90 min nicht überstiegen werden dürfen. Diese Forderung ist allerdings mehr für die Betriebszuverlässigkeit und damit für die notwendigen Backup Strukturen in Fehlerfällen maßgebend. Die zu erreichenden Kabinentemperaturen für den normalen Flugbetrieb bewegen sich zwischen 21 und 27 °C je nach Einstellung der Flugbegleitung und Flugphase. Die hierfür abzuführenden spezifischen Wärmemengen bewegen sich an einem heißen Tag am Boden zwischen 150 und 200 W/Passagier, je nach Flugzeuggröße. Bei einem Großraumflugzeug mit ca. 350 Passagiere bedeutet dies eine Kälteleistung von 52 KW. Hinzu kommen Flight Deck Wärmelasten zwischen 3 und 4 kW. Zusätzliche Leistungen leiten sich aus Cargoausführungen, Rezirkulationsverlusten etc. ab, die Mehrleistungen am Beispiel vom Airbus A330 von bis zu 70 % fordern. Die Leistungsanforderungen lassen sich jedoch nicht nur aus den stationären Gleichgewichtszuständen ableiten. Zumeist werden die maximalen Kühl- und Heizleistungen von den dynamischen Abkühl- und Aufheizevorgängen bei Inbetriebnahmen bestimmt. Typische Werte für eine Abkühlung von 40°C auf 24°C sind 30 Minuten. Die Systemkonzeption wird auch von den statischen und dynamischen Heizleistungsanforderungen wesentlich beeinflusst. Aufheizevorgänge verlangen nicht selten bis zu 70 °C Frischlufttemperatur, um die Kabine von -25 bis +21 °C in 30 min aufzuheizen.

Zu einer guten Luftqualität gehört auch ein gewisser Feuchtigkeitsgehalt. Ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt in der Kabine, der sich am Boden und in niedrigen Flughöhen in Form von Nebel einstellen kann, erfordert eine Entfeuchtung der zuzuführenden Luft. Die Anforderungen werden in der Regel so gelegt, daß exzessives freies Wasser in den Verteilungssystemen und resultierende Nebelfahnen an den Lufteinlässen in der Kabine limitiert werden, aber auch daß Leistungsverluste aufgrund notwendiger Drainagen minimiert werden können.

Eine Befeuchtung wird gegenwärtig nur für spezifische Bereiche vorgesehen und von separaten Befeuchtungssystemen bereitgestellt.

4. KONZEPTION

Die prozesstechnischen Ausführungen von Klimaanlage für Passagierflugzeuge haben sich in den letzten 20 Jahren immer mehr angeglichen. Dem Luftabzapfsystem am Triebwerk ist das Klimatisierungsaggregat bestehend aus einem Turbokompressor mit Axialgebläse, Wärmetauschern und Wasserabscheidersystem nachgeschaltet. Danach erfolgt die Zumischung der Rezirkulation und die Luftverteilung. Die regelungstechnischen und überwachenden Ausführungen sind entsprechend der Entwicklung im Elektronikbereich gefolgt.

4.1. Die Luftquelle

Die Hauptverdichtung der Frischluft auf das notwendige Druckniveau, das durch den erforderlichen Kabinendruck und den Kälteprozess bestimmt wird, übernehmen die Verdichterstufen des Triebwerkes. Diese garantieren gleichzeitig auch die erforderliche Zuverlässigkeit dieser Funktion. Da der zeitliche Leistungsbedarf des Klimasystems nicht mit dem Verlauf der Triebwerksleistung übereinstimmt, müssen mehrere Abzapfstellen vorgesehen werden. Aus Komplexitäts- und Kostengründen sind diese in der Regel auf zwei Zapfstellen limitiert. Die erste befindet sich nach der Niederdruckstufe und wird im Reiseflug verwendet. Bei Leerlauf der Triebwerke im Sinkflug, wird auf die höhere Stufe umgeschaltet.

Im weiteren Verlauf werden die Drücke und Temperaturen auf ein Niveau limitiert, das einen sicheren Betrieb der nachgeschalteten Systeme und Gewichtsreduzierungen durch Wandstärkenreduzierung und Aluminiumeinsatz erlaubt. Bild 1 zeigt am Beispiel des Airbus A320 die Verschaltung des Abzapfsystems.

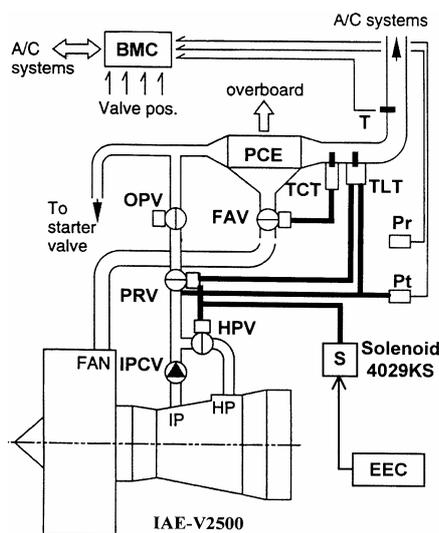


BILD 1. Abzapfsystem Airbus A320

Am Boden wird die erforderliche pneumatische Leistung von der Auxiliary Power Unit bereitgestellt.

4.2. Die Durchsatzregelung

Eine der wichtigsten Funktionen ist die Sicherstellung ausreichender Frischluft. Abgesehen von kleineren Systemen, in denen keine Durchsatzregelung stattfindet und dadurch die Frischluftmengen vom Triebwerksbetriebszustand abhängen, kommen in größeren Flugzeugen aus Wirtschaftlichkeitsgründen Durchsatzregelventile zum Einsatz. Der Durchsatz wird in Venturirohren über Drucksensoren ermittelt und daraus über den Rechner entsprechende Stellsignale für das Ventil generiert, wobei Genauigkeiten zwischen 4 und 6 % erreicht werden. Alternative Durchsatzmessmethoden wie die der Hitzdrahtanemometer und deren abgewandelten Formen werden hierfür bis dato als zu ungenau und zu sensibel hinsichtlich Verschmutzung betrachtet.

Die Aufrechterhaltung des Durchsatzes ist eine der wenigen sicherheitskritischen Funktionen innerhalb des Klimatisierungssystems. Vom elektrischen Bordnetz vollständig unabhängige vollpneumatische Durchsatzregelventile bestanden aus mehreren verschalteten pneumatischen Kammerensystemen, die die einzelnen Funktionen Durchsatzmessung, höhenabhängige Durchsatzvorgabe und Höhenlimitierung lieferten. Die aus den Sicherheitsanalysen sich ergebenden obligatorisch notwendigen back up Funktionen wurden ebenfalls pneumatisch ausgeführt. In der Gegenwart z.B. beim A318 ist die Entwicklung bei einfacheren und wesentlich flexibleren elektropneumatischen Ventilen angekommen, die ihre Redundanzforderungen über die redundanten A/C Netze erfüllen.

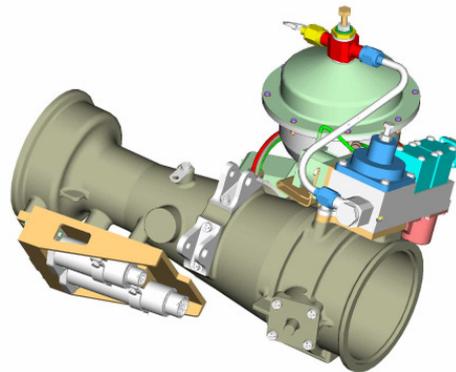


BILD 2. A318 Durchsatzregelventil

4.3. Das Kühlaggregat

4.3.1. Der Kühlprozess

Das Grundprinzip arbeitet nach dem linksläufigen Joule-Prozess. Die verdichtete Luft aus dem Triebwerk wird abgekühlt und in einer Turbine auf tiefere Temperaturen entspannt. Die dabei gewonnene Leistung wird einem auf der gleichen Welle angeordnetes Gebläserad zugeführt, das die erforderliche Kühlluft über den Wärmetauscher fördert. Dieses sehr einfache System erfordert allerdings sehr hohe Drücke und wurde hauptsächlich in militärischen Anwendungen eingesetzt.

Die heute gängigen Flugzeugklimaanlagen für Passagierflugzeuge beinhalten eine weitere Kompressionsstufe, die neben dem Lüfterrad ebenfalls von der Kühlturbine gespeist wird. Die heiße Druckluft von ca. 200 °C wird zunächst in einem ersten Wärmetauscher mit Außenluft gekühlt, im Radialverdichter wiederum auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und in einem zweiten Wärmetauscher wieder abgekühlt. Durch den zweiten Temperatur- und Druckhub wird eine kompaktere Bauweise und eine Leistungssteigerung erreicht, da im Flug die gesamte Turbinenarbeit über den Kompressor wieder in den Prozess zurückgeführt werden kann. Das Gebläserad dreht durch den Staudruck nahezu momentfrei. Der vorgeschaltete erste Wärmetauscher erniedrigt die Verdichtereintrittstemperatur und verbessert dadurch die Energiebilanz und gewährleistet den Einsatz von Aluminium auch für den zweiten Wärmetauscher. Bild 3 zeigt ein solches System am Beispiel A318.

Die neueste Ausführung ist die zweistufige Entspannung, bei der zwischen den Stufen der Kondensator für die Entfeuchtung geschaltet ist.

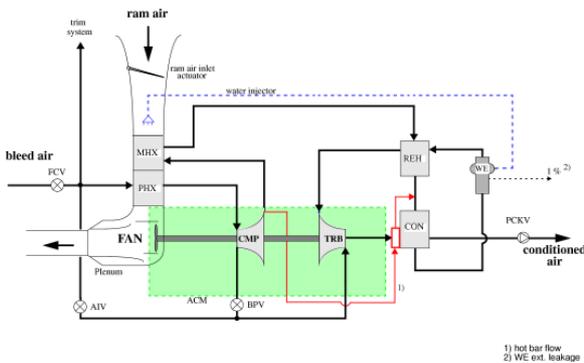


BILD 3. Airbus A318 Klimatisierungsaggregat

Die Abstimmung der Komponenten untereinander und die Anpassung an die Triebwerks- und APU Charakteristiken bestimmt letztendlich die Ausführungsvarianten des Systems. Hierbei werden die Parameter Kühl- und Heizleistungskapazität, Auslassfeuchte, Widerstandsverhalten, Akustik und Gewicht in ein ausgewogenes Verhältnis gebracht.

Der Widerstand eines Aggregats wird wesentlich von der Turbinenleitkranzöffnung bestimmt. Das sich dabei einstellende Druckverhältnis über der Turbine bestimmt wiederum das Kühlpotential. Sind die Verhältnisse von Massenstrom/Druck von APU und Triebwerk ähnlich können in der Regel fixe Leitkranzöffnungen eingesetzt werden. Mit den zunehmenden Triebwerksbypassverhältnissen wird der Einfluss der Luftabzapfung auf den Energiehaushalt größer, so dass das Klimaaggregat mit kleineren Drücken zurecht kommen muss. Die hierfür geeigneten zweistufigen und variablen Leitkränze sind immer wieder Gegenstand von Untersuchungen, werden jedoch oft aus Kostengründen verworfen. Bild 4 verdeutlicht die Zusammenhänge zur

Kompromissfindung zwischen notwendiger Wärmetauschergröße und Leitkranzöffnung.

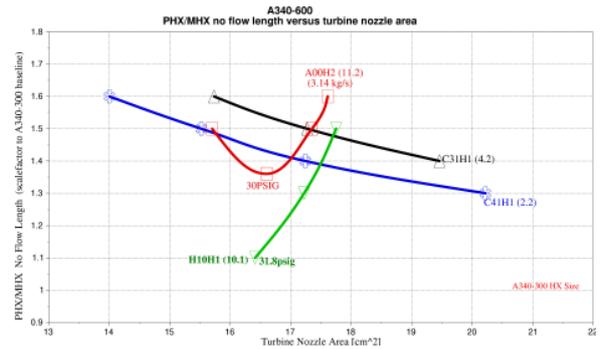


BILD 4. Wärmetauscher und Turbinenabstimmung

Bild 4: Die Anforderungen des Reisefluges (C41H1) bilden einen Schnittpunkt mit dem APU Betrieb (A00H2) bei Größenfaktor 1,4. Bei reduzierten Triebwerksdrücken wandern die Reiseflugkurven (C41 und C31) nach rechts. Die Wahl besteht dann aus größeren Wärmetauschern oder geteilten bzw. variablem Turbinenleitkranz.

Ein weiterer Parameter bildet die Balance zwischen den Rädern der Turbomaschine, dargestellt in Bild 5. Die Aufnahmeleistung des Gebläserades liegt gewöhnlich zwischen 15 und 30 % der Turbinenleistung. Ist der APU Druck eher niedrig, muss die Wärmetauscherleistung höher sein, was wiederum höhere Kühlluftdurchsätze und größere Gebläseleistungen erfordert. Sehr hohe Gebläseleistungen erfordern jedoch in der Regel akustische Dämmmaßnahmen in der Gebläsekammer.

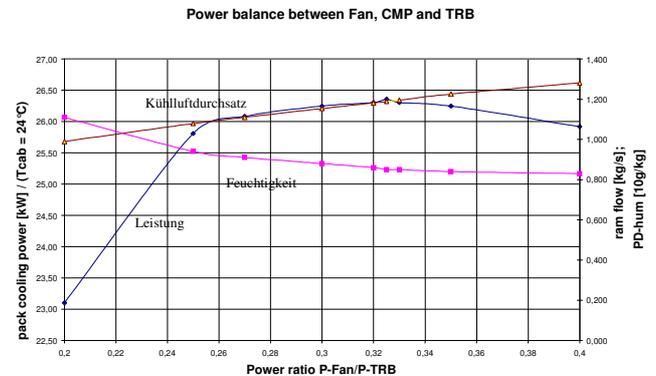


BILD 5. Radbalanceanalyse der Turbomaschinenräder

Die Abnahme der Wellenleistung vom Gebläserad ist natürlich nur dann gewünscht, wenn diese für die Herstellung der nötigen Wärmesenke erforderlich ist. Dies ist am Boden im Kühlbetrieb der Fall, bei dem das Gebläse Umgebungsluft in den Stauluftkanal und über die Wärmetauscher fördert. Durch die kompakte Bauweise der Turbomaschine muss die Luft in einer eher ungünstigen Strömungsführung zum Gebläse geleitet werden. Im Fluge, unter niedrigen statischen Drücken, wird das Gebläse durch Rückschlagventile bzw. Rückschlagklappen umgangen, wobei strömungsgünstige

Führungen unabdingbar sind. Die Ausführungen reichen von geometrisch fixen Jet Pumps über einfache Check Valve Lösungen bis zu aufwendigeren multiblen Check Valve Kränzen (Bild 6) .

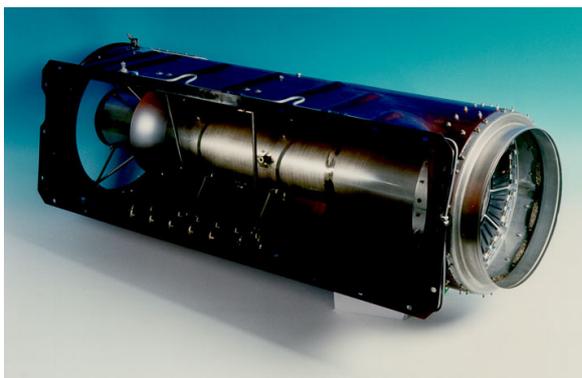


BILD 6. Radial Check Valve Plenum A340-600

Der ausschließliche Einsatz von Jet Pumps setzt voraus, daß einerseits die Durchlässigkeit im Flugbetrieb ausreichend groß ist, andererseits eine Rückströmung bei der Gebläseförderung am Boden im Kühlfall unterbunden wird. Kann diese Forderung nicht erfüllt werden, müssen Kombinationen zwischen Check Valve und Jet Pump in Betracht gezogen werden. Die Jet Pump hat zusätzlich den Vorteil, daß sie eine Rückströmung bzw. Gebläsekreisströmung erlaubt, die den Regelbereich der Stauluftklappen zu kleineren Öffnungen hin vergrößern. Die Abstimmung der Gebläsecharakteristik mit der Gebläsekammercharakteristik hinsichtlich des Pumpverhaltens muss sehr sorgfältig durchgeführt werden, wobei der Einsatz von CFD Werkzeugen obligatorisch geworden ist (Bild 7).

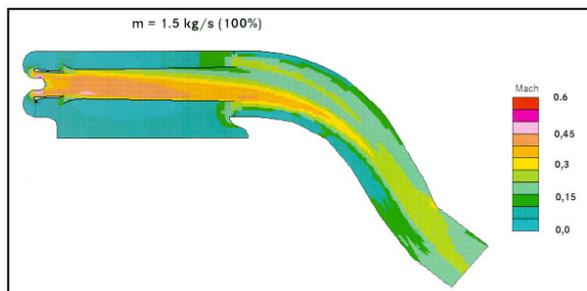


BILD 7. Strömungsdynamische Untersuchung einer Gebläsekammer

4.3.2. Die Entfeuchtung

Etwa 25 % des gesamten Leistung an heißen Tagen am Boden wird von der Entfeuchtung beansprucht. Zur Entfeuchtung werden in der Regel zwei Verfahren angewendet, die Niederdruck und die Hochdruckwasserabscheidung. Die Niederdruckwasserabscheidung besteht aus einem Tröpfchensammler aus Gewebematerial und einem nachgeschalteten Zentrifugalabscheider, die nach der Kühltrieb angeordnet sind. Diese Ausführung wird

heute kaum mehr eingesetzt, da sie aufgrund der Verschmutzungsanfälligkeit sehr wartungsaufwendig ist. Auch kann das Klimatisierungssystem nicht unter 0 °C betrieben werden, was bei hohen Wärmelasten hohe Frischluftdurchsätze erfordert. Jedoch aus Gründen des niedrigen Gewichtes, kleinen Einbauraumes und aus Kostengesichtspunkten bleibt diese Ausführung auch heute noch ein potentieller Kandidat bei der Wasserabscheidung.

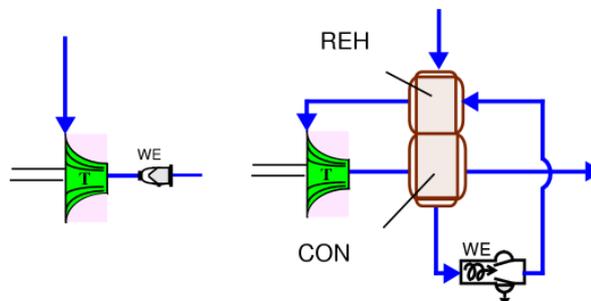


BILD 8. Wasserabscheidung

Die Anwendung der Hochdruckwasserabscheidung ermöglicht die Erweiterung des Temperaturbereiches unter den Gefrierpunkt, womit größere Entspannungsverhältnisse und damit größere spezifische Kühlleistungen erreichbar sind. Die Hochdruckwasserabscheidung findet vor der Turbine statt und nutzt die verringerte Wasseraufnahmefähigkeit von Luft bei höherem Druckniveau. Die aus dem Hauptwärmetauscher austretende Luft wird in einem Kondensator durch kalte Turbinenaustrittsluft weiter abgekühlt. Das dabei kondensierende Wasser verlässt den Kondensator in Tropfenform, das in einem Zentrifugalabscheider abgeschieden, dem Stauluftkanal zugeführt und wieder verdampft wird.

Der durch den Kondensator der Turbine entzogene Wärmestrom wird teilweise durch die Ausführung eines Reheaters regeneriert. Auf der warmen Seite findet eine Vorkühlung statt, auf der kalten Seite eine Rückerwärmung und Verdampfung des Restwassers. Diese Verdampfung führt zusätzlich zu einer Standzeitverlängerung des Turbinenleitringes durch Verhinderung von Erosionsschäden. Der Einsatz eines Reheaters hängt letztlich von der Kosten und Einbausituation des Flugzeuges ab.

Die Entfeuchtung der Luft vor der Turbine verhindert natürlich nicht vollständig die Entstehung von Eis und Schnee am Turbinenaustritt und Kondensatoreintritt. Die Haftung ist im wesentlichen abhängig von der Temperaturlage und Schnee bzw. Eisstruktur. Der Kondensator wird aus diesem Grunde so ausgeführt, dass die Metalltemperaturen in den kritischen Bereichen über dem Gefrierpunkt zu liegen kommt. Zusätzlich werden diese kritischen Bereiche beheizt (Bild 3) und mittels Drucksensoren überwacht. Werden Druckdifferenzen gemessen, die die Kühlleistung und das Durchsatzvermögen zu unakzeptabel reduzieren, wird über ein Enteisungsventil angewachsenes Eis abgeschmolzen.

4.3.3. Die Temperaturregelung

Die Grundausführung der Temperaturregelung ist der

ausschließliche Bypass des gesamten Aggregats. Diese Anwendung findet sich zumeist in kleineren Regional- und Commuterflugzeugen. Diese Ausführung hat den Nachteil, daß in Teillastfällen Druckenergie abgedrosselt werden muß. Um das zu vermeiden, werden bei größeren Flugzeugen aerodynamisch ausgeführte Stauluftklappen, nach den NACA Einlässen angeordnet, eingesetzt. Diese werden in Kombination mit dem Bypass so geregelt, daß weitmöglichst der gesamte Druck im Kühlprozess genutzt werden kann. Durch diese Optimierung wird die Stauluft reduziert und eine Reduzierung des Flugzeugwiderstandes erreicht. Weiterhin wird eine größere Heizkapazität erreicht, wodurch die Positionierung des Bypasses nach dem ersten Wärmetauscher möglich wird. Die dort herrschenden niedrigeren Temperaturen erlauben größere Bypassdurchsätze und damit höhere Frischluftstraten bei sehr niedrigen Triebwerksdrücken.

4.3.4. Konstruktive Ausführungen

Die konstruktiven Ausführungen werden wesentlich von der Flugzeugkonzeption bestimmt. In Flugzeugen mit Hecktriebwerken werden die Kühleinheiten stehend eingebaut. Dafür sprechen drei Gründe. Durch den sich nach hinten verjüngenden Rumpf wird die Breite reduziert. Ein Mittelgang muss zwischen den beiden Kühleinheiten aus Wartungsgründen frei gehalten werden, und um den Zugang zum Tail Cone zu ermöglichen. Die Stauluft wird über den Einlaß-Scoop von oben nach unten geführt.

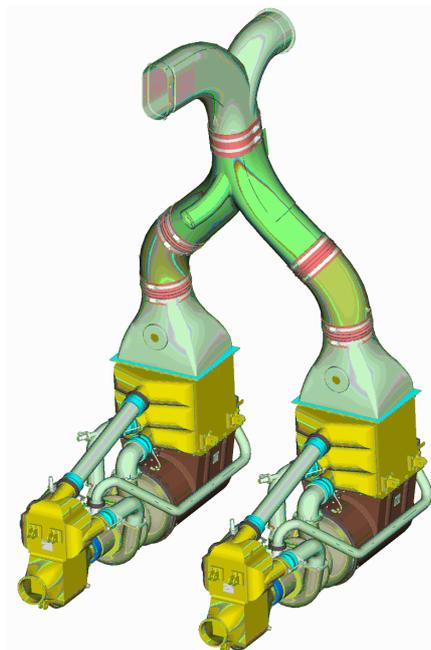


BILD 9. Stehender Einbau im Global Express

Bei Schulterdeckern wie die DO328 oder A400M werden die Kühleinheiten im oberen unbedruckten mittleren Flügelbereich liegend eingebaut, was eine äußerst flache Ausführung erfordert.

Bei Tiefdeckern werden die Kühleinheiten ebenfalls liegend, jedoch im unteren unbedruckten mittleren Flügelbereich, der sogenannte Belly Fairing, eingebaut.

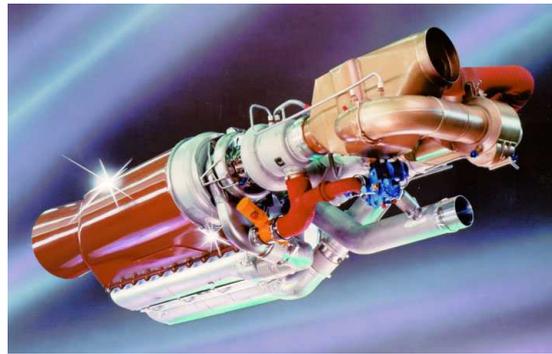


BILD 10. Klimaaggregat A330/340

4.4. Komponentenausführungen

4.4.1. Die Turbomaschine

Die Turbomaschine ist sozusagen das Herz des Klimaaggregats. Die Ausführungen sind vielfältig:

- 1) Turbofans mit Radialturbine und Axialgebläse.
- 2) Turbokompressoren mit Radialturbine und Radialkompressor
- 3) 3-Rad-Maschinen mit Radialturbine, Radialkompressor und Axialgebläse auf einer Welle.
- 4) 4-Rad-Maschinen mit zwei Radialturbinen, Radialkompressor und Axialgebläse auf einer Welle.

Moderne Turbomaschinen sind mit axialen und radialen Luftlagern ausgestattet, die wartungsfreie Betriebszeiten bis 50 000 Std. erreichen (MTBF).



BILD 11. 3-Rad Turbomaschine mit Luftlager und Turbinenstufe

Die den Widerstand bestimmenden Turbinenleitkränze werden zum einen als Leitschaufelkranz ausgeführt, zum anderen als Düsenleitkranz, der wesentlich kostengünstiger gefertigt werden kann und deshalb bei kleineren Anlagen vorherrscht. Allerdings muss auch mit kleineren Wirkungsgraden gerechnet werden.

4.4.2. Die Wärmetauscher

Die Wärmetauscher in Klimatisierungsaggregaten werden in Aluminium ausgeführt. In der Regel sind es Kreuzwärmeströmer. Der zweite Wärmetauscher im

Prozesskreis wird aus Gründen hoher Wirkungsgradforderungen und Einbaugründen als Kreuzgegenströmer ausgeführt. Die Übertragungsflächen sind Platten und Rippen mit größeren Abständen auf der Niederdruckseite als auf der Hochdruckseite. Die Rippen auf der Niederdruckseite sind in Wellenform ausgeführt, um eine größere Unempfindlichkeit gegen eine Verschmutzung zu erreichen. Rippendicken werden mit bis 0,08 mm auf der Hochdruckseite und 0,1 mm auf der Niederdruckseite ausgeführt.

5. ENERGIEBEDARF UND ENTWICKLUNGSTENDENZEN

Bei der Bewertung unterschiedlicher Konzeptionen werden die einzelnen Charaktere auf die zugehörigen Kosten zurückgeführt. Neben den Herstell-, Entwicklungs- und Wartungskosten spielen dabei auch die Brennstoffverbrauchskosten eine gewichtige Rolle, die etwa 15 % der direkten Flugzeugbetriebskosten (DOC) ausmachen.

Der durch das Klimasystem verursachte Brennstoffbedarf wird bestimmt durch die Frischluftabzapfung, den Stauluftdurchsatz und das Gewicht, wobei der Zapflanteil über 80 % beträgt. Die Frischluftmengen sind weitgehend durch die Passagieranforderungen

festgelegt. Der Gesamtanteil des Klimaaggregats am Brennstoffverbrauch von derzeit etwa knapp 5 % (Bild 12) wird deshalb für Zapflsysteme nicht wesentlich zu verbessern sein.

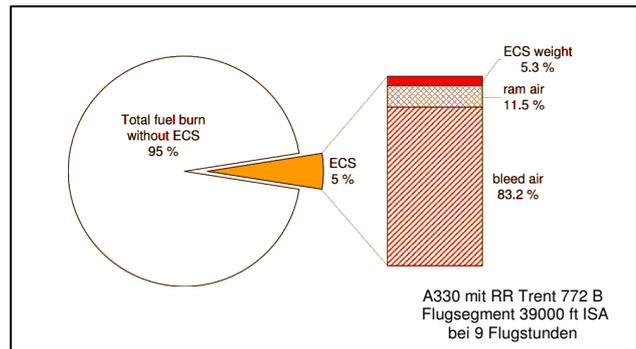


BILD 12. Anteiliger Brennstoffverbrauch des Klimaaggregats

Aus diesem Grunde konzentrieren sich gegenwärtige Technologieprogramme in Europa und USA auf zapfltlose Klimatisierungssysteme, bei denen bis zu 20% Brennstoffeinsparung erwartet werden.