

## 2 Klimaanlage

### Air Conditioning, ATA 21

#### 2.1 Definition

*Die Einheiten und Komponenten, die Möglichkeiten bieten um Luft zur Belüftung der Räume innerhalb des Druckrumpfes zu behandeln, zu erwärmen, zu kühlen, zu filtern sowie im Druck und im Feuchtigkeitsgehalt zu regeln. Beinhaltet Kompressoren, Kühlaggregate, Heizungen, Kraftstoffsysteme für Heizungen, Expansionsturbinen, Lufteinlässe, Luftkanäle etc. (ATA 100)*

#### 2.2 Grundlagen

##### Auswirkung von atmosphärischen Parametern

In der Troposphäre sinkt die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe. In der Stratosphäre, oberhalb von 11000 m (36089 ft), ist die Lufttemperatur konstant und beträgt -56,5 °C. Der Luftdruck nimmt ebenfalls mit der Höhe ab. Obwohl der Sauerstoffgehalt in der Luft mit 21 % unabhängig von der Höhe ist, sinkt der Partialdruck<sup>1</sup> des Sauerstoffs mit zunehmender Höhe durch den Abfall des Drucks. Unser Körper ist an einen Sauerstoffpartialdruck von 0,21 multipliziert mit dem Luftdruck auf Meereshöhe, gewöhnt. Wenn wir in großen Höhen überleben wollen, muss:

- a) der Sauerstoffanteil erhöht werden (durch die Verwendung eines Sauerstoffsystems) oder
- b) der Totaldruck in Meereshöhe in der Flugzeugkabine beibehalten werden (durch ein Druckregelungssystem, pressurization system).

Für Zivilflugzeuge (civil aircraft) wird generell Option b) herangezogen. Flüge ohne Druckkabine<sup>2</sup> und ohne zusätzliche Sauerstoffversorgung sind auf eine Höhe von 10000 ft beschränkt. Selbst mit Sauerstoffversorgung ist die Kabinenhöhe<sup>3</sup> (cabin altitude) auf 20000 ft begrenzt. Militärflugzeuge benutzen teils auch eine Kombination aus a) und b).

##### Zweck einer Klimaanlage

Die Klimaanlage soll ein für den Menschen angenehmes Klima im Inneren des Flugzeugs schaffen. Abhängig vom Flugzeugtyp und der Dienstgipfelhöhe, kann die Klimatisierung einfach eine *Belüftung* der Flugzeugkabine sein. Dies geschieht durch die Zufuhr von Frischluft mit Hilfe von Lüftungsklappen (air vents). Wenn die Temperatur angepasst werden muss, so

---

<sup>1</sup> **Partialdruck:** Einzeldruck eines Gases in einem Gasgemisch (**AIR 171**). Gasanteil multipliziert mit dem Druck des Gasgemisches.

<sup>2</sup> **Druckkabine:** Eine Flugzeugkabine, die abgedichtet und mit einem Hilfssystem ausgestattet ist, um einen höheren Druck in der Kabine zu erzeugen, als in der umgebenden Atmosphäre vorherrscht (**SAE 1998**).

<sup>3</sup> **Kabinenhöhe:** Die Höhe, die nach der Standardatmosphäre dem Kabinendruck entspricht (**SAE 1998**).

benötigt man Techniken zum *Heizen* und *Kühlen*. Kann ein Flugzeug auch in großen Höhen operieren, so können die meisten Wetterlagen überflogen werden. Dadurch wird der Flug komfortabler, weil Turbulenzen der Luft mit der Höhe abnehmen. Damit das Flugzeug in diesen Höhen operieren kann, benötigt man eine *Bedruckung* (pressurization) der Flugzeugkabine. In einigen Teilen der Welt ist die relative Feuchtigkeit<sup>4</sup> ziemlich hoch. Daher kommen Wasserabscheider (water separator) zum Einsatz, die die Kabinenluft *entfeuchten*. Des Weiteren ist dies erforderlich, um Schäden an der elektrischen und elektronischen, der Flugzeugisolierung und der Struktur zu vermeiden. Ebenso minimiert die reduzierte Luftfeuchtigkeit das Beschlagen der Fenster und Windschutzscheiben. In einer Höhe von 40000 ft beträgt die relative Feuchtigkeit 1 % bis 2 %. Bezogen auf das Komfortniveau für die Besatzung und die Passagiere (30 %) ist dies sehr niedrig. Trotzdem ist eine *Befeuchtung* der Kabinenluft, wie bereits beschrieben, ungünstig. Außerdem würden zusätzliche Kosten für den Transport des benötigten Wassers entstehen, weil die Wassermasse in der Luft gehalten werden muss und dafür Kraftstoff erforderlich ist (**AIR 1609**).

## Anforderungen

Die Klimaanlage ist ein sicherheitskritisches System (safety-critical system), weil die Passagiere und die Besatzung auf eine einwandfreie Funktion angewiesen sind. Verkehrsflugzeuge (transport category aircraft) besitzen daher zwei unabhängige Subsysteme (subsystems), um die Anforderungen an Sicherheit und Komfort zu erfüllen. Die Zulassungsvorschriften fordern Mindeststandards. Der Flugzeughersteller kann jedoch höhere Anforderungen festlegen, um den Komfort für die Passagiere zu erhöhen.

### Belüftung (ventilation)

- Unter normalen Bedingungen werden 4,7 l/s ( $10 \text{ ft}^3/\text{min} \approx 10 \text{ lb}/\text{min}$ ), für jedes Besatzungsmitglied, gefordert (CS-25.831(a)).
- Die Hersteller stellen üblicherweise ein Minimum von 7,8 l/s, für jede Person im Flugzeug bereit.
- Im Fall eines Fehlers (mit einer Wahrscheinlichkeit von nicht mehr als  $10^{-5}$  1/FH) sollte die Frischluftversorgung pro Person, nicht weniger als 3,1 l/s (0,4 lb/min) betragen. Die Luft aus dem Rezirkulationssystem (recirculation system) darf nicht berücksichtigt werden (CS-25.831(c)).
- Um einen Luftzug in der Nähe der Passagiere zu vermeiden, sollte die Luftströmung auf 0,2 m/s (40 ft/min) begrenzt sein (**AIR 1168/3**). Individuelle Luftauslässe weisen hingegen Luftaustrittsgeschwindigkeiten von 1,0 m/s auf. Klimatisierte Luft darf mit maximal 2,0 m/s aus den Kabinenauslässen in das Flugzeuginnere strömen.

---

<sup>4</sup> **Relative Feuchtigkeit:** Das Verhältnis der aktuellen absoluten Feuchtigkeit bezogen auf die absolute Feuchtigkeit bei Sättigung der Luft (bei gleicher Temperatur und gleichem Druck) (**SAE 1998**).

### Temperaturregelung (temperature control)

- Die Temperaturregelung vom Cockpit sollte normalerweise den Bereich von 18 °C bis 30 °C abdecken.
- Spezifizierte Heiz- und Kühlanforderungen müssen erfüllt werden. Dabei sind verschiedene stationäre und transiente Szenarien vorgegeben. Die Erfahrung zeigt:
  - Während des Reiseflugs muss meist gekühlt werden (eine Ausnahme sind Flüge ohne Passagiere).
  - Die Beanspruchung an das Kühlsystem ist an einem heißen Tag und mit Passagieren an Bord am Boden höher als im Reiseflug.
  - Transiente Szenarien werden sehr wahrscheinlich die Heiz- und Kühlleistung der Klimaanlage bei zivilen Unterschallflugzeugen (civil subsonic aircraft) bestimmen:
    - Erwärmen der Kabine aus einem ausgekühlten Zustand von -32 °C auf 21 °C innerhalb von 30 min (keine Passagiere, keine anderen internen Wärmequellen an Bord, Türen geschlossen)
    - Kühlen des Flugzeugs von 46 °C auf 27 °C innerhalb von 30 min (keine Passagiere, keine anderen internen Wärmequellen an Bord, Türen geschlossen) (**ARP 85**).
  - Für Hochgeschwindigkeitsflugzeuge, werden die Anforderungen an das Kühlsystem, durch das Aufheizen der Flugzeughaut bestimmt. Die Erwärmung entsteht durch die Reibung der Luftmoleküle an der Flugzeugaußenhaut. Im Flugbereich unter Mach 2, ist die Temperatur der Flugzeugaußenhaut, gleich der Recoverytemperatur<sup>5</sup>:  
$$T_{skin} \approx T_{ambient} \cdot (1 + 0.18 \cdot M^2)$$
*M* bezeichnet dabei die Flugmachzahl.

### Druckregelung (pressure control) (für Flugzeuge mit einer Druckkabine):

- Unter normalen Bedingungen, darf die Kabinenhöhe einer Druckkabine nicht mehr als 2440 m (8000 ft) betragen. (CS-25.841(a)).
- Im Falle eines Fehlers (mit einer Wahrscheinlichkeit von nicht mehr als 10<sup>-5</sup> 1/FH), darf die Kabinenhöhe nicht mehr als 4570 m (15000 ft) betragen (CS-25.841(a)).
- Um den Passagieren ein gewisses Maß an Komfort zu bieten, sollte die Steiggeschwindigkeit der Kabine nicht mehr als 2,5 m/s (500 ft/min) betragen. Als Sinkgeschwindigkeit sollte 1,5 m/s (300 ft/min) nicht überschritten werden (**ARP 1270**).
- Die Durchflussmenge der Luft sollte um 10 % bis 15 % höher gewählt werden, als sich aus der maximalen Sinkgeschwindigkeit des Flugzeugs ergibt, um im Falle einer Leckage die Bedruckung der Kabine gewährleisten zu können. Der Druckaufbau in der Kabine sollte mit Luftströmungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s (300 ft/min) stattfinden (**ARP 85**).

---

<sup>5</sup> **Recoverytemperatur:** Ist die Gleichgewichtstemperatur eines Objektes in einer Strömung. Sie ist immer kleiner als die Totaltemperatur (**AGARD 1980**)

## 2.3 Heizsysteme

Das simpelste Heizsystem, welches häufig in Leichtflugzeugen verwendet wird, besteht aus einer **Heizmuffe** (heater muff), die um das Abgasrohr des Triebwerks verlegt ist. Die Heizmuffe wird über eine Klappe mit Stauluft (ram air) versorgt. Die aufgewärmte Luft wird über Rohre in die Kabine geleitet, wobei ein Ventil die Durchflussmenge regelt. Als Alternative zur Heizmuffe könnte ein Teil des Abgases durch einen **Wärmetauscher** (heat exchanger) geführt werden. Im Wärmetauscher würde dann die Stauluft oder die rezirkulierte Luft aus der Kabine, erwärmt und der Kabine zugeführt werden.

In größeren Flugzeugen kommt häufig ein **Verbrennungsheizer** (combustion heaters) zum Einsatz. Das Heizaggregat verbrennt Kraftstoff in einer Brennkammer. Durch die Verbrennung, wird ein Luftstrom aufgewärmt, der um die Brennkammer herum geführt und über Rohre in die Kabine geleitet wird.

Turbinengetriebene Flugzeuge (turbine engine-powered aircraft), die keine Druckkabine besitzen, zapfen normalerweise heiße verdichtete Luft vom Triebwerksverdichter ab, um die Kabine zu erwärmen. Diese Luft nennt man **Zapfluft** (bleed air). Die Temperaturregelung wird durch das Vermischen von Zapfluft mit Umgebungsluft, oder rezirkulierter Luft aus der Kabine erreicht.

Eine **Flugzeugdruckkabine** wird normalerweise mittels des Luftstroms geheizt oder gekühlt, der auch für die Druckregelung der Kabine zugeführt wird. Der kombinierte Prozess der Temperatur und Druckregelung wird in den nächsten Abschnitten genauer erörtert.

## 2.4 Kühlsysteme

Es gibt mehrere **Wärmequellen** die im Flugzeug einen Kühlungsbedarf hervorrufen. *Externe Wärmequellen* sind, die Wärmeleitung durch die Kabinenwände sowie Wärme durch die Sonneneinstrahlung in das Flugzeug. Als *interne Wärmequellen* gelten Passagiere, Besatzung und die Wärmeerzeugung durch elektronische und mechanische Ausstattung.

Für den Betrieb eines Kühlsystems benötigt man **Energie**. Diese Energie bereitgestellt werden von: der Stauluft (ram air), der Triebwerkszapfluft (engine bleed air), einem triebwerksgetriebenem Kompressor (engine-driven compressor) oder vom Hilfstriebwerk (auxiliary power unit).

Das Kühlen kann durch unterschiedliche **Wärmesenken** realisiert werden: Stauluft, Luft vom Fan (fan air), Abluft aus der Kabine, oder durch ein sich verbrauchendes Kühlmedium (expendable cooling media) in Form von Wasser oder flüssigem Wasserstoff. Hinweis: Wird Umgebungsluft aufgenommen, so steht diese bei Totaltemperatur<sup>6</sup> zur Verfügung, die deutlich höher als die Umgebungstemperatur sein kann.

Die **Kühlluft wird bewegt** mit Hilfe eines Gebläses. Das Gebläse kann über einen elektrischen oder hydraulischen Motor, mit einer Kühlmaschine (air cycle machine) oder einer Wasserstrahlpumpe (ejector pump) angetrieben werden.

Durch die Kombination der beschriebenen Methoden lassen sich verschiedene Kühlsysteme verwirklichen. Wobei **zwei Kühlprinzipien** zur Anwendung kommen. Diese Systeme sind bekannt als:

- Die *Verdampferanlage* (vapor cycle system), wobei die Verdampfungswärme durch das Verdampfen eines Kältemittels, abgegeben wird.
- Die *Expansionskühlanlage* (air cycle system), die auf der Umwandlung von Wärmeenergie in Arbeit basiert.

Eine Kombination beider Prinzipien ist möglich.

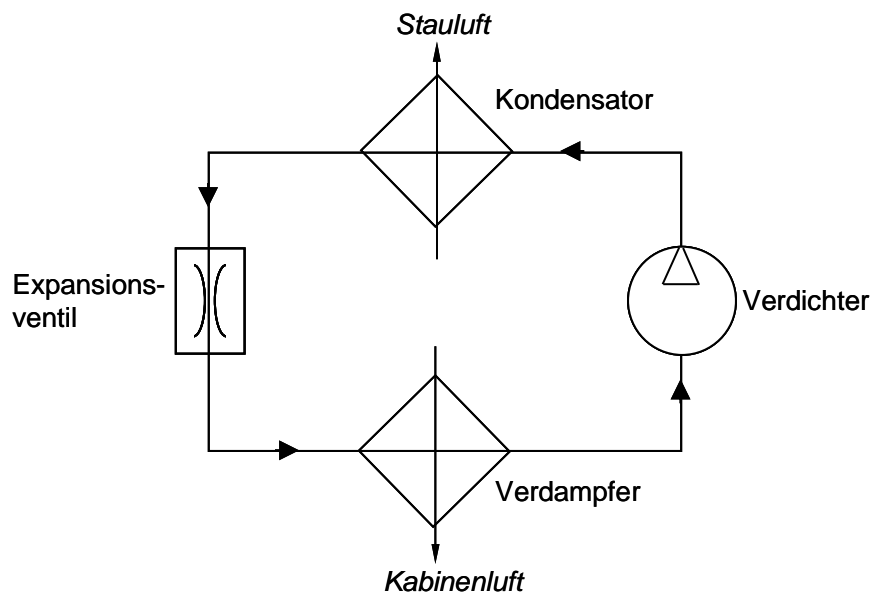
Die **Verdampferanlage** (Bild 2.1) kommt auch bei Kühlschränken zur Anwendung. Der Kühlprozess lässt sich ausgehend vom *Verdichter* (compressor) am einfachsten erklären. Hier liegt das Kühlmittel (ein spezielles Fluid) zunächst in gasförmiger Form vor. Der Verdichter erhöht den Druck sowie die Temperatur des Kühlmittels und befördert es durch das gesamte System. Ein Wärmetauscher, der Kondensator (condenser) genannt wird, entzieht dem verdichteten Kühlmittel Wärme und befördert diese über Bord. Das Kühlmittel kühlt sich dabei ab und verflüssigt sich. Im *Expansionsventil* (expansion valve) entspannt sich das Kältemittel und wird in kleine Tropfen zerstäubt. Durch diese Druckreduzierung kommt es zu einer beträchtlichen Temperaturabnahme. Der zweite Wärmetauscher im System ist der *Verdampfer* (evaporator). Die Luft für die Kabine wird beim Passieren des Verdampfers, durch das in kalten Tropfen vorliegende Kältemittel, gekühlt. Durch den Energieaustausch liegt am Ende des Verdampfers, das Kühlmittel erneut in gasförmiger Form vor. Es strömt wieder in den Verdichter und der Kreisprozess beginnt von vorne.

Die Verdampferanlage besteht also aus einem geschlossenen Kreislauf. Er beinhaltet einen Phasenwechsel vom gasförmigen in den flüssigen Zustand und umgekehrt. Die latente Wärme<sup>7</sup>, die beim Phasenwechsel auftritt, macht die Verdampferanlage sehr effizient. Beispiel: Dassault Falcon 10.

---

<sup>6</sup> **Totaltemperatur = Stautemperatur:** Die Temperatur die entstehen würde, wenn das strömende Fluid adiabatisch zur Ruhe gebracht werden könnte (AGARD 1980).

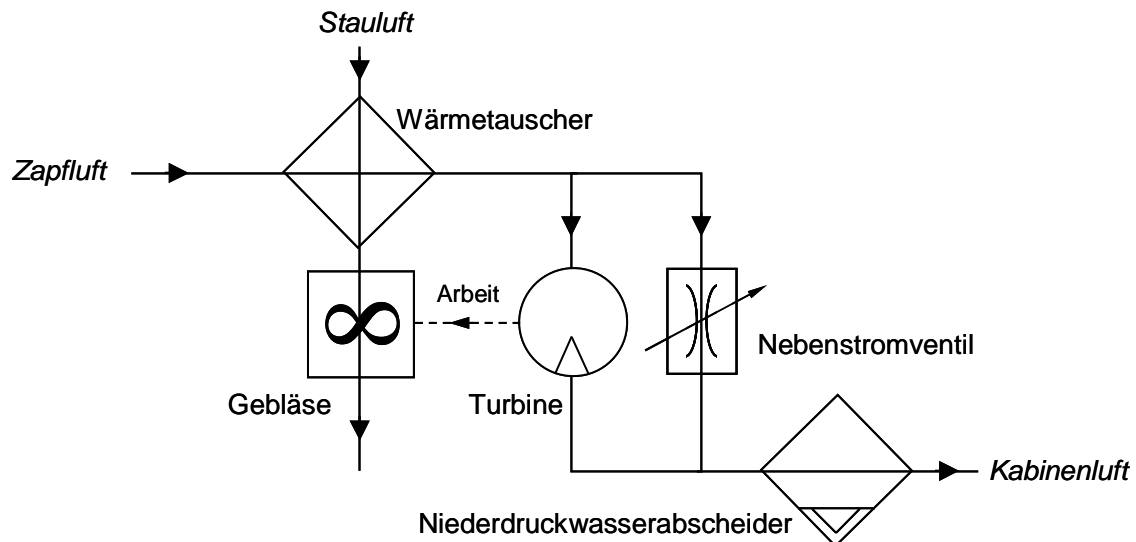
<sup>7</sup> **Latente Wärme:** Als latente Wärme bezeichnet man die bei einem Phasenübergang aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge (SAE 1998).



**Bild 2.1** Verdampferanlage

Ersetzt man das Kältemittel durch Luft und das Expansionsventil durch eine Turbine (turbine), so erhält man die *geschlossene Expansionskühlanlage*. Bei der Flugzeugklimaanlage wird als weiterer Unterschied die Luft nicht im Kreis geführt, sondern aus dem Verdichter des Triebwerks über die Expansionskühlanlage direkt in die Kabine geleitet. Daraus ergibt sich die *offene Expansionskühlanlage*. Es gibt verschiedenste offene Expansionskühlanlagen. Hier soll nur auf drei offene Expansionskühlanlagen eingegangen werden: die *offene einfache Expansionskühlanlage* (open basic air cycle system), das *offene Bootstrap-System* (open bootstrap system), und das *offene Drei-Wellen-System* (open three-wheel system).

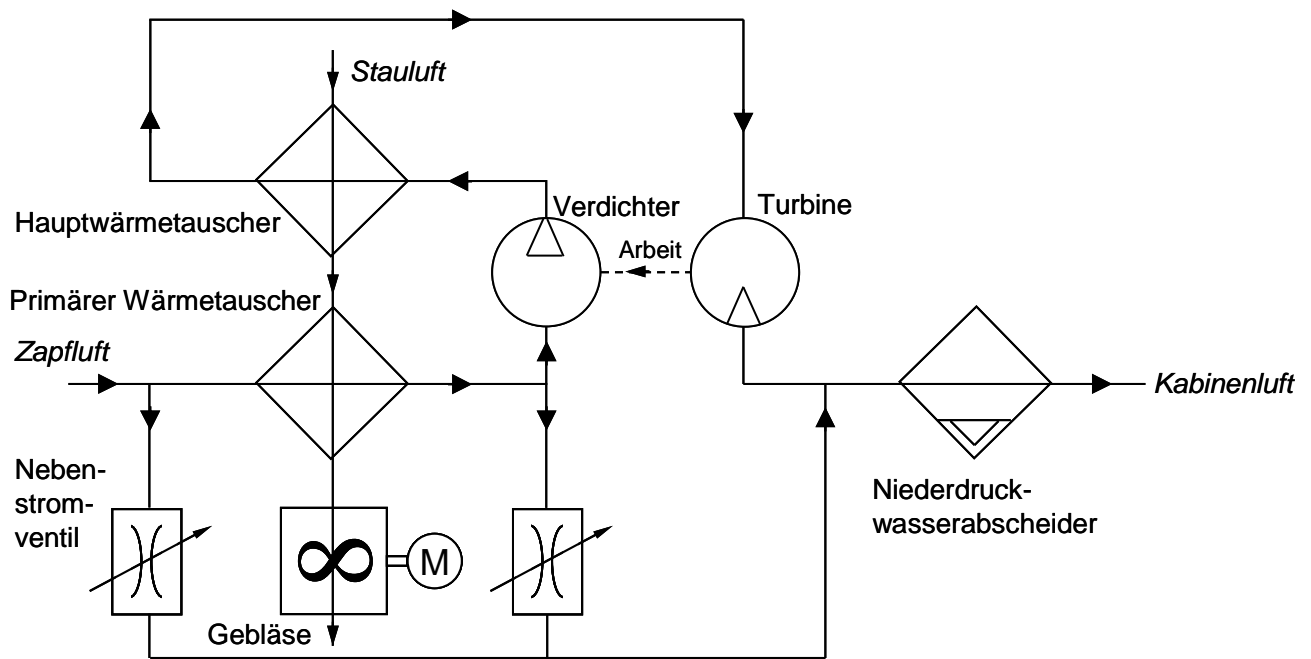
Bei der **offenen einfachen Expansionskühlanlage** (open basic air cycle system) (Bild 2.2) wird in einem Wärmetauscher, Zapfluft durch Stauluft gekühlt. Die Zapfluft besitzt einen höheren Druck als die Kabinenluft und treibt so die Turbine an. Durch die Expansion in der Turbine, kühlt sich die Zapfluft ab. Der Turbine wird Arbeit entnommen, um ein Gebläse (fan) anzutreiben. Dieses erhöht den Luftstrom im Wärmetauscher. Hinter der Turbine befindet sich kühlere Luft, in der das Wasser zu winzigen Tropfen (Nebel) kondensiert. Ein Niederdruckwasserabscheider (low-pressure water separator) entzieht der Luft anschließend das Wasser. Über ein Nebenstromventil (bypass valve), lässt sich die Temperatur regeln, sowie Eisbildung im Wasserabscheider vorbeugen. Beispiel: Lockheed C-130.



**Bild 2.2** Offene einfache Expansionskühlanlage

Die Turbine kann ebenfalls benutzt werden, um einen Verdichter anzutreiben. Der Verdichter erhöht den Luftdruck, bevor die Luft in der Turbine abgekühlt wird. Ein höherer Druck führt zu einem größeren Temperaturabfall in der Turbine, folglich verbessert sich die Arbeitsleistung. Eine Expansionskühlanlage, bei der Turbine und Verdichter gekoppelt sind, nennt man Bootstrap-System.

Die **offene Bootstrap-Expansionskühlanlage (open bootstrap air cycle system)** (Bild 2.3) leitet Zapfluft zunächst durch einen *primären Wärmetauscher*. Anschließend wird sie verdichtet und durch einen *zweiten Wärmetauscher* (oder Hauptwärmetauscher) geführt. Danach wird die Luft in der *Turbine* auf das Kabinendrucklevel entspannt. Bevor die Luft in die Kabine gelangt, wird in *einem Niederdruckwasserabscheider* der Wassergehalt reduziert. Der Bootstrap-Verdichter wird über die Turbine angetrieben. Hier wird Wärmeenergie in Wellenleistung (shaft work) umgewandelt. Der primäre und der Hauptwärmetauscher werden durch die Stauluft aus der Umgebung gekühlt. Das *Gebläse* kann über einen Elektromotor angetrieben werden, um den Luftstrom durch die Wärmetauscher zu erhöhen. Mithilfe von integrierten Nebenstromleitungen kann die Temperatur eingestellt werden. Beispiel: Boeing 727.



**Bild 2.3** Offene Bootstrap-Expansionskühlanlage

Grundsätzlich existieren zwei Arten von Wasserabscheidern. Der *Niederdruckwasserabscheider* befindet sich hinter der Turbine und erlaubt daher keine Temperaturen der Kabinenluft unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Im Gegensatz zum Niederdruckwasserabscheider, befindet sich ein *Hochdruckwasserabscheider* (high-pressure water separator) vor der Turbine. Dadurch benötigt man jedoch zwei weitere Wärmetauscher: einen Kondensator (condenser) und einen Wiedererhitzer (reheater). Vorteil des Hochdruckwasserabscheiders ist, dass die Luft auf bis zu  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgekühlt werden kann. Dies hat zur Folge, dass größere Temperaturunterschiede am Wärmetauscher entstehen und dadurch das gesamte System effizienter wird.

Moderne Verkehrsflugzeuge verwenden die **offene Drei-Wellen-Expansionskühlanlage (open three-wheel system)** mit einem **Hochdruckwasserabscheider** (Beispiel: B757, B767, A320). Das Drei-Wellen-System ist ein Bootstrap-System, bei der die Turbine nicht nur den Verdichter sondern auch das Gebläse antreibt. Diese Konfiguration ist in Bild 2.4 zu sehen.



## 2.5 Druckregelungssysteme

Wie bereits beschrieben, ist die Bedruckung notwendig, damit das Flugzeug in großen Höhen operieren kann (vergleiche mit Bild 2.6). Druckregelungssysteme findet man in leichten einmotorigen Flugzeugen bis hin zu großen turbinengetriebenen Verkehrsflugzeugen (turbine-powered transport aircraft). Obwohl die grundsätzlichen Regelungsmechanismen bei den unterschiedlichen Typen gleich sind, unterscheiden sie sich bei in der **Druckquelle** sowie bei vereinzelt Details des Systems. Die Druckerzeugung sowie die Verteilung fallen in den Verantwortungsbereich des Pneumatiksystems (pneumatic system), welches weiter unten näher beschrieben wird. Bei Kolbenantrieben (reciprocating engine) kann Druckluft einem *Kompressor* (supercharger) oder einem *Turbolader* (turbocharger) entnommen werden. Strahltriebwerke beziehen verdichtete Luft normalerweise in Form von Zapfluft aus dem *Verdichter* (compressor) der Triebwerke.

Um bei der offenen Expansionskühlanlage heizen und kühlen zu ermöglichen, wird der Kabine *klimatisierte Luft* zugeführt. Gleichzeitig findet über die Luftzufuhr eine Bedruckung statt. Heizen, Kühlen und Druckaufbau müssen so kombiniert werden, dass das Gesamtsystem optimale Ergebnisse liefert.

Die Luftzufuhr in die Kabine ist nahezu konstant. Die **Druckregelung** erfolgt daher durch die Variation der Luftentnahme aus der Kabine. Dies geschieht mittels eines regulierbaren *Auslassventils* (outflow valve). Das Auslassventil kann direkt über den pneumatischen Druck oder über einen Elektromotor verstellt werden.

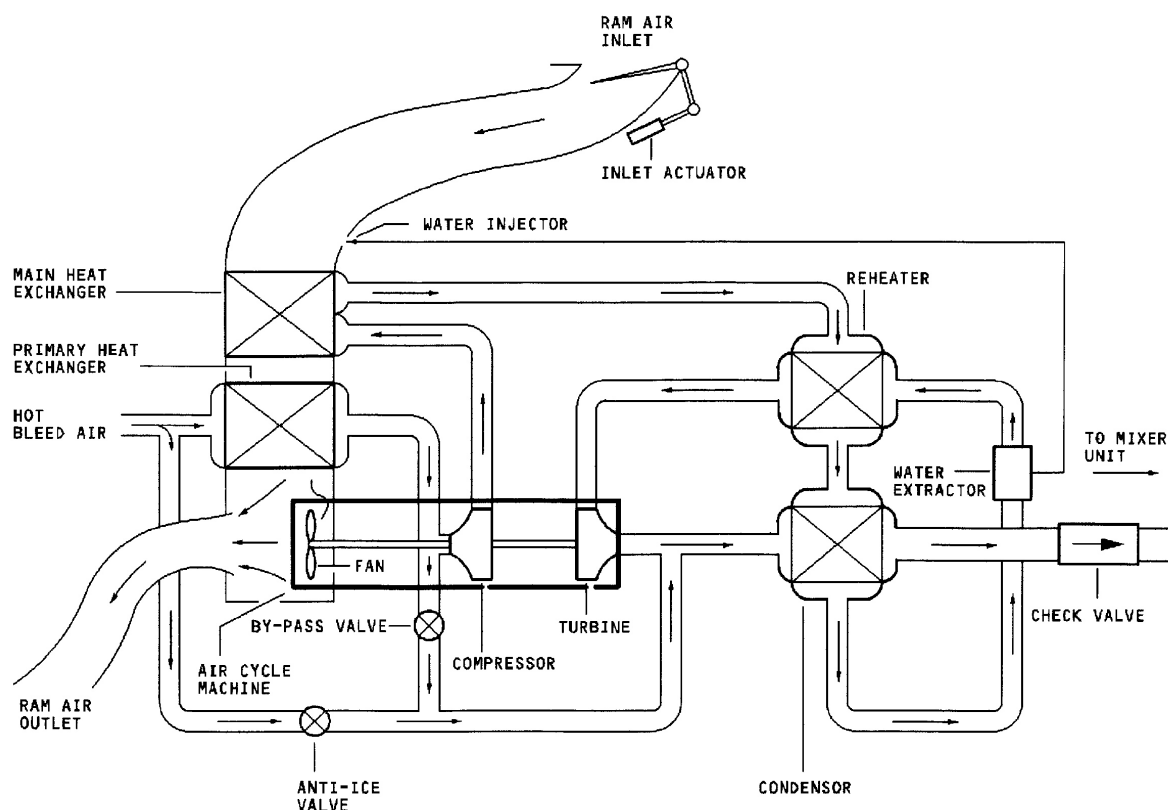
Die Flugzeugstruktur muss eine ausreichende Festigkeit besitzen, um die Spannungen, die durch eine Druckkabine entstehen, auszuhalten. Die maximale Flughöhe eines Flugzeugs wird durch den höchsten, zulässigen Kabinendifferenzdruck (cabin differential pressure) bestimmt. Der Kabinendifferenzdruck beschreibt die Differenz zwischen dem Kabinendruck und dem Umgebungsdruck, in der für die Zulassung vorgesehenen Flughöhe:  $\Delta p = p_{\text{Kabine}} - p_{\text{max.Höhe}}$ . Die Flugzeugstruktur ist jedoch nicht für einen negativen Kabinendifferenzdruck  $\Delta p$  ausgelegt.

Um einen zu großen positiven bzw. einen nicht erwünschten negativen Druckunterschied zu vermeiden, kommen **Sicherheitsventile** zum Einsatz. Ein *Druckbegrenzungsventil* (pressure relief valve) öffnet sich automatisch, wenn der Druckunterschied zugelassene Werte überschreitet. Ein *negatives Druckbegrenzungsventil* öffnet sich ebenfalls automatisch, wenn ein negativer Kabinendifferenzdruck überschritten wird. Ein *Schnellentleerungsventil* (dump valve) sorgt dafür, dass bei der Landung des Flugzeugs, der noch vorhandene Kabinendifferenzdruck, ausgeglichen wird. Sicherheitsventile können mehr als nur eine der beschriebenen Funktionen erfüllen.

## 2.6 Beispiel: Airbus A321

Der Airbus A321 hat zwei Klimaaggregate (air conditioning packs) an Bord. Es handelt sich jeweils um offene Drei-Wellen-Expansionskühlanlagen. Bild 2.4 zeigt, eine Klimaaggregate mit Kühlmaschine, Wärmetauscher und einem Hochdruckwasserabscheider.

Die Kabinentemperatur kann mittels eines Computers individuell, für drei verschiedene Kabinenzonen eingestellt werden (Bild 2.5). Die niedrigste Lufttemperatur, die die Klimaanlage (Bild 2.4) erzeugt, wird von der tiefsten Temperaturforderung einer Zone bestimmt. Die kühle Luft wird zu den *Mischereinheiten* (mixing unit) weitergeleitet. Des Weiteren wird ihnen recirkulierte Luft aus der Kabine durch ein *Kabinengebläse* (cabin fan) und *Filter* zugeführt. Der Anteil der recirkulierten Luft in den Mischereinheiten beträgt ca. 40 % der gesamten Luft die in die Kabine strömt. Durch das Zuführen von recirkulierter Luft, wird ein Teil der Luftfeuchtigkeit in der Kabine wiederhergestellt. Einstellventile (trim air valve) vermischen Luft von der Mischereinheit mit heißer Zapfluft, um die eingestellten Temperaturen der Kabinenzonen zu erreichen.



**Bild 2.4** A321 Luftkühlung in der Klimaanlage

Das Druckregelsystem besteht aus *Kabinendruckreglern* (cabin pressure controller). Sie können voll automatisch, halb automatisch oder manuell betrieben werden. Das *Auslassventil* wird über drei elektrische Motoren versorgt. Zwei *Sicherheitsventile* verhindern einen über-

höhen positiven (593 hPa = 8.6 psi) oder einen überhöhten negativen (-17 hPa = -0.25 psi) Druckunterschied (vergleiche mit Bild 2.6).

Bild 2.7 zeigt die *Luftverteilung* in der Kabine.

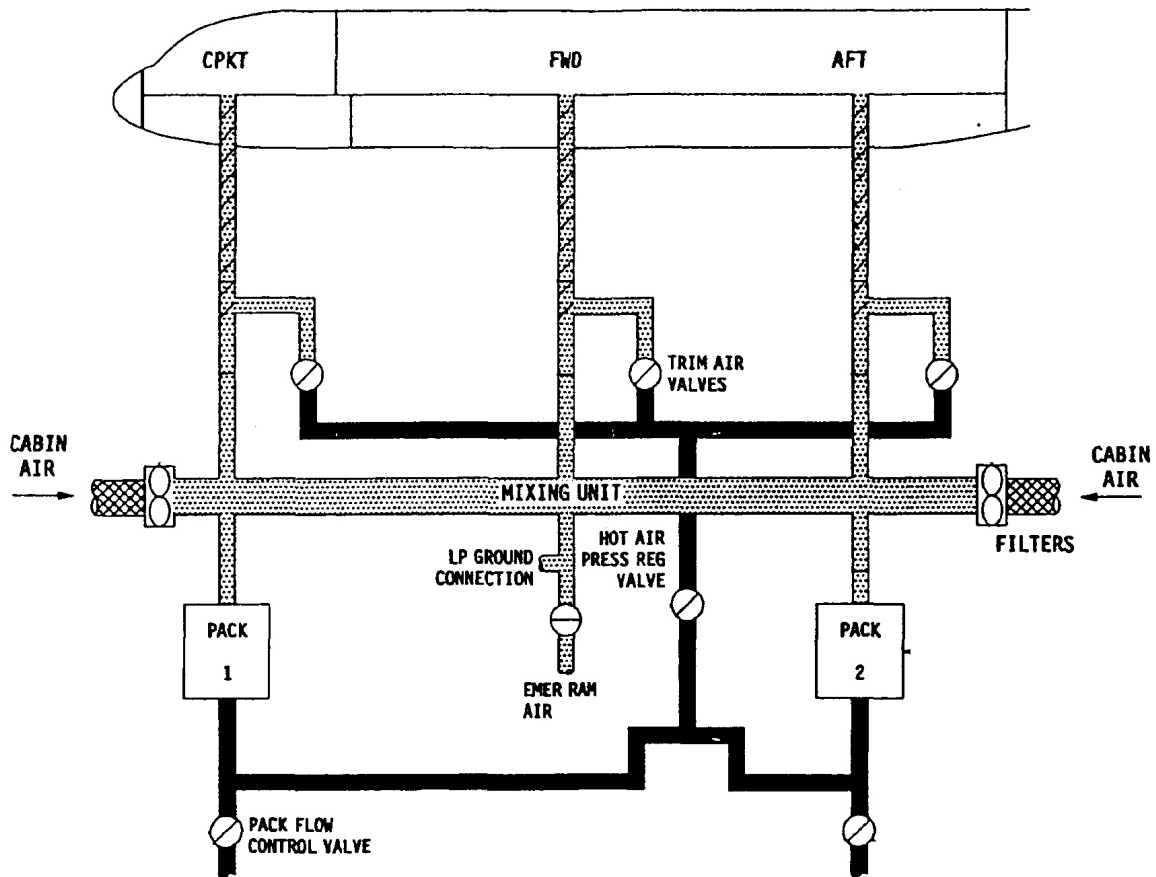


Bild 2.5 A321 Klimaanlage

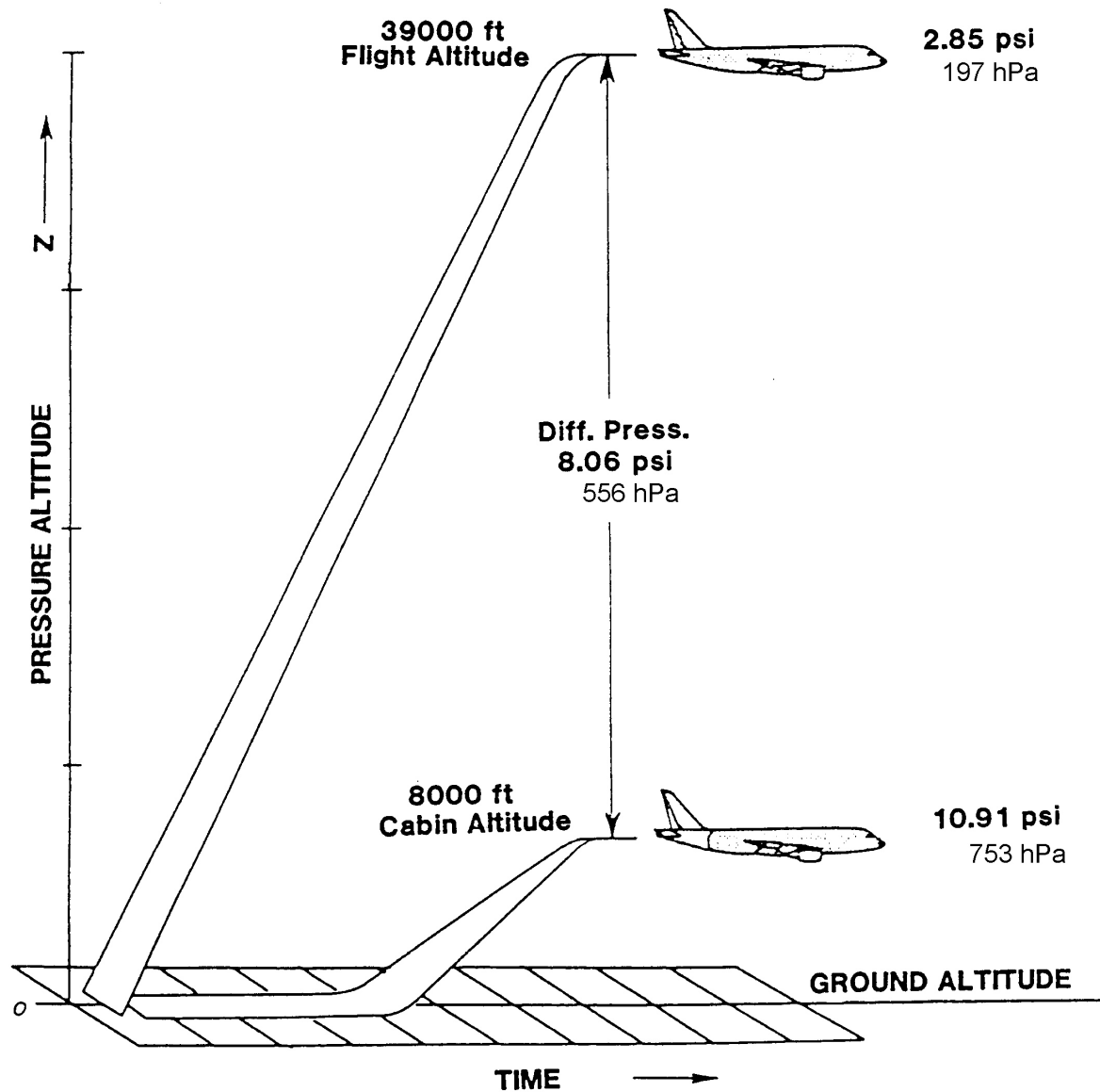
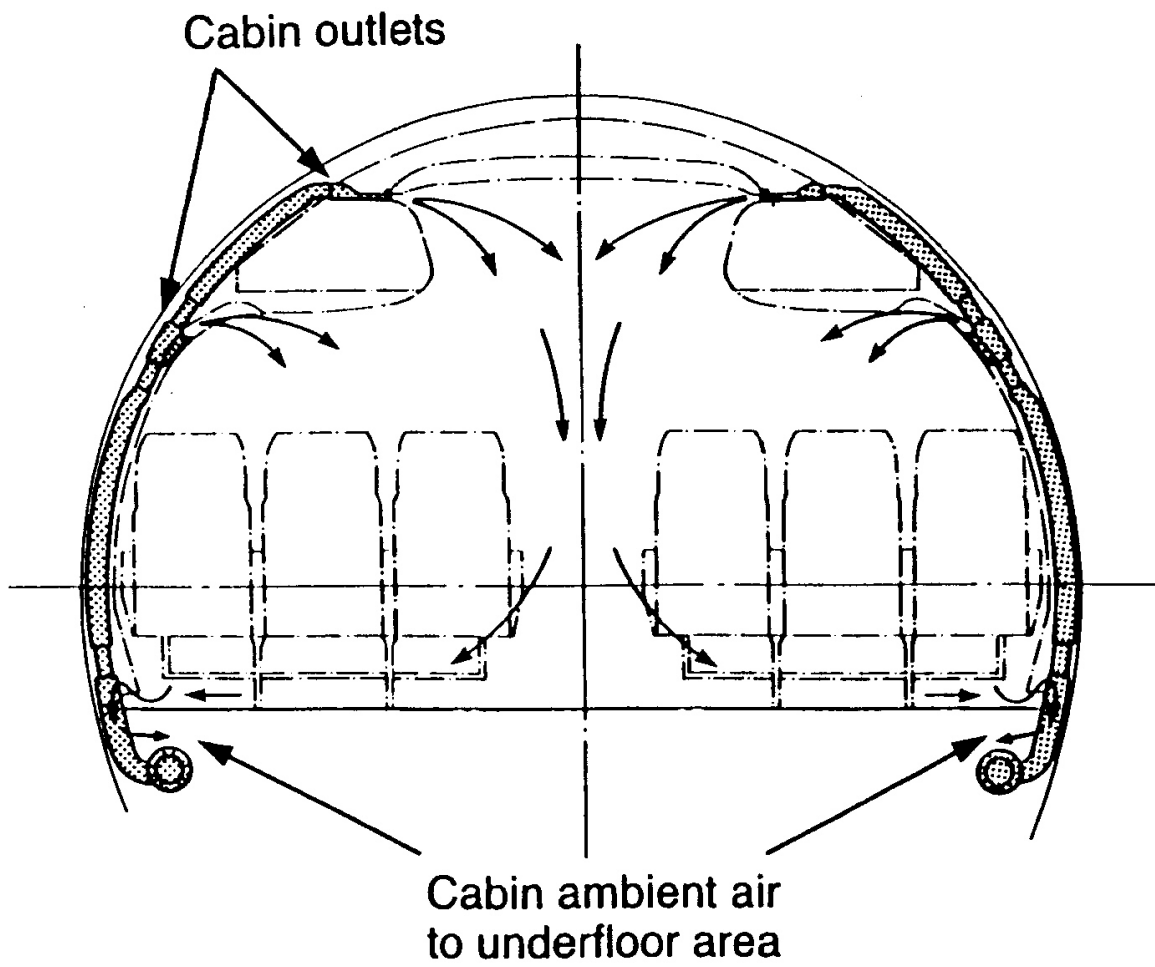


Bild 2.6 A321 Druckregelung



**Bild 2.7** A321 Luftverteilung