

Engelbert Schlagenhaff

Flugzeugklimatisierung

Das selbstverständliche Reisen in einer Umgebung, die das Überleben nur für sehr kurze Zeit ermöglicht, setzt hohe Anforderungen an die technischen Versorgungssysteme (Tab. 1).

Zur Klimatisierung eines Flugzeugs gehört die Druck- und Temperaturregelung der Kabine. Die Frischluft für die Passagiere wird aus den Triebwerksverdichtern (vor der Brennkammer) entnommen und von der Zapfluftanlage unabhängig von den Triebwerksbedingungen geregelt. Im Kühlaggregat wird diese Druckluft entsprechend den Anforderungen abgekühlt und getrocknet. Über Rückschlagventile gelangt die Frischluft in den Druckrumpf und das Verteilungssystem. Somit wird den Passagieren ein kontinuierlicher Frischluftstrom aus der Umgebung, der in Durchsatz und Temperatur geregelt ist, zugeführt. Der Kabinendruck wird abhängig vom Flugprofil durch Ablassen von verbrauchter Kabinenluft geregelt (Bild 1).

Aircraft air-conditioning

The travel in an environment, which enables a surviving even only for a short time, sets high request to the technical utility systems. The air conditioning system of an airplane includes the pressure and temperature control of the cab. The fresh air for the passengers is taken out of the engine compressors (before the combustion chamber) and controlled independently of the bleed air system of the engine conditions. In a cooler this compressed air is cooled down and dried according to the request. Over check valves the fresh air arrives in the pressurized trunk and the distributing system. Thus a continuous flow of fresh air from the environment, which in mass flow and temperature is controlled, is supplied to the passengers. The cab pressure is controlled dependent on the flight profile by discharging used cab air.

Keywords: Aircraft air-conditioning, pressure control, temperature control, air distribution

1 Druckluftherzeugung

1.1 Bodenbetrieb

Am Boden wird die zum Betrieb der Klimaanlage erforderliche Druckluft durch ein Hilfstriebwerk erzeugt (Bild 1).

1.2 Flugfall

Der atmosphärische Umgebungsdruck fällt mit der Höhe. Die Triebwerke saugen Luft an, verdichten sie in mehreren

Stufen und benutzen sie zur Verbrennung des Treibstoffes. Da zum Betrieb der Klimaanlage Luft mit einem höheren Druck als in der Passagierkabine notwendig ist, bietet es sich an, für die Klimatisierung Luft aus den Verdichterstufen des Triebwerkes abzuzapfen. Um die Leistungsaufnahme des Triebwerks niedrig zu halten, ist die Entnahme aus verschiedenen Verdichterstufen vorgesehen. Die Auslegung erfolgt so, daß im Reiseflug von einer möglichst frühen

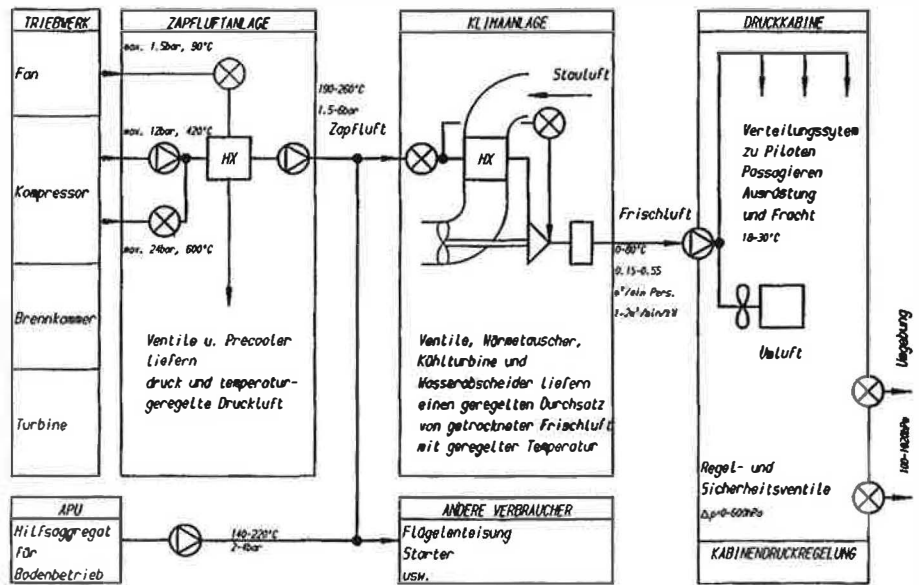


Bild 1 Luftsysteme

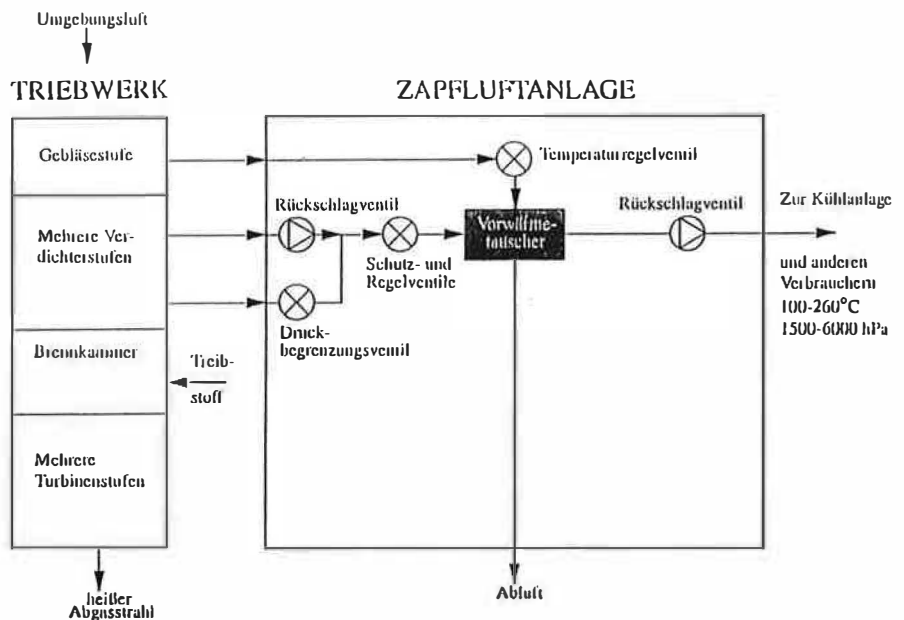


Bild 2 Zapfluftanlage

Tab. 1 Anforderungen an die Klimaanlage

Umgebung:	Der Betriebsbereich reicht vom Boden bis in 15 km Höhe. Alle Klimazonen der Erde sind abzudecken.
Sicherheit:	Internationale Standards. Nationale Auflagen.
Komfort:	Steigendes Bewußtsein der Passagiere: Frischluftdurchsatz, Druckänderungen, Temperatur, Lärm. Zusätzliche Ausrüstung.
Betreiber:	Life Cycle Cost, Leistungsaufnahme, Zuverlässigkeit. Diagnose, Dispatchability.

Verdichterstufe abgezapft wird und im Sinkflug, bei Leerlauf der Triebwerke, auf eine höhere Stufe umgeschaltet wird. Ein Rückschlagventil verhindert das Zurückströmen der Luft ins Triebwerk (Bild 2).

2 Kühlanlage

2.1 Mengenregelung

Vor der Kühlanlage sitzt ein Durchsatzventil. Dieses Ventil regelt die Frischluftmenge, die in die Kabine eingeblasen wird. Dieser Luftmengenstrom muß über den Mindestanforderungen liegen, die sich aus internationalen Vorschriften, in Abhängigkeit von der Passagierzahl, ergeben. Weiterhin muß die eingeblasene Menge so groß sein, daß sich der Kabinendruck regeln läßt (Bild 1).

2.2 Kühlprinzip

Das Grundprinzip (Bild 3) besteht darin, daß die von der Zapfluftanlage gelieferte Luft sich in einem Wärmeaustauscher, der auf der kalten Seite mit Umgebungsluft beaufschlagt ist, abkühlt, bevor sie in einer Kühltriebwerke unter Lei-

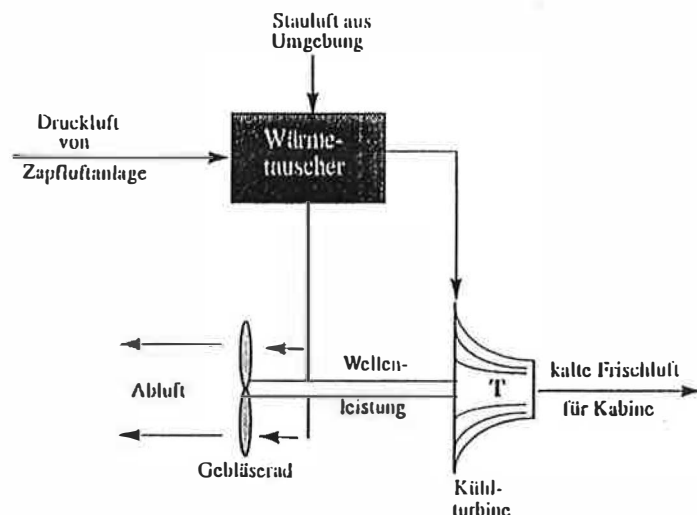


Bild 3 Kühlprinzip

stungsabgabe expandiert. Durch diesen linksläufigen offenen Joule-Prozeß kann sich die Luft auf Temperaturen unter dem Umgebungsniveau abkühlen.

Die von der Luft in der Kühltriebwerke abgegebene Wellenleistung kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden.

Am einfachsten ist es, die Wellenleistung für ein Gebläse zu verwenden, das sicherstellt, daß auch bei stillstehendem Flugzeug die kalte Seite des Luft/Luft-Wärmeaustauschers durchströmt wird.

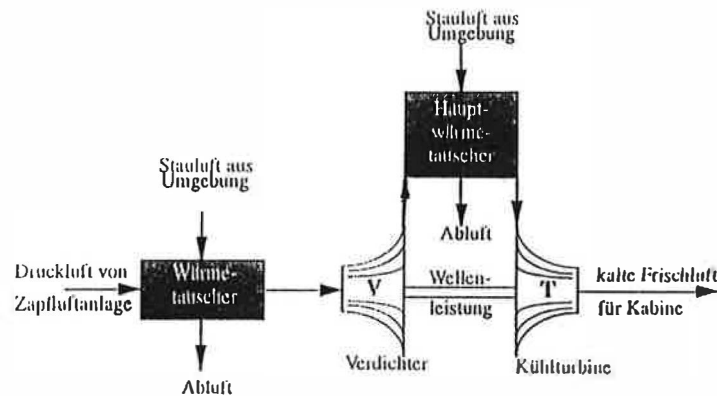


Bild 4 Boot-Strap-Anlage

In der sogenannten Boot-Strap-Anlage (Bild 4) treibt das Turbinenrad einen Verdichter an. Für den Hauptwärmeaustauscher wird dadurch ein größerer Temperaturunterschied zur Umgebung und somit eine kompaktere und leichtere Bauweise erreicht.

Der höhere Druck am Turbineneintritt führt zu einer Leistungssteigerung. Ein vorgeschalteter Wärmeaustauscher erniedrigt die Verdichtereintrittstemperatur und verbessert dadurch die Energiebilanz und den Sicherheitsabstand zu den thermischen Werkstoffgrenzen des Hauptwärmeaustauschers, der meistens als Aluminium-Rippen-/Platten-Wärmeaustauscher ausgeführt ist.

2.3 Wasserabscheidung

Es ist notwendig, das bei der starken Abkühlung der Außenluft anfallende Kondensat aus dem Frischluftstrom abzusondern, um freies Wasser im Verteilungssystem und Nebelbildung an den Ausblasteilen in der Kabine zu vermeiden.

Üblicherweise wird das abgeschiedene Wasser im Stauluftkanal verdampft. Die dabei anfallende Verdampfungsenthalpie reduziert die Staulufttemperatur entsprechend.

Die Hochdruckwasserabscheidung (Bild 5) benötigt mindestens einen zusätzlichen Wärmeaustauscher, hier als Verflüssiger bezeichnet. In ihm wird die Feuchtigkeit durch kalte Turbinenaustrittsluft verflüssigt und abgeschieden. Dies erfolgt vor der Kühltriebwerke, wodurch am Turbinenaustritt wesentlich

weniger Feuchtigkeit anfällt. Daher wird die volle Ausnutzung des verfügbaren Zapfluftdrucks und somit der Betrieb der Kühltriebwerke bis weit in den Temperaturbereich unter dem Gefrierpunkt möglich. Der für die Kühlleistung erforderliche Massenstrom verringert sich entsprechend.

Die für die Kühlleistung erforderliche Massenstrom verringert sich entsprechend.

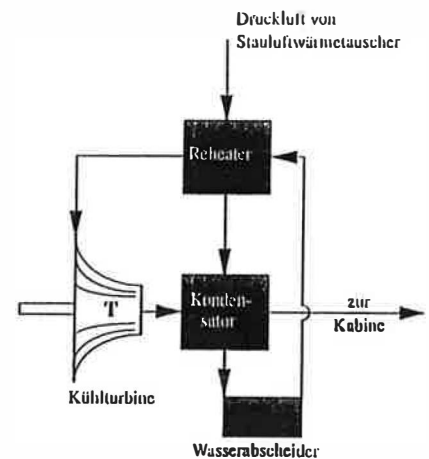


Bild 5 Hochdruck-Wasserabscheider

2.4 Temperaturregelung

Zur Regelung der Temperatur wird der kalten Luft aus dem Kühlaggregat Heißluft zugemischt.

Die Besatzung wählt die Solltemperaturen für die einzelnen Zonen wie Cockpit, diverse Passagierzonen und Frachträume. Zu jeder einzelnen Zone gehören separate Regelkreise, die über die Mischung von geringen Mengen Heißluft die Möglichkeit der Feinabstimmung bieten.

Die Auslaßtemperatur der Kühlanlage wird durch ein meist elektrisch ange-

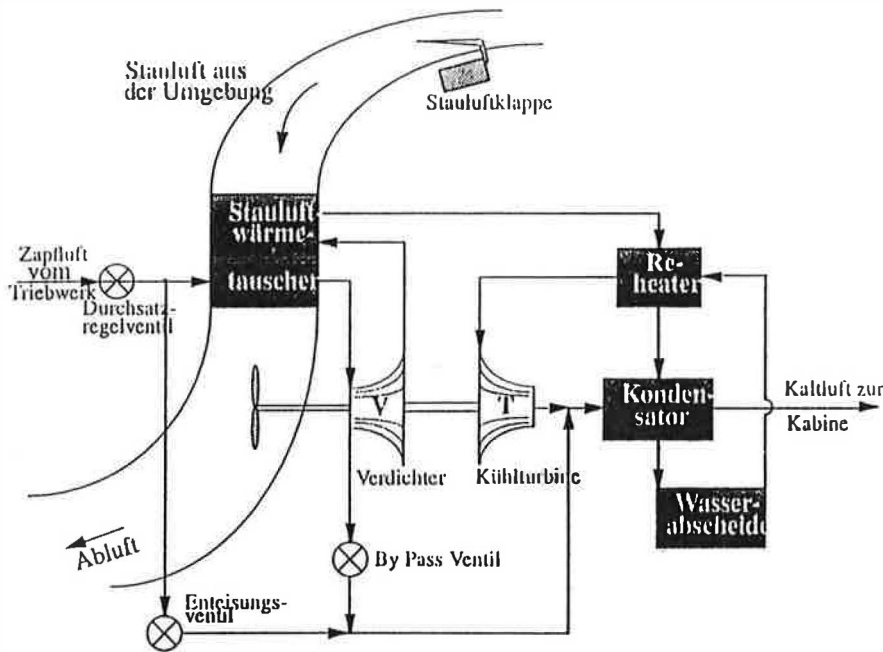


Bild 6 Kühlanlage

steuertes By-Pass-Ventil schnell geregelt. Dabei umgeht ein Teil der heißen Druckluft die Wärmeaustauscher und die Kühlturbine. Häufig wird auch der Stauluftmassenstrom auf der kalten

Seite der Wärmeaustauscher moduliert. Dies ermöglicht eine Reduzierung des Flugzeugwiderstandes in den Fällen, in denen nicht die volle Kühlleistung gefordert wird.

Die gesamten Regelungsaufgaben, zusammen mit einer Vielzahl von Überwachungs- und Warnfunktionen, übernehmen in neuentwickelten Flugzeugen redundante digitale Rechner vollautomatisch.

Da diese Rechner im engen Datenaustausch mit anderen Flugzeugsystemen stehen, sind sie in der Lage, unter allen Einsatzbedingungen eine für das Gesamtflugzeug optimale Regelung zu bieten. Weiterhin können diese Rechner Probleme erkennen, die erforderlichen Wartungsinformationen generieren oder Cockpitanzeigen auslösen.

2.5 Realisierte Anlagen

Installiert wird die Kühlanlage bevorzugt im Flügel-Rumpf-Übergangsbereich oder bei kleinen Flugzeugen im Heck.

Exemplarisch ist die Kühlanlage eines modernen Verkehrsflugzeuges im Bild 6 dargestellt. Es handelt sich um eine Boot-Strap-Anlage mit in Reihe geschalteten Stauluftwärmeaustauschern, einem Hochdruckwasserabscheider-Kreislauf und einer Kühlturbine, die neben dem Verdichter auch noch das Gebläse rad antreibt. Der aus diesen drei Rädern bestehende Rotor läuft mit ca.

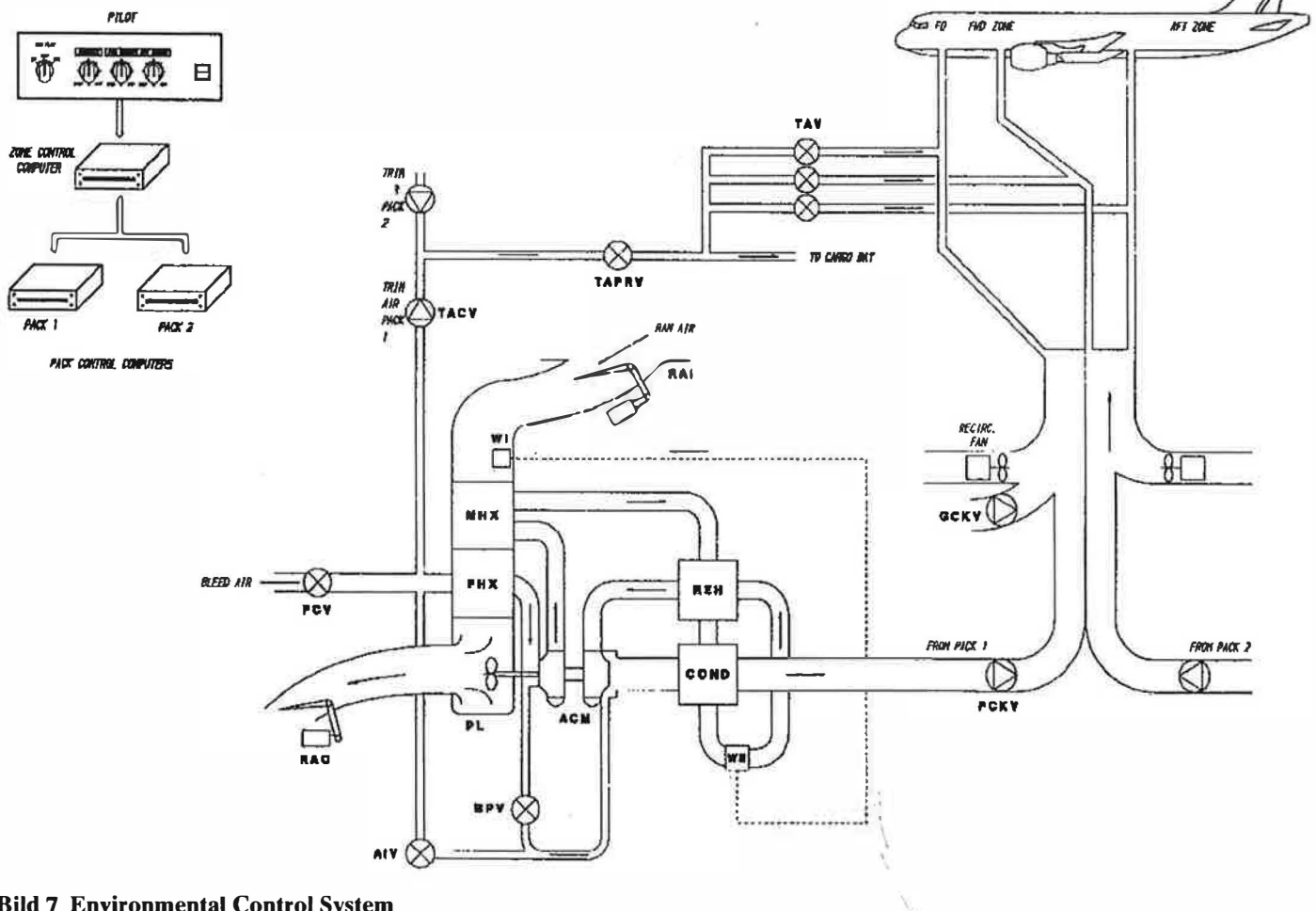


Bild 7 Environmental Control System

40000 U/min auf dynamischen Luftlagern.

Dadurch entfallen die kritischen Dichtungen zwischen dem Schmierstoff und der Atemluft sowie regelmäßige Wartungsarbeiten. Im Luftlager baut sich aufgrund von Relativbewegungen ein aerodynamisches Luftpolster auf, auf dem der Rotor berührungs- und verschleißfrei läuft.

Die Regeleinrichtungen By-Pass-Ventil und Stauluftklappen sind elektrisch angesteuert. Das Enteisungsventil arbeitet rein pneumatisch. Neben dieser Sicherheitsfunktion übernimmt es bei Totalausfall der elektrischen Regelung die Kontrolle der Austrittstemperatur der Kühlanlage über einen Bimetallsensor. Der Überhitzungsschutz ist redundant elektrisch und zusätzlich pneumatisch realisiert und wirkt sich drehzahlreduzierend auf die Turbomaschine aus.

3 Luftverteilung

In größeren Flugzeugen und in Flugzeugen mit großer Reichweite werden unabhängige Kühlanlagen installiert. Durch ein Rückschlagventil wird die Luft aus der Kühlanlage in den Druckrumpf geführt.

Dort wird die kalte Luft mit gefilterter Rezirkulationsluft aus der Kabine gemischt (Bild 7). Dadurch läßt sich eine hohe Kabinenventilation bei niedrigen Zapfluftmengen (Treibstoffverbrauch) und kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Einblasluft und Kabine realisieren (Komfort).

Die dabei auftretenden Probleme werden deutlich, wenn man bedenkt, daß abhängig von der Flugstrecke oft weniger als 1,5 m³ in der Passagierkabine pro Sitzplatz zur Verfügung stehen und die Kabinenluft etwa alle drei Minuten einmal ausgetauscht wird.

Ein Teil dieser Luft wird gefiltert und rezirkuliert. Der größere Teil, insbesondere die Abluft aus den Raucherzonen, der Küche und den Toiletten, wird vom Kabinendruckregelsystem über Bord abgelassen.

4 Kabinendruckregelung

Das Kühlaggregat fördert kontinuierlich Frischluft in den Druckrumpf. Eine entsprechende Menge verbrauchter Kabinenluft wird abgelassen.

Da für die menschliche Atmung der Sauerstoffpartialdruck maßgebend ist, muß beim Flug in großer Höhe der Kabinendruck über den Umgebungsdruck angehoben werden. Normalerweise fällt der Kabinendruck nicht unter 750 hPa, welche einer Höhe von 2400 m entsprechen. Damit herrscht beim Reiseflug in 12500 m Höhe im Rumpf mehr als der 4fache Umgebungsdruck.

Um die Passagiere mit der notwendigen Sauerstoffmenge zu versorgen, werden 2 Parameter redundant geregelt:

- Frischluftzufuhr
- Kabinendruck

Bei Totalverlust einer dieser beiden Funktionen sind Backups vorgesehen:

- Sauerstoffmasken zum Aufrechterhalten des Sauerstoffpartialdrucks

- Begrenzung der Flughöhe

- Zwangsbelüftung

Der Kabinendruck wird abhängig von der Flughöhe und Flugphase geregelt. Dazu lassen Regelventile Luft aus dem Druckrumpf entweichen.

Bei großen modernen Flugzeugen erfolgt dies durch Klappen in der Außenhaut, die den Abluftstrom so lenken, daß er zum Vortrieb des Flugzeuges beiträgt.

Das menschliche Ohr reagiert nicht nur auf Druckunterschiede, sondern auch auf die Druckänderungsgeschwindigkeit. Der Beginn der Wahrnehmung von Druckänderungen ist individuell verschieden und beginnt bereits unter 3 hPa/min.

International wird gefordert, daß der Kabinendruck nicht schneller als 18 hPa/min fällt und nicht schneller als 10 hPa/min ansteigt. Diese Änderung des Kabinendrucks ist mit den möglichen Steig- und Sinkleistungen des Gesamtflugzeuges abzustimmen.

Literatur

- [1] Cube, H. L. von, Steimle, F., Lotz, H., Kunis, J. (Hrsg.): Lehrbuch der Kältetechnik. C.F. Müller Verlag, Heidelberg (1997)

Schlüsselwörter

Flugzeugklimatisierung
Druckregelung
Temperaturregelung
Luftverteilung

Sonderdrucke

Alle Beiträge und
Fachaufsätze
der Zeitschrift



können wir Ihnen als
Sonderdruck
mit einer nach Ihren
Wünschen gestalteten
Titelseite liefern.

Gerne informieren wir
Sie.

Bitte rufen Sie an:
Inge Bielfeldt
(Redaktion)
Telefon (0 62 21) 4 89-4 92

Wir werden Ihnen ein
schriftliches Angebot
machen.

C. F. Müller Verlag
Hüthig GmbH
Postfach 10 28 69
69018 Heidelberg