

Detlef Makulla

Wirtschaftliche Luftversorgung von geparkten Flugzeugen mittels Pre-Conditioned-Air-(PCA-)System

Die Versorgung des Bordnetzes von geparkten Flugzeugen an der Passagierbrücke über eine externe Stromzuführung ist heute nahezu Standard an allen Flughäfen. Dagegen sind externe Systeme zur Lüftererneuerung, Heizung und Kühlung der geparkten Flugzeuge, sogenannte Pre-Conditioned-Air-(PCA-)Systeme, in Europa und insbesondere in Deutschland nur selten anzutreffen. Dies ist um so erstaunlicher, weil die Kostenvorteile und das enorme Entlastungspotential für die Umwelt eindeutig für diese Systeme sprechen.

Economic air supply of parked airplanes by means of Pre Conditioned Air (PCA) system

The supply of the electrical system of parked airplanes at the passenger bridge over an external electricity supply is today almost standard at all airports. On the other hand external systems are for the air renewal, heating and cooling of the parked airplanes, so-called Pre Conditioned Air (PCA) systems can be find in Europe and particularly in Germany only rarely. This is the more amazing, because the cost advantages and the enormous release for the environment for these systems.

Keywords: aircraft air-conditioning, Pre Conditioned Air (PCA) systems, environmental release within the airport area, Auxiliary Power Unit (APU)

Das behagliche Klima für den Fluggast während des Aufenthaltes an Bord übernimmt während des Fluges die bordeigene Klimaanlage. Sobald das Flugzeug gelandet ist und an einer Passagierbrücke angedockt hat, schaltet der Pilot die Haupttriebwerke ab und die Hilfsturbine (APU – Auxiliary Power Unit) zum weiteren Betrieb der Bordklimaanlage ein.

Diese Hilfsturbine im Heck des Flugzeuges hat ferner die Aufgabe, die Aufrechterhaltung des elektrischen 400-Hz-Bordnetzes zu gewährleisten. An den meisten Flughäfen ist es aber heute Standard, die elektrische Versorgung des Flugzeuges über ein Kabel von der Brücke oder direkt vom Gebäude vorzunehmen. Dazu werden 400-Hz-Umformer eingesetzt, die vom öffentlichen Netz gespeist werden. Infolgedessen wird die Hilfsturbine im Flugzeug nur noch für den Betrieb der Bordklimaanlage benötigt.

Der Wirkungsgrad der Hilfsturbine liegt bei nur 8 bis 14 % [1]. Gemessen am Nutzen wird hier ferner ein relativ hoher Schadstoffausstoß in Kauf genommen. Aus diesen Gründen sind Systeme entwickelt worden, die den Betrieb der Hilfsturbine am Boden nahezu überflüssig machen. Neben den bekannten 400-Hz-Systemen für die Elektroversorgung sind das insbesondere die Pre-Conditioned-Air-(PCA-)Systeme für die Luftversorgung.

Während in den Vereinigten Staaten von Amerika diese Systeme bereits seit Mitte der 70er Jahre an über 2000 Abfertigungspositionen eingesetzt werden, ist in Europa und insbesondere in Deutschland diese Technik bisher nicht zum Durchbruch gekommen.

Der vorliegende Fachaufsatz beschreibt die Möglichkeiten und Vorteile der PCA-Systeme und weist im Rahmen ei-

ner Kostenbetrachtung auch deren Wirtschaftlichkeit nach.

1 Klimatisierungsanforderung durch das Flugzeug

Während das Flugzeug am Boden ist, sind die Funktionen Lüftererneuerung, Heizung und Kühlung erforderlich. Insbesondere die Erfordernis der Lüftererneuerung wird leicht unterschätzt. Würde man ein mit maximaler Passagierzahl besetztes Flugzeug von der Größe einer B 737 nicht belüften, so stiege die CO₂-Konzentration bereits nach 3 min auf 1000 ppm (Pettenkofer-Zahl) und nach 15 min auf 5000 ppm (MAK-Wert) an. Dazu sorgt ein Anstieg der Luftfeuchte und des Geruchspegels für ein rapides Absinken der Luftqualität.

Neben der Lüftererneuerung spielt die Wärmeabfuhr eine wesentliche Rolle. Die maximale Kühllast eines Flugzeuges am Boden wird von den folgenden Anteilen gebildet:

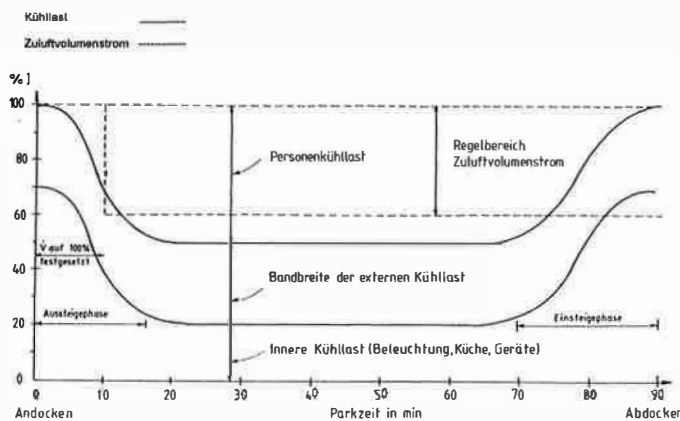
- Passagiere und Crew 40–50 %
- Elektrische Geräte und Beleuchtung 20–25 %
- Transmission durch Kabinenwand 20–25 %
- Solareinstrahlung durch Fenster 10–15 %

Tab. 1 Maximale Kühl- und Heizlasten verschiedener Flugzeugbaumuster

Baumuster	Kühllast [kW]	Heizlast [kW]
B 747	82	140
A 340	65	100
MD 11	52	80
A 320	26	45
MD 87	18	29

Dipl.-Ing. D. Makulla, Krantz-TKT, Bergisch Gladbach

Bild 1
Prinzipieller
Verlauf der Kühl-
last und des Zuluft-
volumenstromes
eines Flugzeuges
während der
Parkzeit am Gate



Bei den Werten handelt es sich um Mittelwerte über alle Flugzeuggrößen. Die absoluten Werte sind in Tab. 1 für die Kühl- und Heizlast für verschiedene Baumuster nach Herstellerangaben dargestellt.

Die Kühl- und Heizlasten gelten für Außenlufttemperaturen im Sommer von +35°C und im Winter von -20°C. Die Kabinentemperaturen betragen in diesen Fällen +24°C (Sommer) bzw. +21°C (Winter).

Der zeitliche Kühllastverlauf eines Flugzeuges während der Parkzeit ist prinzipiell im Bild 1 dargestellt. Die Maximalkühllast liegt nur während der Ankunft und nach Ende der Boardingzeit vor. Nach dem Aussteigen der Passagiere, das je nach Flugzeuggröße und Anzahl der Passagierbrücken zwischen 8 und 15 min dauert, schließt sich eine Phase mit ca. 50 bis 60% der Maximalkühllast an. Die Phase der Maximalkühllast nach dem Einsteigen kann sich durchaus verlängern, wenn der Pilot keine Startfreigabe erhält.

Bei der in Tab. 1 angegebenen Heizlast sind keine inneren Lasten berücksichtigt. Die Werte stellen somit den ungünstigsten Fall dar, wenn ein Flugzeug ohne Personen und interner Wärmefreisetzung auf einer Kabinentemperatur von 21°C bei einer Außentemperatur von -20°C gehalten werden soll. Für kurze Aufheizzeiten von „Night-Stoppern“ können höhere Heizleistungen erforderlich sein.

2 Herkömmliche Luftversorgung von Flugzeugen am Boden

Die Bordklimaanlage wird während des Fluges von Zapfluft (bleed-air), die umschaltbar an zwei Stellen im Verdichterteil des Triebwerkes entnommen wird, versorgt. Diese hat dabei eine Temperatur von ca. 280°C bei einem Druck von ca. 3 bar. Bei der Bordklimaanlage handelt es sich um einen offenen Kaltluftkälteprozeß, bei dem die Zapfluft zur

Kühlung über einen Verdichter, einen Außenluftwärmeaustauscher und eine Turbine geführt wird (Air-Pack).

Durch die Umgehung des Kälteteils wird ferner ein Warmluftkanal geschaffen. Auf diese Art steht im Flugzeug eine 2-Kanal-Anlage zur Verfügung, aus der zonenweise die gewünschte Zulufttemperatur eingestellt werden kann. Übliche Temperaturwerte für den Kaltluftkanal sind minimal -5°C und für den Warmluftkanal maximal +60°C.

Am Boden übernimmt bei abgeschalteten Haupttriebwerken die Hilfsturbine im Heck des Flugzeuges (APU) die Versorgung der Air-Packs. Dazu ist ebenfalls Druckluft von ca. 280°C und 3 bar erforderlich. Da die Bordklimaanlage für die Flugphase konstruiert ist, ergeben sich am Boden mit dem Einsatz der Hilfsturbine nur sehr schlechte Wirkungsgrade von 8 bis 14%.

Ein Airbus A 320 benötigt beispielsweise für die maximale Leistung der Air-Packs von 26 kW Kälteleistung und 50 kW Stromleistung für das Bordnetz 115 l Kerosin pro Stunde. Dies entspricht einem Primärenergiegehalt (Heizwert) von ca. 1070 kWh. Diesem Aufwand steht ein Nutzen von lediglich 26 kWh Kälte und 50 kWh Strom gegenüber. Der Ausnutzungsgrad der Primärenergie beträgt also nur ca. 7% [(26 + 50)/1070].

Nun wird an größeren Flughäfen heute bereits überall die 400-Hz-Bordnetzversorgung über ein Kabel realisiert. Hierfür entrichten die Fluggesellschaften eine Gebühr, die meistens pauschal in den Abfertigungsgebühren enthalten ist oder seltener nur bei wirklicher Nutzung separat berechnet wird. Es wäre deshalb konsequent, wenn neben der Stromversorgung parallel auch die Versorgung mit geheizter bzw. gekühlter Luft erfolgt. Die Hilfsturbine im Flugzeug würde dann nur noch ca. 5 min für das Anlassen der Haupttriebwerke mit Druckluft benötigt.

Leider wird in Europa zum Nachteil der Umwelt nur an wenigen Flughäfen die

externe Versorgung der Flugzeuge mit gekühlter bzw. geheizter Luft durchgeführt. Solche Flughäfen sind Oslo, Kopenhagen, Brüssel, Mailand, Rom und Zürich. In Deutschland wird die Technik nur in Hamburg eingesetzt. Vor der Ausführung steht der Einsatz an 24 Passagierbrücken beim neuen internationalen Flughafen von Athen.

Insbesondere dem Flughafen Zürich kommt eine Vorreiterrolle zu. Hier werden durch ein Betriebsverbot der Hilfsturbinen nach Angaben der Swissair [1] pro Jahr ca. 12,5 Mio. Liter Kerosin eingespart. Die Emissionen an SO₂, CO₂ und NO_x reduzieren sich um 90%. Die jährlich eingesparte Kerosinmenge durch den Verzicht auf die APU entspricht ca. 23000 Start- und Landezyklen einer MD 81.

3 Versorgung von geparkten Flugzeugen mittels Pre-Conditioned Air-(PCA-)System

Das PCA-Gerät (Bild 2 und 3) wird unterhalb des beweglichen Teils der Passagierbrücke hängend angeordnet (Bild 4). Es besteht im wesentlichen aus dem Gehäuse 1 mit Wetterschutzgitter 2 und Luftfilter 3 an der Ansaugöffnung, dem Zuluftgebläse 4, Lufterhitzer 5 und Luftkühler 6. Weitere Bestandteile sind die Kondensatpumpe 7, der Frequenzumformer 8 für die kontinuierliche Förderstromregelung des Zuluftgebläses und der Schaltschrank 9.

Der luftseitige Anschluß am Gerät erfolgt über Anschlußstutzen 10. Das Gerät besitzt zwei Anschlußstutzen. Der zweite Anschlußstutzen 11 ist absperr-

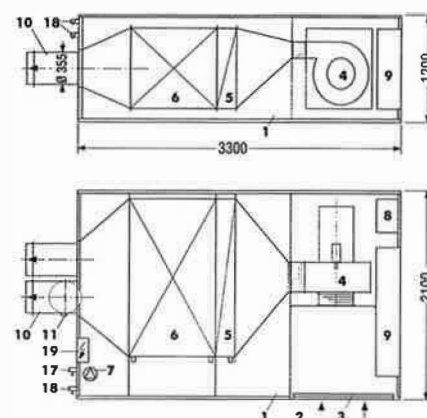


Bild 2 PCA-Gerät, konstruktiver Aufbau und Hauptabmessungen in mm

bar, er wird in der Regel nur für die Versorgung von Großraumflugzeugen wie B 747 oder A 340 genutzt.

Durch den regelbaren Zuluftvolumenstrom können alle Flugzeugtypen versorgt werden.

Klimatechnik / Flugzeugklimatisierung

Die Zuluftführung zum Flugzeug erfolgt über flexible Schlauchleitungen **12** zwischen Anschlußstutzen **10** und dem Schlauchadapter **13** am Flugzeugrumpf. Die Zuluftanschlüsse am Flugzeug sind bzgl. Größe und Anschlußmechanik genormt.

In nicht angeschlossenem Zustand sind die Schlauchleitungen in einem fahrbaren Korbwagen **14** deponiert, der am Fahrwerk der Passagierbrücke befestigt ist. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Schlauch mechanisch in einem Gehäuse auf eine Trommel aufzuwickeln.

Um den Platzbedarf für die Schlauchleitungen zu minimieren, werden Flachschläuche verwendet, die erst unter Betriebsdruck ihre runde Form annehmen.

Am Fahrwerk der Passagierbrücke befindet sich das Bediengerät **15** für das Bodenpersonal. Ferner ist am Kopf der Passagierbrücke ein flexibler Temperaturfühler vorhanden, der von der Flugzeugbesatzung in die Kabine gehängt wird.

Die Versorgungseinrichtung umfaßt die Medienleitungen und die Transporteinrichtung zu deren Führung zwischen dem PCA-Gerät und der Übergabestelle **16** am festen Teil der Passagierbrücke. Es werden folgende Versorgungsleitungen angeschlossen (Bild 2):

- Kühlsole und Heizmedienleitung, Vor- und Rücklauf **17**
- Kondensatleitung **18**

- Elektroleitung für Gebläse und Kondensatpumpe **19**

- Datenleitung der DDC-Anlage im PCA-Gerät zur DDC-GLT-Anlage im Gebäude.

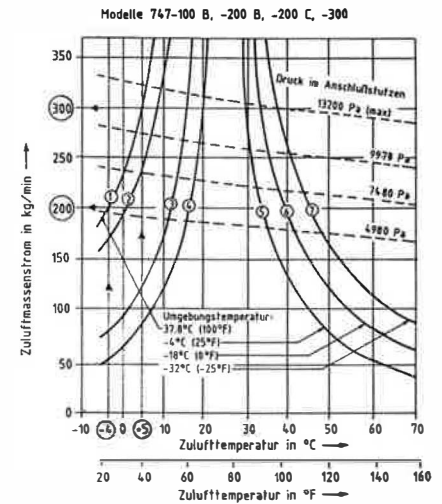
Alternativ ist auch die Ausrüstung des PCA-Gerätes mit einem eigenen Kälte- teil möglich. Diese Geräte werden als „Point-of-Use“-Geräte bezeichnet. Dabei entfallen die Leitungen für die Kühl- sole und das Heizmedium.

4 Anforderungen an PCA-Systeme

Die Anforderungen werden im wesentlichen durch die Wetterbedingungen am Einsatzort (Lufttemperatur, Luftfeuchte) und durch die zu versorgenden Flugzeugtypen bestimmt. Den hierzu nach Angabe des Flugzeugherstellers erforderlichen maximalen Zuluftvolumenstrom zeigt Tab. 2.

Die Auslegung der Zuluftvolumenströme für den Kühl- und Heizfall muß natürlich unter Berücksichtigung der gewählten Zulufttemperatur erfolgen. Grundsätzlich ist es hier im Kühlfall aus energetischen Gründen sinnvoll, eine sehr niedrige Zulufttemperatur zu wählen. Die in der Tab. 2 angegebenen Werte basieren auf einer Zulufttemperatur beim maximalen Kühlfall von ca. -4 bis 0°C hinter dem Luftkühler. Wie das Auslegungsdiagramm (Bild 5) des Baumusters B 747 (Boeing) zeigt, ist bei einer Auslegung auf eine Zulufttemperatur von -4°C ein Zuluftmas-

senstrom von 200 kg/min erforderlich. Wählt man dagegen eine Zulufttemperatur von +5°C, erhöht sich der erforderliche Zuluftmas- senstrom um 50% auf 300 kg/min. Der erforderliche statische Druck steigt von 5250 Pa um über 100% auf 11500 Pa an. Die Auslegung auf die niedrigere Zulufttemperatur ist unter diesem Aspekt die wirtschaftlichere Lösung.



Alle Türen und Luken geschlossen

- ① 23,9 °C (75 °F) Kabinentemperatur, 511 Personen, 16,2 kW elektrische Lasten, 6,1 kW äußere Wärmelast
- ② 26,7 °C (80 °F) Kabinentemperatur, Wärmelast wie ①
- ③ 23,9 °C (75 °F) Kabinentemperatur, 3 Personen, 6,1 kW äußere Wärmelast
- ④ 26,7 °C (80 °F) Kabinentemperatur, Wärmelast wie ③
- ⑤ ⑥ u. ⑦ 23,9 °C (75 °F) Kabinentemperatur, keine Personen oder Wärmelasten

Bild 5 Auslegungsdiagramm für B 747

Die hohen Drücke aufgrund der hohen Geschwindigkeiten im Kanalnetz des Flugzeuges (im Anschlußstutzen 40m/s) und der hochinduktiven Luftdurchlässe in der Kabine erfordern eine sehr luftdichte Ausführung der PCA-Geräte. Ferner tritt durch die niedrigen Zulufttemperaturen ein hoher Kondensatanfall im Sommer auf, insbesondere in Regionen mit hoher Luftfeuchte. Bei auftretender Vereisung wird das Kühlventil kurzzeitig geschlossen.

Bei der Ventilatorauslegung sind natürlich die Druckverluste der einzelnen geräteinternen Komponenten sowie der Schlauchleitung zum Flugzeug zu berücksichtigen. In der Regel werden Hochleistungsventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln mit einer max. Druckerhöhung von 8000 Pa eingesetzt. Davon entfallen ca. 70% auf den Druckverlust im Flugzeug.

Der Kühlerauslegung kommt besondere Beachtung zu. Neben der Entfeuchtung der Außenluft ist die hohe Aufwärmung der Zuluft im Ventilator aufgrund der Druckerhöhung zu beachten, die im



Bild 3 PCA-Gerät im Labortest
(Quelle: Krantz-TKT, Bergisch Gladbach)

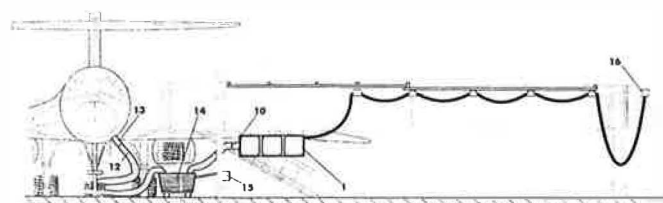


Bild 4 PCA-Gerät unterhalb der Passagierbrücke, über Schlauchleitung mit dem Flugzeug verbunden

Tab. 2 Zuluftvolumenstrom für verschiedene Flugzeugtypen

Typ	Baumusterbeispiel	Zuluftvolumenstrom [m³/h]
Jumbo aircraft	B 747, A 340	7500-10000
wide body aircraft	B 767, MD 11	5000- 6500
narrow body aircraft	A 320, B 737	3000- 4000

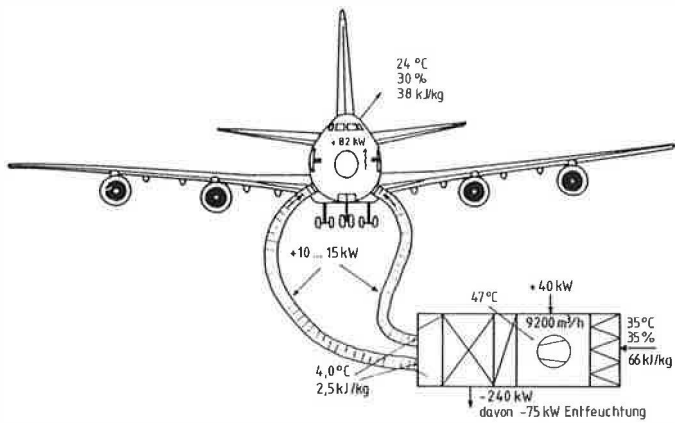


Bild 6 PCA-Geräteleistung und Flugzeugkühllast B 747 (Auslegungsfall)

Kühler wieder kompensiert werden muß.

Für den Standort Athen beispielsweise ergibt sich für die Kühlerauslegung eine Enthalpiedifferenz von 64 kJ/kg trockene Luft (Bild 6). Der abzuführenden Kühlleistung von max. 82 kW steht eine Kühlerleistung von 240 kW gegenüber. Davon entfallen ca. 40 kW auf die Ventilatorwärme und ca. 75 kW auf die Entfeuchtung.

Den erforderlichen Energieeinsatz für ein PCA- und 400-Hz-System zeigt die Tab. 3.

Um die in Tab. 3 angegebenen Maximalleistungen zu erzeugen, verbraucht die APU des Flugzeuges 115 l/h Kerosin entsprechend einem Primärenergieverbrauch von ca. 1070 kWh. Die entsprechenden Verbräuche bei externer Versorgung mittels PCA-System und 400-Hz-Umformer entsprechend Tab. 3 belaufen sich für

- Maximales Kühlen, Belüften und 400-Hz-Bordnetz 282 kWh
- Maximales Heizen, Belüften und 400-Hz-Bordnetz 232 kWh
- Nur Belüften und 400-Hz-Bordnetz 179 kWh

Der Vergleich zeigt, daß mittels PCA- und 400-Hz-Systemen der Primärenergieverbrauch um 74 bis 83 % gesenkt werden kann. Wird z. B. eine Kraft-Wärmekopplung, eventuell im Verbund mit einer Absorptionskälteanlage eingesetzt, ergeben sich noch höhere Primärenergieeinsparungen.

5 Einsatzvarianten

Die am häufigsten verwendete Variante ist die Montage des PCA-Gerätes am Kopf der Passagierbrücke (Bild 7). Vorteilhaft ist bei diesem System, daß kurze Leitungswege von 18 bis 20 m für den flexiblen Zuluftschlauch ausreichend sind. Die Aufwärmung der Zuluft im

Schlauch ist mit ca. 2 K unter Extrembedingungen (tiefe Zulufttemperatur und hohe Außenlufttemperatur) relativ gering. Das Gerät ist für Bedienung- und Wartungsarbeiten gut erreichbar. Die zusätzliche Gewichtsbelastung der Passagierbrücke durch das PCA-Gerät erfordert in der Regel keine besonderen

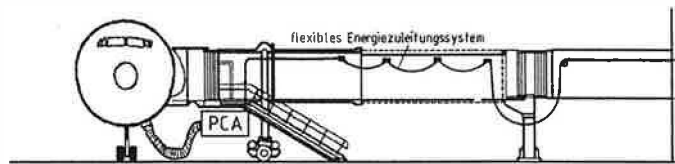


Bild 7 PCA-Gerät am Kopf der Passagierbrücke

Maßnahmen. Es ist jedoch eine Abstimmung mit dem Brückenhersteller bzgl. der Montagepunkte und der flexiblen Zuführung der Strom- und ggf. Soleleitungen erforderlich.

Bei der zweiten Variante (Bild 8) ist das Gerät am festen Teil der Passagierbrücke installiert. Die Zuleitungen für das Kühl- und Heizmedium und die Elektroversorgung können fest verlegt werden. Gegenüber der ersten Variante muß jedoch die Zuluftweiterführung mit ein oder zwei Rohren unterhalb der Passagierbrücke erfolgen. Diese Rohre sind teleskopisch ineinander verschiebbar. In der Praxis müssen Längen von ca. 35 bis 40 m überbrückt werden, so daß die Gesamtzuleitung inkl. Schlauch bis zu 60 m betragen kann. Hieraus resultieren Temperaturerhöhungen in der Zuluft bis zu 6 K, da nur eine

geringe Dämmschichtdicke wegen der Flexibilität von Schlauch und Rohr möglich ist. Ferner sind die Dichtungen des Teleskoprohres aufgrund der Druckdifferenz von ca. 7000 Pa hohen Beanspruchungen ausgesetzt.

Der vorteilhafteste Installationsort ist die Unterbringung des PCA-Gerätes im Gebäude (Bild 9). Das Gerät ist wettergeschützt und die Versorgungsleitungen brauchen nicht aus dem Gebäude herausgeführt zu werden. Für die Auslegung im

Sommer wie im Winter kann in Abstimmung mit den Zentralanlagen ein Umluftanteil aus dem Gebäude durch Reduktion der Wärmeaustauschergrößen im PCA-Gerät verwendet werden.

Die Zuleitung zum Flugzeug erfolgt über ein isoliertes Erdrohr mit entsprechend geringen Wärmeverlusten. Neben der Parkpositionslinie (Centerline) des Flugzeuges befinden sich dazu ein oder zwei Bodenpits, in welche das Erdrohr mündet. Nach dem Öffnen des Deckels kann das Bodenpersonal den Zuluft-

Tab. 3 Energieverbrauch von PCA- und 400-Hz-Systemen am Beispiel eines Airbus A 320

Betriebsart	Aufwand	Primärenergieeinsatz ⁵⁾
Zuluftförderung	3650 m ³ /h 9 kWh Strom	24 kWh
Maximale Kühlleistung	78 kW ¹⁾ 39 kWh Strom ²⁾	103 kWh
Maximale Heizleistung	45 kW 53 kWh Erdgas ³⁾	53 kWh
Maximaler 400-Hz-Bordnetzverbrauch	50 kW 59 kWh Strom ⁴⁾	155 kWh

- 1) Maximale Kühlleistung 26 kW
- 2) Leistungszahl Kälteerzeugung $\epsilon = 2$
- 3) Kesselnutzungsgrad $\eta = 0,85$
- 4) Wirkungsgrad der Umformung 85 %
- 5) Kraftwerkwirkungsgrad 38 %

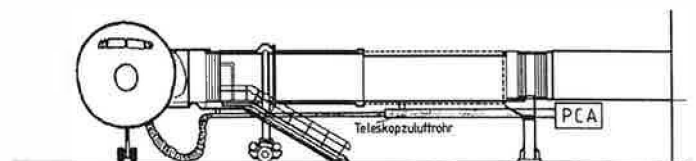


Bild 8 PCA-Gerät am festen Brücken- bzw. Gebäudeteil

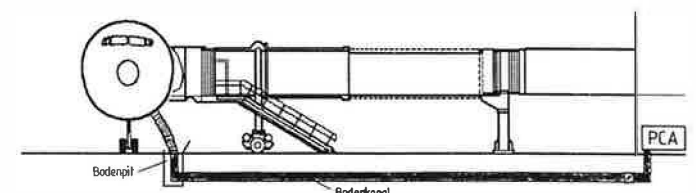


Bild 9 PCA-Gerät im Gebäudeteil

schlauch aus dem Bodenpit herausziehen. Die Schlauchlängen sind mit 10 bis 12 m die kürzesten unter den beschriebenen Systemen.

Ein weiterer Vorteil ist neben dem geschützten Aufbewahrungsort für den Schlauch jeglicher Wegfall von Installationen an der Passagierbrücke, die auch immer einer Gefahr der Beschädigung durch Bodenfahrzeuge (z. B. Zuluftrohre unterhalb der Brücke) ausgesetzt sind.

6 Dezentrale oder zentrale Energieversorgung

Die PCA-Geräte müssen grundsätzlich mindestens mit Elektroenergie versorgt werden. Bei dezentraler Wärme- und Kälteerzeugung in jedem einzelnen Gerät (Point-of-Use-System) treten folgende Vorteile auf:

- Kein Platzbedarf für Kälte- und Heizzentrale erforderlich.
- Kein Wärme- und Kälteverteilnetz erforderlich.
- Nachrüstungen einfacher möglich, da nur Stromanschluß erforderlich.
- Schnelles System durch den Einsatz von Direktverdampfer zur Kühlung und Elektrolufterhitzer zur Heizung.

Nachteile beim dezentralen System:

- Unter mittel- und nordeuropäischen Verhältnissen sind die Heizleistungen zu hoch, um ökologisch und ökonomisch vertretbar Elektrolufterhitzer einsetzen zu können.
- Die Vielzahl von Kälteaggregaten erhöht den Wartungsaufwand erheblich. Jedes PCA-Gerät hat einen eigenen Kältemittelkreislauf. Dies ist insbesondere bei der Montage des PCA-Gerätes am Brückenkopf ein Nachteil für den Flughafen, da während der Wartung die Passagierbrücke nicht genutzt werden kann.
- Die zu installierende Gesamtleistung für Heizen und Kühlen ist erheblich höher, da der Gleichzeitigkeitsfaktor nicht genutzt werden kann.

Wird dagegen eine zentrale Versorgung des PCA-Gerätes mit Heiz- und Kühlmedium gewählt, kommen folgende Vorteile in Betracht:

- Wirtschaftliche Erzeugung von Wärme und Kälte im Verbund BHKW – Absorptionskälteanlage (mit zusätzlichem Eisspeicher) möglich,
- ggf. Nutzung von Fernwärme oder Fernkälte mit nachgeschaltetem Tiefkältekreis,
- geringer Wartungsaufwand durch Zentralanlage,
- Ausnutzung des Gleichzeitigkeitsfaktors.

Die zentrale Versorgung bietet in der Summe die größeren Vorteile. Für mittel- und nordeuropäische Klimaverhältnisse scheidet die dezentrale Wärme-erzeugung mittels Elektrolufterhitzer aus. Für die Wärmeversorgung ist deshalb ein Verteilnetz erforderlich. In diesem Fall spricht auch nichts mehr für eine dezentrale Kälteversorgung. Das Verteilnetz sollte als 4-Leiter-System dann auch für die Kälteversorgung genutzt werden.

Insbesondere durch die Berücksichtigung der Faktoren Flugzeugmix, durchschnittliche Passagierauslastung, Zeitprofil der Brückenbelegung usw. können bei einer Zentralanlage die zu installierenden Kälte- und Wärmeleistungen um 30 bis 40 % gegenüber einer dezentralen Lösung gesenkt werden.

7 Vergleich der Energieverbräuche und Kosten

Betrachtet man den Energieverbrauch eines PCA-Gerätes, stellt sich zuerst die Frage nach der Nutzungshäufigkeit der Funktionen Heizen, nur Belüften und Kühlen.

Die in der Tab. 4 aufgeführten Bereiche zeigen z. B. für mitteleuropäische Verhältnisse, daß der Kühlfall deutlich überwiegt. Dies liegt zum einen an der wetterunabhängigen inneren Kühllast des Flugzeuges und zum anderen an der relativ hohen Zulufterwärmung bereits im Ventilator. Die in Tab. 4 angegebene Nutzungszeit einer Passagierbrücke von 7 Stunden innerhalb 24 Stunden stellt ei-

Tab. 4 Häufigkeiten der Betriebsarten beim PCA-System in Mitteleuropa

Außenlufttemperatur [°C]	Betriebsart	Häufigkeit gesamt [h/a]	Häufigkeit bei 7 h/d [h/a]
unter + 4	Heizen und Belüften	2140	624
4 – 10	nur Belüften	2380	694
über + 10	Kühlen und Belüften	4240	1237
	Summe	8760	2555

nen Mittelwert dar, der je nach Flughafen schwanken kann.

Die Energiekosten für die verschiedenen Betriebsarten wie Luftförderung, Lufterwärmung bzw. -kühlung zeigt die Tab. 5 am Beispiel eines Airbus A 320. Ferner sind auch die Kosten für eine Abnahme von 25 kW aus dem 400-Hz-Netz des Flughafens angegeben.

Im Gegensatz dazu ergeben sich beim Betrieb der APU im Flugzeug Energiekosten von DM 46,- pro Stunde, entsprechend einem Kerosinverbrauch von 115 l/h bei einem Preis von 0,40 DM/l. Dabei deckt die APU der A 320 die gleichen Leistungen wie das PCA/400-Hz-System in Tab. 5 ab. Die Energiekosten liegen dennoch im Kühlbetrieb um den Faktor 5, im Heizbetrieb um den Faktor

Tab. 5 PCA- und 400-Hz-Energiekosten für Airbus A 320

Komponente		DM/h
Zuluft-Ventilator	9 kW (max.)	1,10
Maximale Kälteleistung	78 kW	4,70
Maximale Heizleistung	45 kW	3,70
400 Hz-Bordnetz	25 kW (Durchschnitt)	3,00
Summe Heizen und Belüften	+ 400 Hz	7,80
Summe nur Belüften	+ 400 Hz	4,10
Summe Kühlen und Belüften	+ 400 Hz	8,80

6 und im Falle einer reinen Belüftung mit Außenluft um den Faktor 10 höher, wenn die APU eingesetzt wird.

Diese Zahlen gelten für ein Verkehrsflugzeug modernster Bauart. Ältere Baumuster haben erheblich höhere Kerosinverbräuche der APU, die bei älteren Jumbo Jets bis zu 550 Liter pro Stunde betragen (Tab. 6 nach [1] und [2]).

Die Kosten pro Betriebsstunde der APU sind abhängig von der Flugzeuggröße in Tab. 7 nach [1] angegeben. Dabei sind der Kerosinverbrauch und die Wartung/Instandhaltung berücksichtigt.

8 Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit

Um die Gesamtkosten des APU-Betriebes mit den Kosten eines Pre-Conditioned-Air-Systems zu vergleichen, ist auch die Betrachtung der Investitionskosten erforderlich. Für eine Passagierbrücke ist mit durchschnittlichen Kosten von

Tab. 6 Kerosinverbrauch in l/h der APU Hilfsturbine

Flugzeugtyp	400-Hz-Bordnetz + Klima
narrow body aircraft	115 – 130
wide body aircraft	180 – 200
Jumbo aircraft	400 – 550

Tab. 7 Gesamtkosten in DM/h der APU Hilfsturbine

Flugzeugtyp	400-Hz-Bordnetz + Klima
narrow body aircraft	90 – 110
wide body aircraft	160 – 190
Jumbo aircraft	230 – 270

DM 400 000,- zu rechnen. Dazu gehören das PCA-Gerät mit Zubehör (Luftschläuche, Flugzeugadapter) sowie die Zuleitungen und die zentrale Wärme- und Kälteversorgung. Bei einem Abschreibungszeitraum von 15 Jahren und einem Zins von 8 % p. a. ergibt sich eine Jahresbelastung von DM 46 000,-.

Für die Wartungs- und Instandhaltungskosten werden 2,5 % von der Investitionssumme, also DM 10 000,- pro Jahr, angesetzt. Ferner ergeben sich Bedienungskosten durch das Bodenpersonal von ca. 9 Minuten pro 90 Minuten Parkzeit eines Flugzeuges. Dies ergibt bei einer Nutzung von 7 Stunden pro Tag eine Summe von DM 12 750,-. Die Betriebskosten für Strom, Kälte und Wärme betragen pro Jahr im Durchschnitt DM 14 550,- pro Passagierbrücke. Alle aufgeführten Kostenblöcke ergeben eine Summe von DM 83 300,- pro Passagierbrücke und Jahr. Auf die Jahresnutzungszeit von 365 Tagen à 7 Stunden bezogen sind dies ca. 33 DM/h. Im Vergleich dazu betragen die mittleren Gesamtkosten einer APU ca. 180 DM/h (Tab. 6). Erhöht man die PCA-Kosten um einen Sicherheitsfaktor von 1,2, so stehen Gesamtkosten von 40 DM/h beim PCA-System 180 DM/h beim Betrieb der APU-Bordturbine gegenüber, welche demnach um den Faktor 4,5 in den Gesamtkosten teurer ist.

Berücksichtigt man, daß in den APU-Gesamtkosten von 180 DM/h auch die Stromerzeugung für das 400-Hz-Bord-

netz enthalten ist, reduziert sich zwar bei reinem Klimabetrieb der APU der Verbrauch um ca. 20 %, der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand aber nicht. Auch dann beträgt bei APU-Gesamtkosten von 160 DM/h das Kostenverhältnis noch 1:4.

Aufgrund der enormen Kostenunterschiede ist eine statische Betrachtung der Amortisationszeit ausreichend. Dazu zeigt Bild 10 die Kosten in Abhängigkeit der Nutzungszeit. Bereits nach 2,5 Jahren sind bei einem Nutzungspreis von 80 DM/h für das PCA-System durch die Fluggesellschaften die Investitionskosten von DM 400 000,- pro Passagierbrücke zzgl. Energie-, Bedienungs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten erbracht. Bei einer Gebühr von 60 DM/h beträgt die statische Amortisationszeit 3,5 Jahre. Innerhalb von 10 Jahren kann somit ein Ertrag von DM 750 000,- bis DM 1,2 Mio. pro Passagierbrücke erwirtschaftet werden.

Eine unabhängige Studie der TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrttechnik [3], welche im Auftrag des Bundesverkehrsministers durchgeführt wurde, kommt für ein „Alternativ Szenario“ am Flughafen Frankfurt bei Ausrüstung aller Passagierbrücken mit PCA-Geräten zu jährlichen Erträgen von DM 2,2 Mio. Dabei wurde die Verrechnung der PCA-Kosten an die Fluggesellschaften aufwandsneutral entsprechend den eingesparten APU-Kosten betrachtet.

9 Zusammenfassung

Die Vorteile von Pre-Conditioned-Air-Systemen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Drastische Reduktion des Schadstoffausstoßes um ca. 90 % durch Abschaltung der Hilfsturbine im Flugzeug während der Parkzeit am Gate.
- Reduktion des Primärenergieverbrauches je nach Lastfall (Kühlen, Heizen, nur Belüften) um 74 bis 83 %.
- Verringerung der Geruchsbelästigung der Flugzeugpassagiere und je nach Außenluftsaugsituation auch der Personen in Gebäuden durch Kerosin.
- Verschleißminderung der Hilfsturbine durch geringere Betriebszeit und Senkung der Wartungs- und Instandhaltungskosten.

- Verbesserung der Luftqualität (Schadstoffkonzentration) für Passagiere, Personal und Anwohner von Flughäfen.
- Imageverbesserung des Flughafens in der Öffentlichkeit durch den Einsatz umweltentlastender PCA-Technologie.
- Kurze Amortisationszeit von 3 Jahren erzielbar, wobei die Kosten für die Fluggesellschaften durch die Nutzungsgebühren nicht höher sind, als durch die Reduktion der APU-Betriebskosten eingespart wird.

Aufgrund der Vorteile von Pre-Conditioned-Air-Systemen bleibt zu hoffen, daß die anstehenden Terminalneubauten insbesondere in Deutschland mit diesen Systemen ausgerüstet werden. Eine Akzeptanz dieser Systeme bei den Fluggesellschaften würde sicherlich zu einer Änderung der noch zögerlichen Haltung bei einigen Flughäfen im Bereich von Terminalneubauten und Sanierungen mit Nachrüstungen führen.

Auch wenn die Einführung einer Flugbenzinsteuer kurzfristig nicht zu erwarten ist, werden doch im Bundesverkehrsministerium Möglichkeiten überprüft, die Schadstoffemissionen im Flughafenbereich als Gebührentatbestand einzuführen. Letztendlich ist auch der Gesetzgeber gefordert, durch Umweltauflagen die Nutzung dieser Technik zum Schutz von Menschen und Natur zu fördern.

Besonders der Aspekt von Umweltauflagen in der Zukunft sollte bei geplanten Terminalneubauten oder -erweiterung beachtet werden, da eine direkte Einplanung beim Neubau sicherlich kostengünstiger als eine nachträgliche Installation ist.

Literatur

- [1] Gautschi, Ulrich: The „APU-Free“ Airport, The reasons for introducing the APU-free concept at Zürich Airport, the technology and the results – Vortrag Inter-Airport 1995, Frankfurt
- [2] Burns & McDonnell, Planning Guidebook of Aircraft Ground Support Air Systems, Air Transport Association of America
- [3] Hütting, G., Hotes, A., Blechschmidt, F.: Schadstoffreduktionspotentiale durch den Ersatz von Hilfsturbinen (APU) durch bodenseitige Energieversorgungssysteme. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesverkehrsministers. durchgeführt an der TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr (1996)

Schlüsselwörter

Flugzeugklimatisierung
Pre-Conditioned-Air-(PCA-) System
Umweltentlastung im Flughafenbereich
Auxiliary-Power-Unit (APU)

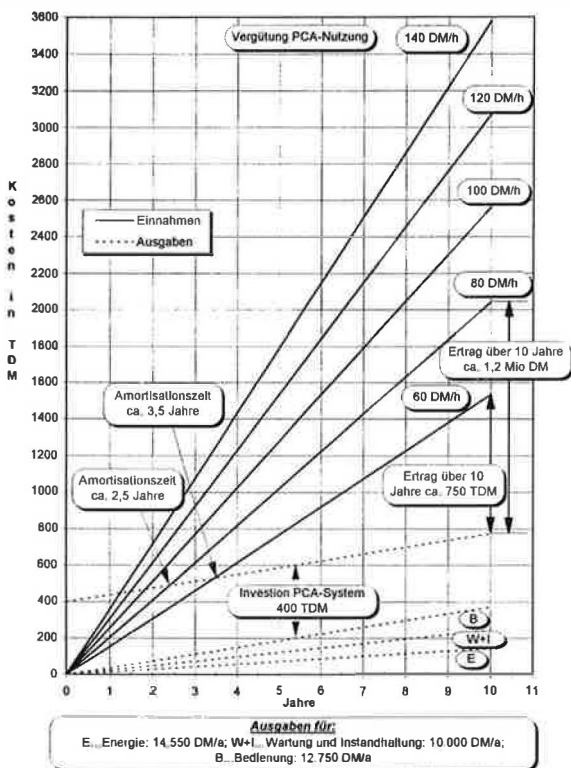


Bild 10 Amortisationszeiten und Erträge von Pre-Conditioned-Air-(PCA-) Systemen pro Passagierbrücke