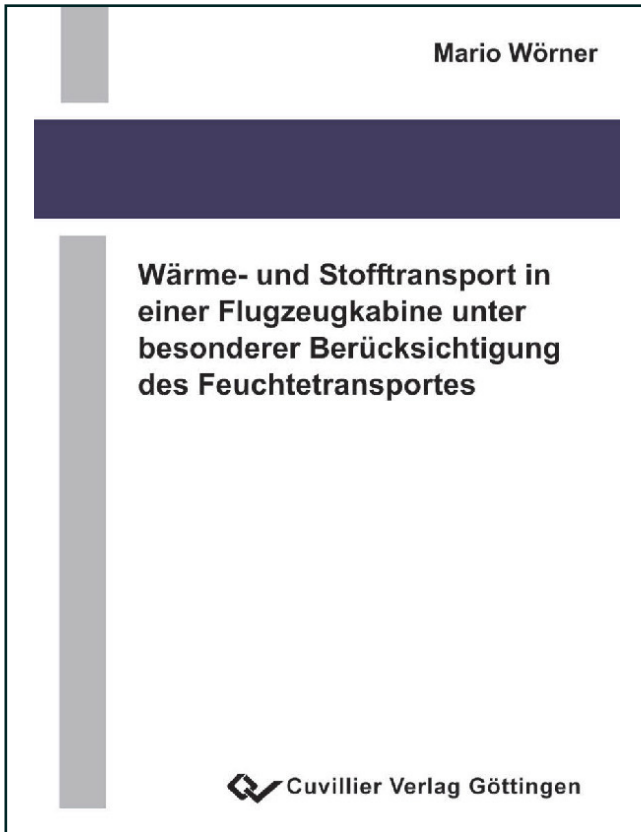




Mario Wörner (Autor)

**Wärme- und Stofftransport in einer Flugzeugkabine
unter besonderer Berücksichtigung des
Feuchtetransportes**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1996>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

Seit dem Beginn der kommerziellen Luftfahrt vor mehr als 40 Jahren wird wiederholt von Problemen mit der Kondensation und Ansammlung von flüssigem Wasser in Flugzeugen berichtet. Dabei sind alle Flugzeuge von der Kondensation betroffen, wobei das Ausmaß entscheidend von der Art der jeweiligen Nutzung durch die Airlines beeinflusst wird. Die Recherche in [29] zeigt, dass auch die Flugzeughersteller diese Problematik erkannt haben und Lösungen zur Verringerung der Wasseransammlung untersuchen. Gerade im Hinblick auf neue und größere Flugzeuge, wie dem Airbus A380 oder der Boeing 787, ist dies erforderlich. So soll nach [53] zusätzlich der Komfort der Passagiere in der Boeing 787 vor allem durch eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in der Kabine gesteigert werden. Mehr Passagiere, längeren Flugzeiten und eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit werden, wie in Kapitel 2 gezeigt wird, die Kondensationsproblematik voraussichtlich erhöhen.

Für die Einleitung von Maßnahmen zur Reduzierung der Wasseransammlung ist es notwendig die physikalischen Vorgänge zu verstehen, die den Wassertransport und die damit einhergehende Kondensation hervorrufen. Für die Untersuchung der Vorgänge im Flugzeug bieten sich Simulationsprogramme an, da sich in den vergangenen Jahren der Trend zur numerischen Simulation auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung stark beschleunigt hat. Hintergrund sind immer leistungsfähigere Rechner und neue anwendungsfreundlichere Simulationsprogramme, die den Einsatz von numerischen Methoden fördern. Durch die Simulationen können die Zeiten und Kosten für aufwendige Versuche reduziert werden, die dann nur noch zur Validation der Simulationsergebnisse erforderlich sind.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von *aktiven*- und *passiven* Konzepten zur Reduzierung der Wasseransammlung im Flugzeug. Unter aktiven Maßnahmen versteht man dabei den Einsatz von zusätzlichen Systemen, während bei den passiven Konzepten auf die Systeme verzichtet wird. In [65], [66] und [67] wurden zum Beispiel die Bauweise und die Materialien der Flugzeugisolierung mit Hilfe von Simulationen und Messungen als passive Konzepte untersucht. Die dabei erzielten Ergebnisse werden in dieser Arbeit weiterentwickelt. Dabei wird der Wasserdampftransport in der Isolierung wieder mit Strömungssimulationsprogrammen und durch experimentelle Arbeiten untersucht.

Aktive Systeme trocknen zum Beispiel die Luft in bestimmten Bereichen des Flugzeuges, um die Kondensation zu verringern bzw. angefallenes Kondensat zu entfernen. Die Simulation des Einflusses eines aktiven Systems ist bisher nicht möglich, da es kein Modell gibt, das die Strömungsverhältnisse im Flugzeugrumpf als Randbedingungen ermitteln kann. Bisherige Strömungssimulationen, zum Beispiel bei der Airbus Deutschland GmbH in Hamburg, berücksichtigen nur Teilbereiche eines Flugzeuges (zum Beispiel die Kabine). Für eine umfassende Strömungssimulation wäre es erforderlich, die komplette Flugzeuggeometrie in einem Flugzeug in ein Berechnungsgitter zu überführen. Dies ist sehr aufwendig und nicht praktikabel. Gleichzeitig würde die dann benötigte Rechenleistung heutige Rechnersysteme überfordern. Daher bietet sich die Erstellung eines eindimensionalen Simulationsmodells an, welches alle relevanten thermodynamischen und strömungsmechanischen Phänomene berücksichtigt die in einem Flugzeug auftreten. Es basiert auf einem in [51] beschriebenen SIMULINK-Modell der trockenen Luftströme. Die Implementierung erfolgt unter Anwendung einer objektorientierten Methode. Das in dieser Arbeit erstellte mathematisch-physikalische Simulationsmodell enthält zur Vereinfachung nur wenige Komponenten. Durch den gewählten objektorientierten Ansatz wird die Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit des Modells unterstützt, so dass zukünftig wesentlich komplexere und höher aufgelöste Simulationen möglich sind.

In Kapitel 2 erfolgt eine Einführung in die Problematik der Wasseransammlung im Flugzeug und es wird ein Überblick über den Stand der Technik gegeben. Es werden die Methoden zur Untersuchung des Feuchtetransportes ausgewählt und bisherige Arbeiten vorgestellt.

Zum Verständnis der Modellgenerierung ist die Kenntnis der Strömungsverhältnisse im Flugzeug notwendig. Dabei werden in Kapitel 3 alle relevanten Strömungswege, der Aufbau der Isolierung sowie das Belüftungssystem in einem Passagierflugzeug erklärt. In Kapitel 4 folgt die Vorstellung der physikalischen und numerischen Grundlagen.

Das Kapitel 5 enthält die Beschreibung der objektorientierten Methode zur Erstellung eines vereinfachten thermo-hydraulischen Flugzeugmodells. Dabei wird zuerst die Modellierungssprache MODELICA, mit der Simulationsumgebung DYMOLA, eingeführt. Es folgt die Modellerstellung, in der die Reduzierung der Flugzeuggeometrie auf ein Ersatzmodell und alle Komponenten beschrieben werden. Nicht zu vernachlässigen ist die Identifikation und Ermittlung der Simulationsparameter. Dies erfolgt teilweise durch Vorgaben der Airbus Deutschland GmbH. Für alle fehlenden Parameter wurden Messungen an Mock-up's bei Airbus durchgeführt, wobei der Versuchsaufbau und die Messergebnisse erläutert werden. Abschließend finden sich in diesem Kapitel die eigentlichen Simulationen zur Bestimmung der Luftverteilung und des Einflusses eines aktiven Trocknungssystems auf die Kondensation sowie die Verifikation und Validation der Simulationsergebnisse.

In Kapitel 6 folgt die Beschreibung der durchgeführten Strömungssimulationen die den Wassertransport und die Speicherung von Wasser in der Isolierung mit verschiedenen Bauweisen untersuchen. Dazu gehören Validationsmessungen an Versuchsständen an der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) und bei der Airbus Deutschland GmbH in Hamburg.

Die Zusammenfassung der beschriebenen Arbeiten findet sich in Kapitel 7, während in Abschnitt 7.1 ein Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen gegeben wird.

Kapitel 2

Stand des Wissens und der Technik

In diesem Kapitel wird die Kondensation, und die damit verbundene mögliche Problematik beim Betrieb von Passagierflugzeugen, erläutert. Dies beinhaltet die Beschreibung von generell möglichen Maßnahmen zur Reduktion der Wasseransammlung sowie die Auswahl konkreter Techniken zur genaueren Untersuchung. Diese wird mittels numerischer und experimenteller Methoden durchgeführt und beinhaltet die Simulation des Feuchtetransportes im Allgemeinen. Dabei wird zwischen der System- und Feldsimulation unterschieden, wobei die Systemsimulation den Wärme-, Impuls- und Stofftransport global im gesamten Flugzeugrumpf untersucht, während die Feldsimulation die Kondensation nur lokal im Bereich der Isolierung betrachtet.

Abschließend erfolgt die Vorstellung bisheriger Arbeiten zum Feuchtetransport und zur Wasseransammlung in Flugzeugen, die als Grundlage der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Arbeiten dienen.

2.1 Kondensation und Wasseransammlung im Flugzeug

Die Ursache der Kondensation liegt hauptsächlich in der Abgabe von Wasser an die Kabinenluft durch den Menschen. Dies geschieht über die Atmung und durch die Haut. Obwohl die relative Luftfeuchte φ in Flugzeugkabinen während des Fluges durch die Klimatisierung extrem niedrig gehalten wird ($\varphi < 20\%$, siehe Abschnitt 3.3.2.2), ist noch Wasserdampf in der Luft enthalten. Aufgrund der niedrigen Umgebungstemperaturen während des Fluges von -50 bis -60 °C, kommt es zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur an der Innenseite der Flugzeugstruktur. Da die Temperaturen im Flug dort meist unterhalb des Gefrierpunktes liegen, sammelt sich das Kondensat als Eis (siehe Abbildung 2.1 a). Dabei strömt die Luft aus der Kabine durch Undichtigkeiten im Kabinenlining in Richtung der kalten Struktur. Besonders kritisch hinsichtlich Kondensation sind die Spanten und Stringer, die der Versteifung der Flugzeughülle dienen und weit in die Isolierung hineinragen. An diesen Kältebrücken kommt es sehr schnell zur Ansammlung von Wasser. Die Luft, und der darin enthaltene Wasserdampf, kann wiederum durch Spalte in der Flugzeugisolierung direkt zur Struktur



(a)



(b)

Abbildung 2.1: Kondensatbildung als Eis an der Flugzeugstruktur (a), Wasserflecken am Rand eines Handgepäckfaches (b) [29]

gelangen, oder es kommt zur Diffusion durch die Isolationspakete. Die bisher verwendete Isolierung besteht aus Glasfasermatten, die in einer Umhüllfolie eingeschweißt eingesetzt werden. Die Diffusion durch die Folie resultiert aus dem temperaturbedingten Unterschied zwischen dem Wasserdampfpartialdruck in der Kabinenluft und dem Sättigungsdampfdruck an der Innenseite der Außenhaut. Dabei kommt es bereits in dem Isolierpaket zur Bildung von Wasser oder Eis (siehe Abbildung 2.2). Während der Landung und am Boden taut das Eis. Der größte Teil des dabei entstehenden Wassers fließt über die sich schindelartig überlappenden Isolierpakete in die Bilge im unteren Teil des Flugzeuges (siehe Abschnitt 3.1), wo es während des Bodenaufenthaltes abgepumpt werden kann. Ein Teil gelangt allerdings durch Leckagen in die Crown Area oberhalb der Kabine. Von dort tropft es in die Kabine oder es sammelt sich oberhalb des Deckenlinings. Die Abbildung 2.1b zeigt zum Beispiel die Wasserflecken am Rand eines Handgepäckfaches.

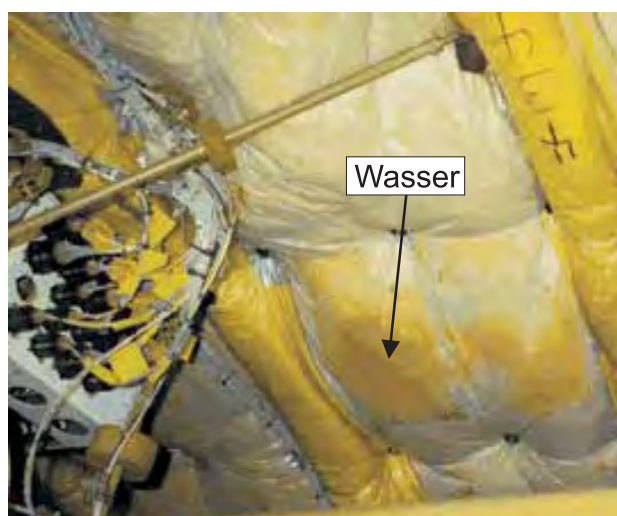


Abbildung 2.2: Feuchte Isolierpakete in einer Boeing 737-300 [29]

Das Flüssigwasser in den Isolierpaketen sammelt sich im unteren Bereich und kann nicht abfließen. Da die Grenzfläche des sich sammelnden Kondensats mit der Luft sehr klein ist, findet kaum Verdampfung statt. Deshalb steigt gerade bei sich wiederholenden Flügen mit langen Flugzeiten und kurzen Standzeiten am Boden die Wassermenge in den Paketen stetig an. In Abbildung 2.3 ist die Wasseransammlung an der Innenseite der Struktur indirekt zu erkennen. Dargestellt sind zwei Infrarotaufnahmen einer Thermografiekamera, die jeweils die Oberflächentemperaturen vergleichbarer Sektionen von zwei unterschiedlichen Flugzeugen direkt nach der Landung zeigen. Ein Vergleich der beiden Flugzeuge zeigt, dass die Oberflächentemperatur in Abbildung 2.3b stellenweise erheblich niedriger ist als in Abbildung 2.3a. Dies liegt darin begründet, dass bei dem Flugzeug in Abbildung 2.3b eine zusätzliche Frachttür vorhanden ist. Durch die aus Festigkeitsgründen erforderliche zusätzliche Rahmenkonstruktion erhöht sich in diesem Bereich der Wärmedurchgang, weshalb mehr Wasser kondensiert. In Abbildung 2.3b sind der Türrahmen und die Tür aufgrund der niedrigeren lokalen Temperaturen zu erkennen. Die Temperaturen speziell im unteren Bereich der Tür sind insgesamt sehr niedrig und lassen sich nur durch das Vorhandensein von zusätzlichen Versteifungen der Struktur, und den damit erhöhten Wärmekapazitäten, nicht erklären. Durch Untersuchungen bei der Lufthansa Technik AG, Abteilung FRA WE14, wurde festgestellt, dass sich Wasser hinter dem Lining angesammelt hat. Direkt nach der Landung taut das Wasser auf, wobei beim Übergang von der festen in die flüssige Phase Energie aufgewendet werden muss. Diese Energie wird der Umgebung entzogen, wodurch sich die Struktur nach der Landung langsamer erwärmt als wenn kein Kondensat vorhanden ist. Dieses Wasser sammelt sich im Bereich des vor den Türen geschlossenen Kabinenbodens, da das Wasser dort nicht in die Bilge abfließen kann. In Abbildung 2.3a ist keine Tür vorhanden, weshalb weniger Wasser anfällt, welches wiederum zum größten Teil zur Bilge geführt wird.

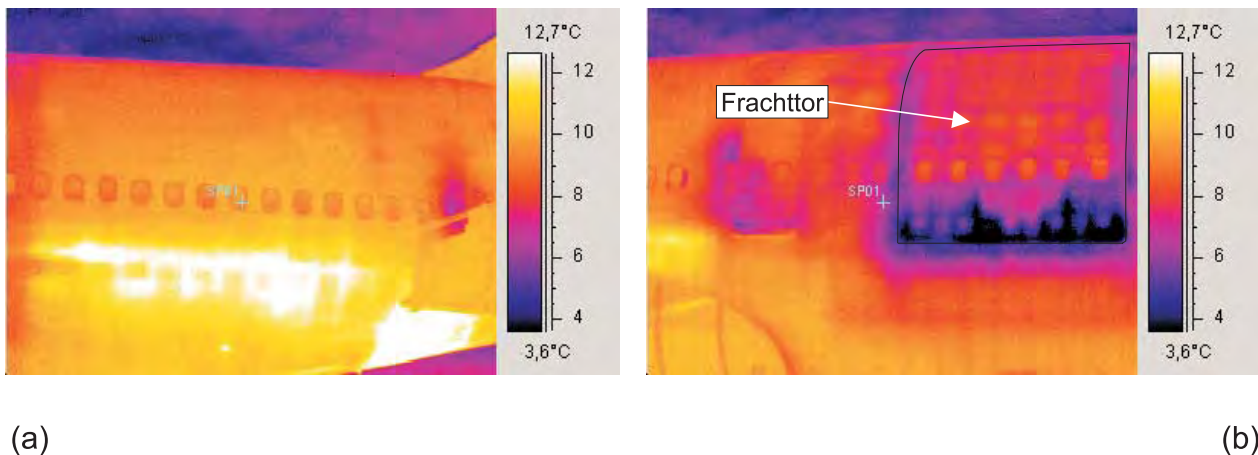


Abbildung 2.3: Darstellung der Oberflächentemperaturen eines Flugzeuges ohne (a) und mit (b) zusätzlicher Frachttür direkt nach der Landung. Quelle: Lufthansa Technik AG, Customer Engineering Department FRA WE14

Durch die Ansammlung von Wasser zwischen dem Kabinenlining und der Struktur kann es zu folgenden Problemen beim Betrieb eines Flugzeuges kommen:

- Das Auftauen des Eises führt in bestimmten Situationen zu unkontrollierten Wasserbewegungen (*“Rain in the plane”*).
- Aus dem ständig steigenden Wasseranteil in der Isolation folgt ein gesteigertes lastunabhängiges Leergewicht des Flugzeugs. Daraus resultiert ein erhöhter Kraftstoffbedarf bei gleicher Nutzlast, der sich in gesteigerten Betriebskosten widerspiegelt. Bei einem nicht zu überschreitenden Gesamtgewicht geht Nutzlast verloren.
- Durch die Feuchtigkeit in der Isolierung sind die tragenden Konstruktionsteile durch Korrosion gefährdet.
- Es können Kurzschlüsse im elektrischen System auftreten, was die Sicherheit des Flugbetriebes gefährden kann.
- In der feuchten Isolierung finden Mikroorganismen, wie Bakterien oder Schimmelpilze, einen idealen Nährboden. Dies kann hygienische Probleme zur Folge haben.
- Verringerung der thermischen und akustischen Isolierung.
- Erhöhter Wartungsaufwand durch regelmäßiges Austauschen der Isolierpakete.

Die Bildung und Anlagerung von flüssigem Wasser wird im Wesentlichen vom Sitzabstand und damit der Passagierzahl, der Auslastung, der Flugzeugnutzung sowie der Flugstrecke bestimmt. Gerade bei Charterflügen mit vielen Passagieren ist die Feuchtigkeit in der Kabine erhöht. Bei gleichzeitig hohen Nutzungsraten, mit verkürzten Bodenzeiten bei kalten Umgebungsbedingungen und hoher Anzahl von Flügen, steigt die Wasseransammlung. In [29] wurden dazu Untersuchungen an der Flotte von Boeing 757 Flugzeugen durchgeführt. Die Abbildung 2.4 zeigt als Ergebnis die geschätzte tägliche Kondensation in der Crown Area in g pro Spantfeld. Der Mittelwert liegt dabei bei 91 g.

Zur genauen Ermittlung wo und wieviel Wasser anfällt, wurde bei der Airbus Deutschland GmbH ein 5-Jahres Check (D-Check) eines A310-Charterflugzeuges dazu genutzt, um sämtliche feuchte Isolierpakete die demontierbar waren zu wechseln und das Ausbaugewicht zu ermitteln. Bei allen Paketen die nicht ausgebaut werden konnten, wurden diese mit Drainagelöchern versehen. Das dann abfließende Wasser konnte aufgefangen und gewogen werden. Insgesamt wurde dabei eine Gesamtmasse an Kondenswasser von 420 kg ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass bei dem untersuchten Flugzeug keine Isolierpakete in der Crown Area infolge von Kondenswasseransammlungen beanstandet wurden. Vielmehr ist der Bereich der Fenster kritisch, wo Wassermassen zu finden waren, die dem 1 bis 1.5-fachen des eigentlichen Isolierpaketes entsprechen. Vereinzelt wurde sogar ein Verhältnis von 1.5 bis 2.5 erreicht. Zusätzlich wurden Unterschiede zwischen rechter und linker Flugzeugseite festgestellt. Dies liegt wieder darin begründet, dass sich auf der rechten Seite zwei Frachttore befinden. Generell sind alle Türisolierungen kritisch, also auch die Passagier- und Nottüren.

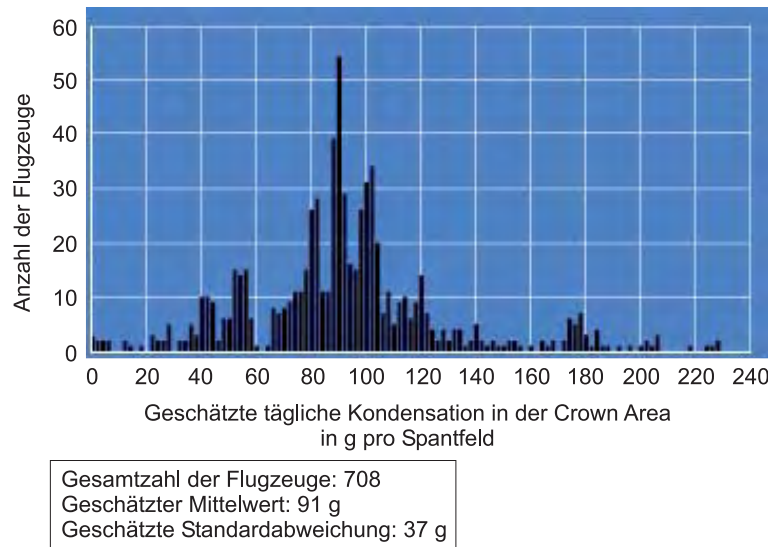


Abbildung 2.4: Geschätzte Kondensation in der Crown Area bei der Boeing 757 Flotte [29]

Bei anderen Flugzeugen des Typs A310 wurden Gewichtsteigerungen der Flugzeuge, bezogen auf den Auslieferungszustand, von bis zu 1000 kg ermittelt. Da diese Gewichtserhöhung auch durch Verschmutzungen und Verunreinigungen in der Bilge sowie durch konstruktive Veränderungen verursacht werden kann, ist der auf kondensierendes Wasser zurückzuführende Anteil nicht eindeutig zu bestimmen. Da bei dem beschriebenen D-Check jedoch in den untersuchten Isolierpaketen schon 420 kg Wasser gemessen wurden, ist davon auszugehen, dass die Gewichtserhöhungen hauptsächlich mit dem Vorhandensein von Kondenswasser erklärt werden können. Um diese hohen Wasseransammlungen zu reduzieren, werden die heutigen Isolierpakete an der Unterseite mit Drainagelöchern versehen. Trotzdem kann die Kondensatbildung nicht vollständig verhindert werden, weshalb weiterführende Maßnahmen zu treffen sind.

Da in Zukunft noch größere Flugzeuge an die Airlines übergeben werden, die zudem noch höhere Reichweiten besitzen, wird sich die Kondensationsproblematik vermutlich verschärfen. So werden zum Beispiel im neuen A380 zwischen 500 und 600 Passagiere über eine Reichweite von bis zu 14800 km transportiert. Im Vergleich zu dem im D-Check untersuchten A310, der ca. 220 Passagiere bis zu 10000 km transportieren kann, resultieren daraus längere Flugzeiten, bei gleichzeitig erhöhtem Wassereintrag in die Kabinenluft. Wird dabei, wie teilweise geplant, die Kabinefeuchte aus Komfortgründen auf Werte größer 20 % angehoben, ist zu erwarten, dass eine weitere Verschärfung des Problems eintritt.

2.2 Möglichkeiten der Reduktion der Kondensation und Wasseransammlung

Neben den im vorangegangenen Abschnitt 2.1 schon beschriebenen Drainagelöchern in den Isolierpaketen werden in [29] weitere Möglichkeiten genannt, welche die Wasseransammlung und die daraus resultierenden Probleme verringern:

- Bei der Konstruktion und beim Einbau der Isolierungen muss verstärkt darauf geachtet werden, dass keine Spalte zur Struktur auftreten.
- Kapillaraktive Materialien können dafür sorgen, dass das Wasser an bestimmten Problemstellen kontrolliert abgeführt wird. In der Crown Area können auch sorptive Materialien auf das Deckenlining aufgebracht werden, die Wasser aufnehmen und am Boden Verdampfen lassen. Es kann dann nicht durch Spalte im Lining in die Kabine tropfen.
- Durch die aktive Belüftung der Crown Area gelangt trockene Luft hinter das Lining. Dadurch wird die Kondensation reduziert, bzw. das Verdampfen unterstützt. Die Belüftung kann dabei mit Kabinenzuluft oder getrockneter Luft erfolgen, wobei letztere über entsprechende Trocknungssysteme aus der feuchten Luft in der Crown Area gewonnen wird.
- Bei der Konstruktion der Struktur ist darauf zu achten, dass die Drainage des Wassers in die Bilge verbessert wird.
- Durch Abstandhalter zwischen Struktur und Isolierung in der Bilge wird dafür gesorgt, dass die Pakete keinen Kontakt mit dem in die Bilge fließenden Wasser haben [64].
- Die Positionierung von elektrischen Leitungen und Steckern muss entsprechend verändert werden. Zusätzlich ist eine Kapselung von Steckverbindungen nötig, um das Eindringen von Wasser zu vermeiden.

Die Einführung von kapillaraktiven oder sorptiven Materialien, die Verbesserung der Drainage sowie die Positionierung und Kapselung von elektrischen Systemen sind geeignet zur Verringerung der negativen Auswirkungen des kondensierten und angesammelten Wassers.

Bevor die Folgen verringert werden, ist es jedoch viel interessanter und wichtiger die Bildung und Ansammlung von Wasser zu untersuchen sowie geeignete Techniken zu identifizieren, die diese reduzieren. Dafür kommt zum Einen der Aufbau und die Anordnung des Isolierpaketes in Frage. Dabei soll untersucht werden, ob es möglich ist nur durch die Veränderung des Isolierungsaufbaus und dessen Positionierung eine Reduktion der Wasseransammlung zu erreichen. Des Weiteren kann untersucht werden, inwieweit die aktive Belüftung mit trockener Luft in der Crown Area die Kondensation beeinflusst.

2.3 Auswahl der Methoden

Im vorangegangenen Abschnitt 2.2 wurden der Aufbau des Isolierpaketes und die aktive Belüftung als mögliche Maßnahmen beschrieben, um die Kondensation und Wasseransammlung im Flugzeug zu reduzieren. Der Vorteil bei der eventuellen Verbesserung des Aufbaus und der Positionierung der Isolierung ist, dass durch diese *passiven* Konzepte keine zusätzlichen Systeme benötigt werden. Bei den *aktiven* Maßnahmen kann trockene Kabinenzuluft direkt in die Crown Area geführt werden, was allerdings eine Änderung der Luftverteilung im Flugzeug erfordert. Werden sorptive Trocknungssysteme, wie zum Beispiel Zonal DryingTM Systeme [17] verwendet, erhöht sich der Energiebedarf und das Gewicht des Flugzeuges, was gesteigerte Betriebskosten zur Folge hat. Trotzdem kann der Einsatz solcher Systeme wirtschaftlich sein, wenn dadurch zum Beispiel die Wartungsintervalle verlängert werden können, oder andere negative Auswirkungen durch Kondensatbildung verhindert werden.

In den vergangenen Jahren hat sich die numerische Simulation als Entwicklungswerkzeug etabliert. Dies läßt sich durch die zunehmende Anzahl an Methoden und Simulationsprogrammen erklären, die wiederum durch die ständig steigende Leistungsfähigkeit moderner Rechnersysteme unterstützt werden. Die Simulation eignet sich hervorragend zur Optimierung von Systemen oder Komponenten, die allein durch experimentelle Methoden nicht, oder nur unter erheblich höherem Zeitaufwand, bewerkstelligt werden kann. Dabei ist jedoch die *Verifikation* und *Validation* der Modelle entscheidend. Nach [49] klärt die Verifikation die Güte des Modells durch schrittweise Prüfung von Teilmodellen, bis zu deren Zusammenwirken im Gesamtmodell. Die Validation erfolgt nach Abschluß der Verifikation und untersucht, ob das Modell das typische Verhalten des Originalsystems wiedergibt. Dies kann dabei durch analytisch berechenbare Testfälle oder durch experimentelle Vergleiche realisiert werden.

Die numerische Untersuchung von thermodynamischen und strömungsmechanischen Fragestellungen wird heutzutage vielfach mit kommerziellen Strömungssimulationsprogrammen (CFD, Computational Fluid Dynamics) durchgeführt. Anwendungsbeispiele dieser *Feldsimulationen* lassen sich dabei in den vielfältigsten Bereichen finden, wie zum Beispiel dem Automobilbau, der chemischen Industrie, im Schiffbau oder der Luftfahrtindustrie. Im Bereich der Kabinenklimatisierung wird dabei zum Beispiel das Kabinenlayout hinsichtlich einer optimalen Durchströmung untersucht (siehe Abbildung 2.5). Dabei wird die zu untersuchende Geometrie in ein hinreichend genaues mikroskopisches Berechnungsgitter überführt, das aus einer endlichen Zahl kleiner Kontrollvolumina besteht (FVM, Finite-Volumen-Methode, siehe Abschnitt 4.7.1). Für jedes Kontrollvolumen löst die FVM die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Die Schwierigkeit bei CFD-Simulationen ist, dass der Modellaufbau, die Identifikation und Spezifikation der Randbedingungen sowie die eigentlichen Rechnungen sehr zeitaufwändig sind. Zusätzlich wird eine hohe Speicherkapazität des Rechners benötigt, wobei das Erreichen einer konvergenten Lösung besonders bei großen Modellen nicht immer gewährleistet werden kann.