

# STRAHLUNG ALS WESENTLICHER FAKTOR DER NUMERISCHEN SIMULATION VON FLUGZEUGKABINENINNENSTRÖMUNGEN FÜR KOMFORTVORHERSAGEN

**M. Konstantinov, M. Rütten, M. Lambert, C. Wagner**

DLR Göttingen, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Bunsenstrasse 10, 37073  
Göttingen

## Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der numerischen Simulation der gemischten thermischen Konvektionsströmung in einer Do728 Flugzeugkabine. Insbesondere wird der Zusammenhang zwischen der turbulenten Luftströmung aus den Klimaauflüssen und der Wärmestrahlung analysiert. Einer der wesentlichen Faktoren bei der CFD Berechnung solcher Strömungen ist eine realistische Auswahl der Randbedingungen. Die numerischen Ergebnisse für die Flugzeugkabine Do728, die unter verschiedenen Modellierungsansätzen gewonnen wurden, werden dargestellt. Die Berechnungen wurden sowohl mit dem DLR eigenen CFD Code THETA als auch mit dem kommerziellen Code STAR-CD durchgeführt. Die CFD Ergebnisse werden experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt.

## 1. EINLEITUNG

Der thermische Komfort von Passagieren ist ein wesentliches Entscheidungskriterium für die Ausgestaltung des Interieurs von Flugzeugkabinen. Die Vorhersage des thermischen Komforts in der Flugzeugkabine hängt von verschiedenen Wärmequellen ab. Besonders eingebaute Kommunikations- und Unterhaltungselektronik, solare Strahlung sowie die Leistungselektronik verschiedener Steuerungskreise sind zu berücksichtigen. Die Flugpassagiere tragen selbst einen maßgeblichen Anteil an Wärme in die Kabine ein. Neben den verschiedenen Wärmequellen zeichnet sich eine Flugzeugkabine durch eine äußerst komplexe Konfiguration aus, ferner überlagern sich mehrere Strömungsphänomene, die zu einer instabilen, gemischten thermischen Konvektion führen. Die sich in der Kabine einstellende Strömung stellt den wesentlichen Faktor des thermischen Komforts dar, daher ist eine komfortrelevante Strömungssteuerung das entscheidende Element zur Verbesserung des thermischen Komforts. Experimente sind aufgrund des hohen konfigurativen Aufwandes sehr teuer, sie liefern jedoch wertvolle Informationen zur Verbesserung der verwendeten Modelle in der numerischen Simulation und dienen der Validierung [1-2]. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung neuer Turbulenzmodelle und Wärmestrahlungsmodelle für zunehmend genauere und realistische numerische Vorhersage erforderlich. Wie sich die Modellierung der Wärmestrahlung auf thermische Konvektion auswirkt, ist Gegenstand dieser Arbeit. Daher werden im folgenden Kapitel die Grundlagen des verwendeten Strahlungsmodells erläutert. Anschließend wird die zugrunde liegende Flugzeugkonfiguration vorgestellt. Auf die speziellen Anforderungen der CFD Gittergenerierung wird eingegangen, bevor eine Diskussion der numerischen Simulationsergebnisse erfolgt. Die wesentlichen Erkenntnisse werden schließlich zusammengefasst.

## 2. WÄRMESTRAHLUNGSMODELL. DISCRETE TRANSFER RADIATION METHOD (DTRM)

In den hier vorgestellten numerischen Simulationen wird der Wärmetransport durch Strahlung von Oberfläche zu Oberfläche mittels der Discrete-Transfer-Radiation-Method (DTRM) modelliert. Sie basiert ähnlich wie die Radiation-Simulation-Monte-Carlo (RSMC) Methode [3] auf dem Transfer von unabhängigen Energiepartikeln. Diese Partikel werden von jedem Oberflächenpunkt ausgesandt, aber im Gegensatz zur RSMC erfolgt die Aussendung nur in einer festen Anzahl vorher festgelegter Richtungen. In einem Preprocessing-Schritt werden die Randflächen des Berechnungsgitters, die sich in diesen Richtungen befinden, gefunden und abgespeichert. Während der Simulation wird die Wärmestrahlungsenergie direkt von Oberfläche zu Oberfläche übertragen, ohne die Trajektorie der Partikel durch das Berechnungsgebiet verfolgen zu müssen.

Im DLR Code THETA ist die DTRM implementiert, jedoch wird in dem oben genannten Preprocessing-Schritt ein sehr effizienter Ray-Tracer Algorithmus [4] verwendet, der auf einer speziellen Element-to-Element-Liste basiert und ohne Elementsuche zur Trajektorienverfolgung auskommt. Damit lassen sich Austauschrandflächen sehr effizient bestimmen. Da der DLR THETA Code einen Gebietszerlegungsansatz für parallele Berechnungen verfolgt, wird die Liste der gespeicherten Randflächen derartig zerlegt, dass jeder Prozessor eine Liste von Randflächen erhält, die von irgendeiner Randfläche in seinem eigenen Gebiet durch Strahlung erreicht werden können. Während der Simulation wird der DTRM-Schritt lokal auf jedem Teilgebiet berechnet, und anschließend werden die Daten in einem Kommunikationsschritt ausgetauscht, nur so lassen sich Performance-Verluste vermeiden. Im Schnitt dauert ein Strahlungsschritt nur ein Viertel der Zeit, die für eine Iteration der thermischen Konvektionsströmung benötigt wird. Daher kann der

Strahlungsschritt in jeder einzelnen Iteration durchgeführt werden. Für sehr große Berechnungsgitter kann die Liste der durch Strahlung erreichbaren Flächen, die während der Simulation gespeichert werden muss, sehr groß werden. Daher ist die Anzahl der möglichen diskreten Richtungen, die die DTRM gewählt werden können, eingeschränkt. Um den statistischen Fehler zu verringern, wird ein Glättungsalgorithmus auf die Strahlungsenergieverteilung der Randflächen angewandt.

Das vorgestellte Modell ermöglicht genaue und glatte Strahlungswärmeflussverteilungen selbst für eine klein gewählte Anzahl von diskreten Richtungen. Die abgestrahlte Leistung pro Fläche eines so genannten Grauen Lambert-Strahlers ist dabei durch das Stefan-Boltzmannsche Gesetz gegeben:

$$(1) E(T) = \varepsilon \sigma T^4.$$

Hier bezeichnet  $\varepsilon$  den Emissionsgrad,  $T$  die Temperatur, und  $\sigma = 5.671 * 10^{-8} W / m^2 K^4$  die Stefan-Boltzmann-Konstante. Die Strahlungsleistung die von einer infinitesimalen Oberfläche  $dA$  in einen Raumwinkel  $d\Omega$  abgestrahlt wird, beschreibt das Lambertsche Kosinussgesetz:

$$(2) dq = I \cos(\Theta) dA d\Omega, d\Omega = \sin(\Theta) d\Theta d\Phi.$$

Der Proportionalitätsfaktor  $I$  ist die Strahlungsintensität. Eine detaillierte Beschreibung der Physik der Wärmestrahlung findet sich z.B. in [5]. Für jede (Wand-) Randfläche  $F$  des Berechnungsgebietes wird die vom Nutzer festgesetzte feste Anzahl von diskreten Richtungen folgendermaßen berechnet. Ausgehend von äquidistant gewählten Winkelabständen

$$(3) R^{i_\Phi} = \frac{i_\Phi}{n_\Phi}, R^{i_\Theta} = \frac{i_\Theta}{n_\Theta}, i_\Phi = 1 \dots n_\Phi, i_\Theta = 1 \dots n_\Theta,$$

$$n_\Phi, n_\Theta \in \mathbb{N}$$

werden die Winkel

$$(4) \Phi^{i_\Phi} = 2\pi R^{i_\Phi}, \Theta^{i_\Theta} = \arccos(\sqrt{1 - R^{i_\Theta}})$$

und die Richtungen

$$(5) d^{i_\Phi, i_\Theta} = (\sin\Theta^{i_\Theta} \cos\Phi^{i_\Phi}, \sin\Theta^{i_\Theta} \sin\Phi^{i_\Phi}, \cos\Theta^{i_\Theta})^T$$

$$d^0 = (1, 0, 0)^T$$

der Abstrahlung eines gedachten Halbkugelstrahlers berechnet. Die Richtungsverteilung erfüllt aufgrund der Winkelberechnung (4) das Lamberts Kosinussgesetz (2). Diese Richtungen werden wie folgt

$$d_F^{i_\Phi, i_\Theta} = R_{\vec{n}_F} \cdot d^{i_\Phi, i_\Theta}, d_F^0 = R_{\vec{n}_F} \cdot d^0 = \frac{\vec{n}_F}{\|\vec{n}_F\|}$$

berechnet. Anschließend werden Strahlen in diese Richtungen gesendet und durch das Berechnungsgebiet verfolgt. Treffen sie auf eine Wandrandfläche, wird deren Nummer in einer speziellen zur sendenden Wandrandfläche gehörenden Zielwandflächenliste abgespeichert. Am Schluss besitzt jede Wandrandfläche des Berechnungsgebietes die oben erwähnte Liste von Zielwandflächen, die von dieser Wandrandfläche aus durch Strahlung erreicht werden können. Es werden die

Wandrandflächen des Berechnungsgebietes als Graue Lambertstrahler betrachtet, daher wird eine feste Anzahl  $N_P$  von Partikeln, die nach (1) die Energie

$$e_p = \frac{\varepsilon \sigma T^4 \|\vec{n}_F\|}{N_P}$$

tragen, gesendet. Per Zufallsauswahl wird dann eine Wandrandfläche aus der Zielwandflächenliste ausgewählt und die Energie des Partikels direkt zur empfangenen Strahlungsenergie dieser Wandrandfläche addiert. Da jede Wandrandfläche in der Liste von Zielwandflächen vieler anderer Wandrandflächen sein kann, wird die gesamte in einem DTRM Schritt empfangene Energie ( $E_F^0$ ) summiert. Dann wird die

Energie  $\varepsilon E_F^0$  absorbiert und die Energie  $(1 - \varepsilon) E_F^0$  reflektiert. Eine so genannte Wandreflexionsiteration, wobei die übertragene Energie pro Iteration durch

$$(6) e_p^{n+1} = \frac{E_F^{n+1}}{N_P}, E_F^{n+1} = (1 - \varepsilon) E_F^n, 0 \leq n < N_{iter}$$

gegeben ist, wird durchgeführt um diese Wandreflexion zu simulieren. Die mit dem Strahlungsmodell berechneten Wärmeflüsse werden somit als Quellterme auf den Rand eingebracht und so in die Strömungsberechnung integriert.

### 3. CFD - MODELL UND RANDBEDINGUNGEN

Die numerischen Berechnungen wurden für ein Kabinensegment der Do728 durchgeführt. Es wird nur eine Passagiersitzreihe betrachtet. Das CFD - Modell des Segmentes ist in Bild 1 dargestellt.

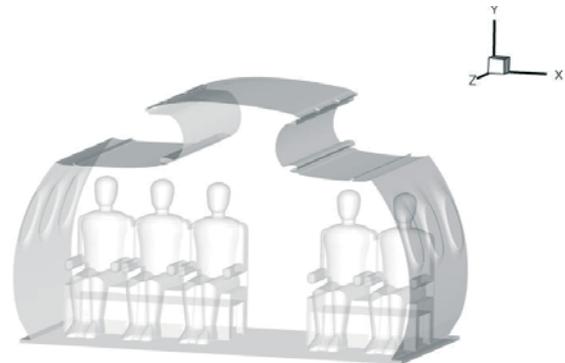


BILD 1. CFD - Modell eines Kabinensegmentes der Do728.

Für eine möglichst realistische Modellierung der Einströmrandbedingungen wurden die Austrittsrippen der Kabinenluftauslässe (KLA) konfigurativ abgebildet (siehe Bild 2).

Für die numerische Simulation wurde ein hybrides CFD - Gitter mit dem kommerziellen Netzgenerator Centaur erzeugt. Für die Wandaufösung werden 5 Prismenschichten erstellt. Das gesamte CFD - Modell besteht aus ca. 7 Mio. Zellen und ca. 20 Mio. Knoten. Ein Schnitt des CFD - Modells senkrecht durch die Passagiere ist in Bild 3 dargestellt.

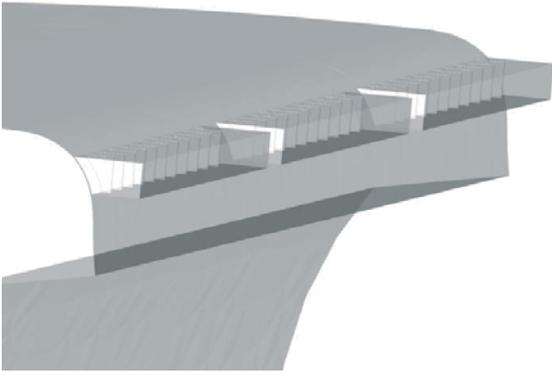


BILD 2. Geometrie des Kabinenluftauslasses (KLA), hier integriert im Kabinenceiling: Detaildarstellung.

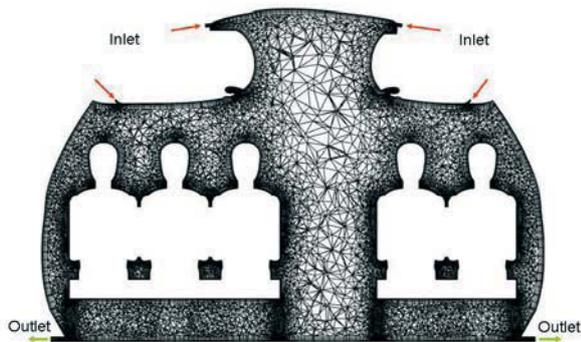


BILD 3. Numerisches Netz: Schnittdarstellung mit In- und Outlet Randbedingungen.

Mit Hilfe der Prismenschichten wurde um die Passagiere herum eine hohe Netzauflösung realisiert. Insbesondere entspricht die Wandauflösung den Anforderungen für eine Simulation der thermischen Konvektionsströmung. In Bild 4 ist ein Netzausschnitt durch das CFD Gitter dargestellt.

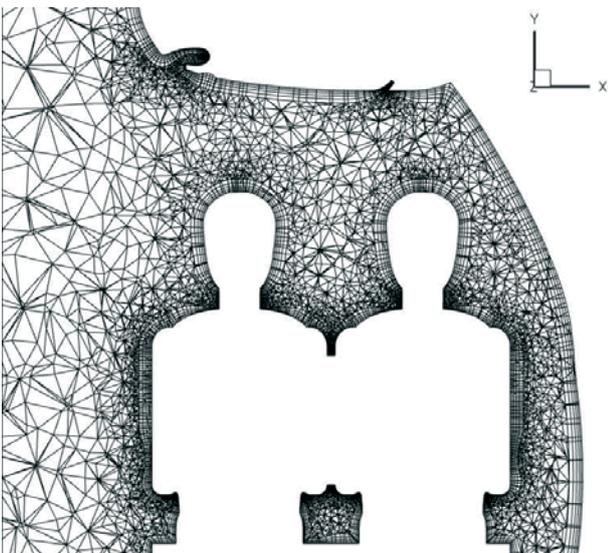


BILD 4. Numerisches Netz: Netzauflösung an der Wand durch Prismenschichten.

Die transienten CFD Berechnungen mit Wärmestrahlung und Turbulenzmodell  $k-\omega$  SST wurden mit DLR Programm THETA und mit dem kommerziellen Kode STAR-CD durchgeführt. Für das berechnete CFD - Modell wurde ein Zeitschritt von  $\Delta t = 1e-3$  s gewählt. Wie schon dargestellt, wurde die Wärmestrahlung mit der DTRM (Discrete Transfer Radiation Method) berechnet.

Die Randbedingungen für die Berechnung wurden aufgrund der detaillierten experimentellen Untersuchungen ausgewählt [6]. Sie sind in die Tabelle 1 zusammengeführt.

TAB 1. Liste der Randbedingungen

Randbedingung	Vorgegebene Werte
Inlet an der Decke	$V = 0.44$ m/s, $T = 285$ K
Inlet am Fenster	$V = 0.87$ m/s, $T = 285$ K
Outlet	$P = 1$ bar
Lichtbänder	$q = 750$ W
Seitenwände	$T = 295.45$ K, $\alpha = 4.41$ m <sup>2</sup> K/W
Decke	$T = 295.45$ K, $\alpha = 6.01$ m <sup>2</sup> K/W
Fenster	$T = 288$ K, $\alpha = 0.24$ m <sup>2</sup> K/W
Brust, Arme, Beine, Hüfte und Schuhe	$q = 45$ W
Köpfe	$q = 62.12$ W
Sessel und Boden	Adiabatic

Hierbei bezeichnet T die absolute Temperatur,  $\alpha$  den Wärmewiderstand, P den Druck und q den Wärmefluss.

Die in der Simulation gewählten Inlet-Randbedingungen repräsentieren eine Lufttauschrate von 23.5 Kabinenvolumen/h. Die Frischluftzufuhr wird über 4 Auslassflächen gleichmäßig verteilt. Die Einstromtemperatur beträgt 285 K. Die Wärmeflusswerte an der Oberfläche der Fluggäste entsprechen den Werten, die in einem Experiment an speziell erstellten Dummies ermittelt wurden.

#### 4. SIMULATIONSERGEBNISSE

Die Temperaturverteilung in der Kabine wird in erster Linie durch das Geschwindigkeitsfeld der Einströmung bestimmt. Gleichzeitig jedoch initiieren starke Temperaturgradienten dominante konvektive Strömungen. Die Geschwindigkeitsverteilung der sich einstellenden gemischten Konvektionsströmung im mittleren Schnitt ist in Bild 5 dargestellt.

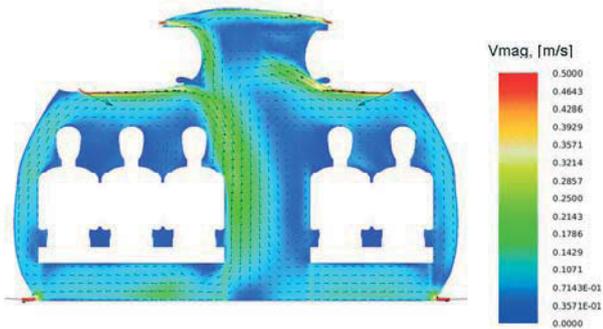


BILD 5. Geschwindigkeitsverteilung im mittleren Schnitt der Do728 Kabine. Berechnung mit Wärmestrahlung.

In Bild 5 bestätigt sich, dass wegen der geometrischen Besonderheiten der Kabine sich keine symmetrische Strömung einstellen kann. Im Passagierbereich beobachtet man zwei entgegengerichtete dominante Wirbel, wobei entlang der Unterseite der Gepäckfächer die maximalen Geschwindigkeitswerte auftreten. Hier spielt der sogenannte *Coanda Effekt* eine Rolle, der zur Umlenkung des winkelig austretenden Frischluftstromes zum Gepäckfach führt. Die relativ hohen Geschwindigkeiten finden sich auch im Gangbereich als Folge der Wechselwirkung der zwei dominanten Wirbel wieder. Die sich einstellende farbskalierte Temperaturverteilung wird in Bild 6 dargestellt. Die höchsten Temperaturen über 60°C entstehen in Bereichen um die seitlichen Lichtbänder.

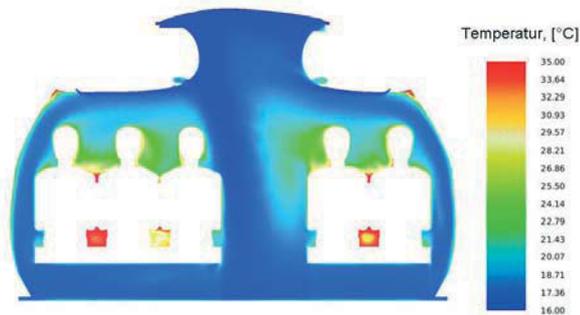


BILD 6. Temperaturverteilung im mittleren Schnitt. Berechnung mit Wärmestrahlung

In Bild 6 ist deutlich zu sehen, dass keine Abkühlung in den Bereichen von seitlichen Lichtbändern stattfindet. Da die Kühlluft aus den KLA direkt in den zentralen Kabinenraum geführt wird, fehlt ein nach außen gerichteter Kühlluftstrom. Dadurch wird die Luft im Bereich der seitlichen äußeren Lichtbänder stark aufgeheizt. Aufgrund der lokalen Aufheizung der Luft, der thermischen Konvektion ausgehend von den Passagieren und der dominanten Wirbelstrukturen befinden sich die beiden seitlichen Lichtbänder in einem Strömungsablösebereich mit sehr geringen Geschwindigkeiten. Zudem, entstehen hohe Temperaturwerte an und zwischen den Passagieren, insbesondere unter den Armgelenken der Passagiere. In

diesen Bereichen beobachtet man keine nennenswerte Luftbewegung.

Eine Iso-Oberfläche mit der Temperatur 17°C wird in Bild 7 dargestellt. Sie zeigt die Verbreitung der Kühlluft von KLA über die Passagiere.

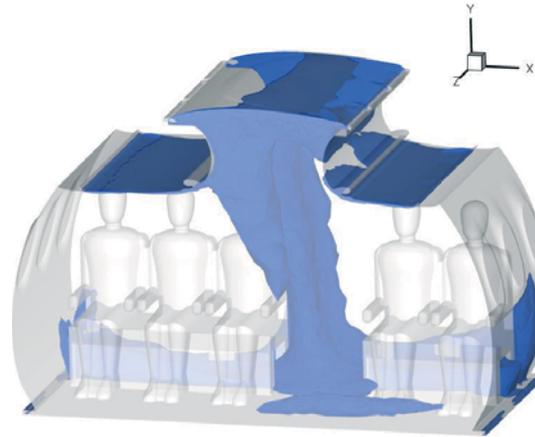


BILD 7. Verbreitung der Kühlluft in der Do728 (Iso-Oberfläche T=17°C).

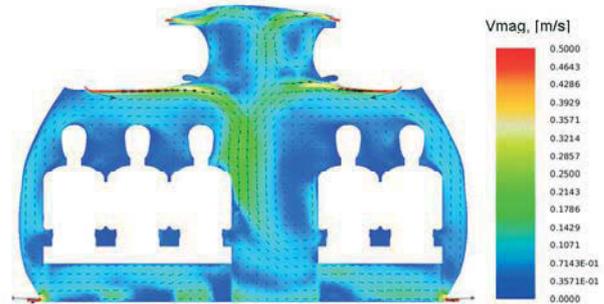


BILD 8. Geschwindigkeitsverteilung im mittleren Schnitt der Do728. Temperaturberechnung ohne Wärmestrahlung.

Es ist prinzipiell möglich und aus numerischer Sicht einfacher die Kabinentemperatur ohne Wärmestrahlung zu berechnen. In diesem Fall tritt aber ein Problem mit der Vorgabe der Randbedingungen an Passagieren auf. Es muss die gesamte Wärme über Konvektion und Diffusion abgeführt werden. Damit wird bei einem solchem Zugang eine stärkere konvektive Strömung auftreten. Zudem verstärkt sich die Wirkung von heißen Randflächen wie z.B. den Lichtbändern auf die überströmende Luft. Dies zusammen verändert das Gesamtströmungsfeld in der Kabine (siehe Bild 8) signifikant.

Die weiteren zwei Bilder zeigen einen Vergleich der Temperaturverteilung an der Wand und auf Passagieroberflächen jeweils für die Berechnungen ohne (Bild 9) und mit Wärmestrahlung (Bild 10).

temperaturverteilung in der Kabine gezeigt. Auf diesem Bild wird der Testfall mit den Dummies präsentiert.

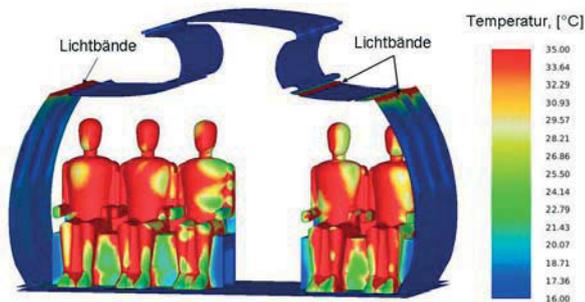


BILD 9. Temperaturverteilung an der Wand bei der Temperaturberechnung ohne Wärmestrahlung.

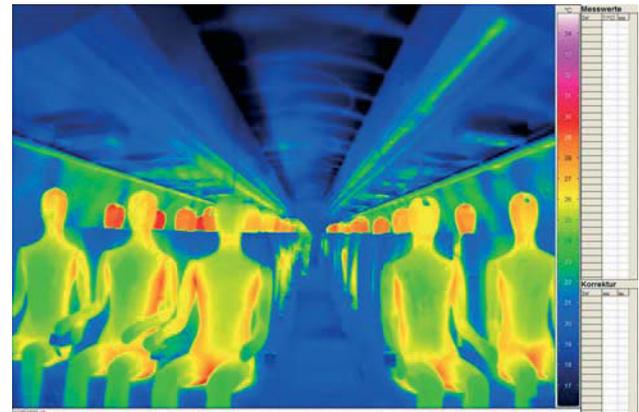


BILD 11. Komfortuntersuchung mit Thermodummies: Gemessene Temperaturverteilung in der Kabine Do728.

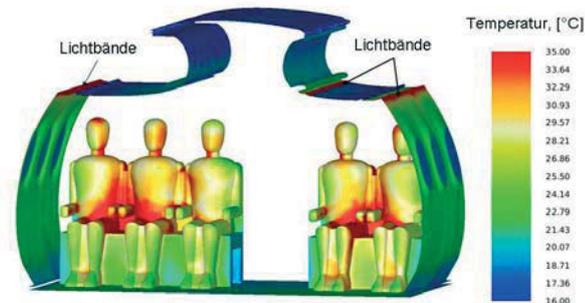


BILD 10. Temperaturverteilung an der Wand bei der Temperaturberechnung mit Wärmestrahlungsmodell.

Ein Vergleich zeigt, dass die numerischen Ergebnisse, die mit der Discrete Transfer Radiation Method erzielt wurden, qualitativ gut mit den in der Kabine gewonnenen Messergebnissen übereinstimmen (vergleiche Bild 10). In beiden Fällen zeigt sich, dass in der Do728 eine stärkere Strömung über die Gangsitze erfolgt. Dort ist die Oberflächentemperatur sowohl in der Simulation als auch im Experiment deutlich geringer. Die Bereiche erhöhter Temperatur stimmen recht gut überein und zeigen, dass dort wenig Luftaustausch stattfindet.

Für eine realistische Abbildung der Wärmeverhältnisse in einer Flugzeugkabine sind physikalischen Materialparameter wie Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmeleitfähigkeitkoeffizienten, als auch die Wärmestrahlungswerte, die Koeffizienten der Emission, der Reflektion und der Transmission von sehr großer Bedeutung. Zudem, spielt die Bekleidung der Passagiere eine wichtige Rolle im Gesamtprozess der Wärmeübertragung. Wie sich diese Unterschiede z.B. zwischen Thermodummies und Menschen auswirken, wird in Bild 12 dargestellt.

Ein Vergleich der auf den Bildern 9 und 10 dargestellten Temperatursignaturen zeigt, dass die Temperaturberechnung ohne Strahlung an der Körperoberfläche der Menschen unrealistisch hohe Temperaturen von bis zu 49°C erzeugt. Es zeigt sich, dass bei der Berechnung ohne Strahlung die Wärmeabgabe an der Passagierkörperoberfläche nicht realistisch modelliert werden kann. Alternativ wäre es möglich eine fixierte Temperatur an der Körperoberfläche des Passagierdummies vorzugeben. Bei einer solchen Vorgabe wird die Temperatur an den Passagieren möglicherweise realistischer aussehen, trotzdem wird die konvektive Strömung ohne Wärmestrahlung zu einer ungenauen Temperaturverteilung in der Kabine führen. Eine Komfortvorhersage ist dann nur noch mit Einschränkungen möglich.

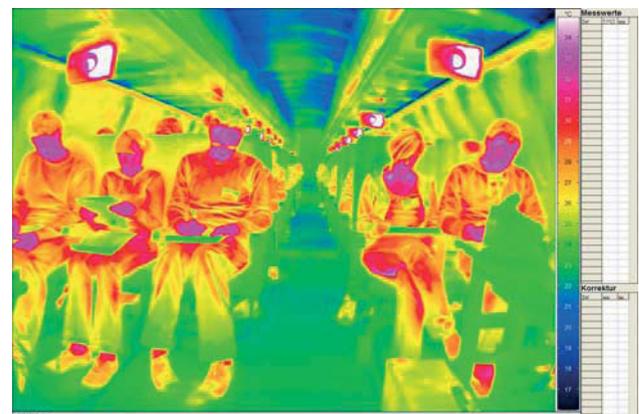


BILD 12. Komfortuntersuchung mit Probanden: Gemessene Temperaturverteilung in der Kabine Do728.

Am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR Göttingen fanden in den letzten zwei Jahren die Versuche in der Flugzeugkabine Do728 mit speziell entwickelten Dummies und mit Probanden statt. In Bild 11 ist eine Thermographieaufnahme der Oberflächen-

Die Temperaturverteilung in Bild 12 zeigt, dass auch die Art der Bekleidung bei den detaillierten CFD-Berechnungen berücksichtigt werden müsste, um eine genauere Vorhersage der Wärmeverhältnisse in der Kabine zu erzielen. Spezielle Randbedingungen müssen dazu entwickelt werden.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Aus den dargelegten Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die CFD Berechnungen mit Wärmestrahlungsmodell zeigen eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Messungen.
- Die Temperaturberechnungen der Kabinenströmung ohne Strahlung sind weniger für eine Komfortaussage geeignet.
- Nur mit Hilfe einer qualitativ hochwertig modellierten numerischen Strömungssimulation einschließlich Wärmestrahlung ist man in der Lage eine passagierbezogene Komfortaussage zu treffen.
- Der Zusammenhang zwischen der turbulenten Strömung mit der thermischen Konvektion und der Wärmestrahlung ist sehr kompliziert und hängt stark von den Randbedingungen ab.
- Deswegen ist die Erstellung einer entsprechenden Datenbank mit den Wärmetransportkoeffizienten und Wärmerandbedingungen für alle Materialien für die Berechnung von großer Bedeutung.
- Das Strömungsfeld in der Kabine ist im Wesentlichen durch die Konfiguration der KLA gekennzeichnet. Die Untersuchung des Einflusses dieser Phänomene auf die Komfortaussage ist Gegenstand laufender Arbeiten.
- Die dargestellte Studie hat gezeigt, dass die DTRM eine sehr effektive Modellierung der Wärmestrahlung erlaubt. Jedoch werden bisher nur glatte Oberflächen angenommen, haptische Eigenschaften sind bisher ausgeschlossen, obwohl sie die Abstrahlung stark verändern. Dies muss in verbesserten Modellen berücksichtigt werden.

Dimensional Meshes, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, U.S.A., [2008-01-07-2008-01-10] AIAA Reno 472.

- [5] H.D. Baehr, K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- [6] G. Günter, J. Bosbach, J. Pennecot, C. Wagner, T. Lerche, I. Gores, Experimental and numerical simulation of idealized aircraft cabins flow, Aerospace Science and Technology, Elsevier, 2006.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Rütten, M. Konstantinov, C. Wagner, Analysis of Cabin Air Ventilation in the Do728 Test Facility Based on High-Resolution Thermography, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2008.
- [2] J. Bosbach, M. Kühn, M. Rütten, C. Wagner, Mixed Convection in a Full Scale Aircraft Cabin Mock-Up. ICAS 2006 – 25 th International Congress of the Aeronautical Sciences, Germany, 2006.
- [3] W. J. Yang, H. Taniguchi, K. Kudo, Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method, Advances in Heat-Transfer (Vol 27), Academic Press 1995.
- [4] M. Widhalm, A. Ronzheimer, J. Meyer, Lagrangien Particle Tracking on Large Unstructured Three-