

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

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur**

genehmigte Dissertation

von

**Mario Wörner**

aus Dresden

2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>vii</b>
I Formelzeichen . . . . .	vii
II Indizes . . . . .	x
III Abkürzungen . . . . .	xiii
IV Dimensionslose Kennzahlen . . . . .	xiv
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens und der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Kondensation und Wasseransammlung im Flugzeug . . . . .	3
2.2 Möglichkeiten der Reduktion der Kondensation und Wasseransammlung . . . . .	8
2.3 Auswahl der Methoden . . . . .	9
2.4 Bisherige Arbeiten zur Untersuchung des Feuchtetransports . . . . .	11
<b>3 Strömungsverhältnisse im Flugzeug</b>	<b>15</b>
3.1 Wandaufbau in Kabine und Frachtraum . . . . .	15
3.1.1 Primärisolierung . . . . .	16
3.1.2 Sekundärisolierung . . . . .	17
3.2 Hauptaufgaben des Lüftungssystems . . . . .	19
3.2.1 Kabine . . . . .	19
3.2.2 Cargo-Compartment . . . . .	20
3.3 Strömungsverlauf . . . . .	20

3.3.1	Versorgungsluft . . . . .	20
3.3.1.1	Temperatur- und Druckregelung in der Kabine . . . . .	24
3.3.1.2	Air-Conditioning-Packs . . . . .	24
3.3.2	Kabine . . . . .	25
3.3.2.1	Hauptströmungen . . . . .	25
3.3.2.2	Nebenströmung . . . . .	27
3.3.3	Dreiecksbereich . . . . .	29
3.3.4	Cargo-Compartment . . . . .	30
3.3.5	Bilge . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Physikalische und numerische Grundlagen</b> . . . . .	<b>33</b>
4.1	Zustandsgrößen feuchter Luft . . . . .	33
4.2	Wärmeübertragung . . . . .	37
4.2.1	Wärmeleitung . . . . .	37
4.2.2	Konvektiver Wärmeübergang . . . . .	38
4.2.3	Wärmestrahlung . . . . .	40
4.2.4	Wärmedurchgang . . . . .	40
4.3	Stofftransport durch Diffusion . . . . .	41
4.4	Strömungswiderstand und Ausflussfunktion . . . . .	43
4.5	Messtechnik . . . . .	45
4.6	Erhaltungsgleichungen . . . . .	46
4.6.1	Massenerhaltung . . . . .	46
4.6.2	Impulserhaltung . . . . .	46
4.6.3	Skalare Erhaltungsgleichungen . . . . .	47
4.7	Grundlagen der numerischen Strömungsmechanik . . . . .	48
4.7.1	Finite-Volumen-Methode . . . . .	49
4.7.1.1	Approximation der Flächenintegrale . . . . .	50
4.7.1.2	Approximation der Volumenintegrale . . . . .	50

4.7.1.3	Interpolation der Variablenwerte . . . . .	
4.7.1.4	Implementierung der Randbedingungen . . . . .	
4.7.2	Linearisierung der Quellterme . . . . .	
4.7.3	Lösung linearer Gleichungssysteme . . . . .	
4.7.4	Lösungsalgorithmen . . . . .	
<b>5</b>	<b>Systemsimulationen der Strömungen im Rumpfquerschnitt</b> . . . . .	
5.1	Einführung in die objektorientierte Modellierung . . . . .	
5.1.1	Modellierungssprache MODELICA . . . . .	
5.1.2	Simulationsumgebung DYMOLA . . . . .	
5.1.3	MODELICA-Modellbibliothek THERMOLIB . . . . .	
5.2	Modellerstellung mit DYMOLA/MODELICA . . . . .	
5.2.1	Komponentenbibliothek <i>FlueGas</i> . . . . .	
5.2.2	Voluminamodelle . . . . .	
5.2.2.1	Adiabates Kontrollvolumen . . . . .	
5.2.2.2	Kontrollvolumen mit Wärmeübertragung . . . . .	
5.2.2.3	Diskretisiertes Rohrmodell . . . . .	
5.2.3	Widerstandsmodelle . . . . .	
5.2.3.1	$\mu$ -Widerstandsmodell . . . . .	
5.2.3.2	Regressions-Widerstandsmodell . . . . .	
5.2.3.3	Lineares Widerstandsmodell . . . . .	
5.2.4	Quellen und Senken . . . . .	
5.2.4.1	Temperaturmodell . . . . .	
5.2.4.2	Massenquelle und -senke . . . . .	
5.3	Identifikation und Ermittlung der Simulationsparameter . . . . .	
5.3.1	Bisherige Arbeiten zur Parameterermittlung . . . . .	
5.3.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	
5.3.3	Experimentelle Ermittlung der Strömungsparameter . . . . .	

20	4.7.1.3	Interpolation der Variablenwerte an der KV-Oberfläche	51
24	4.7.1.4	Implementierung der Randbedingungen	52
24	4.7.2	Linearisierung der Quellterme	52
25	4.7.3	Lösung linearer Gleichungssysteme	54
25	4.7.4	Lösungsalgorithmen	55
27			
29	<b>5</b>	<b>Systemsimulationen der Strömungen im Rumpfquerschnitt</b>	<b>57</b>
30	5.1	Einführung in die objektorientierte Modellierung	58
31	5.1.1	Modellierungssprache MODELICA	60
33	5.1.2	Simulationsumgebung DYMOLA	63
33	5.1.3	MODELICA-Modellbibliothek THERMOFLUID	65
37	5.2	Modellerstellung mit DYMOLA/MODELICA	66
37	5.2.1	Komponentenbibliothek <i>FlueGas</i>	67
38	5.2.2	Voluminamodelle	71
40	5.2.2.1	Adiabates Kontrollvolumen	71
40	5.2.2.2	Kontrollvolumen mit Wärmeübertragung	72
41	5.2.2.3	Diskretisiertes Rohrmodell	73
43	5.2.3	Widerstandsmodelle	75
45	5.2.3.1	$\mu$ -Widerstandsmodell	76
46	5.2.3.2	Regressions-Widerstandsmodell	76
46	5.2.3.3	Lineares Widerstandsmodell	76
46	5.2.4	Quellen und Senken	78
47	5.2.4.1	Temperaturmodell	78
48	5.2.4.2	Massenquelle und -senke	78
49	5.3	Identifikation und Ermittlung der Simulationsparameter	79
50	5.3.1	Bisherige Arbeiten zur Parameterermittlung	80
50	5.3.2	Sensitivitätsanalyse	81
	5.3.3	Experimentelle Ermittlung der strömungsmechanischen Parameter	83

5.3.3.1	Versuchsaufbau	84
5.3.3.2	Versuchsdurchführung	88
5.3.3.3	Messdatenauswertung	89
5.3.3.4	Messergebnisse	92
5.3.3.5	Vergleich der Messergebnisse mit Literaturwerten	95
5.4	Simulationsergebnisse	96
5.4.1	Simulationen ohne sorptive Trocknung	97
5.4.2	Simulationen mit sorptiver Trocknung	101
5.5	Verifikation und Validation	102
5.5.1	Verifikation des DYMOLA/MODELICA-Modells	102
5.5.2	Validation des DYMOLA/MODELICA-Modells	107
5.5.2.1	Versuchsaufbau	109
5.5.2.2	Versuchsdurchführung	112
5.5.2.3	Versuchsergebnisse	114
<b>6</b>	<b>Simulationen des Feuchttransportes in der Isolierung</b>	<b>119</b>
6.1	1D-Simulationen mit MATLAB	120
6.1.1	Aufbau des Programms	120
6.1.2	Definition des Isolierungsaufbaus	121
6.1.3	Randbedingungen	124
6.1.4	Simulationsergebnisse	127
6.2	2D-Simulationen mit STAR-CD	132
6.2.1	Gittergenerierung	132
6.2.2	Randbedingungen	135
6.2.3	Benutzerdefinierte Subroutinen	137
6.2.3.1	Materialspezifische Diffusion	137
6.2.3.2	Phasenwechsel	137
6.2.4	Simulationsergebnisse	141

6.2.4.1	Numerische Einstellungen	
6.2.4.2	Temperaturverlauf	
6.2.4.3	Relative Feuchte	
6.2.4.4	Wasserdampfkonzentration	
6.2.4.5	Kondensatmengen	
6.3	Verifikation der Simulationen	
6.4	Validationsmessungen	
6.4.1	Modellversuchsstand	
6.4.1.1	Versuchsaufbau	
6.4.1.2	Messgeräte und Anlagenkomponenten	
6.4.1.3	Versuchsdurchführung	
6.4.1.4	Messergebnisse	
6.4.1.5	Diskussion der Ergebnisse	
6.4.2	A310-Seitenteil	
6.4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung	
6.4.2.2	Messergebnisse	
6.4.2.3	Diskussion der Ergebnisse	
6.4.3	ARCTIC-Cell	
6.4.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung	
6.4.3.2	Messergebnisse	
6.5	Vergleich 2D-Simulation-Messung	
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	
7.1	Ausblick	
<b>Literatur</b>		
<b>A Systemsimulationen der Kabinenströmung</b>		
<b>B Simulationen zum Feuchttransport in Isolierungen</b>		

84  
88  
89  
92  
95  
96  
97  
101  
102  
102  
107  
109  
112  
114  
  
**119**  
120  
120  
121  
124  
127  
132  
132  
135  
137  
137  
137  
141

6.2.4.1 Numerische Einstellungen . . . . . 142  
6.2.4.2 Temperaturverlauf . . . . . 142  
6.2.4.3 Relative Feuchte . . . . . 145  
6.2.4.4 Wasserdampfkonzentration . . . . . 145  
6.2.4.5 Kondensatmengen . . . . . 147  
6.3 Verifikation der Simulationen . . . . . 152  
6.4 Validationsmessungen . . . . . 154  
6.4.1 Modellversuchsstand . . . . . 154  
6.4.1.1 Versuchsaufbau . . . . . 154  
6.4.1.2 Messgeräte und Anlagenkomponenten . . . . . 157  
6.4.1.3 Versuchsdurchführung . . . . . 159  
6.4.1.4 Messergebnisse . . . . . 162  
6.4.1.5 Diskussion der Ergebnisse . . . . . 169  
6.4.2 A310-Seitenteil . . . . . 169  
6.4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung . . . . . 169  
6.4.2.2 Messergebnisse . . . . . 172  
6.4.2.3 Diskussion der Ergebnisse . . . . . 173  
6.4.3 ARCTIC-Cell . . . . . 174  
6.4.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung . . . . . 174  
6.4.3.2 Messergebnisse . . . . . 176  
6.5 Vergleich 2D-Simulation-Messung . . . . . 178  
  
**7 Zusammenfassung . . . . . 183**  
7.1 Ausblick . . . . . 186  
  
**Literatur . . . . . 189**  
  
**A Systemsimulationen der Kabinenströmung . . . . . 195**  
  
**B Simulationen zum Feuchtetransport in Isolierungen . . . . . 211**

# Nomenklatur

## I Formelzeichen

### Lateinische Formelbuchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$A$	1	Koeffizient
$A_m$	$m^2$	durchströmte Fläche
$A_q$	$m^2$	Wärmeübertragungsfläche
$a$	1	Absorptionskoeffizient
$\alpha$	1	Koeffizient
$\alpha$	$m^2 / s$	Temperaturleitfähigkeit
$b$	m	Breite
$b$	1	Koeffizient
$c$	1	Korrekturfaktor
$c$	kg / kg	Massenanteil
$c$	$mol / m^3$	Konzentration
$c$	J / (kg K)	spezifische Wärmekapazität
$c_p$	J / (kg K)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$D$	$m^2 / s$	Diffusionskoeffizient
$d$	m	Durchmesser
$d_{hyd}$	m	hydraulischer Durchmesser
$\rho_{KOV}$	$kg / m^3$	volumenbezogene Konzentration
$F$	1	Variable
$f$	1	Variable
$\Sigma$	N	Summe der Glieder
$g$	$m / s^2$	Fallbeschleunigung
$H$	J	Enthalpie
$h$	1	Term
$h$	W	Enthalpiestrom