

**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

Nomenklatur	vii
I Formelzeichen	vii
II Indizes	x
III Abkürzungen	xiii
IV Dimensionslose Kennzahlen	xiv
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens und der Technik	3
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
3 Strömungsverhältnisse im Flugzeug	15
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
4	Physikalische und numerische Grundlagen	33
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	
5	Systemsimulationen der Strömungen im Rumpfquerschnitt	
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	μ -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	5	Systemsimulationen der Strömungen im Rumpfquerschnitt	57
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	μ -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
6	Simulationen des Feuchttransportes in der Isolierung	119
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	
7	Zusammenfassung	
7.1	Ausblick	
Literatur		
A Systemsimulationen der Kabinenströmung		
B Simulationen zum Feuchttransport in Isolierungen		

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
α	1	Koeffizient
α	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
ρ_{vol}	kg / m^3	volumenbezogene Dichte
F	1	Variable
f	1	Variable
Σ	N	Summe der Glieder
g	m / s^2	Fallbeschleunigung
H	J	Enthalpie
h	1	Term
h	W	Enthalpieströme