

**Zum Einfluss von Luftströmungen auf die  
thermischen und aerodynamischen Verhältnisse in  
und an Gebäuden**

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der

**Technischen Universität Dresden**

zur  
Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Joachim Seifert

geb. am: 8.03.1976 in: Greiz (Vogtland)

Tag der Einreichung: 19.04. 2005

Tag der Verteidigung: 20.10. 2005

Gutachter: / Prof. Dr.-Ing. habil W. Richter  
/ Prof. Dr.-Ing. D. Müller  
/ Prof. Dr. rer. nat. M. Hoffmann

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. R. Grundmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführende Bemerkungen</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Entwicklung	2
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	3
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Thermodynamische Grundlagen	5
2.1.1 Wärmeleitung	5
2.1.2 Wärmestrahlung	5
2.1.3 Konvektion	6
2.2 Strömungsmechanische Grundlagen	8
2.2.1 Grundgleichungen für inkompressible Strömungen	9
2.2.2 Turbulente Strömungen	11
2.2.2.1 $k - \epsilon$ -Modell	14
2.2.2.2 $RNG\ k - \epsilon$ -Modell	15
2.2.2.3 $v'^2 - f$ -Modell	15
<b>3 Das Programmpaket TRNSYS-TUD / ParallelNS</b>	<b>17</b>
3.1 Einführende Bemerkungen	17
3.2 Das Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS-TUD	17
3.2.1 Type 56 (Zonenmodell)	18
3.2.2 Type 158 (Wandmodell)	20
3.2.3 Type 57 (Bilanzmodell Heizungsanlage)	20
3.2.4 Type 230 (Neuer Berechnungsgang für direkte solare Strahlung)	21
3.3 Das Strömungssimulationsprogramm ParallelNS	26
3.3.1 Grundlegende Erläuterungen zum CFD-Code ParallelNS	26
3.3.2 Approximation des wandnahen Strömungsverlaufes	26
3.4 Kopplung zwischen TRNSYS-TUD / ParallelNS	30
3.5 Validierung des Programmpaketes	31
3.5.1 Einführende Bemerkungen	31
3.5.2 Testfall Wärmeübergang	31
3.5.2.1 Einführende Bemerkungen	31
3.5.2.2 Testkonfiguration	32
3.5.2.3 Modellbildung	33
3.5.2.4 Vergleich zwischen Messung und Simulation	34
3.5.3 Testfall Fluidstruktur I	37
3.5.3.1 Einführende Bemerkungen	37
3.5.3.2 Beschreibung des Versuchstandes	37
3.5.3.3 Verwendete Messtechnik	38

3.5.3.4	Versuchsdurchführung . . . . .	39
3.5.3.5	Modellbildung . . . . .	40
3.5.3.6	Vergleich zwischen Messung und Simulation . . . . .	41
3.5.4	Testfall Fluidstruktur 2 . . . . .	45
3.5.4.1	Einführende Bemerkungen . . . . .	45
3.5.4.2	Beschreibung der Testkonfiguration . . . . .	45
3.5.4.3	Modellbildung . . . . .	46
3.5.4.4	Vergleich zwischen Messung und Simulation . . . . .	47
3.5.5	Testfall Simulationsparameter . . . . .	49
3.5.5.1	Zeitschrittweite . . . . .	49
3.5.5.2	Linearisierungszyklen . . . . .	50
3.5.6	Fazit der Validierungsuntersuchungen . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Einfluss der Luftströmung im Gebäudeinneren</b>	<b>53</b>
4.1	Einführende Bemerkungen . . . . .	53
4.2	Stand der Forschung . . . . .	53
4.2.1	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	54
4.2.2	Numerische Untersuchungen ohne Raumluftrömung . . . . .	54
4.2.3	Numerische Untersuchungen mit Raumluftrömung . . . . .	55
4.2.4	Konsequenzen für die vorliegende Arbeit . . . . .	56
4.3	Einflussgrößen auf den Prozess der Wärmeübergabe . . . . .	57
4.3.1	Wärmebilanz / Wärmetransportvorgänge im Raum . . . . .	57
4.3.2	Wärmephysiologische Kriterien . . . . .	59
4.3.2.1	Globale Kriterien . . . . .	60
4.3.2.2	Lokale Kriterien . . . . .	62
4.4	Berechnungsmodell . . . . .	65
4.4.1	Allgemeine Angaben . . . . .	65
4.4.2	Spezifikation der technischen Anlagen . . . . .	66
4.4.2.1	Fußbodenheizung . . . . .	67
4.4.2.2	Freie Heizflächen . . . . .	67
4.4.2.3	Luftheizung . . . . .	68
4.4.3	Diskretisierung / Berechnungsablauf . . . . .	69
4.4.4	Äußere / Innere thermische Randbedingungen . . . . .	71
4.4.5	Raumlüftung . . . . .	73
4.5	Modellvergleich Einschwingphase A . . . . .	75
4.5.1	Ergebnisüberblick . . . . .	75
4.5.2	Detailanalyse Feldmodell . . . . .	77
4.5.2.1	Fußbodenheizung . . . . .	77
4.5.2.2	Freie Heizflächen . . . . .	78
4.5.2.3	Luftheizung . . . . .	79
4.5.3	Detailanalyse Knotenmodell . . . . .	80
4.5.3.1	Fußbodenheizung . . . . .	81
4.5.3.2	Freie Heizflächen . . . . .	82
4.5.3.3	Luftheizung . . . . .	84
4.6	Modellvergleich Einschwingphase B . . . . .	86
4.7	Fazit der Modelluntersuchung . . . . .	87
4.8	Systemvergleich . . . . .	88

4.8.1	Grundlegende Betrachtungen . . . . .	88
4.8.2	Charakterisierung ausgewählter wärmephysiologischer Parameter . . . . .	97
4.9	Parameterstudie . . . . .	100
4.9.1	Einfluss der Positionierung freier Heizflächen . . . . .	100
4.9.2	Einfluss der Speicherkapazität bei Fußbodenheizungen . . . . .	103
4.9.3	Einfluss der Raumlüftung . . . . .	106
4.9.4	Einfluss des Referenzpunktes der Regelung . . . . .	111
4.10	Bewertung von Wärmeübertragungsprozessen . . . . .	114
4.10.1	Einführende Bemerkungen . . . . .	114
4.10.2	Definition eines wärmephysiologischen Referenzprozesses . . . . .	114
4.10.3	Formulierung einer gekoppelten Bewertungsfunktion für den Raum . . . . .	115
4.10.4	Anwendung der gekoppelten Bewertungsfunktion . . . . .	119
4.10.5	Weiterführende Gedanken . . . . .	124
4.11	Fazit der Untersuchungen im Gebäudeinneren . . . . .	127
<b>5</b>	<b>Wechselwirkung zwischen Durch- und Umströmung</b> . . . . .	<b>131</b>
5.1	Einführende Bemerkungen . . . . .	131
5.2	Stand der Forschung . . . . .	132
5.3	Theoretische Grundlagen . . . . .	134
5.3.1	Antriebskräfte für natürliche Lüftungsvorgänge . . . . .	134
5.3.2	Ingenieurtechnische Berechnungsmethoden . . . . .	136
5.3.2.1	Grundlagen . . . . .	136
5.3.2.2	$C_p$ -Wert Methode . . . . .	137
5.3.2.3	Energiebilanzmethode . . . . .	139
5.3.3	Konsequenzen für die vorliegende Arbeit . . . . .	141
5.4	Wahl des Berechnungsverfahrens . . . . .	142
5.4.1	Testfall nach Castro / Robins . . . . .	142
5.4.2	Testfall nach Castro / Robins (reale Gebäude) . . . . .	144
5.5	Parameterstudie . . . . .	147
5.5.1	Charakterisierung der Gebäudeumströmung . . . . .	147
5.5.2	Charakterisierung der Gebäudedurchströmung . . . . .	149
5.5.2.1	Grundlegende geometrische Untersuchungen . . . . .	149
5.5.2.2	Einfluss der Wandstärke . . . . .	158
5.5.2.3	Einfluss der Öffnungsgeometrie . . . . .	162
5.5.2.4	Einfluss äußerer und innerer geometrischer Abmessungen . . . . .	163
5.6	Fazit der Um- und Durchströmungsuntersuchungen . . . . .	166
<b>6</b>	<b>Fazit / Ausblick</b> . . . . .	<b>167</b>
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	167
6.2	Ausblicke auf weiterführende Arbeiten . . . . .	169
<b>6</b>	<b>Englisch Summary</b> . . . . .	<b>171</b>
6.1	General Discussions . . . . .	171
6.2	Recommendations for future work . . . . .	173
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>175</b>
<b>A</b>	<b>Wärmeübergang an Wänden / Temperaturschichtung</b> . . . . .	<b>183</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

A.1	Geschwindigkeits- / Temperaturwandgesetze . . . . .	183
A.2	Herleitung der <i>Ri-Zahl</i> als Funktion der Temperatur . . . . .	183
<b>B</b>	<b>Konstruktive Details des Testraumes</b>	<b>185</b>
B.1	Wandaufbauten des Testraumes . . . . .	185
B.2	Positionierung der Messsensoren . . . . .	186
<b>C</b>	<b>Randbedingungen der numerischen Berechnungen</b>	<b>187</b>
C.1	Konstruktive Details des Untersuchungsraumes . . . . .	187
C.2	Annahmen für die wärmephysiologischen Parameter . . . . .	188
<b>D</b>	<b>Ausgewählte Ergebnisse der Simulation</b>	<b>189</b>
D.1	Heizwärmebedarfsentwicklung . . . . .	189
D.2	Temperaturverläufe / -profile der Raumluft . . . . .	189
D.3	$\hat{h}_c$ -Wert, Konvektionsanteil, Strahlungsanteil . . . . .	194
D.4	Wärmephysiologische Parameter als Funktion der Zeit . . . . .	195