

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xi
Glossar	xv
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Ziele	3
1.2 Abgrenzung des Inhalts der Arbeit	4
1.3 Gliederung der Arbeit	5
2 Stand der Erkenntnisse	7
2.1 Brandsimulationsmodelle/Brandsimulationscodes	7
2.1.1 Zonenmodelle	8
2.1.2 Feld- bzw. CFD-Modelle	9
2.2 Wärmeleitung in numerischen Brandsimulationen	10
2.3 Konvektiver Wärmeübergang in numerischen Brandsimulationen	15
2.3.1 Zonenmodelle	15
2.3.2 Feld- bzw. CFD-Modelle	16
3 Modell für konvektiven Wärmeübergang zwischen fester Phase und Gasphase	19
3.1 Einleitende Bemerkungen	19
3.1.1 Arten der Turbulenzmodellierung in CFD-Modellen	19
3.1.2 Abgrenzung der gewählten Vorgehensweise im Modell zu anderen Verfahren	22
3.1.3 Übergeordnete Klassifizierungen	23
3.2 Freier konvektiver Wärmeübergang an horizontalen und vertikalen ebenen Oberflächen	24
3.3 Erzwungener konvektiver Wärmeübergang an horizontalen und vertikalen ebenen Oberflächen	27
3.4 Erzwungener konvektiver Wärmeübergang in Rohr-/Kanalströmungen	37
3.4.1 Turbulente Strömung ($Re \geq 10000$)	38
3.4.2 Laminare Strömung ($Re \leq 2300$)	43
3.4.3 Übergangsbereich ($2300 < Re < 10000$)	47

3.4.4	Einfluss von Abweichungen und Steuerparameter des Relokalisierungs- konzeptes	48
3.4.4.1	Einfluss von Abweichungen	48
3.4.4.2	Steuerparameter des Relokalisierungskonzeptes und deren Verwendung	51
3.5	Gleichzeitiges Auftreten von freiem und erzwungenem konvektivem Wärme- übergang - Mischkonvektion	52
3.5.1	Mischkonvektion an vertikalen und horizontalen ebenen Oberflächen	53
3.5.1.1	Horizontale ebene Oberflächen	53
3.5.1.2	Vertikale ebene Oberflächen	55
3.5.1.3	Anwendungsbereich für entgegengerichtete Mischkonvektion	57
3.5.2	Mischkonvektion bei Rohr-/Kanalströmungen	61
3.5.2.1	Horizontale Rohre/Kanäle	61
3.5.2.2	Vertikale Rohre/Kanäle	61
3.6	Numerische Umsetzung	67
3.7	Schnittstellen - Eingangswerte und Rückgabewert	68
3.8	Integration in den Brandsimulationscode FDS (Version 5)	69
3.9	Ein- und Ausgabegrößen	70
4	Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung	71
4.1	Physikalische Herleitung der verwendeten Gleichungen	71
4.1.1	Satz von der Erhaltung der Energie	72
4.1.2	Materialverhalten bei Änderung der Zustandsgrößen (phänomenolo- gische Gleichungen)	72
4.1.3	Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen	74
4.2	Approximationsverfahren	76
4.2.1	Verfahren zur räumlichen Approximation	76
4.2.2	Verfahren zur Zeitapproximation	77
4.3	Numerische Umsetzung	80
4.3.1	Indizierung und Diskretisierung	80
4.3.2	Zentrale Modellgleichung	82
4.3.3	Veränderliche Stoffwerte	83
4.4	Randbedingungen	84
4.4.1	Konstante Oberflächentemperatur	85
4.4.2	Konstante Wärmestromdichte	86
4.4.3	Wärmestromdichte aus Konvektion und Strahlung infolge eines Brandes	87
4.5	Thermischer Kontaktwiderstand	89
4.6	Wärmequellen/-senken	90
4.7	Schnittstellen - Eingangs- und Rückgabewerte	91
4.8	Integration in den Brandsimulationscode FDS (Version 5)	92
4.8.1	Gegenwärtige Struktur der festen Phase in FDS	93
4.8.2	Neu entwickelte Struktur der festen Phase in FDS	94
4.8.3	Ein- und Ausgabegrößen	97
4.9	Alternativen bei der Netzgenerierung	97

4.9.1	Variable Kontrollvolumenabmessungen in den Koordinatenrichtungen eines orthogonalen Gitters	98
4.9.2	Variable Kontrollvolumengeometrien	98
5	Überprüfung des Wärmetransportmodells	101
5.1	Stationärer, eindimensionaler Wärmetransport	101
5.2	Instationärer, eindimensionaler Wärmetransport	103
5.2.1	Wärmetransport ohne Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs	103
5.2.2	Wärmetransport mit Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs	106
5.3	Freier konvektiver Wärmeübergang an horizontalen und vertikalen ebenen Oberflächen	109
5.4	Erzwungener konvektiver Wärmeübergang an horizontalen und vertikalen ebenen Oberflächen	112
5.5	Konvektiver Wärmeübergang bei Rohr-/Kanalströmungen	116
5.6	Instationärer, mehrdimensionaler Wärmetransport	119
5.6.1	Wärmetransport mit konstant vorgegebenen Wärmestromdichten	119
5.6.2	Wärmetransport mit konvektivem Wärmeübergang	125
5.6.3	Wärmetransport mit konvektivem und radiativem Wärmeübergang	129
5.7	Thermischer Kontaktwiderstand	133
5.8	Wärmeleitung mit Wärmequelle bzw. -senke	134
5.8.1	Konstante Wärmequelle	135
5.8.2	Linear-temperaturabhängige Wärmequelle	136
5.8.3	Wärmequelle in Anlehnung an ein Pyrolysemodell (Arrhenius-Ansatz)	137
5.9	Schlussbemerkungen zur Modellüberprüfung	138
6	Anwendung des Modells	143
6.1	Einleitende Bemerkungen	143
6.2	Beschreibung des Szenarios	143
6.3	Modell und Eingangsgrößen	145
6.4	Ergebnisse der Simulation	148
6.4.1	Thermische Belastung im Nachbarraum (Beurteilungskriterium)	149
6.4.2	Verhalten des 3DWL-Objekts - Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung	150
6.4.3	Wärmeübergangskoeffizienten im Brandraum und innerhalb des Lüftungskanals - Modell für konvektiven Wärmeübergang	154
6.4.4	Zusammensetzung der Heißgase	163
6.5	Fazit aus der Anwendung des Modells	163
7	Zusammenfassung und Ausblick	165
7.1	Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit	165
7.2	Ausblick auf weitere Arbeiten	167
	Literaturverzeichnis	171

Anhang	185
A Mathematische Grundlagen	187
A.1 Gradient und Divergenz	187
A.2 Gauß'scher Integralsatz (Divergenztheorem)	188
A.3 Taylorreihe	188
B Einfluss der Heißgaszusammensetzung auf den Wärmeübergangskoeffizienten	189
B.1 Einfluss der Zusammensetzung	189
B.2 Einfluss von Druckänderungen	193
C Berücksichtigung von rauen Oberflächen in Rohren und Kanälen	195
C.1 Der Begriff „Rauheit“	195
C.2 Vorgehensweisen bei der Berücksichtigung von Rauheiten	197
C.2.1 Kommutative Methoden	197
C.2.2 Multiplikative Methoden	198
D Ergänzende Eingangs- und Steuergrößen in FDS (Version 5)	201
E Inputgenerator für FDS (Version 5)	203
E.1 Arbeitsbereich und Menü	203
E.2 Geometrie und Diskretisierung	204
E.3 Oberflächeneigenschaften	204
E.4 Stoffeigenschaften	205
E.5 Ergebnis des Inputgenerators - Datei „Daten.txt“	208
Abbildungsverzeichnis	211