

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielstellung, Lösungsansatz und Vorgehen	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	9
2.1 Allgemeines	9
2.2 Physikalische und chemische Prozesse bei thermischer Beanspruchung von Feststoffen	11
2.3 Grundlagen der Verbrennung	12
2.3.1 Unendlich schnelle Einschritt-Verbrennung	14
2.3.2 Anwendung für PVC-Kabel	18
2.3.3 Heizwert und Bildungsenthalpie	19
2.3.4 Bestimmung der Massenverlustrate	21
2.3.5 Reaktionskinetik und endliche Verbrennungsgeschwindigkeit	23
2.4 Pyrolyseprozesse von Feststoffen	27
2.5 Einflussgrößen bei Pyrolyseprozessen von Kabeln und Kabelmaterialien	32
2.5.1 PVC als verkohlendes Polymer	32
2.5.2 Einfluss der Modellparameter auf das Pyrolyse- und Abbrandverhalten	35
2.6 Bestimmung der Eingangsgrößen	38
2.6.1 Schätzung aus TGA-Versuchsergebnissen	38
2.6.2 Stochastische Optimierungsverfahren	43
3 Entwicklung eines Pyrolysemodells	45
3.1 Energie- und Massenbilanzen der festen und gasförmigen Phase	45
3.1.1 Massenbilanz der festen Phase	46
3.1.2 Massen- und Stoffbilanz der gasförmigen Phase	47
3.1.3 Energiebilanz der festen und gasförmigen Phase	49
3.2 Diskretisierung der festen Phase	52
3.3 Modellierung dreidimensionaler Schwind- und Quellprozesse	54
3.4 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen bei Schwinden und Quellen	59
3.5 Berücksichtigung nichtlinearer Materialparameter	62
3.6 Eigenschaften von Stoffen aus verschiedenen Materialien	65
3.7 Rand- und Übergangsbedingungen	68
3.7.1 Vorgegebener Wärmestrom bzw. Oberflächentemperatur	69
3.7.2 Wärmestrom aus Konvektion und Wärmestrahlung	70

3.7.3	Massenstrom von fester Phase in die Gasphase	74
3.8	Berechnungsalgorithmus	77
3.9	Optimierung der Ausführungsgeschwindigkeit	82
3.9.1	Allgemeines	82
3.9.2	Parallelisierung für einen einzelnen Knoten mit Hilfe von OpenMP	84
3.10	Modularer Entwicklungsansatz	88
4	Verifizierung des Pyrolysemodells	89
4.1	Konzept und Umsetzung	89
4.2	Verifizierung der 3D-Wärmeleitung	90
4.2.1	Eindimensionale stationäre Wärmeleitung	91
4.2.2	Zweidimensionale Wärmeleitung	93
4.2.3	Nichtlineare dreidimensionale instationäre Wärmeleitung	94
4.3	Pyrolysemodell	97
4.3.1	Massenverlust bei konstanter Aufheizrate	97
4.3.2	Mehrschritt-Pyrolyse mit Materialrückstand und Berücksichtigung der Reaktionsenthalpie	99
4.3.3	Schwinden und Quellen für den eindimensionalen Fall	102
4.3.4	Massenverlustrate eines schwindenden PMMA-Elements unter eindimensionaler Wärmestrombeaufschlagung	103
4.3.5	Gekoppelte Phänomene bei mehrdimensionaler Wärmestrombeaufschlagung	106
4.4	Untersuchung der Sensitivität der Netzauflösung	110
4.4.1	Auflösung der festen Phase	110
4.4.2	Auflösung der Gasphase im Verhältnis zur festen Phase	114
5	Experimentelle Untersuchungen zur Brandausbreitung	117
5.1	Grundlagen	117
5.2	Angaben zu den ausgewählten Kabeln	119
5.3	Durchgeführte Kleinversuche	120
5.3.1	TGA-FTIR-Versuche	120
5.3.2	Cone-Kalorimeterversuche	124
5.4	Eigene Trassenversuche	127
5.4.1	Versuchsaufbau und Prüfstand	128
5.5	Internationales Forschungsvorhaben OECD-PRISME2	131
6	Validierung und Anwendung des Pyrolysemodells	133
6.1	Überblick	133
6.2	Ermittlung der reaktionskinetischen Eingangswerte	133
6.3	Berechnung und Validierung anhand von Cone-Kalorimeterversuchen .	134
6.3.1	Modellerstellung und Abbildung der Kabel	136
6.3.2	Verbrennungsberechnung und Modellierung der Kabel	137
6.3.3	Parameterschätzung und Berechnung	140
6.3.4	Auswertung und Vergleich der Ergebnisse	141
6.4	Berechnung der Trassenversuche T1 und T2	147
6.4.1	Modellgrundlagen	147

6.4.2	Modellierung der Brandlast	149
6.4.3	Ventilationsrandbedingungen	151
6.5	Anwendung und Validierung für Kabel A	152
6.6	Validierungsmethodik und Bewertungskriterien	154
6.7	Auswertung und Vergleich der Ergebnisse	159
6.7.1	Trassenversuche T1 und T2	159
6.7.2	Trassenversuch CFS(S)-1	167
6.8	Fazit der Anwendung und Validierung des Pyrolysemodells	168
7	Zusammenfassung und Ausblick	171
7.1	Zusammenfassung	171
7.2	Ausblick	173
8	Anhang	185
8.1	Eingabeparameter von FDS_DEV	185
8.2	Ausgabedateien und Ergebnisdarstellung	188
8.3	Kabelquerschnittsgenerator	189
8.4	Aufbau Prüfkörper und Lage der Messfühler für den Großversuch	190
8.4.1	Aufbau des Prüfkörpers	190
8.4.2	Messgrößen und Instrumentierung	191
8.4.3	Kabel- und Gastemperaturmessungen	192
8.5	TGA-Ergebnisse Kabel B	194
8.5.1	Mantelmaterial Kabel B	194
8.5.2	Füller Kabel B	198
8.5.3	Aderisolierung Kabel B	200
8.6	FTIR-Ergebnisse Kabel B	202
8.6.1	Mantelmaterial Kabel B	202
8.6.2	Füller Kabel B	205
8.6.3	Aderisolierung Kabel B	209
8.7	Weitere Angaben und Berechnungsergebnisse	213
8.7.1	Thermische Eingangswerte des Cone-Kalorimetermodells	213
8.7.2	Kabeltemperaturen Cone-Kalorimeterversuche	214
8.7.3	Gas- und Oberflächentemperaturen Versuch T1	219
8.7.4	Gas- und Oberflächentemperaturen Versuch T2	227