

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation . . . . .	1
1.2 Zielstellung, Lösungsansatz und Vorgehen . . . . .	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>9</b>
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 Einschnitt-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 Abbrand- verhalten . . . . .	35
2.6 Bestimmung der Eingangsgrößen . . . . .	38
2.6.1 Schätzung aus TGA-Versuchsergebnissen . . . . .	38
2.6.2 Stochastische Optimierungsverfahren . . . . .	43
<b>3 Entwicklung eines Pyrolysemodells</b>	<b>45</b>
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
<b>4</b>	<b>Verifizierung des Pyrolysemodells</b>	<b>89</b>
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
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Brandausbreitung</b>	<b>117</b>
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
<b>6</b>	<b>Validierung und Anwendung des Pyrolysemodells</b>	<b>133</b>
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)-I . . . . .	167
6.8	Fazit der Anwendung und Validierung des Pyrolysemodells . . . . .	168
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>171</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	171
7.2	Ausblick . . . . .	173
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>185</b>
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