

# INHALTSVERZEICHNIS

## HÄUFIG VERWENDETE FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN ..... VII

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Lösungsansatz .....	2
1.3	Gliederung.....	4
1.4	Hinweise.....	4
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN DER BRANDAUSBREITUNG.....</b>	<b>5</b>
2.1	Allgemeines.....	5
2.1.1	Orientierung der Oberfläche und Ausbreitungsrichtung.....	5
2.1.2	Verkohlende und nicht-verkohlende Stoffe .....	7
2.2	Parameter der Brandausbreitung .....	8
2.3	Kabelrelevante Größen .....	9
2.3.1	Aufbau und Geometrie.....	9
2.3.2	Mantel- und Aderisolierungen .....	10
2.3.3	Wärmeleitung .....	11
2.3.4	Wärmeleitfähigkeit Kabelader .....	13
2.3.5	Strombedingte Temperaturerhöhung.....	15
2.4	Die Zersetzung von Kabelmaterialien .....	17
2.5	Versuche zur Brandausbreitung.....	20
2.6	Zusammenfassung Kapitel 2.....	21
<b>3</b>	<b>AUSBREITUNGSMODELLE – STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>23</b>
3.1	Einführung.....	23
3.2	Modellierung der festen Phase: Pyrolyse .....	24
3.2.1	Modelle auf Basis experimenteller Daten .....	24
3.2.2	Analytische Berechnungen .....	25
3.2.3	Thermische Zersetzungsmodelle.....	27
3.2.4	Modellierung der Brandausbreitung auf Kabeln.....	28
3.3	Modellierung der Gasphase .....	31
3.3.1	Die Behandlung des Strömungsfeldes.....	31
3.3.2	Strahlung .....	32

3.3.3	Verbrennung .....	32
3.4	Das CFD-Modell Fire Dynamics Simulator .....	33
3.4.1	Modellierung der Gasphase .....	33
3.4.2	Modellierung der Verbrennung .....	34
3.4.3	Die Vorausberechnung der Pyrolyse .....	36
3.4.4	Das Pyrolyse-Modell für thermoplastische Stoffe .....	37
3.4.5	Kopplung der festen Phase mit der Gasphase .....	38
3.5	Zusammenfassung Kapitel 3 .....	39
<b>4</b>	<b>BRANDVERSUCHE ZUR ENTZÜNDUNG UND AUSBREITUNG .....</b>	<b>41</b>
4.1	Untersuchte Kabel .....	41
4.2	Versuche im Cone-Kalorimeter .....	42
4.2.1	Ergebnisse von Cone-Kalorimeter Untersuchungen .....	43
4.2.2	Verfahren zur effektiven Vergasungswärme .....	46
4.2.3	Verfahren zur Entzündungstemperatur und thermischen Trägheit .....	50
4.3	Spezifische Wärme und Dichte (Ergänzende Untersuchungen) .....	53
4.4	Versuche im iBMB-Versuchsstand .....	54
4.4.1	VGB-Kabelversuche .....	54
4.4.2	ICFMP-Kabelversuche: Spezifikation .....	56
4.4.3	ICFMP-Kabelversuche: Ergebnisse .....	60
4.5	Zusammenfassung Kapitel 4 .....	64
<b>5</b>	<b>BRAND AUSBREITUNGSMODELL KABEL (CFS-MODELL) .....</b>	<b>65</b>
5.1	Einführung .....	65
5.2	Generelle Annahmen und Voraussetzungen .....	65
5.3	Laterale Wärmeleitung (LATERAL HEAT) .....	68
5.4	Mehrstufiges Zersetzungsmodell (DEGRADATION) .....	74
5.5	Implementation in ein CFD-Modell .....	78
5.5.1	Kopplung der Randbedingung zum Objekt der Ader .....	78
5.5.2	Berücksichtigung der zylindrischen Geometrie .....	79
5.5.3	Vorgaben für die Berechnung der Abbrandrate bei der Zersetzung .....	80
5.6	Verifikation des CFS-Modells .....	82

5.6.1	Laterale Wärmeleiteffekte .....	82
5.6.2	Randbedingungen eindimensionaler Wärmetransfer: Wärmequellen .....	87
5.6.3	Unverbrannte Brennstoffanteile .....	90
5.6.4	Brandausbreitung .....	99
5.6.4.1	KabHEAT 1, Studie CFS .....	101
5.6.4.2	KabHEAT 2, Studie Wärmequelle .....	103
5.7	Zusammenfassung Kapitel 5 .....	106
<b>6</b>	<b>VALIDIERUNG DES CFS-MODELLS .....</b>	<b>109</b>
6.1	Berücksichtigung von komplexen Kabeln in der Simulation .....	109
6.1.1	Geometrische Angaben .....	109
6.1.2	Mehrphasige Verbrennung bei komplexen Kabeln .....	110
6.1.3	Eingabedaten zur Simulation komplexer Kabel .....	112
6.2	Validierung anhand von Cone-Kalorimeter Versuchen .....	113
6.2.1	Voruntersuchungen mit dem Szenario CONE .....	114
6.2.2	Berechnungen zur Feinheit des Gitters .....	117
6.2.3	Untersuchungen zur zweiphasigen Zersetzung .....	118
6.2.3.1	Studie CONE 3a .....	118
6.2.3.2	Studie CONE 3b .....	120
6.2.4	Berechnungen im Vergleich mit Cone-Kalorimeter Daten .....	123
6.3	Validierung mit Versuchen im iBMB-Versuchsstand .....	131
6.3.1	Das ICFMP-Szenario .....	131
6.3.1.1	Studie ICFMP 3a .....	137
6.3.1.2	Studie ICFMP 3b .....	140
6.3.1.3	Ergänzungsstudie ICFMP 3c .....	143
6.3.2	Bewertung der Ergebnisse .....	145
6.4	Zusammenfassung Kapitel 6 .....	146
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>149</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>153</b>
	<b>ANHANG .....</b>	<b>160</b>