

INHALTSVERZEICHNIS

HÄUFIG VERWENDETE FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN VII

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Lösungsansatz	2
1.3	Gliederung.....	4
1.4	Hinweise.....	4
2	GRUNDLAGEN DER BRANDAUSBREITUNG	5
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
3	AUSBREITUNGSMODELLE – STAND DER TECHNIK	23
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
4	BRANDVERSUCHE ZUR ENTZÜNDUNG UND AUSBREITUNG	41
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
5	BRANDAUSBREITUNGSMODELL KABEL (CFS-MODELL)	65
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
6	VALIDIERUNG DES CFS-MODELLS	109
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
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	149
	LITERATURVERZEICHNIS	153
	ANHANG	160