

INHALTSVERZEICHNIS**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS****XIII****1 EINLEITUNG****1**

1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Abgrenzung zu anderen Forschungsarbeiten.....	2
1.3 Vorgehensweise	3

2 STAND DER ERKENNTNISSE**5**

2.1 Brandschutzkonzepte im Holzbau	5
2.1.1 Brandschutzkonzepte nach Verordnungen.....	6
2.1.2 Leistungsorientierte Brandschutzkonzepte	7
2.2 Brandverhalten von Holz	8
2.2.1 Aufbau	8
2.2.2 Pyrolyse.....	8
2.2.3 Entzündungstemperatur	9
2.2.4 Abbrandrate.....	13
2.3 Brandschutztechnische Ertüchtigung von Holzkonstruktionen	16
2.3.1 Holzwerkstoffe.....	16
2.3.2 Bekleidungen aus nichtbrennbaren Baustoffen	17
2.3.3 Chemische Brandschutzsysteme	18
2.3.4 Neue Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen aus den InnoNet-Vorhaben20	
2.4 Bemessung von Holzkonstruktionen	21
2.4.1 Verfahren mit genauen Festigkeiten und Steifigkeiten	21
2.4.2 Verfahren mit ideellem Restquerschnitt.....	22
2.4.3 Nichtlineares vereinfachtes Verfahren.....	23
2.4.4 Verfahren für geschützte Konstruktionen	23
2.4.5 Bemessung mit genauen Verfahren	24
2.4.5.1 Thermische Analyse	24
2.4.5.2 Mechanische Analyse	27
2.5 Zulassungsgrundsätze für Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen	28

3 BRANDVERHALTEN BESCHICHTETER HOLZBAUTEILE**29**

3.1 Versuchsmethodik.....	29
3.1.1 Versuchseinrichtungen.....	30
3.1.1.1 Cone-Kalorimeter.....	30
3.1.1.2 SBI-Test.....	31
3.1.1.3 Fassaden-Laborbrandversuch	32
3.1.1.4 Fassaden-Großbrandversuch	34

3.1.1.5 Kleinbrandofen nach DIN 4102-8	36
3.1.1.6 Brandhäuser des iBMB	38
3.1.2 Vorgehensweise	39
3.1.3 Beschichtungssysteme	40
3.2 Pyrolyseverhalten im Cone-Kalorimeter.....	41
3.2.1 Untersuchung des 270 °C-Kriteriums.....	41
3.2.1.1 Abgedecktes Fichtenholz	41
3.2.1.2 Beschichtetes Fichtenholz.....	43
3.2.2 Allgemeine Untersuchungen zum Zündverhalten	44
3.2.3 Allgemeine Untersuchungen zur Energiefreisetzungsrate	45
3.2.3.1 Referenz unbeschichtetes Fichtenholz.....	45
3.2.3.2 Beschichtetes Fichtenholz.....	46
3.2.3.3 Gesamtenergiefreisetzung	47
3.2.4 Temperaturprofile beschichteter und unbeschichteter Proben.....	48
3.3 Baustoffversuche	51
3.3.1 Bombenkalorimeter.....	51
3.3.2 Single-Burning-Item-Test	51
3.4 Brandversuche an Fassadenbekleidungen.....	54
3.4.1 Fassaden-Laborbrandversuche	54
3.4.2 Fassaden-Großbrandversuch	55
3.5 Bauteilversuche	58
3.5.1 Temperaturprofile und Abbrandraten beschichteter Massivholzteile.....	58
3.5.1.1 Eindimensionale Beflammung.....	58
3.5.1.2 Mehrdimensionale Beflammung.....	60
3.5.2 Konstruktionsdetails beschichteter Kleinbauteile	63
3.5.2.1 Gefachbereich Holztafelelement	64
3.5.2.2 Kabeldose	65
3.5.2.3 Metallisches Anbauteil.....	66
3.5.2.4 Rahmenelement.....	68
3.5.2.5 Rohrdurchführung	69
3.5.2.6 Nagelplattenkonstruktionen.....	72
3.5.3 Brandversuche an Nagelplattenkonstruktionen	73
3.5.4 Kleinbrandversuch (1) mit Wand- und Deckenelement.....	76
3.5.5 Kleinbrandversuch (2) mit Wand- und Deckenelement.....	79
3.5.6 Kleinbrandversuch (3) mit Rauchdichtemessung.....	81
4 ERFÜLLUNG DER SCHUTZZIELE	87
4.1 Schutzzieldefinition entsprechend dem akzeptierten Sicherheitsniveau	87
4.1.1 Brandenstehungsphase	87
4.1.2 Vollbrandphase	87
4.2 Schutzzielerfüllung mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen	89

4.2.1	Brandentstehungsphase.....	89
4.2.2	Thermische Umsetzung in der Vollbrandphase.....	93
4.2.2.1	Ingenieurmodell für die Energiefreisetzungsrate	93
4.2.2.2	Auswirkungen auf den Verlauf des Vollbrandes	97
4.2.3	Feuerwiderstandsdauer und Hohlraumbrände	100
4.2.4	Zusammenfassug	100
4.3	Entwicklung eines Temperaturkriteriums für die Zulassungsprüfung	101
4.3.1	Entzündungstemperatur unter Glutbrandbedingungen.....	102
4.3.2	Erweiterung des Temperaturkriteriums nach DIN EN 13501-2.....	107
4.4	Zulassungsprüfungen	109
4.4.1	Allgemeines Prüfkonzept.....	109
4.4.2	Entzündungsschutz	110
4.4.2.1	Trägerplatte	110
4.4.2.2	Einbausituationen	111
4.4.2.3	Durchführung	111
4.4.2.4	Oberer und unterer Grenzwert der Schichtdicke.....	112
4.4.2.5	Prüfkriterien	112
4.5	Einordnung des Entzündungsschutzes in die deutsche Brandschutzphilosophie ...	113
5	GRUNDLAGEN DER THERMISCHEN ANALYSE	114
5.1	Numerische Untersuchungen	114
5.1.1	Validierung der Rechenprogramme.....	115
5.1.2	Gitterstudie	115
5.2	Thermische Materialkennwerte für langsam erwärmtes Holz	116
5.3	Wärmeleitung in Dämmschichtbildnern	118
5.3.1	Energetisches Modell	118
5.3.2	Theorie der Wärmeleitung poröser Medien	120
5.3.3	Parameterstudie für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit.....	125
5.4	Thermische Materialkennwerte der HLB	128
5.4.1	Modell für den Rohdichteverlauf.....	128
5.4.1.1	Submodell für den Schaumfaktor.....	131
5.4.2	Spezifische Wärmekapazität mittels DSC	132
5.4.3	Tempertaturleitfähigkeit mittels TPS.....	133
5.4.3.1	Messprinzip.....	133
5.4.3.2	Materialkennwerte der unreaktierten Beschichtung	135
5.4.3.3	Materialkennwerte des Schaumes.....	135
5.4.3.4	Gültigkeitsbereich der TPS-Messungen für die Wärmeleitfähigkeit .	138
5.4.4	Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aus Brandversuchen.....	140
5.4.5	Zustand des abgeschlossenen Porenbildes	142

5.5 Wärmeleitwiderstand	143
5.5.1 Stationäres Modell	143
5.5.2 Instationäres Modell.....	144
5.5.3 Konsequenzen für die chemische Entwicklung.....	145
6 DETERMINISTISCHES BEMESSUNGSMODELL FÜR TRAGFÄHIGKEIT UND ENTZÜNDUNGSSCHUTZ	147
6.1 Bemessungsprinzip.....	147
6.1.1 Normiertes Verfahren mit ideellem Restquerschnitt.....	147
6.1.2 Erweiterung für beschichtete Holzbauteile	150
6.1.3 Diskussion alternativer Lösungsansätze	150
6.2 Standardisiertes Modell für die thermische Analyse	152
6.2.1 Problemstellung	152
6.2.2 Klassifizierungsversuche	152
6.2.3 Rechenmodell.....	154
6.2.3.1 Eindimensionaler Wärmeeintrag	154
6.2.3.2 Modellierung der Ecke.....	156
6.3 Parameterstudie.....	157
6.3.1 Matrix.....	157
6.3.2 Erste Erkenntnisse.....	158
6.4 Bemessung des Entzündungsschutzes	159
6.4.1 Bemessungsprinzip.....	159
6.4.2 Modell für $k_{\text{mod},fi,U/A}$	160
6.5 Bemessung der Tragfähigkeit mit ideellen Querschnittswerten	162
6.5.1 Reale Abbrandtiefe d_{char}	163
6.5.2 Ideelle Abbrandtiefe d_0	167
6.5.2.1 Festigkeiten und Steifigkeiten unter Temperatureinwirkung.....	168
6.5.2.2 Modelle für d_0	170
6.5.2.3 Plausibilitätsprüfung	173
6.5.2.4 Vergleich mit Normverfahren.....	174
6.5.2.5 Dreiseitige Beflammung	175
6.6 Anwendung.....	176
6.6.1 Zugstäbe.....	177
6.6.2 Balken.....	178
6.6.3 Pendelstützen	179
6.6.4 Schlussfolgerungen	181
7 SICHERHEITSKONZEPT FÜR TRAGFÄHIGKEIT UND ENTZÜNDUNGSSCHUTZ	183

7.1 Stochastische Modelle.....	184
7.1.1 Modelle der Widerstandsseite	184
7.1.1.1 Holzfestigkeit und –steifigkeit.....	184
7.1.1.2 Trockenschichtdicke der HLB	185
7.1.1.3 Schutzdauer der HLB.....	187
7.1.2 Modelle der Einwirkungsseite	188
7.1.2.1 Ständige und veränderliche Einwirkungen.....	188
7.1.2.2 Brandraumtemperatur.....	188
7.1.2.3 Abbrandrate	189
7.1.3 Modellunsicherheiten.....	190
7.2 Erforderliche Zuverlässigkeit von Bauteilen im Brandfall.....	191
7.2.1 Nachweismethoden	191
7.2.2 Zuverlässigkeit im Naturbrandmodell	192
7.2.3 Zuverlässigkeit im ETK-Modell.....	194
7.2.3.1 Versuch.....	194
7.2.3.2 Normierte Rechenverfahren.....	195
7.2.4 Definition der Zielversagenswahrscheinlichkeit beschichteter Holzbauteile ..	198
7.3 Untersuchung beschichteter Bauteile	199
7.3.1 Balken	201
7.3.2 Stützen	204
7.4 Ableitung des Sicherheitsformats für die Tragfähigkeit	205
7.4.1 Allgemeine Vorgehensweise	205
7.4.2 Teilsicherheitsbeiwert für HLB.....	206
7.5 Ansatz des Entzündungsschutzes in leistungsorientierten Konzepten	210
7.5.1 Festlegung des Schutzziels am Beispiel der Versammlungsstätte.....	210
7.5.2 Formulierung des Grenzzustandes	211
7.5.3 Herleitung eines Sicherheitsformats.....	213
8 BRANDSCHUTZGERECHTES KONSTRUIEREN	217
8.1 Flächenbauteile	217
8.1.1 Problempunkt Außenecken	217
8.1.2 Innenecke mit verschiedenen Baustoffen.....	218
8.1.3 Rauchdichtigkeit	219
8.1.4 Türanschlüsse	219
8.1.5 Konsollasten.....	220
8.2 Installationen	220
8.2.1 Elektrische Leitungen innerhalb der Bauteile	220
8.2.2 Vorwandebene	220
8.2.3 Rohrdurchführungen.....	221

8.3 Feuerwiderstandsdauer (R-Kriterium).....	222
8.3.1 Stabförmige Tragglieder	222
8.3.2 Nagelplattenbinder.....	222
8.3.2.1 Konstruktion und Beschichtungssystem.....	222
8.3.2.2 Steifigkeitsverhalten	224
8.4 Fassaden	226
8.5 Vorbehandlung der Oberflächen.....	227
9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	228
9.1 Zusammenfassung	228
9.2 Ausblick	230
LITERATUR	231
ANHANG	247
A1 Ergebnisse von Versuchen im Cone-Kalorimeter	247
A2 Vergleich der Temperaturprofile aus Versuchen und Nachrechnung	255
A3 TGA und DSC - Messungen	261
A4 Thermische Materialkennwerte aus Rückrechnung der Kleinbrandversuche	263
A5 Rechenwerte der thermischen Materialkennwerte für standardisierte thermische Analyse	267
A6 Nachweis- und Grenzzustandsgleichungen	269