

**Entwicklung von
Hochleistungsbrandschutzsystemen zum
Entzündungsschutz von Holz unter
Vollbrandbedingungen**

von

Dirk Kruse

Heft 212

Braunschweig

2010

ISBN 978-3-89288-196-4

ISSN 1439-3875

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Eingereicht am	30. Oktober 2009
Disputation am	29. Januar 2010
Berichterstatter	Prof.Dr-Ing. D. Hosser Prof. Dr. rer. nat. R. Marutzky

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Information bibliographique de la Deutsche Nationalbibliothek

La Deutsche Nationalbibliothek a répertorié cette publication dans la Deutsche Nationalbibliografie; les données bibliographiques détaillées peuvent être consultées sur Internet à l'adresse <http://dnb.d-nb.de>.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) angefertigt. Sie wurde in Teilen durch finanzielle Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft im Rahmen des Innonet-Projekts gefördert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Hossler danke ich, für die Bereitschaft die Betreuung dieser Arbeit zu übernehmen und für die Freiheiten, die ich am Institut für Baustoffkunde, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig hatte. Die Offenheit und die hervorragende Zusammenarbeit mit dem iBMB haben diese Arbeit und die Ergebnisse überhaupt ermöglicht.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. R. Marutzky danke ich für die Bereitschaft, das Koreferats zu übernehmen und für die fast unbeschränkten Möglichkeiten am WKI. Auch bedanke ich mich für das jahrelange Vertrauen und die gute Zusammenarbeit.

Ganz besonders möchte mich bei allen Kollegen am iBMB und am WKI bedanken. Für die Organisation und Durchführung sowie die anschließende Diskussion der Brandversuche bei Dr.-Ing. R. Dobbernack, Dr.-Ing. M. Dehne, Dr.-Ing. B. Kampmeier, Dipl.-Ing. D. Hollmann. Für die Umsetzung der Ideen in chemische Formulierungen und Reaktionen, den umfangreichen Versuchsreihen sowie den intensiven Diskussionen danke ich Dr. S. Simon, Dr. B. Deppe, Dipl.-Ing. (FH) B. Gläser, Dipl.-Chem. H. Jeske und MSc. A. Lepadatu. Weiterhin möchte ich mich allen studentischen Hilfskräften bedanken, die durch Ihren Einsatz ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Auch gilt mein Dank Dr. V. Gettwert und seinem Team am Fraunhofer-Institut für chemische Technologie (ICT) in Pfinztal für seine Diskussionsbereitschaft und seine guten Ideen.

Bei Dr. P. Böttcher und Dr. G. Hora, die meine berufliche Karriere am WKI maßgeblich gefördert haben, möchte ich mich ganz herzlich bedanken. Den Kollegen meiner Abteilung danke ich für die Geduld und das Verständnis insbesondere im letzten Jahr für die oft fehlende Zeit und Unterstützung.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie für Ihre Unterstützung.

Dirk Kruse

Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Hochleistungsbrandschutzbeschichtung entwickelt, die eine brandschutztechnisch wirksame Kapselung von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen ohne zusätzliche Plattenbekleidung ermöglicht. Dazu waren Prüfmethode zu erarbeiten, um die Eigenschaften neuer chemischer Entwicklungsschritte schnell und mit geringem Aufwand als geeignet bzw. ungeeignet klassifizieren zu können. Weiterhin wurde ein vereinfachtes physikalisches Modell entwickelt. Mit den entwickelten Prüfmethode wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt. Die Analyse der Ergebnisse erfolgte mittels des vereinfachten physikalischen Modells. Sie bildete die Grundlage für weitere chemische Entwicklungsarbeiten. Erfolgversprechende Formulierungen wurden in anwendungsspezifischen Brandversuchen weiter untersucht. Darauf aufbauend wurden Untersuchungen zur Systemrelevanz von Konstruktionen im Realmaßstab durchgeführt. Anschließend wurde die klimatische Beständigkeit der Systeme beurteilt und verbessert. Weiterhin wurden zusätzliche Energieverbrauchende Reaktionen und Möglichkeiten zur Stabilisierung der Schutzschichten untersucht, mit dem Ziel die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit zu steigern.

Abstract

This document describes the development of a high performance fire protection coating. This coating should substitute a fire safety cladding without the use of any additional gypsum boards. To achieve this goal it was necessary to develop testing methods which were able to classify the properties of the single chemical development steps fast and efficiently. Additionally a physical model was described. The developed physical model was used to analyse the results gained through the tests. This formed the basis for the further chemical research work. Promising coating formulations were examined in specific furnace tests under consideration of the application. Building upon these studies the systematic relevance of real constructions was investigated. Afterwards the climatic durability was discussed and enhanced. Furthermore endergonic reactions and ideas to stabilise the protection layer were evaluated to enhance the overall performance of the system.

Inhalt

1	Einleitung.....	8
1.1	Idee.....	11
1.2	Zielsetzung.....	13
1.3	Inhaltliche Struktur der Arbeit.....	13
2	Ausgangslage.....	15
2.1	Hochtemperaturwerkstoffe aus der Weltraumtechnologie.....	15
2.2	Flammschutzmittel.....	16
3	Definition der Anforderungen.....	23
3.1	Allgemeine Anforderungen.....	24
3.2	Anwendungsfall Innen.....	26
3.2.1	Fußböden und Treppen.....	27
3.2.2	Tragende Wände und Stützen.....	28
3.2.3	Decken.....	28
3.2.4	Türen und Tore.....	28
3.2.5	Pfosten- und Riegelkonstruktionen.....	29
3.3	Anwendungsfall Außen.....	29
3.3.1	Wetterseite.....	29
3.3.2	Hinterlüftungsspalt.....	31
3.4	Sonstige Anwendungen.....	32
4	Erarbeitung einer geeigneten Entwicklungsmethodik.....	33
4.1	Entwicklung eines chemisch-physikalischen Modells.....	33
4.2	Überschlägige Berechnung mit einem vereinfachten Modell (Phase 5).....	36
4.3	Berechnung mit reaktionsabhängigen Materialkennwerten (Phase 4 u. 5).....	40
4.3.1	Bestimmung der reaktionsabhängigen Materialkennwerte.....	40
4.3.2	Numerische Berechnungen.....	43
4.4	Entwicklung der Methode der Laborbrandversuche.....	46
4.5	Entwicklung der Methode der Beistellversuche.....	52
5	Lackphysikalische und chemische Entwicklungsarbeiten.....	55
5.1	Grundlegende chemische Entwicklungsschritte.....	55
5.2	Weiterentwicklung der keramisierenden Elastomere.....	56
5.3	Kombination Keramik / Dämmschichtbildner.....	59
6	Untersuchungen zur Optimierung der Beschichtungen.....	62
6.1	Anpassung an technologische Erfordernisse.....	62
6.2	Überprüfung der Brandschutzleistung mittels Beistellproben.....	64
6.2.1	Ammoniumpolyphosphat mit großer Kettenlänge.....	64
6.2.2	Mikronisiertes Ammoniumpolyphosphat.....	77
6.2.3	Substitution des Phosphoresthers durch endergonische Zusätze.....	79

6.2.4	Transparentes System mittels nano- und mikroskaliger Zuschläge	86
6.2.5	Brandschutzbeschichtung nach dem Stand der Technik	87
6.3	Streuung der Versuchsergebnisse	88
6.4	Druckfestigkeit eines Probekörpers nach Brandversuch	91
7	Anwendungsspezifische Untersuchungen	97
7.1	Eignung unter Aspekten des Denkmalschutzes	97
7.2	Verbesserung der Feuerwiderstandsdauer von Nagelplattenbindern	99
7.3	Ertüchtigung von Bauteilen in der Innenanwendung	101
7.3.1	Untersuchungen an Festverglasung, OSB-Platte, Akustikdecke und Treppe..	103
7.3.2	Untersuchungen an Akustikwand und feuerhemmender Treppe	112
7.3.3	Untersuchungen an Festverglasung, Fachwerkwand und verstärkter Treppe.	116
7.3.4	Entzündungsschutz eines Brettsperrholzwandelements	122
7.4	Systemeinfluss realer Konstruktionen	127
7.4.1	Versuchsaufbau	127
7.4.2	Versuchsdurchführung	130
7.4.3	Versuchsergebnisse	131
8	Untersuchungen zur klimatischen Beständigkeit	137
8.1	Allgemeines	137
8.2	Verbesserung der Elastizität	137
8.3	Verringerung der Wasserlöslichkeit	145
8.4	Schutz durch Decklack	150
9	Energieverbrauchende Reaktionen und Stabilisierung der Schutzschicht	152
10	Zusammenfassung und Ausblick	157
10.1	Zusammenfassung	157
10.2	Ausblick auf weiterführende Forschung	159
11	Literatur	160

1 Einleitung

Holz war in Mitteleuropa und anderen Teilen der Welt über viele Jahrhunderte der dominierende Baustoff bei der Konstruktion von Gebäuden und Inneneinrichtungen. Der traditionelle Baustoff Holz wurde im Zuge der industriellen Revolution Mitte des 19. Jahrhunderts und dem damit verbundenen Übergang von der handwerklichen Fertigung zur industriellen Massenproduktion aus vielen Bereichen durch neue, technisch herstellbare Baustoffe wie Stahl, Stahlbeton und in jüngster Zeit auch Kunststoffe verdrängt. Der Tiefpunkt der Holzverwendung wurde in den 1960er Jahren des 20. Jahrhunderts durchschritten. Vermutlich passte der altbewährte Baustoff Holz nicht in das moderne Weltbild und den allgemeinen Fortschritts- und Wachstumsglauben jener Jahre /12/.

Erst als Ende der 1980er Jahre erkannt wurde, dass der technische Fortschritt mit einem immens steigenden Ressourcen- und insbesondere Energieverbrauch erkauft wurde, der die natürlichen Lebensgrundlagen der kommenden Generationen gefährdet, ist eine stärkere Verwendung des bedeutendsten, durch Syntheseleistungen der Natur entstehenden Rohstoffes Holz im Bauwesen wieder vermehrt in den Fokus gerückt.

Um die Verwendung von Holz auch in innerstädtischen Quartieren mit einer mehrgeschossigen Bebauung zu ermöglichen, musste die zentrale Frage der Sicherheit und hier vor allem im Brandfall von mehrgeschossigen Holzgebäuden gelöst werden.

Zum Verständnis des Bauteilverhaltens von Konstruktionen aus Holz und Holzwerkstoffen im Brandfall existieren umfangreiche Untersuchungen. Im Wesentlichen ändern sich der Querschnitt aufgrund des Abbrandes und die elasto-mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und E-Modul in Folge der Temperaturbeanspruchung. In der Planung können diese Effekte über den Abbrand im Rahmen einer rechnerischen Bemessung berücksichtigt werden. Dazu stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Das vereinfachte Verfahren gemäß DIN 4102-22 nimmt einen ideellen Restquerschnitt an. Zusätzlich zum vorhandenen Abbrand wird die Abnahme des E-Moduls und der Festigkeit durch Abzug einer Dicke von $d_0 = 0,7$ mm berücksichtigt. Die Bemessung erfolgt dann mit den Materialkennwerten bei Normaltemperatur bezogen auf den ideellen Restquerschnitt. Das genaue Verfahren berücksichtigt gemäß DIN 4102-22 die reduzierte Steifigkeit und Festigkeit in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Querschnittsfläche zu Querschnittsumfang über den Modifikationsbeiwert $k_{mod,fi}$. Theoretisch ist es damit möglich, nahezu jede beliebige Feuerwiderstandsklasse durch eine Vergrößerung des Querschnittes zu erreichen.

Auch zum Baustoffverhalten von Holz im Hinblick auf das Brandverhalten wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt. Holz und Holzwerkstoffe gelten entsprechend DIN 4102-1 als „normalentflammbar“ und tragen daher die Bezeichnung B2. Durch Imprägnierungen (Vollholz, Sperrholz) oder Zugabe von Flammschutzmittel auf die Faser bzw. den Span lässt sich sowohl die Entzündungsneigung als auch die Abbrandgeschwindigkeit positiv beeinflussen. Dieses Prinzip wird auch als Masseschutz bezeichnet. Damit kann die Baustoffklasse B1 „schwerentflammbar“ erreicht werden.

Der Begriff Flammschutzmittel dient dabei als „Sammelbezeichnung für anorganische und/oder organische Stoffe, die insbesondere Holz und Holzwerkstoffe, Kunststoffe, Textilien flammfest machen (flammhemmend ausrüsten) sollen. Sie erreichen dies, indem sie die Entflammung der zu schützenden Stoffe verhindern, die Entzündung behindern und die Verbrennung erschweren“ /39/. Im Wesentlichen wirken Imprägnierungen bzw. Flammschutzmittel in der Phase vor der eigentlichen Entzündung, indem sie diese zeitlich verzögern. Das Prinzip wird anhand Bild 1 deutlich.

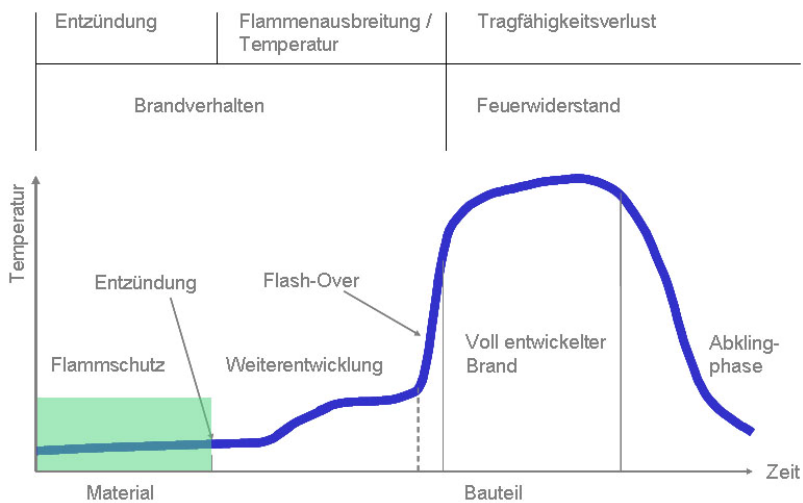


Bild 1: Prinzipieller Brandverlauf mit dem Wirkungsfenster (grün) einer Flammschutzausrüstung

Neben dem Prinzip des Masseschutzes ist es auch möglich, durch einen Oberflächenschutz über einen dämmschichtbildenden Anstrich die Baustoffklasse B1 zu erreichen.

Bei einer mehrgeschossigen Holzbauweise mit mehr als drei Geschossen sind spezifische Risiken im Brandfall zu beachten, die nicht mehr nur durch eine Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer und eine Verbesserung des Baustoffverhaltens berücksichtigt werden können.

Einleitung

Die risikoe erhöhenden Faktoren, die sich bei der Holzbauweise gegenüber einer üblichen Massivbauweise ergeben, wurden ursprünglich maßgeblich durch das iBMB formuliert /3/, /19/, /20/, /21/.

Insbesondere sind dies:

- Erhöhung der Brandlastdichte durch die brennbare Tragkonstruktion,
- Gefahr eines Hohlraumbrands bei Einbrand in die Holztafelbauteile,
- Eintreten eines verzögerten Tragfähigkeitsverlustes durch versteckten Weiterbrand im Inneren der Bauteile (Glutnester),
- Möglichkeit der Brandweiterleitung über Installationsöffnungen und
- Mangelnde Rauchdichtigkeit im Bereich von Eckfugen.

Diese Risiken lassen sich durch die hochfeuerhemmende Bauweise beherrschen. Das wesentliche Element der hochfeuerhemmenden Bauweise mit Holzbauteilen ist die Kapselung der brennbaren Baustoffe durch eine Brandschutzbekleidung der Kapselklasse K₂60 nach DIN EN 13501. Die Anforderung K₂60 bezieht sich dabei auf die Brandschutzbekleidung der Bauteile, die den darunter liegenden brennbaren Baustoff Holz während einer Zeitdauer von mindestens 60 Minuten vor einer Entzündung schützen soll. Das Prüfverfahren bzw. die Leistungskriterien zur Bestimmung der Dauer der Schutzwirkung einer Kapselklasse werden in der DIN EN 14135 definiert. Demnach wird bei der Prüfung der Kapselwirkung der Brandschutzbekleidung die Temperatur direkt hinter der Bekleidung betrachtet. Im Mittel muss die Temperaturerhöhung dort kleiner als 250 °C und an der ungünstigsten Stelle kleiner als 270 °C sein (Bild 2). Zudem darf keine Entzündung oder Verkohlung auf der Holzwerkstoffplatte auftreten. Schmelzen oder Schrumpfung wird als Schaden angesehen, eine Verfärbung dagegen nicht.

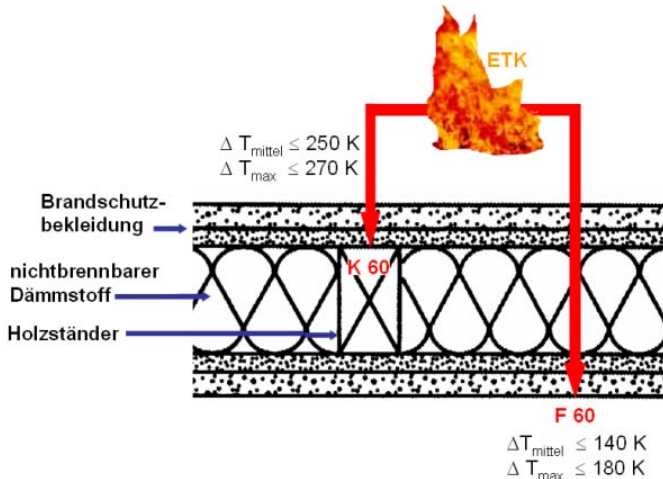


Bild 2: Leistungskriterien K₂₆₀ und F 60 im Vergleich bei hochfeuerhemmenden, raumabschließenden Bauteilen in Holzbauweise

Die Erfüllung der Anforderung der Kapselklasse K₂₆₀ durch eine Brandschutzbekleidung ist vor allem aus wirtschaftlichen Gründen problematisch. Da z. B. eine gebräuchliche Bekleidung aus 2 x 12,5 mm Gipsfaser- (GF) oder Gipskartonfeuerschutz- (GKF) Platten lediglich die Kapselklasse K₂₃₀ erreicht, sind in der Kapselklasse K₂₆₀ weitaus dickere Bekleidungen aus GF-, GKF- oder Gipskartonbau- (GKB) Platten erforderlich. Dies treibt die Kosten der Gesamtkonstruktion unverhältnismäßig in die Höhe. Ein weiteres Problem besteht darin, dass Bauherren mehrgeschossiger Holzbauten meist auch sichtbare Holzelemente wünschen. Dies ist nicht möglich, wenn alle Holzbauteile allseitig mit einer Brandschutzbekleidung versehen werden.

1.1 Idee

Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit derartiger Maßnahmen (aufwändige Konstruktionen, 2-lagiger Einbau der Platten, Einbau mit Fugenversatz etc.) erfolgten erste Überlegungen, ob ein Entzündungsschutz auch über einen Anstrich zu realisieren wäre. Im Rahmen von Recherchen wurden dämmschichtbildende Anstriche gefunden, die allerdings nur einen Entzündungsschutz im Bereich weniger Minuten erzielen. Auf die Wirkungsweise dieser Technologie wird im Kapitel 2 näher eingegangen.

Um durch leistungsfähigere Brandschutzbeschichtungen die Anforderungen an eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung zu erfüllen, waren daher neue Ansätze und Ideen notwendig. Da die Leistungsfähigkeit der recherchierten Beschichtungen nicht ausreichend war,

wurden hochtemperaturbeständige Isolationsmaterialien als Grundlage für die Entwicklung einer hochleistungsfähigen Brandschutzbeschichtung in die Überlegungen einbezogen. Für die Weltraumtechnik wurde eine Reihe von unterschiedlichen Materialien entwickelt, die Flugkörper und Brennkammern von Triebwerken vor Hitze schützen. Der Hitzeschutz wird neben technischen Maßnahmen (z. B. Wärmepumpen) durch keramische Materialien erreicht, die den Temperaturen und hohen mechanischen Belastungen durch heiße Gas- und Partikelströme widerstehen können. Ein auf den ersten Blick interessanter Ansatz wurde im Intranet der Fraunhofer-Gesellschaft entdeckt. In früheren Veröffentlichungen zur Raketenforschung wurde über keramisierende Elastomere berichtet, die Brennkammern von Triebwerken vor Hitze schützen¹. Diese Isolationsmaterialien stellen eine Besonderheit im Bereich der keramischen Schutzschichten für die Auskleidung von Brennkammern dar. Einerseits müssen sie den Raketenkörper beim Abbrand des Raketentreibstoffes vor den heißen Abbrandprodukten schützen und Temperaturen bis 3000 °C widerstehen, andererseits aber eine elastische Verbindung zwischen dem Raketentreibstofftank und der Brennkammer herstellen. Eine spröde keramische Schutzschicht könnte den Schwingungen beim Start des Motors nicht widerstehen. Daher muss das Isolationsmaterial erst im Bedarfsfall die schützende keramische Schicht aufbauen. Hierfür wurden so genannte „keramisierende Elastomere“ entwickelt. In Bild 3 ist die Ausbildung einer solchen Keramikschicht dargestellt.

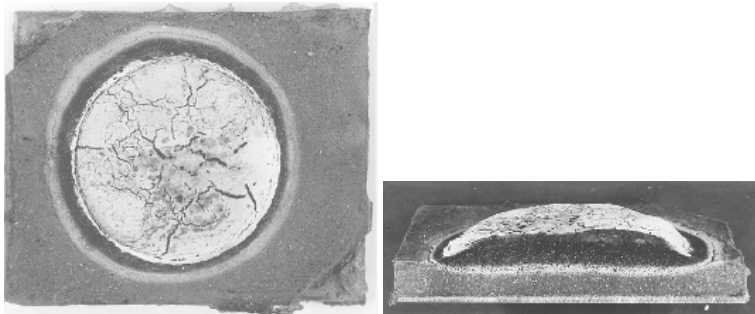


Bild 3: Oberfläche und Querschnitt einer 5 mm dicken keramischen Elastomerschicht nach 60 s Beflammung bei 2000 °C

Die Idee, diese Technologie für den Brandschutz von Holz und Holzwerkstoffen weiter zu entwickeln, bildete die Grundlage der vorliegenden Arbeit. Die Entwicklungen sind zu einem internationalen Patent angemeldet worden, welches mittlerweile erteilt wurde.

¹ http://www.ict.fhg.de/kernko/EnMa/Brand/Keramisierende_Elastomere/index.jsp

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung von dekorativen, dämmschichtbildenden Beschichtungssystemen zum Entzündungsschutz von Holz unter Vollbrandbedingungen. Die Entwicklungsarbeiten orientierten sich zunächst an den allgemeinen Anforderungen des Brandschutzes und in weiteren Entwicklungsschritten wurden auch spezielle Anforderungen aus der Anwendung berücksichtigt. Im Hinblick auf die Erfüllung dieser Anforderungen wurde eine geeignete Entwicklungsmethodik, unter Einbeziehung ingenieurwissenschaftlicher Ansätze, erarbeitet. Durch Brandversuche im Realmaßstab sollte die Leistungsfähigkeit der entwickelten Lösung nachgewiesen werden.

1.3 Inhaltliche Struktur der Arbeit

Die Entwicklung einer Hochleistungsbrandschutzbeschichtung basiert auf der Idee, die Technologie der keramisierenden Elastomere in dämmschichtbildende Beschichtungssysteme einzubauen, um eine brandschutztechnische Kapselung über einen Hochleistungsbrandschutzanstrich zu realisieren.

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik dieser beiden Technologien zusammenfassend beschrieben.

In Kapitel 3 werden die Anforderungen an Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen definiert. Neben Brandschutzanforderungen sind ebenfalls Vorgaben hinsichtlich Optik, Witterungsstabilität und mechanischer Festigkeit zu erfüllen. Das Anforderungsprofil wird durch eine Umfrage unter Industrieunternehmen vervollständigt.

Grundlage für eine erfolgreiche chemische Entwicklungsarbeit ist die Möglichkeit, die Eigenschaften neuer Laborformulierungen entwicklungsbegleitend, schnell und mit geringem Aufwand als geeignet bzw. ungeeignet klassifizieren zu können. Daher mussten zunächst geeignete Prüfmethode entwickelt werden. Die Entwicklung dieser Untersuchungsmethodik wird in Kapitel 4 dargestellt.

Im 5. Kapitel werden die lackphysikalischen Entwicklungsarbeiten aus der Arbeit von Simon /50/ zusammenfassend dargestellt

Aufbauend auf den in Kapitel 4 entwickelten Untersuchungsmethoden erfolgen in Kapitel 8 Untersuchungen unter Normbrandbedingungen zur Weiterentwicklung der Beschichtungssysteme.

Im 7. Kapitel werden erfolgversprechende Formulierungen im Hinblick auf verschiedene Anwendungsbereiche in Brandversuchen bis hin zum Realmaßstab untersucht. Die Untersuchung und Verbesserung der klimatischen Beständigkeit wird in Kapitel 8 diskutiert. Im Kapitel 9 erfolgen weiterführende Überlegungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Systeme mittels energieverbrauchender Reaktionen und mittels einer Stabilisierung der Schutzschichten.

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit werden in Kapitel 10 zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick auf weitere Fragestellungen und mögliche Entwicklungen zum Entzündungsschutz von Holz mittels Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen gegeben.

2 Ausgangslage

2.1 Hochtemperaturwerkstoffe aus der Weltraumtechnologie

Keramiken und keramische Verbundwerkstoffe sind als Hochtemperaturschutz aus der Weltraumtechnologie nicht mehr wegzudenken. Sie bieten für die thermisch wie chemisch am höchsten belasteten Komponenten, z. B. die Nase oder die Flügelvorderkanten, von Wiedereintritts-Flugkörpern die besten Lösungen. Derartige Werkstoffe zeichnen sich durch eine gute Hochtemperaturbeständigkeit und eine exzellente Temperaturwechselbeständigkeit aus. Weiterhin ist die gute Oxidationsbeständigkeit derartiger Werkstoffe wichtig, da die zu schützenden Baugruppen neben der thermischen Belastung dem oxidativen Angriff von Sauerstoff im Plasmazustand ausgesetzt sind.

Beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre herrschen extreme Bedingungen vor. Die Temperaturen können durchaus mehr als 3000 °C erreichen. Ähnliches gilt beim Start der Flugkörper für den Bereich der Triebwerke und Tanks. Der Abbrand der Treibstoffe führt zu extrem heißen und aggressiven Verbrennungsgasen, die mit hohen Geschwindigkeiten ausgestoßen werden. Auch treten beim Start eines Triebwerkes sehr starke Erschütterungen und Vibrationen auf. Dadurch ist die Verwendung steifer Materialien, wie z. B. keramischer Kacheln, kaum möglich. Hier sind flexible Materialien notwendig, die erst im Bedarfsfall einen Schutz entwickeln. Dies ist mit der Entwicklung der keramisierenden Elastomere gelungen.

Diese Materialien bestehen aus einem elastischen Bindemittel und einer anorganischen Füllstoffkombination. Die Elastomer-Matrix ist dabei in der Regel ein Polymer aus der Gruppe der Dimethylsiloxane oder der Polyurethane. Diese Bindemittelkomponenten erhalten eine Füllstoffkombination aus Siliciumcarbid und Siliciumdioxid. Häufig werden Kohlenstoff-, Keramik- oder Silikatfasern als Verstärkung eingearbeitet. Im Ergebnis entsteht ein so genannter Slurry, der unter Zugabe geeigneter Härter im Gießprozess in entsprechende Formen gegossen wird bzw. zu Schutzüberzügen verarbeitet werden kann. Die Viskosität dieser keramisierenden Elastomere erreicht dabei Werte von 10.000 cps. Entsprechend langwierig und aufwendig gestaltet sich der Applikationsprozess /50/. Bei Hitzeeinwirkung durch heiße Gasströmungen oder Feuer reagieren die keramisierenden Elastomere. Es kommt zu einem geringen Aufquellen und es bildet sich eine poröse, zusammenhängende keramische Schutzschicht, die das Trägermaterial vor Temperaturen bis 3000 °C minutenlang zu schützen vermag.

In ersten Vorversuchen wurde das Potenzial dieser Technologie bestätigt. Allerdings wurden auch zwei Problemfelder identifiziert. Der Entzündungsschutz, der mit einer 1,5 mm starken Elastomerschicht erreicht werden kann, ist vergleichsweise gering. Selbst mit dem nur über

eine geringe Leistung verfügenden Brenner aus dem B2- Test gemäß DIN 4102-1 kommt es nach wenigen Minuten zu einer Pyrolyse. Eine offene Flammenbildung wurde zwar aufgrund der unbrennbaren Schicht nicht beobachtet, aber die zu hohe Wärmeleitfähigkeit einer kompakten Keramik führt zu einer Schädigung der Holzstruktur. Um dieses Problem zu lösen, wurden Möglichkeiten untersucht, eine poröse Keramik mittels Intumeszenzprozessen zu erzielen. Die Arbeiten hierzu sind in Kapitel 5.6 beschrieben. Die Kombination von keramisierenden Materialien mit Intumeszenzprozessen führt zu Beschichtungsmaterialien, die im Brandfall Holzbauteile über definierte Zeiträume vor der Hitze des Feuers schützen und die über eine deutlich bessere Brandschutzleistung als herkömmliche Brandschutzbeschichtungen verfügen. Dies gelingt durch eine Stabilisierung des im Brandfall entstehenden schützenden Isolierschaums durch die Ausbildung von keramischen Strukturen in der Dämmschicht.

Das zweite Problem war aus Sicht des Brandschutzes von nachgeordneter Bedeutung, für mögliche Anwender allerdings entscheidend. Die keramisierenden Elastomere waren aufgrund der hohen keramischen Füllgrade in dem eigentlichen Elastomer nicht transparent. Die natürliche Anmutung des Holzes zu erhalten, erschien zunächst nicht möglich. Für den Außenbereich ist dies kein Problem, da hier auch bei herkömmlichen dekorativen Lacken nahezu ausschließlich deckende Anstriche zum Einsatz kommen. Im Innenbereich werden aber vorwiegend transparente Beschichtungen, z. B. Parkett- und Möbellacke, eingesetzt. Für herkömmliche transparente Holzbeschichtungen wurde zu dieser Zeit am WKI mit Nanopartikeln experimentiert, die bestimmte Wellenlängen im UV Bereich blockieren, aber das sichtbare Licht nur wenig behindern sollten. Dies führte zu der Überlegung, die Teilchengrößen der notwendigen Zuschlagstoffe in den Nanobereich zu reduzieren, um eine Transparenz zu erzielen. Diese Idee stellte sich als tragfähig heraus. Heute gilt es in der Lacktechnologie als allgemein bekannt, dass Beschichtungen mit höheren Füllgraden durch den Einsatz von Nanotechnologie transparent hergestellt werden können.

2.2 Flammenschutzmittel

Holz ist ein komplexer Baustoff, der aus polymeren Verbindungen besteht. Diese werden bei der Verbrennung thermisch und oxidativ zu niedermolekularen Stoffen und einer reaktiven Restkohle zersetzt.

Die Zersetzungsreaktionen erfolgen in der Pyrolysezone und sind überwiegend endotherm. Die Reaktionen laufen in vier Stufen ab (Bild 4). Im Temperaturbereich von 100 °C bis 250 °C kommt es zum Bruch schwacher Bindungen (z. B. O - O). Mit steigender Temperatur erfolgt der thermische Abbau durch Bindungsbruch von C - C und C - X Bindungen. Ab einer Temperatur von 350 °C ist ausreichend thermische Energie vorhanden, um auch stärkere Bindungen zu zersetzen. Es entsteht ein primärer Koks, der ab einer Temperatur von ca. 550 °C

unter Freisetzung eines wasserstoffreichen Gases in den sekundären Koks überführt wird. Die gasförmigen und flüchtigen Abbauprodukte des Holzes bilden das Brenngas, welches in der Flamme oxidiert wird /18/, /29/, /32/, /34/, /35/, /55/.

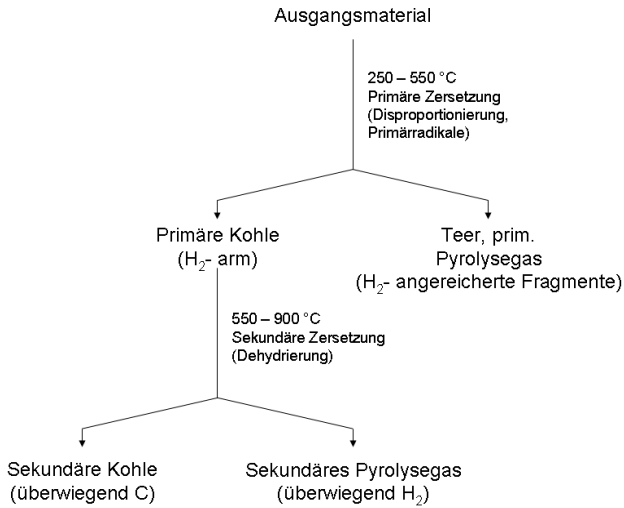


Bild 4: Grundlegende Mechanismen bei der Polymerpyrolyse /34/

Nach der Entzündung der gasförmigen Abbauprodukte steigt der Wärmestrom zur Holzoberfläche aufgrund der zusätzlich hinzukommenden Verbrennungsenergie an. Dies führt zu einem Anstieg der freiwerdenden Wärmeenergie bis auf einen Maximalwert. Im weiteren Verlauf entsteht durch die Bildung des primären und sekundären Kokes eine Schicht mit geringer Wärmeleitfähigkeit, die als Isolierung zwischen der Oberfläche und den tieferen Holzschichten wirkt (Bild 5). Die Temperatur der nach innen laufenden Pyrolysezone ist gegenüber der Oberflächentemperatur der Koksschicht entschieden geringer.

Weiter wirkt die Koksschicht als Gasbarriere. Sie behindert die Abgabe der brennbaren Gase zur Flamme. Dies führt zu einer kontinuierlichen Abnahme der freiwerdenden Wärme aus der Verbrennung nach dem ersten Maximum /6/, /7/, /8/, /11/, /15/, /17/, /22/, /25/, /26/, /33/, /42/, /46/, /47/, /49/, /54/, /58/.

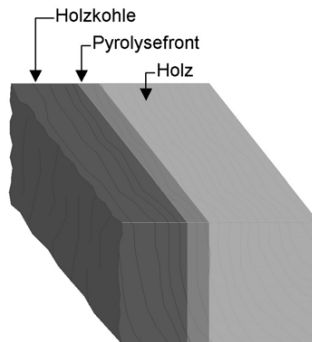


Bild 5: Abfolge der Schichten eines brandbeaufschlagten Holzes

Die Aufgabe von Flammenschutzmitteln ist es, die Entzündung zu erschweren und zu verzögern, bzw. den Abbrand zu verlangsamen. Dies kann durch folgende Mechanismen erreicht werden:

- Energieverbrauch,
- Unterbrechung des Radikalkettenmechanismus und
- Förderung einer Sperrschicht (z. B. Dämmschichtbildung, Verkohlungsförderung etc.).

Energieverbrauchende Flammenschutzadditive werden vorrangig im Kunststoffsektor eingesetzt. Viele der heute im Bauwesen verwendeten Kunststoffe (zum Beispiel Polyethylen, Polypropylen) müssten ohne den Zusatz von Flammenschutzmitteln nach DIN 4102 in die Baustoffklasse B3 „leicht entflammbar“ eingestuft werden und dürften damit nicht verwendet werden. Durch entsprechende Zuschlagsmengen kann sogar die Baustoffklasse B1 erreicht werden. Allerdings müssen diese Additive mit den sonstigen Eigenschaften der Kunststoffe (Polymerisation, Härtung, optische und toxikologische Eigenschaften etc.) vereinbar sein [2].

Zwei typische Vertreter für energieverbrauchende Additive sind das Aluminiumhydroxid und das Magnesiumhydroxid. Die thermische Zersetzung dieser Stoffe läuft in einer stark endothermen Reaktion ab, so dass dem Verbrennungsprozess Energie in Form von Wärme entzogen wird. Außerdem wird bei diesen Reaktionen Wasser freigesetzt, welches durch die Hitze des Feuers zu Wasserdampf wird. Die hierfür nötige Energie wird dem Brand entzogen und das Substrat wird gekühlt. Darüber hinaus verdünnt die Dampfphase des Wassers die Konzentration der brennbaren Gase. Die folgenden Reaktionsgleichungen beschreiben den Prozess.

Aluminiumhydroxid: $Al(OH)_3 + \text{Energie} \rightarrow Al_2O_3 + H_2O$

Magnesiumhydroxid: $Mg(OH)_2 + \text{Energie} \rightarrow MgO + H_2O$

Außerdem können die gebildeten Oxide (MgO und Al_2O_3) mit verkohlendem Material eine Isolationsschicht ausbilden. Dieser Vorgang ist allerdings vom Substrat abhängig.

Insbesondere die Mechanismen Kühlung und Verdünnung führen dazu, dass die Entzündung verzögert wird bzw. das Brandgeschehen mit einer verminderten Energiefreisetzung abläuft. Dies hält solange an, bis das Flammschutzmittel zu großen Teilen umgesetzt ist. Energieverbrauchende Flammschutzmittel haben sich zum Schutz von Holzwerkstoffen bislang nicht durchgesetzt. Mögliche Ursachen dürften im Preis dieser Chemikalien und in dem störenden Einfluss auf die Verklebung zu suchen sein.

Feuererstickende Flammschutzmittel gehörten über viele Jahrzehnte zu den gängigsten Additiven. Sie basieren in der Regel auf Halogenverbindungen. Bei erhöhter Temperatur werden Halogenatome freigesetzt, die den Radikalkettenmechanismus des Verbrennungsprozesses in der Gasphase unterbrechen.

Gängige Vertreter sind chlorierte Paraffine, hochchlorierte bicyclische Verbindungen, Pentabromdiphenylether, Tetrabrombisphenol A, Tetrahalogenphthalsäureanhydride, Tris(2,3-dibrompropyl)-phosphat u. a. Bromverbindungen. Aufgrund ihrer problematischen Umweltwirkung werden diese Mittel in allen Werkstoffgruppen (Kunststoff, Textilien, Holz) zunehmend weniger verwendet und zumindest in Europa zum Schutz von Holzwerkstoffen kaum noch eingesetzt.

Die beiden gängigsten Vertreter von Flammschutzmitteln im Holzsektor sind Ammoniumpolyphosphat und Borax. Beide Chemikalien verstärken die Dehydratisierung der Cellulose und damit die Bildung einer unbrennbaren und wärmeisolierenden Holzkohleschicht. Borax bietet den Vorteil, dass es nicht nur bei Holzwerkstoffen sondern auch als Imprägnierung für Vollholzprodukte eingesetzt werden kann. Allerdings ist Borax in den letzten Jahren vermehrt in der Kritik aufgrund toxischer Eigenschaften. Ammoniumpolyphosphat $((NH_4)PO_3)_n$ ist toxikologisch unbedenklich und hat neben guten verkohlungsfördernden auch feuererstickende Eigenschaften durch eine Verdünnung der brennbaren Gase. Allerdings kann Ammoniumpolyphosphat nur bei Holzwerkstoffen eingesetzt werden. Eine Imprägnierung von Vollholzprodukten ist nicht möglich /52/.

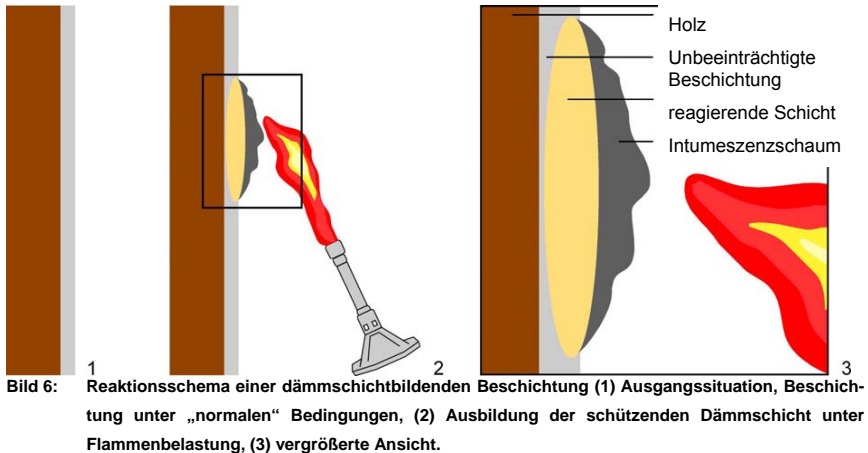
Ammoniumpolyphosphat ist ein anorganisches Salz bestehend aus Polyphosphorsäure und Ammoniak. Die Temperatur, bei der die thermische Zersetzung eines Ammoniumpo-

lyphosphats (APP) einsetzt, ist abhängig von der Kettenlänge. Langkettige APP's reagieren bei Temperaturen von über 350 °C, kurzkettige bereits ab Temperaturen von 150 °C. Bei der thermischen Zersetzung werden die Reaktionsprodukte Ammoniak und Phosphorsäure abgespalten. Ammoniak verdünnt die Konzentration der brennbaren Gase und wirkt daher feuerstickend. Die entstehende Phosphorsäure verstärkt den Verkohlungsprozess. Dadurch werden der Eigenschutz des Holzes schneller aktiviert und die tiefer liegenden Schichten früher und besser geschützt.

Die genannten Wirkungsmechanismen wurden teilweise im Rahmen der Entwicklungsarbeiten mit klassischen dämmschichtbildenden Systemen und den oben beschriebenen keramischen Wirkungen kombiniert und genutzt, um die Brandschutzleistung der zu entwickelnden Beschichtungssysteme zu erhöhen /13/, /37/.

Dämmschichtbildende Beschichtungen sind eine besondere Klasse unter den Flammschutzmitteln. Diese „intelligenten“ Anstrichsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass gewollte Reaktionen durch eine Änderung der äußeren Randbedingungen ausgelöst werden. Weitere Beispiele für derartige intelligente Anstrichsysteme sind die Änderung der Leitfähigkeit zur Überprüfung von Klemmkraften bei Schraubverbindungen oder die Anpassung der IR-Durchlässigkeit bei Glasbeschichtungen zur Regulierung des Raumklimas.

Bei dämmschichtbildenden Beschichtungen wird aufgrund einer Erhöhung der Oberflächentemperatur, z. B. durch Wärmestrahlung eines Feuers, eine Dämmschicht, in der Regel eine voluminöse Kohlenstoffschicht, ausgebildet. Diese Schicht wirkt isolierend und schützt das darunter liegende Material vor weiterer Temperatureinwirkung. Die Ausbildung der Dämmschicht im Brandfall basiert auf einer Reihe temperaturabhängiger chemischer Reaktionen (Bild 6). Dämmschichtbildner müssen dazu mindestens aus den folgenden Komponenten bestehen: Bindemittel, Gasbildner, Kohlenstoffquelle und einem sauren Katalysator. Der Reaktionsablauf lässt sich vereinfacht wie folgt beschreiben. Mit steigender Temperatur wird zunächst eine Säure freigesetzt. Diese wandelt durch katalytische Dehydratisierung die organische Kohlenstoffquelle in elementaren Kohlenstoff um. Parallel bilden sich durch thermische Zersetzung des Treibmittels gasförmige Produkte, welche die verkohlte Kohlenstoffquelle aufschäumen und so einen isolierenden Kohlenstoffschaum ausbilden. Entscheidend dabei ist, dass diese Reaktionen mit dem Erweichen der Bindemittelmatrix zusammen fallen. Sofern die Abfolge der Reaktionen zeitlich übereinstimmt, bildet sich eine voluminöse Dämmschicht aus Kohlenstoff /4/, /9/, /10/, /50/.



Das Prinzip der dämmschichtbildenden Beschichtungen wurde Ende der sechziger Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelt und seitdem in zunehmendem Umfang zum Schutz tragender Stahlbauteile eingesetzt.

In der holzverarbeitenden Industrie wurden solche Systeme mit dem Ziel eingesetzt, die Brennbarkeit des Baustoffes von normalentflammbar zu schwerentflammbar zu verändern. Systeme, die den Feuerwiderstand von Holzbauteilen und -konstruktionen deutlich erhöhen oder sogar die Entzündung über definierte Zeiträume verhindern, existierten bislang nicht.

Hierfür sind zwei wesentliche Ursachen zu nennen. Die erste Ursache ist rein technologischer Natur. Die bislang bekannten und verfügbaren Dämmschichtbildner haben eine zu hohe Ansprechtemperatur. Die Systeme reagieren in einem Temperaturbereich zwischen 180 °C und 220 °C. Erst ab dieser Temperatur baut sich die für den Schutz vor der Temperatureinwirkung notwendige Schutzschicht auf. Diese relativ hohe Temperatur ist für ein Stahlbauteil noch unkritisch. Die kritische Stahltemperatur liegt nämlich bei ca. 550 °C. Die Entzündungstemperatur bei Holz beginnt aber bereits bei ca. 270 °C /48/. Bei einer Starttemperatur von 220 °C würden also lediglich 50 °C bis zum Erreichen der kritischen Temperatur verbleiben. Dies bedeutet, dass zum Erreichen eines Entzündungsschutzes von 60 Minuten, die Temperaturzunahme durch den Dämmschichtbildner bei unter 1 °C/min liegen müsste. Dieser Wert ist derzeit unerreichbar.

Die zweite Ursache waren die fehlenden baurechtlichen Anforderungen. Nach alter Musterbauordnung (Fassung Juni 1996) war keine Notwendigkeit für derartige Beschichtungen gegeben. Demnach durften in Deutschland Holzbauteile lediglich bei Gebäuden bis zu einer Fußbodenhöhe von 7 m des obersten Aufenthaltsraumes verwendet werden, was einem Ge-

Ausgangslage

bäude mit 3 Geschossen entspricht. Die wesentliche Anforderung für diese Gebäude war und ist auch weiterhin „feuerhemmend“ (F30-B). Diese Anforderung lässt sich am einfachsten über eine entsprechende Dimensionierung der Bauteile erreichen. Die Anforderung an einen Entzündungsschutz bei der Verwendung von tragenden bzw. raumabschließenden Holzbauteilen bei Gebäuden mit mehr als drei Geschossen ist erst mit der Novellierung der MBO in 2002 gestellt worden /19/, /20/, /21/.

3 Definition der Anforderungen

Das für die Entwicklungsarbeiten dominierende Kriterium war zunächst die Brandschutzleistung. Die maßgebenden Anforderungen an die Brandschutzleistung, für die vorgestellte Entwicklungsarbeit, können zunächst aus den bauordnungsrechtlichen Vorschriften und den einschlägigen Normen abgeleitet werden. Danach können Anforderungen an die Baustoffklasse gemäß DIN 4102 und das Kapselkriterium gemäß DIN EN 13501-2 gestellt werden.

Die Anforderung an die Baustoffklasse ist „schwerentflammbar“ B1. Das zugehörige Prüfverfahren ist in Deutschland noch die Brandschachtprüfung gemäß DIN 4102-16. Im Zuge des Übergangs auf die europäische Klassifizierung von Bauteilen und der Einbindung in das deutsche bauaufsichtliche Verfahren ist auch eine Klassifizierung durch den Single Burning Item (SBI) Test gemäß DIN EN 13823 möglich. Die Verfahren sind normativ hinreichend beschrieben, so dass auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wird.

Die Anforderung an das Kapselkriterium ist erstmals in der MBO 2002 in Verbindung mit der M-HFH HolzR für die Gebäudeklasse 4 aufgestellt worden. Danach müssen tragende Holzbauteile die Anforderung hochfeuerhemmend erfüllen. Dies bedeutet einen Feuerwiderstand von 60 Minuten (F 60) und eine Kapselung für 60 Minuten (K₂60). K₂60 ist eine Anforderung, die sich auf die Brandschutzbekleidung der Bauteile bezieht. Danach muss die Brandschutzbekleidung den darunter liegenden brennbaren Baustoff Holz unter ETK-Beflammung während einer Zeitdauer von mindestens 60 Minuten vor einer Entzündung schützen (Bild 2).

Die Euronorm DIN EN 14135 beschreibt das Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Brandschutzbekleidung, den darunter liegenden brennbaren Baustoff gegen Entzündung, Verkohlung und andere Schäden während einer definierten Normbrandbeanspruchung (ETK) zu schützen. Werden die in dieser Norm festgelegten Leistungskriterien (Verhinderung der Entzündung bzw. Verkohlung des Holzes) eingehalten, wird die Brandschutzbekleidung je nach Dauer ihrer Schutzwirkung einer Kapselklasse nach DIN EN 13501-2 zugeordnet.

Neben den baurechtlichen Anforderungen gibt es auch nutzerspezifische Wünsche an den Brandschutz. Hier eröffnet das Baurecht über die Möglichkeit der Abweichung in Verbindung mit kompensatorischen Maßnahmen einen gewissen Spielraum. So wird die Kapselklasse K₂60 in der Praxis aufgrund der hohen Kosten kaum umgesetzt. Viele Objekte wurden in der Kapselklasse K₂30 in Verbindung mit kompensatorischen Maßnahmen ausgeführt. Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig ist kürzlich eine Dissertation /23/ vorgelegt worden, die diese Möglichkeit wissenschaftlich absichert.

Darüber hinaus erfolgte bei 15 Unternehmen in der Wertschöpfungskette Holzbau eine Umfrage nach weiteren relevanten Einwirkungen bzw. weiteren Anforderungen. Die dabei ermittelten Kriterien lassen sich in fünf Anforderungsgruppen einteilen:

- Anforderungen aufgrund von mechanischen Einwirkungen,
- Anforderungen aufgrund von Umwelteinwirkungen,
- Anforderungen hinsichtlich Prozess und Handhabung,
- Anforderungen an die Qualität und
- Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit.

Die beiden erstgenannten Anforderungsgruppen werden im Wesentlichen durch den jeweiligen Anwendungsfall bestimmt. Die drei letztgenannten hingegen sind allgemeine Anforderungen, die unabhängig vom spezifischen Anwendungsfall zu sehen sind. Diese werden im Weiteren zuerst diskutiert.

3.1 Allgemeine Anforderungen

Um die Anwendbarkeit der Brandschutzbeschichtung zu gewährleisten, ist die Eignung für übliche Applikationsprozesse notwendig. Für die Holzbeschichtung steht eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse zur Verfügung. Die mit Abstand wichtigsten Prozesse sind die unterschiedlichen Spritzverfahren. Dazu gehören das Air-, das Airmix- und das Airlessverfahren. Jedes dieser Verfahren bietet unterschiedliche Vor- und Nachteile. Prozesstechnologisch unterscheiden sie sich im Wesentlichen in der Art der Zerstäubung.

Beim Druckluftspritzen (Airverfahren) wird das Lackmaterial durch die durchströmende Druckluft, die sich an der Düse schlagartig entspannt, zerstäubt. Das konventionelle Druckluftspritzen (Hochdruck) arbeitet mit Drücken von 2 bis 6 bar und hoher Luftgeschwindigkeit. Der Lack wird dabei in kleine Partikel zerstäubt. Im Ergebnis wird eine sehr gute optische Oberflächenqualität erzielt, allerdings bei einem Overspray von bis zu 70 %.

Ein Nachteil der Druckluftspritzverfahren ist, dass keine hochviskosen Beschichtungsmaterialien verarbeitet werden können. Diese Beschichtungssysteme müssen unter Verlust ihrer Dickschichteigenschaften auf eine geeignete Viskosität verdünnt werden, um eine zufriedenstellende Zerstäubung zu erzielen. Daher lassen sich pro Spritzgang nur vergleichsweise geringe Lackmengen aufbringen. Ein weiterer wesentlicher Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass durch die Pressluft in einem hohen Maße Blasen in die Oberfläche eingetragen werden. Diesem Effekt kann nur durch geeignete Lackadditive entgegen gewirkt werden. Vorteile des

Verfahrens sind die geringen Anschaffungskosten für die notwendigen Geräte, eine einfache Handhabung sowie eine hochwertige Oberflächenqualität.

Die Airless-Zerstäubung ist ein Verfahren, bei der das Beschichtungsmaterial mit einer Pumpe verdichtet und durch kleine Düsen zerstäubt wird. Das Material wird dabei hohen Drücken von 100 bis 150 bar ausgesetzt. Theoretisch entsteht ein reiner Lacknebel ohne jeden Luft-einschluss. Die Lackpartikel sind größer als beim Druckluftspritzen, es entsteht weniger Overspray und ein hoher Lackdurchsatz wird erzielt. Die Fördermengen von Airless-Pumpen können bis zu 45 l/min erreichen. Daher eignet sich die Airless-Technik insbesondere dort, wo größere Flächen beschichtet werden oder eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit gewünscht und möglich ist. Vorteilhaft ist zudem, dass mit der Airless-Zerstäubung die Verarbeitung von Dickschichtsystemen mit hohen Viskositäten ohne Verdünnung möglich ist.

Durch das luftfreie Spritzen werden zudem deutlich weniger Blasen in die Oberfläche eingebracht. Dadurch kann die Menge an notwendigen Lackadditiven deutlich reduziert werden. Die Praxis hat allerdings gezeigt, dass auch bei der Airless-Zerstäubung mit Luftpneulen zu rechnen ist.

Die Nachteile dieses Verfahrens sind vergleichsweise höhere Anschaffungskosten. Weiterhin sind die Handhabung wie Reinigung und Wartung deutlich aufwändiger als beim Airverfahren. Die Oberflächenqualität ist im Vergleich zum Airverfahren etwas schlechter. Das Airmix-Verfahren ist eine Kombination aus den beiden genannten Verfahren.

In der Praxis hat das Airless-Verfahren in den letzten Jahren die größte Bedeutung bei der Beschichtung von Holzbauteilen erlangt. Die Möglichkeit der Spritzapplikation wurde daher als Muss-Anforderung definiert. Das Airless-Verfahren wurde vor dem Hintergrund der üblicherweise hohen Schichtdicken von Brandschutzbeschichtungen bevorzugt. Da Brandschutzbeschichtungen in der Regel einen hohen Füllgrad und dadurch eine hohe Viskosität aufweisen, bietet sich dieses Verfahren ebenfalls an.

Weitere gewünschte Applikationsverfahren waren das Walz- und das Gießverfahren. Dabei handelt es sich um Überschussverfahren. Es wird mehr Lackmaterial als benötigt auf das zu beschichtende Bauteil gegeben und mittels Rakel oder Walze zu einer gleichmäßigen Schichtdicke verteilt. Darüber hinaus musste das Auftragen mittels Pinsel möglich sein, um nachträgliche Ausbesserungen durchführen zu können.

Ein weiterer Aspekt beim Beschichten von Holzbauteilen sind die notwendigen Trocknungszeiten. Lange Trocknungszeiten führen zu einem hohen Flächenbedarf, da die beschichteten Bauteile zwischengelagert werden müssen. Um die Trocknungszeiten zu reduzieren, sollten

forcierte Trocknungsprozesse bei erhöhter Temperatur oder reduzierter Luftfeuchtigkeit möglich sein.

Die Handhabung des Materials sollte möglichst unproblematisch sein. Insbesondere sollte der Anteil an flüchtigen organischen Lösemitteln gering sein, um keine zusätzlichen Anforderungen aus der Lösemittelverordnung beachten zu müssen. Auf die Verwendung von gesundheits- oder umweltgefährdenden Stoffen sollte verzichtet werden. Ein Entsorgungskonzept von Lackresten bzw. von beschichteten Bauteilen im Anschluss an ihre Lebensdauer sollte ebenfalls entwickelt werden. Eine Lagerung von frischem Lackmaterial sollte vorzugsweise über einen Zeitraum von bis zu 12 Monaten möglich sein.

Die Anforderungen an die Qualität werden auch durch die jeweiligen Anwendungen beeinflusst. Allgemeine Anforderungen beziehen sich auf die Haftung und Oberflächenqualität. Für die Haftung wird orientierend die Vorgabe gemäß VDL-RL 14 von mindestens 1,0 MPa/cm² heran gezogen. Als Maß für die Oberflächenqualität wird eine völlig ausgehärtete Oberfläche vergleichbar mit bekannten Holzbeschichtungen definiert. Im Vergleich zu den marktüblichen Brandschutzbeschichtungen stellt dies eine signifikante Verbesserung dar. Im Bereich der üblichen Umgebungstemperaturen sollten keine Veränderungen in der Oberflächenqualität eintreten.

Für die Umsetzung einer neuen Technologie in die Praxis ist die Wirtschaftlichkeit der entscheidende Faktor. Es wird daher gefordert, dass die neu entwickelte Brandschutzbeschichtung auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden muss. Dabei sollten Einsparpotenziale identifiziert werden. Im Brandfall sollen zudem keine hochtoxischen Stoffe, z. B. Dioxine freigesetzt werden.

3.2 Anwendungsfall Innen

Beim Anwendungsfall Innen ist im Gegensatz zum Anwendungsfall Außen mit einer trockenen Umgebung, d.h. mit relativen Luftfeuchten von weniger als 80 % zu rechnen. Eine Belastung durch UV-Licht tritt nur indirekt auf. Übliche Bauteile im Innenbereich sind:

- Fußböden und Treppen,
- Tragende Wände und Stützen,
- Decken,
- Türen,
- Festverglasungen.

Für alle oben genannten Bauteile gilt, dass aus den Beschichtungen keine gesundheitsgefährdenden Stoffe, die zu einer Beeinträchtigung der Innenraumluftqualität führen können, emittieren dürfen. Als Lebensdauer wurde ein Renovierungsintervall von mindestens 10 Jahren gewünscht.

3.2.1 Fußböden und Treppen

Fußböden und Treppen unterliegen in der Nutzung einer mechanischen Beanspruchung der Oberfläche. Diese Beanspruchung ist zunächst das Gewicht der jeweiligen Nutzer, das durch die Polymerschicht ohne Schäden abgetragen werden muss. Weiterhin werden Beschichtungen durch das Begehen schleifend beansprucht. Die Beschichtungen müssen daher über eine ausreichende Abriebfestigkeit verfügen. Dies gilt umso mehr für eine Brandschutzbeschichtung, da die funktionelle Schicht in einer Mindestschichtdicke erhalten bleiben muss. Neben dem Abrieb sind weitere mechanische Einwirkungen denkbar. So können Gegenstände aus einer Fallhöhe von bis zu 2 m auf die Brandschutzbeschichtung auftreffen.

Fußböden und Treppen werden regelmäßig gereinigt. Die größte Beanspruchung stellt feuchtes Aufwischen in Verbindung mit Reinigungsmitteln dar. Auch sind kleinere Haushaltsunfälle wie das Verschütten eines Kaffees als Einwirkung vorstellbar. Diesen Belastungen muss die Brandschutzbeschichtung ohne Schäden oder Oberflächenveränderungen widerstehen können.

Die Beschichtung muss eine weitgehende Transparenz und eine ansprechende Oberflächenqualität aufweisen. Die Mindestanforderung an den Brandschutz ist die Schwerentflammbarkeit (B1) nach DIN 4102.

Für Holztreppen ergeben sich aus den Bauordnungen weitergehende Anforderungen an den Brandschutz. Diese werden aus der MBO 2002 abgeleitet, um nicht die unterschiedlichen Landesbauordnungen diskutieren zu müssen. Gemäß MBO ist die Anforderung an die tragenden Teile von Treppen in der Gebäudeklasse 3 feuerhemmend (F 30-B). Dies ist mit Holztreppen nur möglich, wenn der Abbrand über erhöhte Holzquerschnitte der Treppenwange und der Setzstufen berücksichtigt wird. Eine Anforderung an die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung ist daher die Erhöhung der Feuerwiderstanddauer auf F 30 bei gleichbleibenden Holzquerschnitten. In der Gebäudeklasse 4 gilt zunächst die Forderung nicht brennbar. Damit dürfen formal keine Holztreppen eingesetzt werden. Hinsichtlich der Schutzziele wäre es vertretbar, wenn eine Holzterrasse mit einem Hochleistungsdämmschichtbildner über 10 Minuten Branddauer gekapselt wird. Ein Treppenraum muss per Definition frei von Brandlasten sein. Eine Kapselung über 10 Minuten ist daher ausreichend, da die Brandlasten für ein Primärfeuer von mehr als 10 Minuten Dauer nicht vorhanden sein dürfen. Sollten un-

Definition der Anforderungen

zulässigerweise dennoch Brandlasten vorhanden sein, die ein entsprechendes Brandszenario nach sich ziehen, wird der Treppenraum ohnehin unpassierbar. Auch stellt sich die Frage, ob eine Treppe in der Qualität nicht brennbar aber ohne Feuerwiderstand in diesem Fall nicht einstürzen würde. Dieses Risiko wird baurechtlich als vertretbar angesehen. Vor diesem Hintergrund ist eine K_210 Brandschutzbeschichtung als Kompensation für eine Holzterrasse in der Gebäudeklasse 4 durchaus sinnvoll und angemessen.

3.2.2 Tragende Wände und Stützen

Tragende Wände und Stützen unterliegen nahezu keiner Beanspruchung der Oberfläche. Beschichtungen, die den mechanischen Einwirkungen aus 3.2.1 widerstehen, sind daher mehr als geeignet für diese Bauteile. Regelmäßige Reinigungen dieser Flächen und Bauteile sind denkbar. Allerdings sind die Einwirkungen geringer als die bei Fußböden. Eine Chemikalienresistenz muss allerdings gegeben sein. So sind Belastungen der Flächen z. B. durch Hautcreme an den Händen und anderes denkbar.

Als Farbgebung sind transparente und deckende Beschichtungen vorstellbar.

Die Anforderungen an den Brandschutz entsprechen dem Kapselkriterium K_260 . In Verbindung mit kompensatorischen Maßnahmen ist auch das Kapselkriterium K_230 denkbar.

3.2.3 Decken

Decken(-unterseiten) unterliegen weder mechanischen Belastungen noch sind Reinigungsvorgänge oder ähnliches zu berücksichtigen. Ein hohes Maß an Transparenz ist bei diesen Bauteilen oft das maßgebende Kriterium.

Die Anforderungen an den Brandschutz entsprechen dem Kapselkriterium K_260 . In Verbindung mit kompensatorischen Maßnahmen ist auch das Kapselkriterium K_230 denkbar.

3.2.4 Türen und Tore

Türen und Tore werden aufgrund der Öffnungs- und Schließvorgänge mechanisch stark beansprucht. Eine Hochleistungsbrandschutzbeschichtung muss daher flexibel sein, um diese Bewegungen schadfrei mitmachen zu können. Weiterhin müssen Stoßbelastungen ausgehalten werden.

Auch ist eine Reinigung mittels Haushaltschemikalien denkbar. Wie bei den tragenden Wänden und Stützen ist mit einer Beanspruchung z. B. durch Hautcreme an den Händen oder ähnliches zu rechnen.

Eine Anforderung gemäß Kapselkriterium besteht nicht. Vielmehr soll durch die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile ohne Vergrößerung der Bauteilquerschnitte erhöht werden.

3.2.5 Pfosten- und Riegelkonstruktionen

Außer der Belastung durch Reinigung sind bei diesen Bauteilen keine weiteren Belastungen zu erwarten. Die Brandschutzbeschichtung soll vorzugsweise transparent sein. Die Möglichkeit der Einfärbung sollte ebenfalls vorhanden sein.

Eine Anforderung gemäß Kapselkriterium besteht nicht. Vielmehr soll durch die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile erhöht werden.

3.3 Anwendungsfall Außen

Der Anwendungsfall Außen betrifft das Bauteil Fassade. Die Anforderungen werden durch die Anwendung auf der bewitterten Seite und im Hinterlüftungsspalt bestimmt.

3.3.1 Wetterseite

Hölzerne Grabbeigaben, die in den ägyptischen Pyramiden gefunden wurden, zeigen, dass Holz mehrere Jahrtausende ohne Schaden überdauern kann, sofern die beiden entscheidenden klimatischen Einflussfaktoren Feuchtigkeit und UV-Strahlung fehlen.

Der Eintrag von Wasser in eine Konstruktion kann auf zwei unterschiedlichen Wegen, nämlich als Wasserdampf oder als Flüssigwasser, erfolgen. Bei einer Analyse von durch das Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) begutachteten Schadensfällen fällt auf, dass der überwiegende Teil der Schäden im unteren Bereich der Bauteile auftritt, also dort, wo Flüssigwasser in Form von Niederschlag oder Spritzwasser auftritt /31/. Das Schutzvermögen von Anstrichsystemen gegenüber Flüssigwasser wird als Kennwert nach DIN EN 927-5 bestimmt. Dieser Wert beschreibt, wie viel Wasser in g/m^2 durch die Beschichtung hindurch vom Holz bei einer 72 Stunden dauernden Flüssigwasserbelastung aufgenommen wird. Für maßhaltige Bauteile gilt dabei ein Grenzwert von 175 g/m^2 . Eine deutliche Unterschreitung dieses Wertes und damit trockeneres Holz wirkt sich positiv auf die Dauerhaftigkeit der Bauteile aus.

Der Feuchteschutz eines Anstriches hängt in weiten Bereichen linear von der Trockenfilmschichtdicke ab. Mittels größerer Trockenfilmschichtdicken, z. B. durch erhöhten Nassauftrag oder durch eine zusätzliche Schicht, lässt sich dementsprechend die Feuchteschutzwirkung verbessern. Wie stark sich die Trockenfilmschichtdicke und damit der Feuchteschutz auf die Dauerhaftigkeit des Holzes auswirken, haben Untersuchungen am WKI gezeigt (s. Bild 7).

Definition der Anforderungen

Die linke Probe ist dabei lediglich mit einer Lackschicht versehen. Die mittleren Probekörper haben 2 bzw. 3 Lackschichten und der rechte Probekörper wurde mit 5 Lackschichten appliziert. Die Auftragsmengen wurden dabei pro Schicht konstant gehalten, so dass auf dem ganz rechten Probekörper die fünffache Trockenschichtdicke erreicht wurde.



Bild 7: Anstrichsystem mit unterschiedlichen Schichtdicken nach zweijähriger Bewitterung.

Ein Problem ist allerdings mit Anstrichsystemen, die über eine hohe Feuchteschutzwirkung verfügen, verbunden. Sie erfordern eine regelmäßige Inspektion und eine Beseitigung der Frühschäden.

Außer der Feuchte stellt auch der UV-Anteil des Lichts eine Gefahr für das Holz dar. Die energiereiche UV-Strahlung, insbesondere UV-B-Strahlung (280 - 320 nm) und UV-A-Strahlung (320 - 400 nm), ist in der Lage, bis zu zwei Millimeter tief in eine ungeschützte Holzoberfläche einzudringen und ihre schädigende Wirkung zu entfalten. Das Lignin des Holzes wird durch die UV-Strahlung abgebaut und zerstört. Dies äußert sich bei Hölzern im sogenannten Vergrauen.

Ein deckendes Anstrichsystem lässt aufgrund des hohen Pigmentanteils keine Strahlung passieren und schützt nach derzeitigem Stand eine Holzoberfläche am besten. Allerdings ist dies mit dem Nachteil verbunden, dass die Optik, d. h. Farbe und Struktur des Holzes, verborgen werden. Es besteht daher der Wunsch, dass die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung für Außen lasierend, d. h. halbdurchsichtig sein sollte. Um das Holz trotzdem ausreichend vor der Einwirkung der UV-Strahlung zu schützen, muss eine lasierende Brandschutzbeschichtung im Wellenlängenbereich von 280 μm bis etwa 440 μm eine möglichst hohe Absorption aufweisen. Im Bereich von 440 μm bis 780 μm sollte sie idealerweise über eine geringere Ab-

sorption verfügen, um den optischen Eindruck des Holzes zumindest teilweise sichtbar zu machen. Der Zusammenhang wird anhand von Bild 8 deutlich.

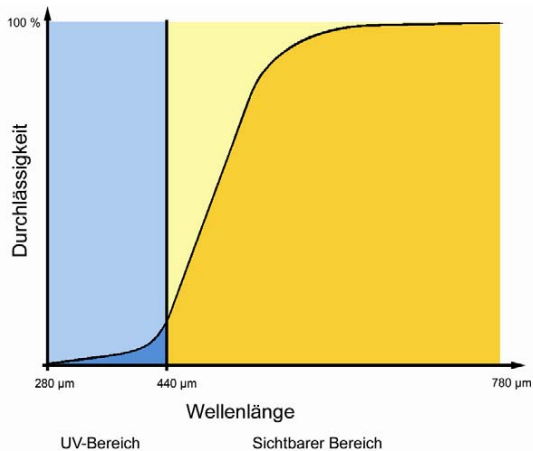


Bild 8: Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Wellenlänge eines idealisierten Anstrichsystems

Als weiterer wichtiger Parameter wurde ein nicht sprödes Verhalten der Beschichtung definiert, da Holz als ein natürlicher Werkstoff unter dem Einfluss von Feuchtigkeit Quell- und Schwindbewegungen unterliegt. Die Größenordnung dieser Bewegungen ist abhängig von der Art des verwendeten Holzes und dessen anatomischer Richtung. Bei der heimischen Kiefer (*Pinus sylvestris*) ist z. B. mit einem tangentialen Quellmaß von etwa 0,36 % je 1 % Holzfeuchtigkeitsänderung zu rechnen. In einem Holzfeuchtebereich von 12 % bis 22 % quillt ein 10 cm breites Stück Holz daher um bis zu 3,6 mm. Diesen Dimensionsänderungen muss der Anstrich folgen können. Erschwerend kommt hinzu, dass die elastischen Verformungen des Anstriches über einen Temperaturbereich von etwa -20 °C bis +70 °C möglich sein müssen.

Da die Wetterseite gleichzeitig die Ansicht eines Hauses darstellt, muss die Brandschutzbeschichtung auch optischen Ansprüchen genügen. Hinsichtlich des Brandschutzes ergibt sich die Forderung gemäß Bauordnung nach Schwerentflammbarkeit.

3.3.2 Hinterlüftungsspalt

Im Hinterlüftungsspalt herrschen andere Bedingungen als auf der Wetterseite vor. Die Oberflächen sind vor Flüssigwasser und UV-Strahlung weitestgehend geschützt. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass es kurzfristig zu einer begrenzten Kondensation von Wasserdampf und damit zur Bildung von Flüssigwasser kommt. Es kann auch zu einem Befall durch Flechten und Moose kommen, die gegebenenfalls zu einer Zerstörung der Brandschutzbe-

schichtung führen. Daher ist ein Mindestschutz gegen biologischen Befall wünschenswert. Prinzipiell ist aber eine Brandschutzbeschichtung, die den Erfordernissen der Wetterseite genügt, auch für den Einsatz im Hinterlüftungsspalt geeignet.

Die Anforderungen an den Brandschutz sind allerdings höher zu bewerten. Hier ist das Schutzziel das sichere Verschießen des Spalts, um die gefährliche Ausbreitung von Feuer und Rauch im Hohlraum zu verhindern.

3.4 Sonstige Anwendungen

Unter die sonstigen Anwendungen fallen Nagelplattenbinder. Diese sind seit einigen Jahren in der Diskussion, da Dachkonstruktionen aus Nagelplattenbindern unter Brandbelastung je nach Ausführung innerhalb weniger Minuten versagen können. Die höchste Priorität für diese Anwendungen war daher die Erhöhung des Feuerwiderstandes auf 30 Minuten. Da es sich um ein kombiniertes Tragverhalten aus Holzbalken und metallischer Nagelplatte handelt, muss die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung beide Teile schützen können. Daher muss auch auf der in der Regel verzinkten Nagelplatte eine Haftung gegeben sein.

Hinsichtlich der Optik bestehen keinerlei Ansprüche. Auch sind in der Nutzung keine mechanischen oder sonstigen Einwirkungen zu erwarten. Allerdings wurde gewünscht, die Nagelplatten vor dem Einpressen zu beschichten. Daher muss die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung dem Einpressdruck standhalten.

Eine weitere Anwendung sind die historischen, denkmalgeschützten Gebäude. Die Anforderungskriterien wurden mit den obersten Denkmalbehörden der Bundesländer Sachsen und Niedersachsen diskutiert. Das wesentliche Kriterium unter dem Aspekt der Denkmalpflege ist, dass alle Maßnahmen reversibel sein müssen. Dieser Grundsatz ist unter dem Eindruck von Schäden durch unzureichende Kenntnis eingesetzter Materialien und Methoden und den damit verbundenen Langzeitschäden entstanden. Vor allem diffusionsdichte Anstriche und Fixierungs- bzw. Konservierungsmittel führten in der Vergangenheit zu erheblichen Schäden. Eine weitere Forderung war daher, die Brandschutzbeschichtung diffusionsoffen zu gestalten.

Weiterhin darf durch die Brandschutzbeschichtung der Gesamteindruck einer historischen Oberfläche nicht gestört werden. Darunter fallen neben der Anforderung einer möglichst hohen Transparenz auch Anforderungen an den Glanzgrad, die Lichtbrechung und die Haptik. Der Eindruck der ungeschützten Oberfläche darf möglichst wenig verändert werden.

Hinsichtlich des Brandschutzes definieren sich die Anforderungen aus der jeweiligen Bauordnung. Eine Entwicklung eines B1-Beschichtungssystems mit genannten Eigenschaften wurde allgemein als sehr großer Fortschritt gesehen.

4 Erarbeitung einer geeigneten Entwicklungsmethodik

Im ersten Schritt der vorliegenden Arbeit wurde die Machbarkeit und Tragfähigkeit der Idee grundlegend untersucht. Dies führte zu dem Ergebnis, dass es offensichtlich nicht ausreichend ist, ein Holzbauteil lediglich mit einer unbrennbaren Schicht zu verkleiden. Eine Schutzschicht, die den Anforderungen aus Kapitel 4 genügt, muss über eine hohe Isolationswirkung verfügen. Klassische keramische Werkstoffe erzielen dies aufgrund vergleichsweise hoher Wärmeleitfähigkeiten nicht. Die Wärmeleitfähigkeiten von technischen Keramiken liegen zwischen $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Zirkonoxid und bis zu $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Siliciumcarbid.

Auf Basis dieser Überlegungen und der zugrundeliegenden Literaturrecherche zu dämmschichtbildenden Systemen wird zunächst in Kapitel 4.1 ein chemisch-physikalisches Modell entwickelt. Mit dem Modell werden in Kapitel 4.2 und 4.3 einfache numerische Berechnungen durchgeführt, um Zielvorgaben für notwendige Schichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten zu erhalten.

4.1 Entwicklung eines chemisch-physikalischen Modells

Für die gezielte Entwicklung der Hochleistungsbrandschutzbeschichtung ist ein deskriptives chemisch-physikalisches Modell hilfreich, mit dem verschiedene Ziele verfolgt werden. Zunächst soll vergleichsweise früh eine Aussage zur Umsetzbarkeit der Idee getroffen werden können. Die der Idee zugrunde liegende Technologie aus der Raumfahrttechnik kann zwar sehr hohen Temperaturen widerstehen, dies aber nur für kurze Zeiträume von ca. 90 Sekunden. Zudem dürfen bei den zu schützenden hochvergüteten Stählen deutlich höhere Temperaturen erreicht werden als bei einem Holzbauteil. Frühzeitig war klar, dass die in Kapitel 3 formulierten Anforderungen nur durch eine Kombination der keramisierenden Elastomere mit den Intumeszenzprozessen von dämmschichtbildenden Beschichtungen erreicht werden können. Offen blieb, ob überhaupt ausreichende Isolationseigenschaften erzielt werden können. Diese Frage wurde mit den folgenden Untersuchungen auf theoretischem Wege und durch unterstützende Vorversuche positiv beantwortet. Ein weiteres wichtiges Ziel war, die theoretischen Entwicklungsmöglichkeiten zu untersuchen. Die Überlegungen sollten dabei eine zielgerichtete Vorgehensweise erlauben. Das Modell wurde parallel zu den chemischen Entwicklungsarbeiten in Verbindung mit den durchgeführten Laborbrand- und Beistellversuchen weiterentwickelt.

Die aus der Literatur bekannte Wirkungsweise von dämmschichtbildenden Beschichtungen wurde bereits in Kap. 2.2 beschrieben. Allerdings sind die dort diskutierten Prinzipien zu un-

genau für eine gezielte Entwicklung. Es wurde daher ein erweitertes Modell erarbeitet, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Die Ausbildung einer isolierenden Schaumstruktur erfolgt in fünf Phasen:

- Phase 1: Vor Temperatur- und Flammeneinwirkung,
- Phase 2: Initiale Beaufschlagung mit Temperatur und Flammen / Erweichung des Bindemittels in den oberen Schichten,
- Phase 3: Start der Ausbildung der Dämmschicht,
- Phase 4: Haltephase mit Nachreaktionen aus den unteren Schichten,
- Phase 5: Haltephase ohne Nachreaktionen bis zum Erreichen der krit. Temperatur.

In Phase 1 liegt ein Zweischichtsystem vor, welches aus der Hochleistungsbrandschutzbeschichtung in einer Trockenschichtdicke x und dem Substrat Holz in der Schichtdicke y besteht. Für die Beschreibung des Systems sind die folgenden wärmespezifischen Eigenschaften relevant:

1) Brandschutzbeschichtung:

- Dichte,
- Wärmeleitfähigkeit,
- Spezifische Wärmekapazität,
- Emissionskoeffizient,
- Trockenschichtdicke der Beschichtung.

2) Holz

- Holzfeuchte,
- Dicke / Masse des Holzes,
- Rückseitendämmung,
- Wärmeleitfähigkeit.

In der Phase 2 erfolgt eine Beaufschlagung der Brandschutzbeschichtung mit Temperatur und Flammen. Die Brandschutzbeschichtung beginnt sich zu erwärmen, das Bindemittel wird

zunächst weich und beginnt dann zu schmelzen. Die Schmelze stellt eine eigene Schicht dar. Aus dem Zweischichtsystem ist ein Dreischichtsystem geworden. Für die Beschreibung des Gesamtsystems werden zusätzliche Parameter benötigt. Die grundsätzlichen Voraussetzungen für eine Verbrennung (Sauerstoff, Brennstoff etc.) werden dabei als gegeben angenommen:

- Energiefreisetzungsrate (Brandquelle),
- Oberflächentemperatur der Beschichtung,
- Viskosität des Bindemittels,
- Glasübergangstemperatur des Bindemittels.

In der Phase 3 startet die eigentliche Intumeszenzreaktion. Es kommt zur Freisetzung einer Säure, die wiederum Kohlenstoff aus der Kohlenstoffquelle freisetzt. Parallel bilden sich durch thermische Zersetzung des Treibmittels gasförmige Produkte. Dadurch kommt es zu einer Aufschäumung des Kohlenstoffs. Aus dem Dreischichtsystem wird ein Vierschichtsystem. Für die modellhafte Beschreibung der Phase 3 werden zusätzliche Parameter benötigt:

- Starttemperatur für die Reaktionen Säurefreisetzung und Gasbildung,
- Reaktionsgeschwindigkeit,
- Umsetzung des Materials,
- Gasvolumen,
- Kohlenstoffmasse,
- Dichte der Kohlenstoffmasse.

In der Phase 4 stellt sich eine Haltephase ein. Die Ausbildung der primären Kohlenstoffschicht ist abgeschlossen. Durch den konstanten Zufluss an Temperaturen durch den Trägerbrand kommt es zu einer konstanten Temperaturerhöhung über die Schichten in Abhängigkeit von der Energiefreisetzung durch die Flamme und der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten. Je nach Formulierung kann es zu einem Abbau des Kohlenstoffs in den obersten Schichten kommen. Dieser Effekt wird allerdings nicht immer beobachtet und ist bislang nicht aufgeklärt. Er wird daher im Weiteren vernachlässigt. In den tieferen Schichten kommt es zu fortgesetzten Intumeszenzreaktionen. Daher wächst die Dämmschicht in ihrer Dicke weiter an. Mitunter ist in dieser Phase auch ein Versagen oder ein Teilversagen in Form von großflächigen Ablösungen der Dämmschicht zu beobachten. Dieser Effekt ist aber

derzeit nicht fassbar und wird daher zunächst vernachlässigt. Für die Modellierung sind weitere Parameter notwendig.

- Dicke der Dämmschicht,
- Dickenzuwachs pro Zeiteinheit,
- E-Modul der Dämmschicht.

Die Phase 5 entspricht im Prinzip der Phase 4. Allerdings steht in der Phase 5 kein unreaktives Material mehr zur Verfügung. Das System ist wieder zu einem Zweischichtsystem bestehend aus der Dämmschicht und dem Holz geworden. Durch den Wärmezufluss durch die Flamme kommt es zu einem konstanten Temperaturanstieg. Dieser führt zu einem Erreichen der kritischen Oberflächentemperatur für Holz. Oftmals ist vorher allerdings auch ein komplettes oder teilweises Versagen der Dämmschicht zu beobachten. Für die Beschreibung des Systems fehlt noch ein ergänzender Parameter.

- Kritische Grenztemperatur

Bei den weiteren Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass alle aufgeführten Parameter nicht konstant über die verschiedenen Phasen sind. Sie ändern sich vielmehr in Abhängigkeit der Temperaturen und des Reaktionsfortschrittes. Erschwerend kommt hinzu, dass die Parameter sich zum Teil gegenseitig beeinflussen. Weitere Effekte sind energieverbrauchende bzw. kühlende Mechanismen, die in den Phasen 3 und 4 zum Tragen kommen können.

4.2 Überslägige Berechnung mit einem vereinfachten Modell (Phase 5)

Das chemisch-physikalische Modell zeigt qualitativ die möglichen Ansätze für eine zielgerichtete Vorgehensweise. Um auch quantitative Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Steigerungen in °C bzw. Minuten zu erhalten, wurde auf Basis des vorgestellten deskriptiven Modells ein einfaches numerisches Modell entwickelt. Ziel dieses Modells ist die Berechnung einer erforderlichen Endschichtdicke mit definierten thermischen Eigenschaften λ , δ , c_p . Weiterhin ist die Abschätzung des Potenzials einer chemischen Entwicklungslinie, z. B. der Einbau einer definierten Kühlreaktion, möglich.

Für die numerischen Betrachtungen ist auch die Einbausituation zu berücksichtigen, da die Geometrie erheblichen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten hat. So verhält sich eine vierseitig beflamnte Stütze deutlich ungünstiger als eine einseitig beflamnte Wandoberfläche.

Grundsätzlich kann zwischen stabförmigen und flächigen Bauteilen bzw. Kombinationen aus beiden unterschieden werden. Flächige Bauteile (Trennwände etc.) unterliegen einer einseitig-

gen Brandbeanspruchung, stabförmige Bauteile können hingegen einer zwei-, drei- oder vierseitigen Brandbeanspruchung unterliegen.

Das entwickelte chemisch-physikalische Modell wurde im Rahmen von zwei betreuten Studien- bzw. Diplomarbeiten /30/, /43/ für die Berechnung mit dem FEM-Programm ANSYS aufbereitet.

Zunächst wurde eine Modellbildung mit der Phase 5, Zweischichtsystem aus Dämmschicht und Holz, vorgenommen.

Als Holzart wurde Fichte mit folgenden wärmespezifischen Eigenschaften bei Normaltemperatur angenommen:

- Dichte (bei 15 % Holzfeuchte): $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$
- Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$
- Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 1800 \text{ J/kgK}$

Weiterhin wurde angenommen, dass sich als Dämmschicht eine poröse Keramik entwickelt hat. Da keine Materialkennwerte für eine poröse Keramik vorlagen, mussten hierfür Annahmen getroffen werden. Als realistische Endschichtdicke der Dämmschicht wurde 3 cm angenommen. Die Materialkennwerte für die Dämmschicht (poröse Keramik) wurden iterativ so angepasst, dass bei dieser Endschichtdicke eine maximale Holztemperatur von 300 °C erreicht wird. Diese Temperatur wurde im weiteren Verlauf der Arbeit als zu hoch erkannt. In späteren Versuchen wurde die kritische Oberflächentemperatur daher zu 270 °C angenommen.

Darüber hinaus wurden weitere Vereinfachungen getroffen:

- Keine Berücksichtigung von Konvektion und Wärmestrahlung.
- Die poröse Struktur keramischer Materialien bedingt verschiedene Anteile der Wärmeleitung durch das Feststoffgerüst (meist gering) und durch das Füllgas (Druckabhängigkeit).
- Wärmetransport durch Konvektion kann hinzukommen /5/.

Die wärmeabhängige Änderung der Materialkennwerte wurde nicht berücksichtigt.

Als Modell wurde zunächst eine Keramikschicht der Größe von 10 cm x 10 cm mit variabler Dicke gewählt. Diese Schicht wurde durch zwei unterschiedliche Temperaturzeitkurven bean-

spricht. Die 100 cm² große Außenfläche der Keramik wurde für 60 min einerseits einer konstanten thermischen Belastung von 800 °C und andererseits einer Belastung entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102-2 beaufschlagt. An allen anderen Flächen wurde eine Temperatur von 20 °C vorgegeben. Die Berechnungen erfolgten mit dem Volumenelement solid70 und einer Netzdichte von 20 mm x 20 mm x 0,5 mm.

In einem weiteren Schritt wurde eine allseitige Brandbelastung einer Stütze mit entsprechender Dämmschicht untersucht. Aufgrund der Symmetrien wurde lediglich ein Viertel des Querschnitts modelliert. Der Stützenabschnitt wurde in einer Länge von 10 cm simuliert und die Schnittflächen wurden mit einer Spiegelfunktion belegt, da die Stütze in Längsrichtung keine Temperaturunterschiede aufweist. Die Anschlusssituation oben und unten wurde nicht berücksichtigt. Die Temperaturfeldberechnung wurde abermals als transiente Analyse durchgeführt. Die Netzdichte des Körpers wurde so gesteuert, dass im Bereich der Grenzschicht Holz-Keramik eine feinere Elementeinteilung erzeugt wird. Für die Berechnungen wurde die Ecke der Stütze als maßgebend angenommen.

Im Ergebnis wurden die folgenden Materialkennwerte für die zu entwickelnde Hochleistungsbrandschutzbeschichtung mittels Iteration bestimmt.

- Dichte: $\rho = 3500 \text{ kg/m}^3$
- Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,22 \text{ W/mK}$
- Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 1050 \text{ J/kgK}$

Der Einfluss der Schichtdicke wurde in Parameterstudien untersucht. Bei der Holzstütze, mit einer 10 mm dicken Dämmschicht, wird eine Temperatur von 300 °C bereits nach ca. 648 s überschritten. Nach 30 min werden schon 661 °C und nach 60 min ca. 861 °C erreicht. Wird die Dicke der Keramikschicht auf 15 mm erhöht, wird die Temperatur von 300 °C nach ca. 20,5 min erreicht. 30 min nach Beginn der Wärmebeanspruchung stellen sich im Eckpunkt des Übergangs Holz-Keramik ca. 449 °C ein. Weitere 30 min später sind es schon 723 °C. Bei 20 mm Schichtdicke verschiebt sich der Zeitpunkt auf 32 Minuten (300 °C). 60 min nach Beginn der Belastung werden mit 553 °C Temperaturen weit über 300 °C erreicht. Diese Temperaturen sind jedoch von theoretischer Natur, da bei etwa 300 °C durch die Entzündung des Holzes ohnehin ein schlagartiger Temperaturanstieg stattfindet. Die ermittelten Werte dienen daher lediglich zur Veranschaulichung der erforderlichen Leistungsfähigkeit in Verbindung mit der notwendigen Schichtstärke. In Bild 9 ist zu erkennen, dass die Beziehung zwischen der Dicke der Keramikschicht und dem Zeitpunkt des Erreichens einer kritischen Temperatur (hier 300°C) annähernd linear ist. Eine Verdopplung der Schichtdicke führt in dieser Berechnung zu einer Verdreifachung der Zeit.

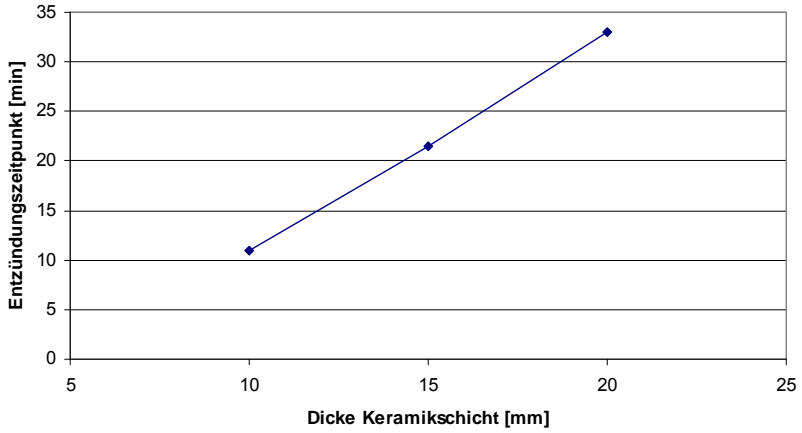


Bild 9: Diagramm der Abhängigkeit des Entzündungszeitpunktes des Holzes von der Dicke der Keramikschicht

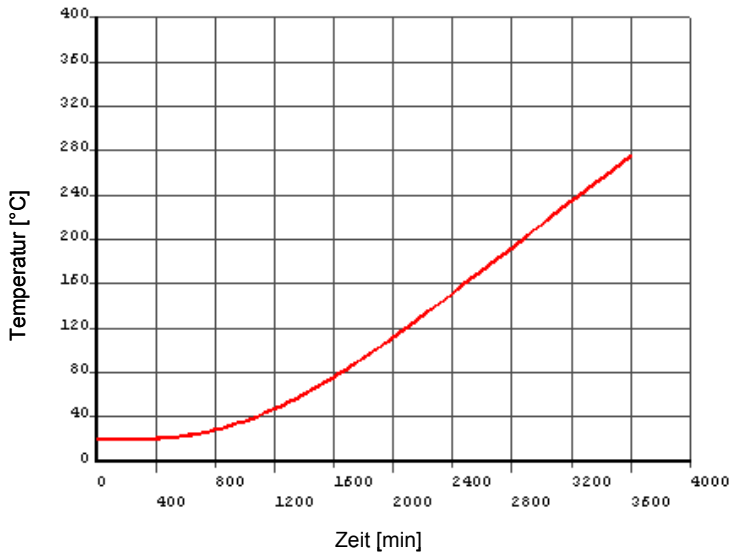


Bild 10: Temperatur-Zeit-Diagramm für den Eckpunkt des Übergangs von einer 30 mm dicken Keramikschicht auf Holz bei einer Temperaturbeanspruchung nach der ETK

Bei einer Dämmschichtdicke von 30 mm wird nach 60 Minuten eine Temperatur von ca. 280 °C erreicht. Um dem Anspruch eines Entzündungsschutzes bei einer Holzstütze gerecht zu werden, ist daher unter den getroffenen Annahmen, Einschränkungen und Vereinfachungen eine Schichtdicke der keramisierten Schutzschicht mit den oben genannten Materialkennwerten von mindestens 30 mm notwendig (Bild 10).

4.3 Berechnung mit reaktionsabhängigen Materialkennwerten (Phase 4 u. 5)

Um das FE-Modell zu verbessern, wurden in einem weiteren Schritt das Intumeszenzverhalten und die Änderung der physikalischen Eigenschaften des Brandschutzbeschichtungssystems berücksichtigt. Wie oben diskutiert, kommt es im Fall der Erwärmung zu einer Änderung der Stoffeigenschaften durch die chemischen Reaktionen. Weiterhin verändert sich die Dicke der Dämmschicht durch die Intumeszenz.

In der Weiterentwicklung des Konzeptes wurden die physikalischen Materialeigenschaften der Laborformulierung „SEF-84“ übernommen.

4.3.1 Bestimmung der reaktionsabhängigen Materialkennwerte

Ein wesentliches Problem bei der Modellierung war die Bestimmung der für die numerische Berechnung notwendigen Materialkennwerte Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt üblicherweise nach DIN EN 12667 (Plattenmethode). Hierzu sind Kontaktkräfte notwendig, die bei den hier vorliegenden Materialien im reagierten Zustand nicht aufgebracht werden können. Daher wurde ein neuartiges Verfahren angewendet, welches sich selber noch in der Entwicklungsphase am WKI befindet. Es handelt sich dabei um das sogenannte Transient-Hot-Strip-Verfahren (THS-Verfahren). Dieses Verfahren erlaubt die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ zwischen 0,1 bis 10 $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ und der Temperaturleitfähigkeit α zwischen 0,1 bis 1,4 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ von dielektrischen Feststoffen in einem weiten Temperaturbereich /16/.

Dabei wird ein dünner aus Nickel bestehender Metallstreifen (alternativ Platin) mit einer Breite von 3 mm in Längsrichtung zwischen zwei Probenhälften geklemmt. Die Prüfkörper sollten eine Mindestgrundfläche von 100 mm x 30 mm haben. Für die Versuchszwecke wurden Beschichtungen verwendet, die im nicht aufgeschäumten und aufgeschäumten Zustand untersucht wurden. In diesem Fall haben die Prüfkörper Abmaße von 250 mm x 100 mm, um eventuelle Randeffekte zu minimieren, die bei kleineren Proben auftreten könnten. Die Schichtdicke variiert, je nach Zustand der Beschichtung, zwischen 1 und 4 mm.

Um flächigen Kontakt zwischen den Probekörpern zu gewährleisten, wurden diese zwischen zwei Kupferplatten gelegt. Die Masse der oberen Kupferplatte sorgt für gleichmäßigen Druck. Ein weiterer positiver Effekt durch das Auflegen der Kupferplatten ist das einfachere Erkennen des Wärmedurchgangs durch die Schicht. Kupfer hat mit $380 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ eine etwa 1600 mal größere Wärmeleitfähigkeit als das Brandschutzbeschichtungssystem. Wenn der Wärmedurchgang durch die Schicht erreicht ist, lässt sich bei der Auswertung ein Abflachen der $U(t)$ -Kurve verzeichnen (Bild 11) /16/, /36/:

$$U(t) - U_0 = \frac{\alpha U_0^2 I}{8\pi L \lambda} \left(\ln t + \ln \frac{45a}{D^2} \right)$$

mit

- U elektrische Spannung am Streifen in V zur Zeit $t > 0$
- U_0 elektrische Spannung am Streifen in V zur Zeit $t = 0$
- I elektrischer Strom in A
- T Zeit in s
- L Länge des Streifens innerhalb des Probekörpers in mm
- D Breite des Streifens in mm
- α Temperaturkoeffizient im elektrischen Widerstand des Streifens in K^{-1}

Bei größerer Wärmeleitfähigkeit werden die Spannungswerte in Abhängigkeit der Zeit folglich kleiner.

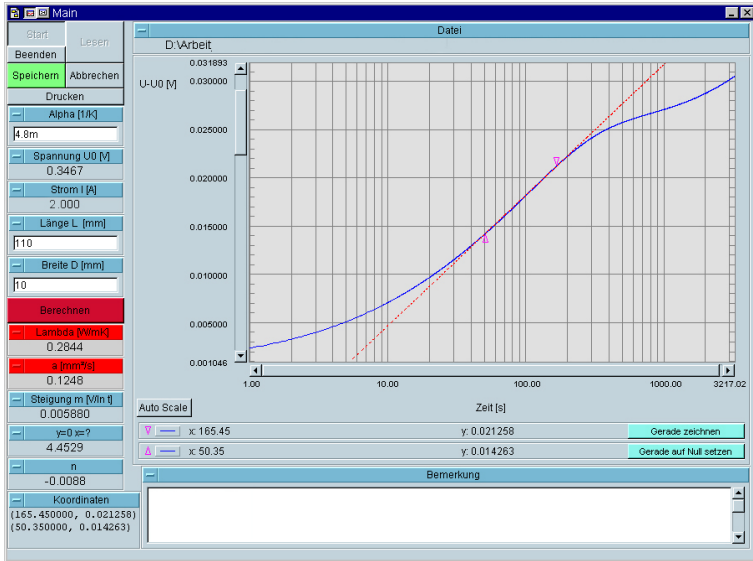


Bild 11: Software zur Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit /36/

Die Ermittlung von α und λ der Trockenschicht war weitgehend unproblematisch. Hierzu wurde zwischen zwei ausgehärtete, 1 mm dicke Beschichtungen, wie oben beschrieben, ein 3 mm breiter Nickelstreifen gelegt und die Anordnung mit Kupferplatten fixiert.

Wesentlich problematischer gestaltete sich die Ermittlung der Materialkennwerte der reagierten Schicht. Das wesentliche Problem war, dass sich keine planen Oberflächen der Schutzschicht ausbilden (Bild 12). Hierzu wurde eine Reihe verschiedener Versuche mit unterschiedlichen thermischen Belastungen und Zwängungen durchgeführt. Dieses Problem konnte allerdings bislang nicht zufriedenstellend gelöst werden.



Bild 12: Unregelmäßige Oberfläche einer reagierten Brandschutzbeschichtung

Um dennoch Materialkennwerte zu erhalten, wurde ein Nickelstreifen in die Beschichtung eingearbeitet. Die Probe wurde anschließend in einen auf 480 °C aufgeheizten Muffelofen gegeben. Die Probe quoll wie in den Versuchen zuvor ebenfalls uneben auf (Bild 13), was in diesem Fall irrelevant war, da der Nickeldraht vollständig vom Beschichtungsmaterial umschlossen war.

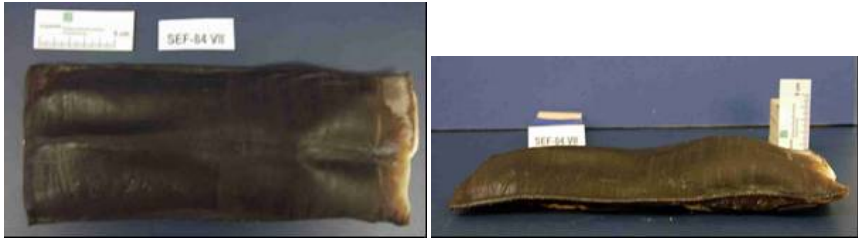


Bild 13: Prüfkörper „SEF-84“-VII nach Erwärmen bei 480 °C in Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts)

Aus den Versuchen vor und nach Erwärmen der Prüfkörper ergaben sich für die Wärmeleitfähigkeit λ und die spezifische Wärmekapazität c_p folgende Mittelwerte (Tabelle 1):

Tabelle 1: Mittelwerte für die Wärmeleitfähigkeit λ und die spezifische Wärmekapazität c_p

	λ [W/(mK)]	c_p [J/kgK]
Vor Erwärmen (bei 20°C)	0,24	2472
Nach Erwärmen (bei 480°C)	0,04	6729

Die Rohdichte ρ des Beschichtungsmaterials wurde über das archimedische Prinzip ermittelt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Mittelwert der Rohdichte ρ

	ρ [g/cm ³]
Nach Erwärmen (bei 480°C)	0,41

4.3.2 Numerische Berechnungen

Zur Simulation muss das Intumeszenzverhalten der Beschichtung an das thermische Verhalten gekoppelt werden.

Einflüsse durch Konvektion und Wärmestrahlung wurden weiterhin nicht berücksichtigt. Die Temperaturbelastung wurde daher direkt auf die äußeren Elemente der Beschichtung gesetzt. In der Realität ist zu erwarten, dass die Temperatur phasenverschoben auf die äußeren Elemente wirkt. Um diese Trägheit der Temperaturzunahme annähernd zu berücksichtigen,

wurde eine modifizierte ETK eingeführt. Diese stützte sich auf Ofenbrandversuche eines beschichteten Stützenabschnittes. Die verwendete Beschichtung trägt die Kennung „SEF-84 z 1 mm“. Die Versuche zeigten einen linearen Temperaturanstieg in der Beschichtung bis ca. 60 °C (ca. 130 s). Ab diesem Punkt wird ein, der ETK ähnlicher, Temperaturverlauf angesetzt.

$$\vartheta_{0-130s}(t) = 0,31113t + 20 \quad \text{und} \quad \vartheta_{131-3600s}(t) = 153,17 \ln(t) - 306,34$$

mit

ϑ_{0-130s} Temperatur im Zeitraum von 0 bis 130 s [°C]

$\vartheta_{131-3600s}$ Temperatur im Zeitraum von 131 bis 3600 s [°C]

t Zeit [s]

Weitere Randbedingungen sind bei Beginn die Raumtemperatur ϑ_0 von 20 °C sowie bei Ende nach 60 Minuten eine Temperatur von $\vartheta = 945$ °C. Die Materialkennwerte der Beschichtung wurden entsprechend den vorhergehenden Ausführungen für den „kalten“ Zustand mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,24$ W/(mK), einer spezifischen Wärmekapazität $c_p = 2472$ J/(kg/K) und einer Rohdichte ρ von 1240 kg/m³ angesetzt. Bei Beendigung der Rechnung liegen die Werte bei $0,04$ W/(mK) (λ), 6729 J/(kg/K) (c_p) und 410 kg/m³ (ρ). Dazwischen werden die Materialkennwerte als linear veränderlich angenommen.

Wie im ersten Modell wurde die Symmetrie ausgenutzt und nur ein Viertel des Querschnitts modelliert.

Um den Temperatúrausdehnungskoeffizienten α_T zu ermitteln, der die Aufschäumgeschwindigkeit der Beschichtung im zugehörigen Temperaturintervall beschreibt, wurden verschiedene Wertepaare aus der Trockenschichtdicke der Beschichtung und der Schichtdicke nach Versuchsende, sowie der Start- und Endtemperatur der chemischen Reaktion untersucht.

Die FEM-Analyse zeigte, dass die Holzoberfläche in der Grenzschicht zur Beschichtung bei einer Trockenschichtdicke von 1 mm und einer Endschichtdicke von 15 mm bereits nach ca. 300 Sekunden eine Temperatur von 300 °C erreicht. Als Bemessungspunkt dient wiederum die Stützenecke, da hier auf Grund der Geometrie die größte Temperaturbeanspruchung zu erwarten ist (Bild 14).

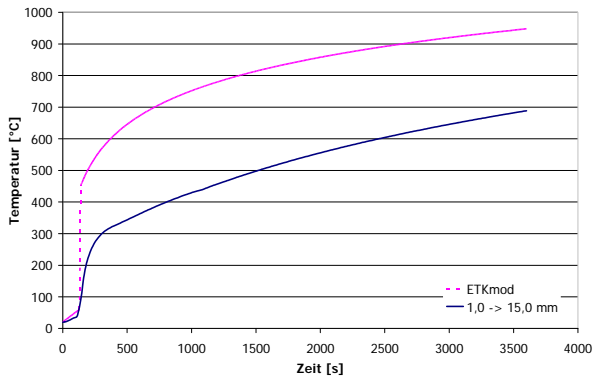


Bild 14: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht bei einer Ausgangsschichtdicke von 1,0 mm und einer Endschichtdicke von 15 mm unter der Belastung einer modifizierten ETK

Bei Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen verschiedenen Trockenschichtstärken und den zugehörigen Endschichtstärken des Brandschutzbeschichtungssystems ist eine Trockenschicht von 2,5 mm erforderlich, damit bei einer Temperaturbeanspruchung durch die modifizierte ETK nach 60 Minuten die Oberflächentemperatur von 300 °C nicht überschritten wird. Nach 60 Minuten lag die Temperatur bei 288 °C, wobei die Beschichtung auf 37,5 mm aufgequollen war (Bild 15).

Auf Basis dieser theoretischen Untersuchungen konnten wesentliche Randbedingungen für die eigentlichen chemischen Entwicklungsarbeiten abgeleitet werden:

- Es ist eine Trockenschichtdicke von ca. 3 mm nötig.
- Es muss mindestens eine 15-fache Aufschäumhöhe erzielt werden.
- Die Wärmeleitfähigkeit muss mindestens 0,04 W/mK betragen.

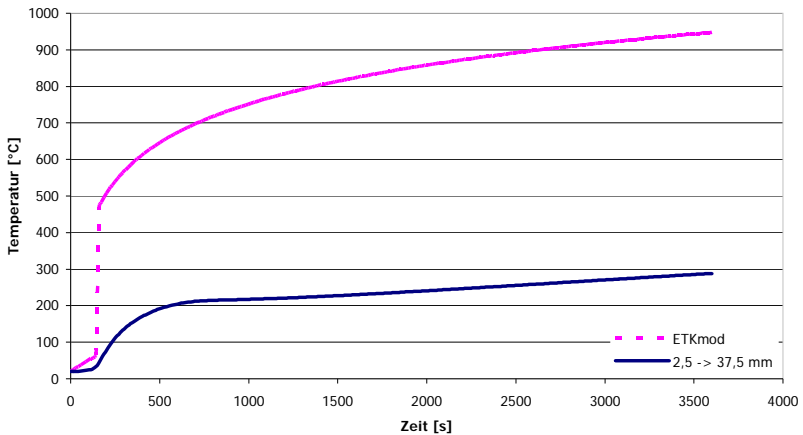


Bild 15: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht bei einer Ausgangsschichtdicke von 2,5 mm und einer Endschichtdicke von 37,5 mm unter der Belastung einer modifizierten ETK

4.4 Entwicklung der Methode der Laborbrandversuche

Die Entwicklung einer Hochleistungsbrandschutzbeschichtung erforderte ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit. Die eigentliche chemische Lackentwicklung und die notwendigen qualifizierenden Untersuchungen zur brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit konnten nicht getrennt voneinander durchgeführt werden. In jeder Phase der Entwicklung wurden die erforderlichen Untersuchungen und Prüfungen zur Brandschutzleistung und zu den eigentlichen Lackeigenschaften eng mit der chemischen Lackentwicklung verknüpft. Im Rahmen der Untersuchungen wurde schnell deutlich, dass selbst kleinste Modifikationen in der chemischen Zusammensetzung einen großen Einfluss auf die gesamte Leistungsfähigkeit haben können. Ein entscheidender Faktor für die erfolgreiche Bearbeitung war daher die Entwicklung einer geeigneten Labormethode zur Beurteilung der Schutzwirkung der Systeme in ihren unterschiedlichen Entwicklungsschritten. Die Labormethode sollte hinsichtlich Herstellung der Probekörper und in der Versuchsdurchführung kostengünstig und schnell auswertbar sein, um die chemische Entwicklung entsprechend steuern zu können.

Zu Beginn der Untersuchungen wurde in Kooperation mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) das Brandverhalten mit Hilfe von Brandkastenprüfungen in Anlehnung an DIN 50050-1 und mit dem Cone-Kalorimeter in Anlehnung an ISO 5660 beurteilt. Weiterhin wurde das Baustoffverhalten einzelner Formulierungen mittels Brandschachtprü-

fungen gemäß DIN 4102 Teile 15 und 16 sowie dem Radiant-Panel Test gemäß DIN 4102-14 bestimmt. Für die eigentlichen Entwicklungsarbeiten waren die genannten Methoden allerdings wenig zweckmäßig. Der Brandkastenversuch verfügte nach einem relativ kurzen Entwicklungszeitraum über eine zu geringe Brandleistung, um Unterschiede in der Leistungsfähigkeit verschiedener Formulierungen feststellen zu können; auch eine Verlängerung der Beflammungsdauer auf eine Stunde führte nicht zu dem gewünschten Erfolg.

Das Cone-Kalorimeter verfügt zwar über eine ausreichende Leistung, allerdings ist die Art der Belastung durch den Strahler für einen kompletten Entwicklungszweig ungünstig. Teilweise wurde im Rahmen der Entwicklungsarbeiten die Idee verfolgt, radikalische Reaktionen zu nutzen. Diese benötigen jedoch zum Start freie Radikale, wie sie in der offenen Flamme vorkommen, jedoch bei der Strahlungsbelastung durch den Heizstrahler eines Cone-Kalorimeter fehlen. Die Baustoffprüfungen im Brandschacht und Radiant-Panel-Test erlaubten zwar die Klassifizierung in eine Baustoffklasse, jedoch sind Rückschlüsse auf die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Systeme schwierig. Darüber hinaus ist die Vorbereitung der Probekörper vergleichsweise aufwändig und kostspielig. Es wurde daher im Rahmen dieser Arbeit eine Laboranordnung entwickelt, mit der entwicklungsbegleitende Versuche einfacher und kostengünstiger durchgeführt werden konnten. Diese Laboranordnung, im Weiteren als Laborbrandversuch bezeichnet, ist die Weiterentwicklung einer Versuchsanordnung, die bei einem Hersteller von Brandschutzbeschichtungen zur Qualitätskontrolle eingesetzt wurde.

Die Versuchsanordnung besteht aus einem üblichen Bunsenbrenner mit einer Nennleistung von 1,5 kW und einer schachtförmigen Probenhalterung aus einem 1,5 mm starken Stahlblech mit einer Grundfläche von 19 cm x 19 cm. Der Schacht hat eine Höhe von 34 cm vom Boden bis zur Probe. Unten und unterhalb der Probe ist jeweils ein umlaufender Schlitz mit einer Breite von 2 cm vorhanden, der eine vertikale Luftdurchströmung des Schachts erlaubt. Als Trägermaterial wird ein dreilagiges Sperrholz verwendet, um möglichst vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten. Der Probekörper wird mit der zu untersuchenden Laborformulierung in einer vorab festgelegten Schichtdicke beschichtet. Die Kontrolle der Schichtdicke erfolgt über eine gravimetrische Bestimmung des Nassauftrages. Die fertige Probe wird nach einer Trocknungszeit von mindestens 10 Tagen im Laborbrandversuch abgebrannt. Dazu wird der Probekörper über Kopf mit der beschichteten Seite nach unten in die Versuchsanordnung gelegt und von unten durch den Bunsenbrenner mit der offenen Flamme belastet. Der Abstand zwischen Bunsenbrennerkopf und Probenunterseite betrug zunächst 15,8 cm. Nach den ersten Versuchen wurde der Abstand durch ein Podest auf 13,3 cm reduziert, um eine höhere Belastung zu erreichen. Als Kriterium für die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Formulierung wurde in der Anfangszeit der Untersuchungen die Zeit bis zu einer Verfärbung des Sperrholzes auf der brandabgewandten Seite definiert. Da sich dieses Kriterium mit fort-

schreitender Entwicklung als zu ungenau erwies, wurde mittig auf der Rückseite ein Thermoelement angebracht, mit dem die Rückseitentemperatur über die Versuchsdauer aufgezeichnet wurde. Mit fortschreitender Entwicklung und steigender Leistung der Laborformulierungen stellte sich ein Gleichgewicht zwischen dem Temperatureintrag durch den Bunsenbrenner, der Isolationswirkung der jeweiligen Formulierung und der Temperaturabstrahlung über die Probenrückseite ein. Daher wurde die Differenzierung der Leistungsfähigkeiten zunehmend schwieriger, obwohl die Versuche zum Teil über Zeiträume von bis zu 8 Stunden durchgeführt wurden. In einem weiteren Schritt wurde daher die Schichtdicke der zu untersuchenden Laborformulierungen reduziert und zusätzlich auf der Rückseite des Probekörpers eine Isolierung aus Vermiculite Platten aufgebracht.

Als Verbrennungsgas wurde Erdgas (Stadtgas) mit einem Heizwert von ca. $8,9 \text{ kW/m}^3$ gemäß Angaben von BS/Energy verwendet. Die Durchflussmenge wurde über einen Durchflussmesser kontrolliert; sie hat sich über die Vielzahl der Versuche mit ca. $4,5 \pm 0,2 \text{ Ltr./Min.}$ als nahezu konstant erwiesen. Der prinzipielle Aufbau des Laborbrandversuches ist in Bild 16 und Bild 17 dargestellt.

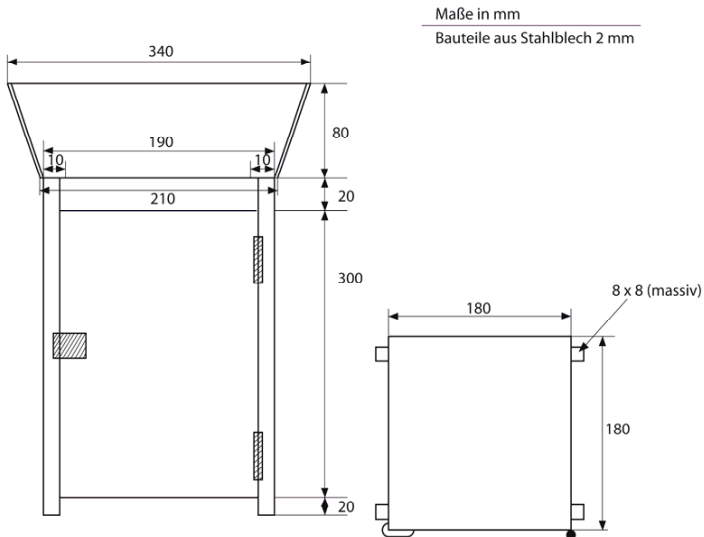


Bild 16: Prinzipskizze Laborversuchsanordnung



Bild 17: Laborversuchsanordnung bei geöffneter Fronttür mit Bunsenbrenner und Probekörper

Um diesen Versuchsaufbau standardisieren zu können und damit auch an mehreren Versuchsständen direkt vergleichbare Ergebnisse produzieren zu können, wurde durch das iBMB die Wärmestromdichte des Versuchsaufbaus mittels Gardon-Gage-Sonden gemessen. Die Messungen dienten ebenfalls zur Einordnung der Ergebnisse aus Laborbranduntersuchungen im Vergleich zu Normbrandversuchen mit ETK-Belastung. Dazu wurden in eine 2 mm starke Stahlplatte drei Gardon-Gage-Sonden eingelassen. Eine wurde zentral über der Flamme angeordnet, die beiden anderen jeweils in einer Entfernung von 5 cm zur mittleren Sonde. Die Stahlplatte mit den Sonden wurde anschließend anstelle des Probekörpers auf den Versuchsstand gelegt. Die Ergebnisse sind in Bild 18 dargestellt.

Die Wärmestromdichten der beiden um 5 cm ausmittig angeordneten Sonden liegen um die 20 kW/m^2 und damit vergleichsweise niedrig. Die mittig angeordnete Sonde erreicht im Mittel Werte von $80 - 90 \text{ kW/m}^2$. Die Kurve ist starken Schwankungen überwiegend zwischen 70 und 100 kW/m^2 unterworfen. Es wird vermutet, dass die Ursache hierfür auf das Messprinzip zurückzuführen ist. Die Messung findet direkt über dem punktförmigen Brenner statt. Dieser ist nicht in der Lage ein homogenes Feld zu erzeugen, so dass kleinste Ablenkungen der Brennerflamme offensichtlich zu größeren Schwankungen führen können.

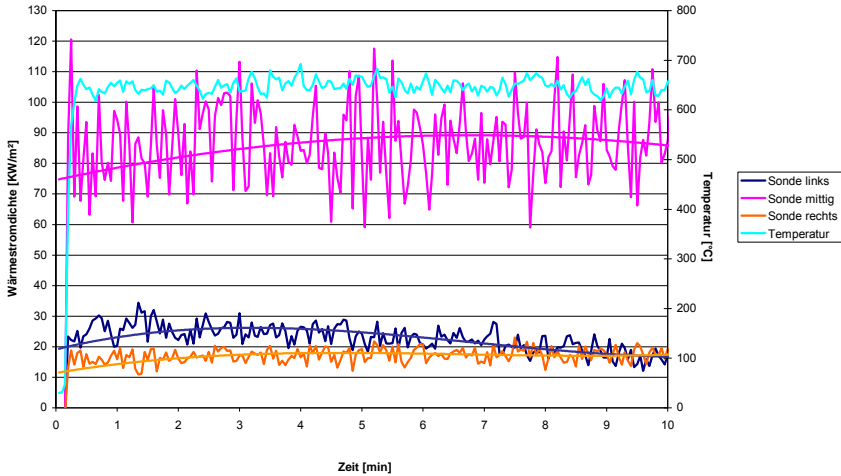


Bild 18: Messung der Wärmestromdichten im Laborbrand mittels Gardon-Gage Sonden

Nach dem gleichen Prinzip wurden Messungen in einem Normbrandofen nach DIN 4102-8 vorgenommen. In eine Stahlplatte wurden ebenfalls drei Sonden eingelassen. Die Anordnung der Sonden erfolgte dabei auf der Diagonalen, mit einer mittig angeordneten Sonde, sowie zwei um jeweils 160 mm verschobenen Sonden. Das Anordnungsprinzip ist in Bild 19 dargestellt. Auch bei dieser Versuchsanordnung sind Schwankungen in der Wärmestromdichte zu erkennen. Diese liegen jedoch im Bereich von ca. $\pm 2 \text{ kW/m}^2$. Im Normbrandversuch nach DIN 4102-8 liegen also deutlich homogenere Verhältnisse vor (Bild 20).

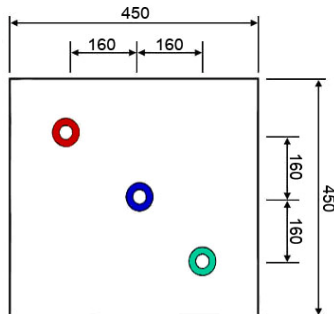


Bild 19: Anordnung der Gardon-Gage-Sonden im Ofen nach DIN 4102-8

Der Vergleich der Messungen zeigt, dass die Wärmestromdichte im unmittelbaren Flammenbereich des Bunsenbrenners im Laborbrand durchaus die Wärmestromdichte eines Normbrandversuches im Brandofen nach DIN 4102-8 erreicht (Bild 18 und Bild 20).

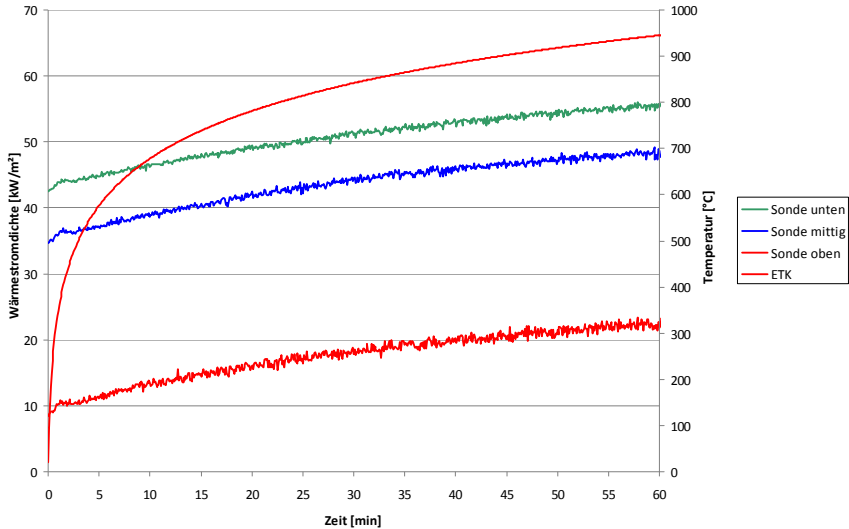


Bild 20: Messung der Wärmestromdichten im Brandversuch nach DIN 4102-8 mittels Gardon-Gage-Sonden

Anschließend wurde mit dieser Methode anhand eines exemplarischen Mustersystems in einer festgelegten Dicke von 200 μm eine Abschätzung der Reproduzierbarkeit vorgenommen. Der Umfang der Serie betrug 10 Probekörper. Eine Auswertung mittels Mittelwertbildung und Darstellung der oberen und unteren Grenzen ist in Bild 21 dargestellt.

Bis zu einer Temperatur von 100 °C beträgt die Abweichung etwa ± 4 °C. Mit steigender Grenzschichttemperatur nimmt die Abweichung zu. Bei ca. 150 °C liegt die Abweichung bei etwa ± 10 °. Bei 175 °C kann eine Abweichung von ± 12 ° festgestellt werden. Danach bleibt die Abweichung in etwa konstant.

Die Ursachen für die Abweichungen sind überwiegend auf Schwankungen der Auftragsmenge bzw. der Trockenschichtdicke zurückzuführen. Die Beschichtung wird mittels Pinsel aufgetragen. Dabei wird die Auftragsmenge über eine Waage kontrolliert. Bedingt durch den Auftrag und die inhomogene Oberfläche des Holzes kann keine exakt gleichbleibende Schichtdicke hergestellt werden. Vielmehr ist die Schichtdicke lokal unterschiedlich. Weitere Fehler sind Inhomogenitäten innerhalb der Beschichtung. So sind die Beschichtungen nicht blasenfrei. Diese Mikroblasen müssen nicht gleichmäßig verteilt vorliegen. Die Mikroblasen stellen

aber eine Störung für den Wärmefluss dar und beeinflussen das Aufschäumverhalten. Die genauen Zusammenhänge sind hier noch nicht abschließend untersucht worden.

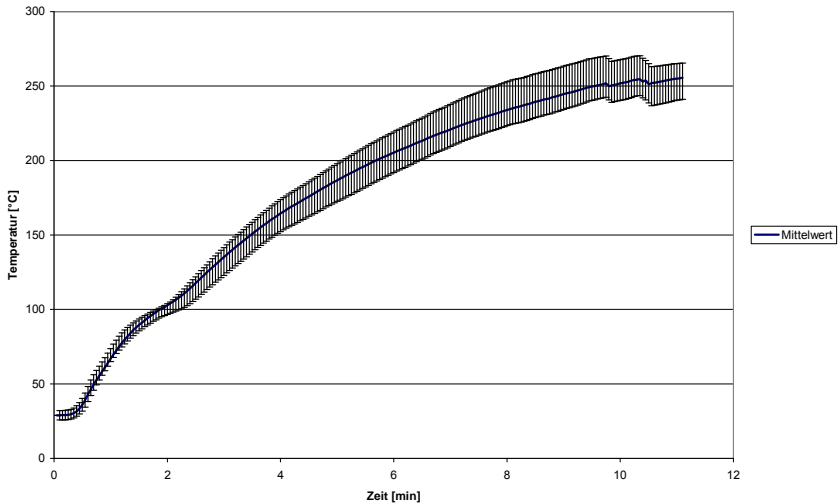


Bild 21: Mittelwert aus 10 Versuchen mit Darstellung der oberen und unteren Grenzen an einem Muster-system

Obwohl die Methode sehr geeignet für eine grundlegende Materialentwicklung ist, können die Versuchsergebnisse nicht ohne weiteres auf ETK-Versuche übertragen werden. Bei der Laborbrandmethode ist die Temperatureinwirkung punktuell. Geometrische Effekte bleiben daher weitgehend unberücksichtigt. Versuche in größeren Maßstäben sind unbedingt erforderlich, um die Laborbrandergebnisse zu verifizieren.

4.5 Entwicklung der Methode der Beistellversuche

Neben den Laborbrandversuchen musste eine Methodik entwickelt werden, die eine belastbare Aussage zur Schutzwirkung, insbesondere zur Beurteilung des Entzündungsschutzes der Beschichtungssysteme im Normbrand erlaubt. Auch hier war die Vorgabe, dass der Aufwand aufgrund der Vielzahl an notwendigen Versuchen bei der Herstellung von Probekörpern und der Durchführung der Versuche in einem vertretbaren Rahmen bleiben musste. Daher wurde zusammen mit dem iBMB die Idee entwickelt, Probekörper in Industrieversuchen beizustellen und mitzuprüfen.

Für die Methode der Beistellprobekörper für Normbrandversuche wurden als Probekörper Balkenabschnitte aus Fichtenvollholz festgelegt. Die Balkenabschnitte wurden mit Abmes-

sungen von 9 cm x 9 cm x 25 cm ausgewählt. Hintergrund dieser Maße war die damalige Verfügbarkeit dieses Materials.

Da die Probekörper bei der Methodik der Beistellversuche in der Regel nicht beobachtet werden konnten, musste die Beurteilung ausschließlich über Thermoelemente erfolgen. Da bei den Beistellversuchen die Situation einer 4-seitigen Brandbeanspruchung vorlag, wurde entschieden, die Thermoelemente nur mittig auf den Flächen anzuordnen. Durch die Anordnung sollten Randeffekte ausgeschlossen werden. Für die Thermoelemente wurden Vertiefungen so in das Holz gefräst, dass diese im eingebauten Zustand plan mit der Holzoberfläche abschlossen. Diese Anordnung wurde gewählt, um die Grenzschichttemperaturen zwischen Beschichtung und Holzoberfläche der Probekörper aufnehmen zu können. Für die Versuche wurden lediglich auf drei der vier Seiten Thermoelemente angeordnet. Dies geschah vor dem Hintergrund, Kosten einzusparen. Für die Kabel wurde ein Schlitz eingefräst, um diese geschützt unter der Beschichtung zur Hirnholzseite führen zu können. Nach dem Beschichten der Probekörper wurden die Hirnholzenden in Porenbetonsteine einzementiert, um Hirnholzeffekte (z. B. verstärktes Ausgasen in Faserrichtung) bei der Beflammung im Ofen auszuschließen. Die Porenbetonsteine wurden ausgewählt, weil sie über eine relative niedrige Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,08 W/mK verfügen und damit die Hirnholzenden gut vor Temperatureinwirkung schützen. Gleichzeitig konnten sie relativ einfach verarbeitet werden. Die Thermoelementkabel wurden durch ein Loch im Porenbetonstein gefädelt und im Ofen so verlegt, dass sie ebenfalls vor der Beflammung geschützt waren (Bild 22).

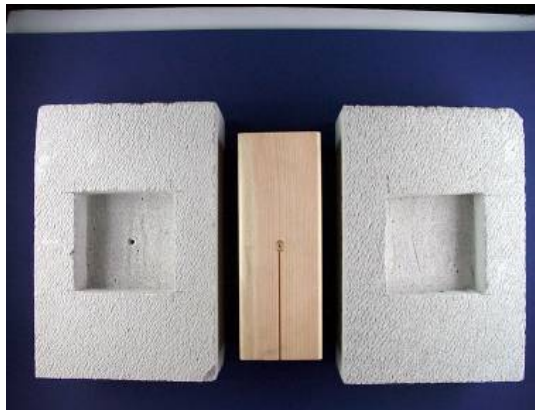


Bild 22: Beistellprobekörper ohne Thermoelemente und Beschichtung

Zu Beginn wurden die Versuche nach dieser Methode in unterschiedlichen Brandöfen am iBMB je nach Verfügbarkeit durchgeführt, da zunächst davon ausgegangen wurde, dass der Einfluss der Beflammung aufgrund verschiedener Öfen zu vernachlässigen ist. Allerdings

wurde relativ schnell erkannt, dass die Öfen in ihren Temperaturprofilen und Gasgeschwindigkeiten nicht vergleichbar sind. Darüber hinaus gibt es innerhalb der Öfen Temperaturschichtungen. Eine homogene Temperaturverteilung ist daher in den jeweiligen Öfen nicht gewährleistet. Dies bedeutet, dass bei Normbrandbedingungen am zu prüfenden Probekörper bei ungünstig platzierten Beistellproben erhebliche Temperaturunterschiede auftreten können und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur bedingt gewährleistet ist. Die Positionierung des Probekörpers im Ofen hat somit einen großen Einfluss auf die tatsächliche Brandbelastung. Um dies zu minimieren, wurde ein Screening über die in Frage kommenden Brandöfen durchgeführt, um den Ofen mit den günstigsten Bedingungen sowie eine günstige Positionierung innerhalb des Ofens zu ermitteln. Zusätzlich wurde zur Kontrolle probennah ein Manteltemperaturelement angebracht. Seit 2006 wurde am iBMB daher ausschließlich der Ofen Kammer 1 eingesetzt. Sofern aus Vorversuchen mittels Laborbrandversuch nur geringe Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Formulierungen erwartet wurden, wurden die Formulierungen innerhalb desselben Normbrandversuches vergleichend geprüft.

Die Vorteile der Methodik der Beistellversuche sind groß. Die Methodik erlaubt eine Einordnung der Versuchsergebnisse aus dem Laborbrand unter realitätsnahen Bedingungen. Die Versuche können mit vergleichsweise geringen Kosten realisiert werden, da die Probekörper sehr einfach gestaltet sind und kaum zusätzliche Kosten für die Öfen anfallen. Weiterhin sind kurzfristige Versuche möglich. Ansonsten müssen die Versuche lange im Voraus geplant werden, da die Öfen stark ausgebucht waren. Allerdings sind mit dieser Methode auch Nachteile verbunden. So ist es nicht möglich, die Systeme im Brandversuch zu beobachten. Die Aussagen und Erkenntnisse basieren ausschließlich auf der Auswertung der Temperaturmessungen. Dies ist aber ungenau, da die Verhältnisse im Ofen schwanken können. In späteren Bauteilversuchen wurde erkannt, dass durch eine Beobachtung während des Versuchs wichtige zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden können. Aufgrund der Art der Versuche (Industrierversuche) ist es in der Regel nicht möglich, den Versuch abzubrechen. Es konnten daher kaum Probekörper für weitere Untersuchungen aus dem Ofen geborgen werden. Auch dadurch gehen wichtige Erkenntnisse, z. B. zum Zustand der Holzoberflächen bei bestimmten Temperaturen verloren. Abgesehen davon ist die Methode für den Erfolg der vorliegenden Arbeit von zentraler Bedeutung gewesen. Mit dem Versuchsaufbau wurde eine Vielzahl von beschichteten Probekörpern im Rahmen von Normbrandversuchen an Bauteilen am iBMB mitgeprüft.

5 Lackphysikalische und chemische Entwicklungsarbeiten

5.1 Grundlegende chemische Entwicklungsschritte

Die grundlegenden chemischen Entwicklungsarbeiten sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Alle Fragestellungen hinsichtlich Gasreaktionen, Verträglichkeiten, Eignung von verschiedenen Bindemitteln, Einsatz geeigneter Lösemittel etc. werden ausführlich in der Arbeit von Simon /50/ behandelt. Zum besseren Verständnis werden diese chemischen Arbeiten in kurzer Form dargestellt.

Ausgehend von Entwicklungsarbeiten zu den keramisierenden Elastomeren, wurden zunächst grundlegende Modifikationen an deren Zusammensetzung vorgenommen. Die keramisierenden Elastomere bildeten unter Flammeneinwirkung zwar unbrennbare Oberflächen aus, allerdings war das Aufschäumvermögen sehr gering (Bild 23). Die Wärmeleitfähigkeit der wenig porösen Keramiken war zu hoch. In den Brandversuchen konnten sie daher nur einen kurzfristigen Entzündungsschutz erzielen.



Bild 23: Ansicht einer KE-Formulierung nach Beflammung im Brandkasten nach DIN 4102

Die in Kapitel 4.2 durchgeführten FEM-Berechnungen zeigten, dass ein längerer Entzündungsschutz für Holzbauteile nur durch unrealistisch große Trockenschichtdicken möglich ist. Dieses Ergebnis passt auch zu den Erfahrungen aus der Raketentechnologie. Die Schichten, die in den Verbrennungskammern der Triebwerke für eine ausreichende Schutzwirkung sorgen, können bis zu mehrere Zentimeter dick sein.

Zur Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit sollte die Keramik als poröse, voluminöse Masse ausgebildet werden. Um dies zu erreichen, wurde durch Simon /50/ eine umfangreiche Versuchsreihe mit verschiedensten gasbildenden Reaktionen als Volumenbildnern durchgeführt. Die Reaktion, welche zur Aufschäumung führen sollte, musste energiereich genug sein, um die relativ schweren prekeramischen Bestandteile zu bewegen. Sobald diese eine ausreichende Aufquellung erreicht hatten, sollte durch Reaktion der prekeramischen Bestandteile untereinander eine Verfestigung durch Ausbildung einer echten Keramik oder keramikähnlicher Strukturen erfolgen. In Versuchen im Reagenzglas wurden verschiedenste Varianten von Gasbildnern mit unterschiedlichen keramisierenden Mischungen entwickelt. Zusätzlich wurde das thermochemische Verhalten der Komponenten mittels Thermischer Analyse (DSC) untersucht, und die quantitativen Anteile wurden entsprechend ihren energetischen Eigenschaften modifiziert. Da toxikologisch unbedenkliche Keramiken erst bei Temperaturen von mindestens 750 °C durch Sinterprozesse und chemische Reaktionen gebildet werden /45/, wurden zusätzlich zu den keramisierenden Bestandteilen verglasende Reaktionen in die Reaktion integriert. Die so entwickelten intumeszierenden „Keramikpulver“ bildeten im Reagenzglas unter Beflammung eine poröse Keramik, ähnlich einem Porenbetonstein.

Diese nichtbrennbare, mit geeigneter Wärmeleitfähigkeit ausgestattete Mischung wurde in verschiedene Harze eingearbeitet. Die Hauptaufgabe dieser Harze war zunächst nur das Fixieren und Zusammenhalten der keramisierenden Mischungen auf dem Substrat Holz. Es stellte sich heraus, dass die Eigenschaften der Harze einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung der aufschäumenden Schutzschicht hatten. Nur wenige der untersuchten Harze erfüllten die speziellen Anforderungen an ein funktionsfähiges Intumeszenzsystem. Viele Harze reagierten entweder mit den keramisierenden Mischungen schon, bevor diese ihre Wirkungstemperatur erreichten, oder verhinderten einen Aufbau der Schutzschicht völlig.

Aus den Versuchsreihen mit Silikon- und Polybutadienelastomeren ging unter Verwendung der entwickelten keramisierenden Pulver ein System hervor, das im Brandfall eine rein keramische Schutzschicht mit bereits sehr guten Isolationseigenschaften ausbildete.

5.2 Weiterentwicklung der keramisierenden Elastomere

Keramisierende Elastomere bilden ihre Schutzfunktion erst bei verhältnismäßig hohen Temperaturen von etwa 1200 °C aus. Dieser Wert korrespondiert mit den aus der Literatur bekannten Werten der Sintertemperaturen von Keramiken. Derartige Temperaturen sind für Anwendungen im baulichen Brandschutz deutlich zu hoch. Zwar ist es bei Naturbränden grundsätzlich möglich, dass auch relativ kurzfristig eine Temperatur von mehr als 1000 °C erreicht wird. Maßgebend in Europa ist aber das Brandmodell eines vollentwickelten Raumbrandes unter der Einheitstemperaturkurve. In diesem Modell werden Temperaturen von über

1000 °C erst nach ca. 90 Minuten erreicht. Zudem sollen Holzbauteile vor der Entzündung geschützt werden. Die Entzündungstemperatur von Holz liegt bei etwa 270 °C, so dass die Reaktionstemperatur der Beschichtungssysteme idealerweise deutlich unter diesem Wert liegen sollte.

Um die Reaktionstemperatur von ursprünglich über 1000 °C zu senken, wurde die Idee einer glasartigen Keramik als Zwischenstufe vor der eigentlichen Sinterung der Keramik entwickelt und verfolgt /50/. Hierzu wurden in Reihenuntersuchungen keramische Zuschlagmischungen auf ihr Leistungsvermögen analysiert. Die besten Ergebnisse wurden durch eine Mischung aus Borax und Dibortrioxid in der Formulierung erzielt. Borax dient dabei als Boratglasbildner, das Dibortrioxid vorwiegend als Flussmittel. Bis etwa 150 °C wird aus dem Borax zunächst Kristallwasser abgespalten. Dieses wirkt zusätzlich kühlend und als Treibgas.

Bei etwa 400 °C ist das Borax wasserfrei und bildet eine glasartige, feste Schicht. Diese stabilisiert die Schutzschicht bis zur eigentlichen Ausbildung der Keramik. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn diese Zuschlagmischung in einer Art Polymerblend, bestehend aus einem Polybutadien- und einem Silikonharz, dispergiert wurden. Dieser Kombination wurde die Laborbezeichnung SEF 84 gegeben.

Beschichtungen der Generation SEF 84 konnten transparent hergestellt werden und zeigten bei einer Beflammung über 30 Minuten im Brandkasten nach DIN 4102 ein vergleichsweise gutes Ergebnis (Bild 24).



Bild 24: Vergleich der Oberflächenqualität der SEF 84 mit einem keramisierenden Elastomer

Insbesondere die im Vergleich zu den keramisierenden Elastomeren deutlich verbesserte Oberfläche führte dazu, dass dieses System als erstes in einem Beistellprobenversuch mit

einer Trockenschichtdicke von ca. 1 mm untersucht wurde. Die Messergebnisse sind in Bild 25 dargestellt.

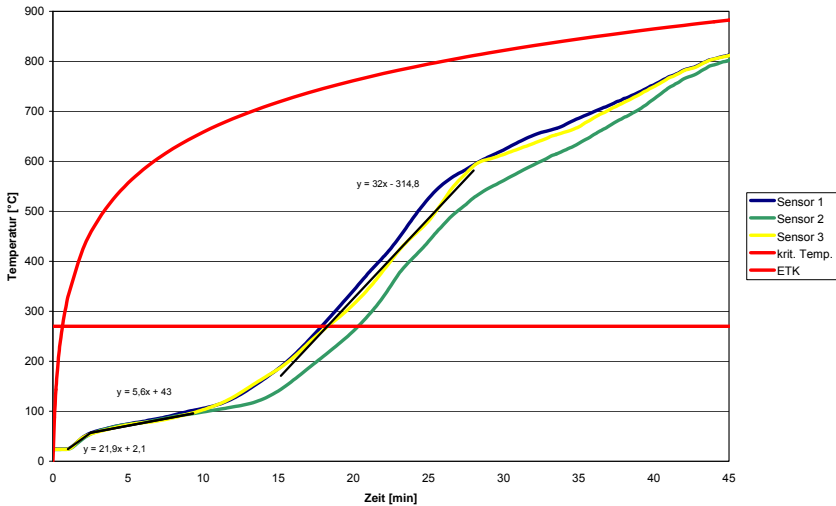


Bild 25: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems SEF 84z

Bei diesem Versuch fällt positiv auf, dass die Thermoelemente bis zur 11. Minute nahezu deckungsgleiche Werte liefern. Bezugnehmend auf das in Kapitel 4.1 vorgestellte chemisch-physikalische Modell gibt es ab Versuchsstart mit einer Dauer von ca. 1 Minute eine recht ausgeprägte Phase 2, in der die äußeren Schichten zunächst erweichen und die Erwärmung der Beschichtung stattfindet. Zwischen der 1. und 2. Versuchsminute steigt die Temperatur in der Grenzfläche zwischen Holz und Beschichtung mit ca. 22 K/min stark an. Nach etwa zwei Minuten setzt die Intumescenzreaktion ein. Die Temperatur in der Grenzschicht beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 60 °C. Trotz steigender Ofentemperaturen stellt sich in der Phase 3 eine nahezu konstante Erwärmung mit einer Steigung von ca. 6 K/min ein. Die Intumescenzreaktion führt zu einer Zunahme der Schichtdicke der Dämmschicht in Verbindung mit einer Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit. Nach etwa 12 Minuten stellt sich ein Wendepunkt im Kurvenverlauf ein. Hier befindet sich die Beschichtung bereits in der Phase 4. Das Material ist komplett aufgebraucht (Phase 5). Vermutlich stellt sich zusätzlich ein Versagen der Dämmschicht ein. Die Steigung wächst auf ca. 29 K/min. an. Das Versagenskriterium wird etwa in der 18. Versuchminute überschritten.

Dieses Ergebnis war im Vergleich zum Stand der Technik von dämmschichtbildenden Anstrichsystemen für Holz ein signifikanter Fortschritt. Dennoch konnten wesentliche Anforderungen gemäß Kapitel 3 im Rahmen dieser Entwicklungsschiene aufgrund des Versagens nach 18 Minuten nicht erreicht werden. Die Ursache für dieses Versagen ist im Aufbau der Dämmschicht zu suchen. In Bild 26 ist ein Querschnitt durch eine Dämmschicht der Formulierung SEF 84 nach einer Beflammung über 30 Minuten im Brandkasten nach DIN 4102-1 dargestellt. Es sind vergleichsweise große Hohlräume erkennbar, die durch eine relativ dünne keramisierte Schicht von der Flamme getrennt sind. Diese dünne keramisierte Schicht wird nur an wenigen Stellen unterstützt. Die Hohlräume zeichnen sich durch eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aus und isolieren daher das Substrat sehr gut. Allerdings reicht ein kleiner lokaler Schaden in der dünnen Deckschicht aus, um die Isolationswirkung drastisch zu reduzieren.



Bild 26: Probekörper mit dünner, keramisierte Schutzschicht (SEF 84)

Dennoch bietet diese Formulierung möglicherweise Potenzial für bestimmte Nischenanwendungen. In weiteren Schritten wurde die Idee verfolgt, die keramischen Prozesse mit bekannten Dämmschichtbildnern zu kombinieren.

5.3 Kombination Keramik / Dämmschichtbildner

Die erste erfolgreiche Rezeptur nach diesem Ansatz erhielt die Bezeichnung IN 25 /50/. Das unterschiedliche Verhalten dieser Beschichtung im Vergleich zu SEF 84 wird deutlich, wenn wiederum die Ausbildung der Dämmschicht im Querschnitt beurteilt wird (Bild 27).



Bild 27: Probekörper IN 25 nach 30 Minuten Beflammung im Brennkasten

Bei diesem Versuch trat während einer 30-minütigen Beflammung im Brennkasten weder eine Pyrolyse des Holzes auf, noch wurde eine Entzündung der Brandschutzbeschichtung beobachtet. Das System ist lokal im Bereich der Flammen- und Temperatureinwirkung aufgeschäumt. Eine Brandweiterleitung auf der Oberfläche der Beschichtung fand nicht statt. Unter der Schutzschicht befindet sich weiteres Material, welches bis zum Versuchsende noch nicht reagiert hat. Diese Formulierung auf Basis eines Melamin-Harnstoffharzes /50/ stellte die Basis für alle weiteren Entwicklungsschritte dar. Das Verhalten dieser Formulierung unter der Temperaturbelastung der ETK ist in Bild 28 dargestellt. Untersucht wurde mittels der Methode der Beistellprobe eine 2 mm starke Schicht der Formulierung IN 25. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anhand des Temperaturverlaufs des Thermoelements 2. Bei den Thermoelementen 1 und 3 liegt vermutlich durch die Einbausituation im Ofen ein Temperaturschatten vor. Die Phase 2 des physikalischen Modells aus Kapitel 4.1 hält bei diesem System für 4 Minuten an. Ab der 2. Minute kommt es zu einem starken Anstieg der Temperatur um ca. 28 K/min. Die Phase 3 beginnt ca. in der 5. Minute bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 100 °C. Ab diesem Zeitpunkt ist eine Schutzwirkung zu erkennen. Der Temperaturanstieg beträgt lediglich noch ca. 5,1 K/min. Zwischen der 27. und 28. Minute ist die Phase 4 zu erkennen, möglicherweise in Verbindung mit einem Teilversagen der Schicht. Die Steigung wächst auf ca. 24 K/min. an. Das Versagenskriterium wird etwa in der 31. Versuchsminute überschritten. Die Steigung erreicht ab diesem Zeitpunkt einen Wert von 38 K/min.

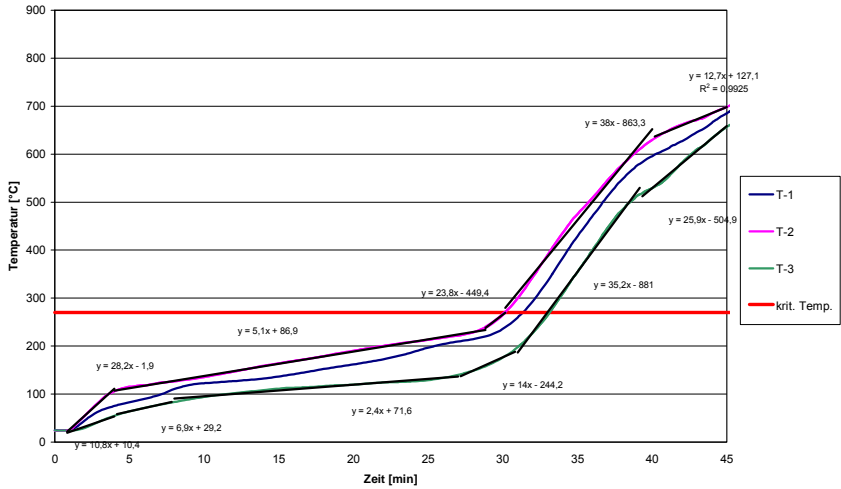


Bild 28: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 2 mm Trockenschichtdicke des Systems IN 25

6 Untersuchungen zur Optimierung der Beschichtungen

6.1 Anpassung an technologische Erfordernisse

Auf Basis der Formulierung IN 25 erfolgten signifikante chemische Modifikationen, um die Rezeptur an lacktechnologische Erfordernisse anzupassen. Ein wesentlicher Entwicklungsschritt war die Trennung der verwendeten Chemikalien in zwei Komponenten. Dies wurde notwendig, um zum einen eine ausreichende Lagerstabilität und zum anderen eine Möglichkeit zum Transport der Komponenten zum (End-) Anwender zu erzielen. In weiteren Schritten wurden eine Ausformulierung mittels Additiven sowie die Einstellung einer Verarbeitungsviskosität mittels Lösungsmitteln vorgenommen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Arbeiten findet sich bei Simon /50/. Als sehr vielversprechende Entwicklungslinie wurde über Laborbrandversuche die Entwicklungsreihe RAB 6 identifiziert. Die prinzipielle Zusammensetzung der Formulierungen aus der Generation RAB 6 ist in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgeführt.

Die hier ausgewählten Lackadditive stellten sich als bester Kompromiss aus Oberflächeneigenschaften und Brandschutzleistung unter Laborbrandbedingungen heraus.

Tabelle 3: Zusammensetzung des Teils A der Brandschutzbeschichtung

Gew-%	Stoffklasse	Bezeichnung
27,1	MF1	Marktübliches MF-Harz
8,1	HF1	Marktübliches HF-Harz
4,1	PF1	Marktübliches PF-Harz
4,1	Phosphorsäureester	Marktüblicher Phosphorsäureester
13,6	MF2	Marktübliches MF-Harz
29,3	Lösemittel I	Wasser
0,4	Entschäumer	Modifiziertes Polydimethylsiloxan
0,4	Verlaufsadditiv	Kombination hochsiedender Aromaten, Ketone und Ester
1,9	Lösemittel II	Xylol
9,5	Endergonischer Zusatz	Aluminiumhydroxid
1,0	Gerüstbildner	Siliziumdioxid
0,5	Hydrophobierungsmittel	Mikronisiertes Amidwachs

Tabelle 4: Zusammensetzung des Teils B der Brandschutzbeschichtung

Gew-%	Stoffklasse	Bezeichnung
58,6	Phosphorsäureester	Marktüblicher partieller Phosphorsäureester
7	Lösemittel I	Wasser
0,6	Entschäumer	Modifiziertes Polydimethylsiloxan
0,4	Katalysator	Aminsatz der Paratoluolsulfonsäure
0,6	Verlaufsadditiv	Modifiziertes Polyacrylat
19,3	APP	VARIABLE
7	Lösemittel I	Wasser
2,4	Glasbildner	Ammoniumpentaborat
5,9	Lösemittel II	Xylolo

Neben den bei Simon /50/ untersuchten Einzelkomponenten hinsichtlich ihres Einflusses auf die Brandschutzleistung unter den Bedingungen eines Laborbrandversuches, wurde es notwendig, das Verhalten unter ETK-Bedingungen genauer zu untersuchen. Dabei wurden im Wesentlichen das Lösemittel sowie die APP Komponente genauer untersucht. Verfolgt wurden drei Hauptziele. Die Ergebnisse sollten zu einer Verfeinerung des physikalisch-chemischen Modells (Schichtdicke/ Wärmeleitfähigkeit etc.) führen. Insbesondere die Identifizierung und Beschreibung der einzelnen Phasen konnte mittels dieser Versuche erreicht werden (Kapitel 4). Weiterhin musste eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Laborbrandversuchen zu Versuchen unter Normbrandbedingungen hergestellt werden. Abschließend musste untersucht werden, ob die Ausbildung der Schutzschicht bei einer flächigen Temperaturbelastung im Normbrandversuch mit der punktuellen Temperaturbelastung eines Bunsenbrenners (geometrischer Faktor) vergleichbar ist. Insbesondere letzterer Punkt führte zu signifikanten Rückschlüssen für die weiteren notwendigen chemischen Modifikationen (Kapitel 9).

Aus neun in Laborbrandversuchen untersuchten organischen Lösemitteln kristallisierte sich Xylol mit einem geringen negativen Einfluss auf die Brandschutzleistung und sehr guten optischen Oberflächeneigenschaften im Laborbrandversuch heraus. Der Einfluss unter ETK-Bedingungen wurde durch einen Beistellversuch verifiziert, dessen Ergebnisse in Bild 29 dargestellt sind. Das Lösemittel wurde mit ca. 8 Gewichtsprozenten in die Formulierung S12 eingebaut. Die Formulierung wurde in einer Schichtstärke von 1 mm untersucht.

Im Versuch wird die Schutzschicht innerhalb einer Minute bei Steigungen von 85 °C/min aufgebaut. Bereits nach 1,5 Minuten erfolgt der Übergang in die Phase 2 mit Steigungen von ca. 7,5 – 8 °C/min. Nach 11,5 Minuten kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Temperatur-

zunahme ($> 60 \text{ K/min}$). Unmittelbar danach - 12. Versuchminute - wird die kritische Temperatur überschritten. Die Steigung in der Phase 1 deutet darauf hin, dass im Probennahbereich erheblich höhere Temperaturen, als gemäß ETK zu erwarten, vorgeherrscht haben. Dies zeigt auch das im Brandraum angeordnete Mantelthermoelement. In der Phase 1 kommt es teilweise zu einer Überschreitung der ETK Temperaturen um bis zu $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Selbst in der Phase 2 liegen die Temperaturen noch um $150 \text{ }^\circ\text{C}$ höher. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Temperaturzunahme in der Phase 2, die vermutlich deutlich zu groß ist. Ob auch ein Einfluss auf die chemischen Reaktionen vorliegt, konnte nicht abschließend geklärt werden. Dies wird aber vermutet. Die grundsätzliche Verwendbarkeit von Xylol als Lösemittel für Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen konnte mit dem Versuch jedoch nachgewiesen werden.

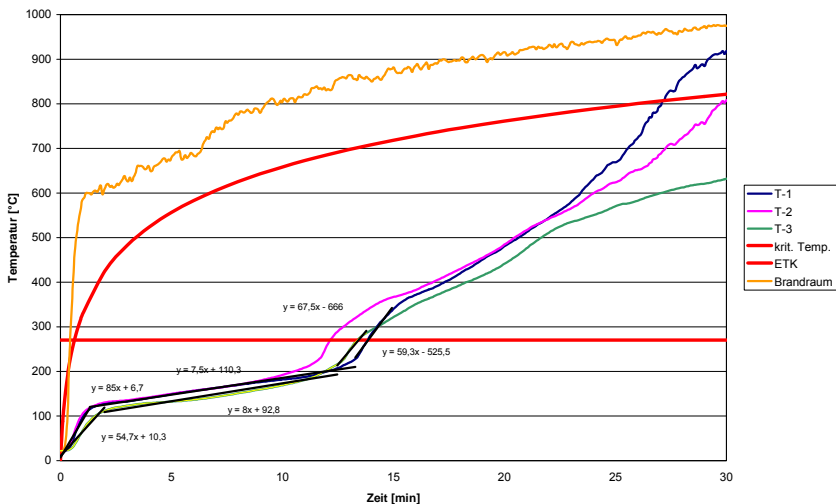


Bild 29: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems S12 mit Xylol

6.2 Überprüfung der Brandschutzleistung mittels Beistellproben

6.2.1 Ammoniumpolyphosphat mit großer Kettenlänge

Die Formulierung RAB 6- S 11 wurde in verschiedenen Trockenschichtdicken mit Hilfe von Beistellversuchen untersucht. In den Versuchen 1 und 2 wurde auf den Einsatz organischer Lösemittel noch verzichtet. Anstelle des organischen Lösemittels wurde ein höherer Anteil an Wasser genutzt. Die Versuche 3 und 4 stellen einen Vergleich der Formulierung RAB 6- S 11

ohne und mit dem organischen Lösemittel Xylol dar. Ab Versuch 4 wurden ausschließlich Formulierungen mit Xylol durchgeführt. In Versuch 5 wurde die Länge des Balkenabschnitts verdoppelt, um einen geometrischen Faktor in der Versuchsreihe zu berücksichtigen. Der Versuch 6 diente lediglich der Vergrößerung der Datenbasis und der Absicherung der Ergebnisse. In Versuch 7 wurde der Einfluss der Holzart untersucht.

Darüber hinaus dienten die Versuche zur Untersuchung des Einflusses von Ammoniumpolyphosphat. In der Richtrezeptur wurde als APP ein Ammoniumpolyphosphat geringer Säurezahl mit Kettenlänge >1000 eingesetzt.

Im ersten Versuch wurde eine Schichtdicke von 1 mm gewählt. Direkt nach Versuchsbeginn bildet die Formulierung zwischen der 1. und 2. Versuchminute die Schutzschicht aus. Die Diskussion erfolgt anhand von Thermoelement 2, das bis zum Erreichen der kritischen Grenztemperatur nahezu identische Werte wie das Thermoelement 3 liefert. Es wird vermutet, dass das Thermoelement 1 aufgrund der Anordnung im Ofen in einem Temperaturschatten lag. Dieser Schluss liegt nahe, da die Kurvenverläufe recht ähnlich sind. Das Thermoelement 1 liefert allerdings bis ca. zur 14. Minute um etwa 30 K niedrigere Temperaturen. Erst im Anschluss kommt es zu einer größeren Spreizung.

Bei dieser Formulierung kann für ca. 11 Minuten die Phase 2 beobachtet werden. Die Steigung im Bereich der Phase 1 liegt bei ca. 49 K/min. Der Übergang in die Phase 2 erfolgt, sobald auf der Holzoberfläche eine Temperatur von ca. 130 °C erreicht wird. In dieser Phase liegt die Steigung mit ca. 8 K/min ebenfalls vergleichsweise hoch. Eine ausgeprägte Phase 3 ist bei diesem Versuch nicht zu erkennen. Der Übergang in die Phase 4 erfolgt nach ca. 14 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt ist in der Grenzschicht Schutzschicht/ Holzoberfläche eine Temperatur von etwa 210 °C messbar. Auch beim Thermoelement 1 ist eine Änderung in der Steigung ab etwa 200 °C bzw. nach etwa 18 Minuten erkennbar.

Die Steigung in der Phase 4 erreicht am Thermoelement 3 einen Wert von ca. 18 K/min. Die Grenztemperatur wird nach ca. 17 Minuten überschritten (Bild 30).

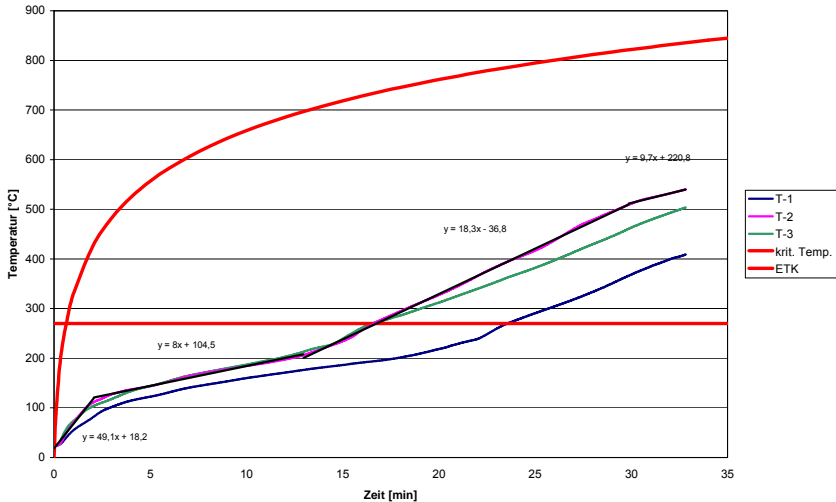


Bild 30: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

Die große Temperaturzunahme in der Phase 1 ist ein Hinweis darauf, dass im Nahbereich der Proben die ETK überschritten wurde (Versuch 7). Sofern diese Vermutung zutreffend ist, relativiert sich die Steigung in der Phase 2. Allerdings ist auch zu beachten, dass keine organischen Lösemittel eingesetzt wurden.

Im Versuch 2 wurde die Formulierung S 11 mit einer Trockenschichtdicke von 2 mm untersucht. Bei diesem Versuch bildet sich die Schutzschicht innerhalb von 4 Minuten aus. In dieser Phase liegt die Steigung der Temperaturkurve bei ca. 18 K/min. Dieser vergleichsweise niedrige Wert deutet darauf hin, dass die ETK im Nahbereich des Probekörpers signifikant unterschritten wurde. Ein weiteres Indiz ist die Zeitdauer von 4 Minuten für Phase 1. Der Übergang in die Phase 2 erfolgt nach 4 Minuten bei einer Temperatur in der Grenzschicht von etwa 100 °C. Die Steigungen der Temperaturkurve liegen bei etwa 3 K/min (Thermoelement 3) bzw. sogar nur bei 1,7 K/min. (Thermoelemente 1 und 2). Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass die Thermoelemente 1 und 2 in einem Temperaturschatten im Ofen z. B. im Eckbereich angeordnet waren. Gegen diese Vermutung spricht allerdings, dass Thermoelement 1 in späteren Phasen zum maßgebenden Thermoelement wird. So nimmt die Steigung bei diesem Thermoelement etwa nach 23 Minuten bei einer Grenzschichttemperatur von 130 °C signifikant auf 7,2 K/min zu.

Nach etwa 30,5 Minuten kommt es zu einer erneuten signifikanten Zunahme auf ca. 22 K/min. Die Temperatur in der Grenzschicht hat zu diesem Zeitpunkt einen Wert von ca. 180 °C. Es dauert weitere 4 Minuten, bis ein dritter signifikanter Temperaturanstieg auf etwa 53 K/min zu beobachten ist. Die kritische Temperatur wird etwa 34,5 Minuten nach Versuchsbeginn erreicht. Thermoelement 3 hingegen behält bis zur 35. Minute seine Steigung von ca. 3 K/min bei. Erst nach der 35. Minute bei einer Temperatur von etwa 230 °C kommt es zu einem signifikanten Temperaturanstieg (Bild 31).

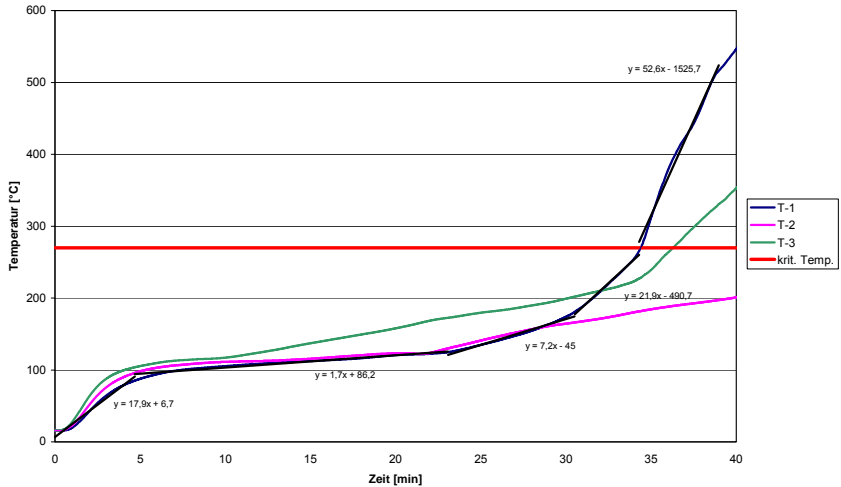


Bild 31: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 2 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

Insgesamt wurde in diesem Versuch ein sehr positives Ergebnis erzielt. Allerdings muss das Ergebnis in Relation zur - vermutlich - niedrigeren Temperatur beurteilt werden.

In zwei weiteren Versuchen wurden die Formulierungen S 11 und S 11 sp bei Schichtstärken von je 1 mm beprobt. Der Versuch diente zum einen zur Überprüfung und Absicherung der bereits ermittelten Werte und zum anderen zur Ermittlung des Einflusses des organischen Lösemittels Xylol, welches in der Formulierung S 11 sp eingesetzt wurde. Die beiden Probekörper wurden parallel im selben Beistellversuch geprüft.

Bei der Formulierung S 11 (Versuch 3) ist der Aufbau der Schutzschicht erst nach etwa 5 Minuten abgeschlossen. Im Vergleich zu dem ersten Versuch mit einer identischen Formulierung und gleicher Schichtdicke (Bild 30) zeigt sich mit ca. 17 K/min ein eher verhaltener Temperaturanstieg zu Versuchsbeginn (Bild 32). Dies ist auf die Versuchsbedingungen im

Ofen - z. B. Temperaturschichtungen oder Abschattungseffekte – zurück zu führen. Aufgrund ähnlicher Steigungen in der Phase 1 können der Versuch 3 und der in Bild 31 dargestellte Versuch 2 direkt miteinander verglichen werden. Ein Vergleich mit Versuch 1 wird hingegen zu Widersprüchen führen.

In der Phase 2, welche nach 5 Minuten bei einer Grenzschichttemperatur von 100 °C startet, liegt die Steigung mit 3,6 K/min ebenfalls deutlich unter den zuvor ermittelten Werten von 8 K/min aus Versuch 1. 16,5 Minuten nach Versuchbeginn kann ein signifikanter Temperaturanstieg an Thermoelement 1 festgestellt werden. Die Steigung nimmt um 18 K/min auf einen Wert von ca. 21 K/min zu. Die Temperatur beträgt zu diesem Zeitpunkt lediglich ca. 120 °C. Im Folgenden erreicht Thermoelement 1 in der 23. Versuchminute die kritische Temperatur von 270 °C. Fast zeitgleich steigt die Temperaturzunahme auf 38 K/min an. Thermoelemente 2 und 3 hingegen zeigen erst zur 22. Minute eine leichte Steigungsänderung auf ca. 8,8 K/min. Erst zur 33. bzw. 35. Minute weisen sie - ebenfalls auf einem Temperaturniveau von 270 °C - einen weiteren Temperaturanstieg von ca. 27 – 28 K/min auf.

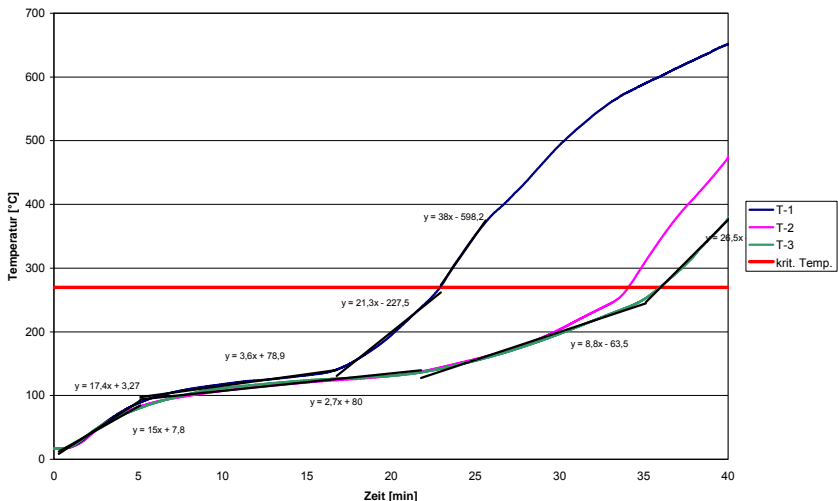


Bild 32: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

Im Vergleich zu Versuch 2 führt eine Halbierung der Schichtstärke zu einer Reduzierung der Brandschutzleistung um 11,5 Minuten. Die doppelte Schichtdicke führt zu einer Steigerung der Brandschutzleistung um den Faktor 1,5.

Der Versuch 4 wurde zusammen mit Versuch 3 im selben Beistellversuch durchgeführt. Die Überlegung dazu war, möglichst alle Einflussfaktoren aus dem Ofen auszuschließen und ausschließlich den Einfluss des organischen Lösemittels zu ermitteln. Auffallend bei diesem Versuch ist, dass die Thermoelemente durchweg einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Bei den anderen Versuchen wurde in der Regel beobachtet, dass zwei Thermoelemente einen ähnlichen Verlauf hatten, eines aber einen davon deutlich unterschiedlichen Verlauf hatte. Es wird vermutet, dass der Einbau des Lösemittels in die Rezeptur zu einer homogeneren Beschichtung führt. Im direkten Vergleich zu Versuch 3 (Formulierung ohne Lösemittel) zeigen sich bei der Temperaturzunahme Unterschiede. In der Phase 1 ist der Temperaturanstieg deutlich steiler. Hier wird eine Steigung von 29 K/min im Vergleich zu 17 K/min erreicht. In der Phase 2, die ebenfalls nach etwa 5 Minuten beginnt, werden hingegen mit 3 K/min ähnliche Werte ermittelt. Allerdings liegt das Temperaturniveau bei der Lösemittelformulierung um ca. 15 K höher. Nach etwa 15 Minuten beginnt die Phase 3 bei einer Grenzschichttemperatur von etwa 140 °C. Die Temperatur steigt in dieser Phase um 11 K/min an. Dieser Wert ist nur etwa halb so groß wie bei der Formulierung ohne Lösemittel. Nach etwa 25,5 Minuten wird die kritische Temperatur erreicht. Dies ist analog dem Versuch ohne Lösemittel mit einer weiteren signifikanten Temperaturzunahme auf 23 K/min verbunden.

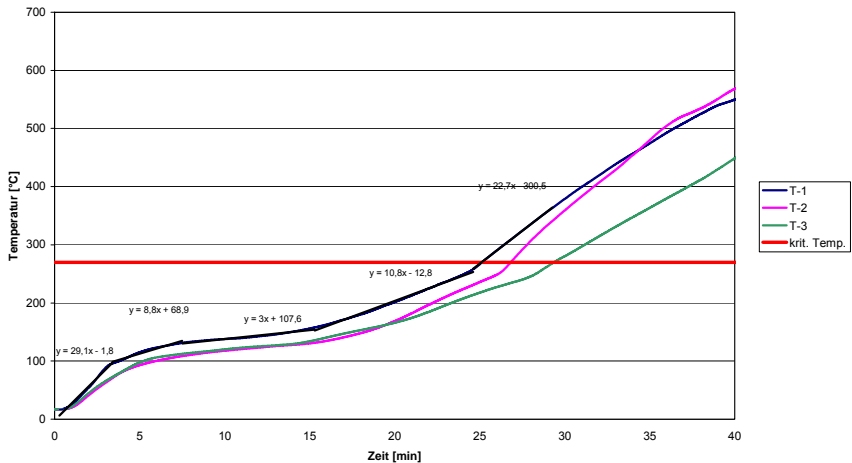


Bild 33: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11 sp (Lösemittel)

Obwohl die Versuche 3 und 4 im selben Beistellversuch durchgeführt wurden, ist die Steigung in der Phase 1 ein deutlicher Hinweis auf unterschiedliche Temperaturen in Nahbereich der Probekörper. Im Vergleich zu Versuch 3 lagen bei Versuch 4 vermutlich lokal deutlich

höhere Temperaturen vor. Die Leistungsfähigkeit in der Phase 2 ist im Versuch 4 um ca. 15 % besser als im Versuch 3. Als Ursache für den sehr gleichmäßigen Verlauf der Temperaturkurven wird eine homogenere Schicht im Versuch 4 vermutet. Auf Basis des Versuchs 4 kann unter den Bedingungen der Methodik der Beistellversuche ein leicht positiver Einfluss auf die Brandschutzleistung festgestellt werden. Absolut beträgt der Zeitgewinn bis zum Erreichen der kritischen Temperatur bei Versuch 4 etwa 2,5 Minuten im Vergleich zu Versuch 3.

Zur Absicherung der Ergebnisse wurde ein weiterer Versuch mit der Formulierung RAB 6- S 11 in einer Schichtdicke von 1,5 mm durchgeführt.

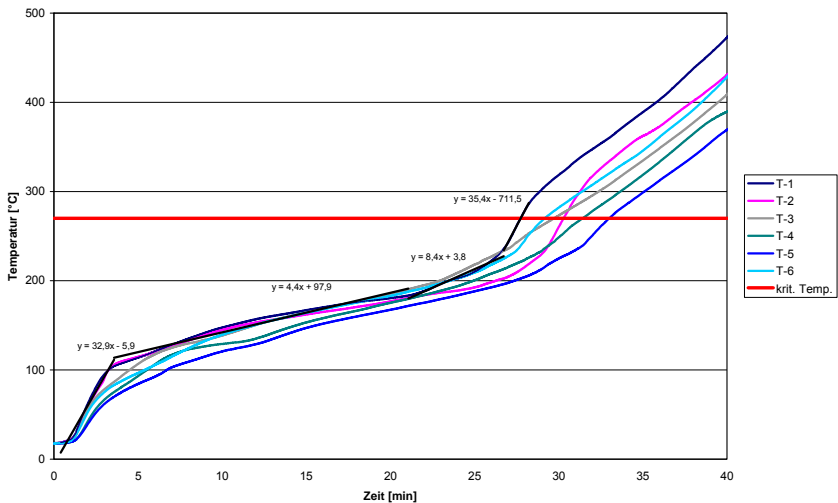


Bild 34: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1,5 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

Der Versuch 5 wurde dahingehend modifiziert, dass die Länge des Balkenabschnitts verdoppelt wurde. Mittels dieses Versuches sollten zusätzlich geometrische Effekte untersucht werden. Auf den Flächen wurde jeweils ein zusätzliches Thermoelement installiert.

Die an den sechs Thermoelementen gemessenen Temperaturverläufe weisen unter Berücksichtigung der 1,5-fachen Schichtdicke auf höhere Umgebungstemperaturen als im Versuch 4 hin (Bild 34). Die Steigung liegt in der Phase 1 bei 33 K/min im Vergleich zu 29 K/min bei der 1 mm dicken Schicht aus Versuch 4. Weiterhin fällt auf, dass die Werte aller Thermoelemente mindestens bis zur 28. Minute sehr ähnlich sind. Auch hier zeigt sich vermutlich der positive Effekt einer homogenen Schicht aufgrund des Einsatzes von Xylol.

Der Aufbau der Schutzschicht vollzieht sich zwischen der 2. und 4. Versuchminute. In der 4. Versuchsminute wird eine maximale Temperatur am Thermoelement 2 von etwa 110 °C gemessen. Die Steigung in der Phase 2 erreicht im Vergleich zu Versuch 4 einen relativ hohen Wert von 4,4 K/min. Diese Phase hält in etwa bis zur 21. Minute an. Hier kommt es zu einer Erhöhung der Steigung auf ca. 8,4 K/min. Ab der 26. Minute wächst bei Thermoelement 1 die Temperaturänderung auf bis zu 35 K/min an, so dass 2 Minuten später - in der 28. Minute - die kritische Temperatur erreicht wird.

Auf Basis des Versuchs 5 führt eine Erhöhung der Schichtdicke um 50 % unter den Bedingungen der Methodik der Beistellversuche zu einem absoluten Zeitgewinn bis zum Erreichen der kritischen Temperatur von etwa 2,5 Minuten. Die Abhängigkeit Schichtdicke zu Brandschutzleistung steht bei diesem Vergleich in einem Verhältnis von 1,5:1,1. Auf Grundlage der Diskussion von Versuch 3 müsste das Verhältnis aber eigentlich in einer Größenordnung von 1,5:1,25 liegen. Vermutlich ist der Vergleich der Versuche 4 und 5 aufgrund unterschiedlicher Temperaturen so nicht zulässig. (1,33:1,23 bei 2 mm:1,5 mm). Zu berücksichtigen ist natürlich auch, dass die Versuchsergebnisse einer gewissen Streuung unterliegen. Diese Streuung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden. Allerdings wurden hilfsweise Ergebnisse aus Industrieversuchen am iBBM mit Stahlbrandschutzbeschichtungen heran gezogen. Dabei wurden innerhalb desselben Versuches Abweichungen von der Mittelwertstemperatur um ca. 20 % ermittelt (Kapitel 6.3).

Bei den vorangegangenen Versuchen wurde vermutet, dass die tatsächlichen Temperaturverhältnisse im Nahbereich der Proben unterschiedlich waren. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurde ein weiterer Versuch mit der Formulierung RAB 6-S 11 in einer Schichtdicke von 1 mm durchgeführt. Im gleichen Versuch wurde noch ein Probekörper mit der Formulierung RAB 6-S 20 ebenfalls mit einer Schichtdicke von 1 mm platziert. Weiterhin wurde mit zwei zusätzlichen Thermoelementen die Temperatur im Nahbereich der Probekörper erfasst. Der Vergleich mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) zeigt, dass bei Versuch 6 im Nahbereich der Kurve bis zu einer Temperatur von 400 °C weitgehend ETK-Bedingungen erzielt wurden. Im weiteren Versuchsverlauf wird die ETK um bis zu 50 °C überschritten. Das Beschichtungssystem S 11 beginnt in der 2. Versuchminute mit der Ausbildung der Schutzschicht. Bis der Übergang in die Phase 2 vollzogen ist, vergehen 1,5 Minuten. Die Schutzleistung der Beschichtung wird im weiteren Verlauf durch Temperatursteigungen um 5 °C/min bestätigt. In der 23. Minute erfolgt bei einer Grenzschnitttemperatur von ca. 210 °C der Übergang in die Phase 3. Die Steigung ändert sich auf 26 K/min. Nach etwa 26 Minuten wird am Thermoelement 1 die kritische Temperatur von 270 °C erreicht. Kurz danach bei ca. 300 °C Grenzschnitttemperatur erreicht die Steigung schlagartig Werte von 62 K/min (Bild 35). Dies kennzeichnet das komplette Versagen der Schutzschicht.

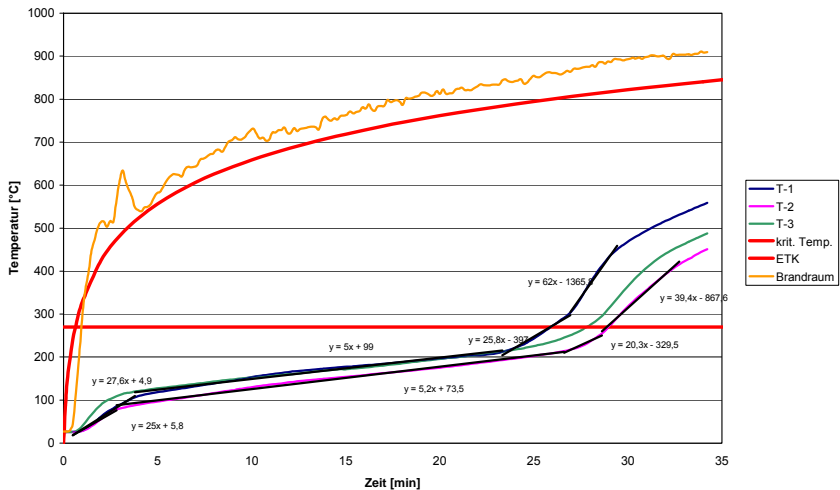


Bild 35: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

Bei diesem Versuch fällt wiederum auf, dass die Temperaturverläufe an den Thermoelementen nahezu identisch sind. Allerdings können auch bei diesem Versuch Verschattungseffekte vermutet werden, da zwischen den Thermoelementen 1, 3 und 2 ein Temperaturunterschied von ca. 25 K besteht. Die Steigung in der Phase 1 erlaubt einen direkten Vergleich mit Versuch 4. Auffallend ist, dass die Steigung in der Phase 2 mit 5 K/min um 2 K/min größer ist als bei Versuch 4. Im Vergleich der absoluten Brandschutzleistung werden aber vergleichbare Ergebnisse mit 25,5 bzw. 26 Minuten erreicht.

Eine weitere Versuchsreihe wurde mit der Formulierung RAB 6- S 11 durchgeführt, um den Einfluss der verwendeten Holzart einschätzen zu können (Versuch 7). Neben dem üblichen Fichtenholz (Thermoelementkennzeichnung F) kam Buchenholz (Thermoelementkennzeichnung B) zum Einsatz. Die Trockenschichtdicke betrug 1 mm. Bis zum Erreichen der kritischen Temperatur nach rund 16 Minuten lassen sich in den Temperaturverläufe zwei Gruppen von Thermoelementen erkennen (Bild 36). Innerhalb der Gruppen sind die Verläufe recht identisch. Die erste Gruppe umfasst die Thermoelemente B1/ B2/ B5 und F3 und ist durch eine Steigung von ca. 69 K/min in der Phase 1 und 4 K/ min in der Phase 2 gekennzeichnet. Die Ausbildung der Schutzschicht dauert 1,5 Minuten und ist in der 3. Versuchminute abgeschlossen. Die zweite Gruppe umfasst die restlichen Thermoelemente. In der ersten Phase liegt die Temperaturzunahme bei etwa 36 K/min und damit deutlich niedriger als bei der ersten Gruppe. Das Temperaturniveau ist beim Übergang in die Phase 2 ebenfalls deutlich ge-

ringer. Allerdings ist die Steigung mit 8,4 K/min in der Phase 2 mehr als doppelt so groß wie bei der Gruppe 1.

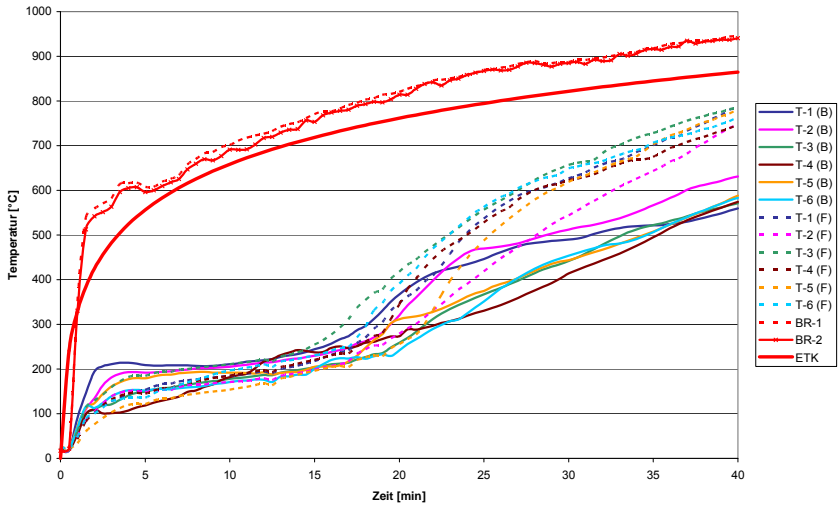


Bild 36: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

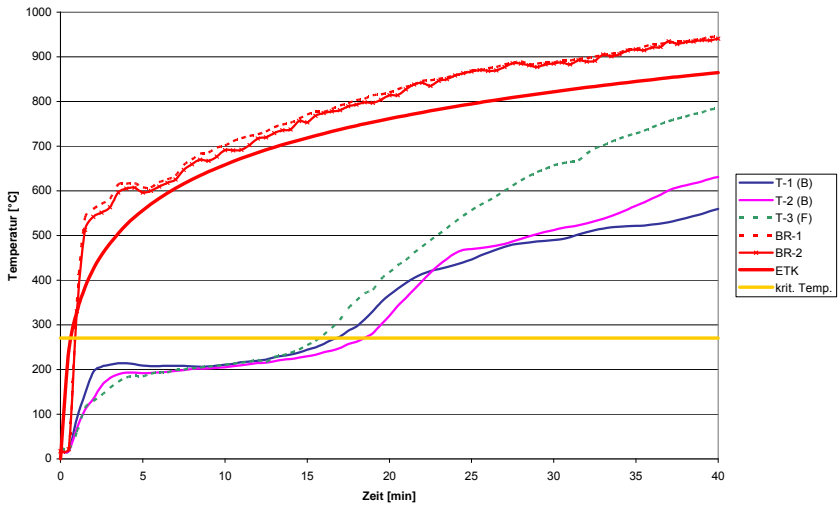


Bild 37: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 11

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Bild 37 nur noch die Thermoelemente B1/ B2 und F3 aus der Gruppe 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass ein Vergleich des Versuchs mit den bereits diskutierten Versuchen aufgrund zu hoher Ofentemperaturen insbesondere in der Phase 1 nicht sinnvoll ist. Die Temperatur im Nahbereich der Probekörper war bei diesem Versuch deutlich höher als die durch die ETK vorgegebene. So wurden in den ersten 5 Minuten Überschreitungen um bis zu 150 °C festgestellt. Im weiteren Versuchslauf lag die tatsächlich gemessene Temperatur relativ konstant, um ca. 50 °C zu hoch. Prinzipiell liegt die tatsächlich gemessene Temperatur zwar im Bereich der zulässigen Abweichungen für die ETK. Eine Überschreitung der Temperatur um 50 °C bedeutet allerdings bei den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systemen einen theoretischen Verlust an Brandschutzleistung zwischen 5 und 12 Minuten bei Steigungen zwischen 4 und 10 K/min.

Allerdings wird durch den Versuch der Nachweis geführt, dass nahezu kein Unterschied aufgrund der Holzart zu erwarten ist. Erst ab der 16. Versuchminute sind differenziertere Temperaturverläufe zu beobachten, die auf die unterschiedlichen Holzarten zurückgeführt werden können. Im weiteren Verlauf, etwa ab der 19. Minute, zeigt das Buchenholz wesentlich geringere Temperaturzunahmen von durchschnittlich 37 K/min, während das Fichtenholz Temperatursteigungen von bis zu 62 K/min aufweist.

In Tabelle 5 sind die sieben Versuche der Versuchsreihe RAB 6- S 11 tabellarisch zusammengefasst. Aufgeführt werden die einzelnen Phasen. In jeder Phase werden als relevante Kennwerte die Steigung in der Phase, die Dauer der Phase sowie die Übergangstemperatur in die nächste Phase dargestellt.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Parameter Steigung, Dauer und Temperatur nach Phasen für die Versuchsreihe RAB 6- S 11

Phase	Parameter	Einheit	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
			1mm	2mm	1mm	1mm	1,5mm	1mm	1mm
P1	Steigung	°C/min	49	18	17	29	33	28	69
	Dauer	min	2	4	5	3,5 (5)	4	3,5	4
	Temperatur	°C	130	100	100	100 (115)	110	120	190
P2	Steigung	°C/min	8	3	3,6	3	4,4	5	4
	Dauer	min	11	19	11,5	10	17	19,5	12
	Temperatur	°C	210	130	120	150	180	210	240
P3	Steigung	°C/min	18	7,2	21	11	8,4	26	15
	Dauer	min	xx	7,5	6,5	10,5	5	4	3
	Temperatur	°C	xx	180	270	265	230	300	270
P4	Steigung	°C/min	xx	22	xx	Xx	xx	xx	xx
	Dauer	min	xx	4,5	xx	Xx	xx	xx	xx
	Temperatur	°C	xx	270	xx	Xx	xx	xx	xx
P5	Steigung	°C/min	xx	53	38	23	35	62	37
Tkrit		min	17	34,5	23	25,5	28	26	16

Die unterschiedliche thermische Belastung aus den verschiedenen Beistellversuchen wurde bereits andiskutiert. Ein Vergleich der unterschiedlichen Versuche im Sinne von absoluten Aussagen ist daher schwierig, zumal die Streuung der Messwerte selbst bei exakt gleichen Temperaturbedingungen unbekannt ist. Ein besonders starker Einflussfaktor ist dabei die Trockenschichtdicke. Diese konnte nicht gemessen werden, sondern wurde über die Auftragsmenge und den Festkörpergehalt geschätzt.

Unter Berücksichtigung der oben angestellten Überlegungen werden die Versuche 1 und 7 aufgrund zu hoher Umgebungstemperaturen im Nahbereich der Probekörper nicht weiter betrachtet. Ein Vergleich der Versuche 3, 4 und 6 zeigt in den Werten eine vergleichsweise gute Übereinstimmung. Die Phase 2 wird bei diesen Versuchen nach etwa 3,5 – 5 Minuten in einem Temperaturfenster von 100 °C bis 120 °C erreicht. Die Steigung in der Phase 2 liegt zwischen 3 K/min (V4) und 5K/min (V6). Eine Analyse der Steigungen aller Versuche (Ausnahme Versuch 1) in der Phase 2 zeigt, dass 5 K/min aus Versuch 6 den höchsten gemessenen Wert darstellen. Selbst im Versuch 7 wurde unter deutlich zu hohen Umgebungstemperaturen ein Wert von 4 K/min ermittelt. Bei einem Vergleich der absoluten Brandschutzleistung aus den drei Versuchen ergibt sich ein Zeitfenster von 23 - 26 Minuten bis zum Erreichen der kritischen Temperatur. Der Übergang in die Phase 5 erfolgt bei den drei diskutierten Versuchen bei einer Grenzschichttemperatur zwischen 265 °C (V4) und 300 °C (V6). Dazu passt auch der Versuch 7 ebenfalls mit einer Grenzschichttemperatur von 270 °C.

Ein Vergleich über die unterschiedlichen Schichtdicken hinweg, zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung. In der absoluten Brandschutzleistung ergibt sich bei Schichtdicken von 1 mm eine mittlere Zeit von 24,8 Minuten, bei 1,5 mm 28 Minuten und bei 2 mm 34,5 Minuten. Der Zusammenhang ist in Bild 38 dargestellt.

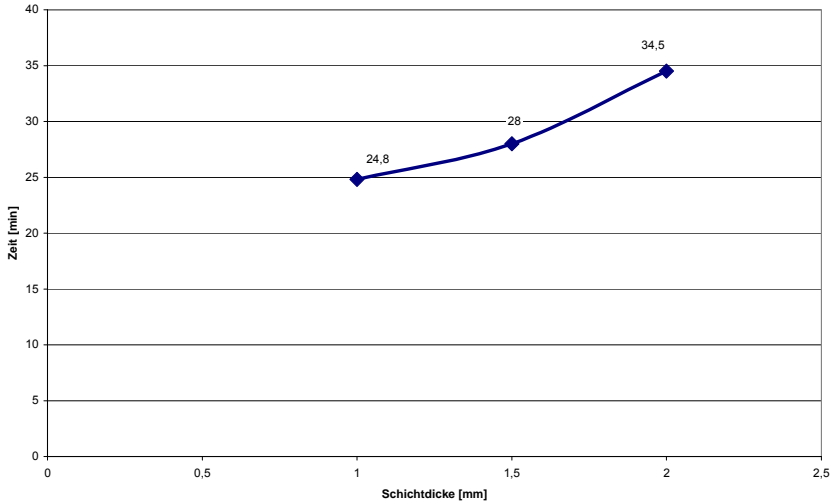


Bild 38: Vergleich Schutzwirkung / Schichtdicke für RAB 6- S 11

Für die Formulierung RAB 6- S 11 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Prinzipiell ist es mit dieser Formulierung möglich, die Kapselklasse K_230 zu erzielen. Hierzu sind Ausgangsschichtdicken um die 2 mm notwendig.
- Die Beziehung zwischen Schichtdicke und Brandschutzleistung – ausgedrückt als Zeit in Minuten bis zum Erreichen der kritischen Temperatur von 270 °C – ist annähernd linear. Die Schlussfolgerung gilt nur für Schichtdicken zwischen 1 mm und 2 mm.
- Wenn die Abhängigkeit zwischen Schichtdicke und Brandschutzleistung linear ist, bedeutet dies, dass bei Ausgangsschichtdicken zwischen 1 mm und 2 mm im Brandversuch eine stetige Zunahme der Dämmschicht über die Zeit erfolgt.
- Die Zunahme der Dämmschicht schwächt sich über die Versuchsdauer ab. Dies korrespondiert mit der sich über die Zeit abschwächenden Steigung der ETK.

6.2.2 Mikronisiertes Ammoniumpolyphosphat

Eine weitere vielversprechende Rezeptur, die aufgrund guter Leistungen im Laborbrandversuch auch im Beistellversuch untersucht wurde, ist die RAB 6- S 12. Im Unterschied zur RAB 6-S 11 wurde hier in der Richtformulierung ein mikronisiertes APP geringer Säurezahl mit Kettenlänge >1000 verwendet.

Aufgrund von Problemen bei der Datenaufzeichnung ist die Interpretation des zeitlichen Ablaufs und der Steigungen schwierig, da die Daten jeweils erst ab der 6. Versuchminute korrekt aufgezeichnet wurden (Bild 39). In dem Beistellversuch wurden die Formulierungen RAB 6- S 12 a und RAB 6- S 12 b in Schichtstärken von je 1,5 mm parallel geprüft.

Das System S 12 a ist bis ca. 16 Minuten nach Versuchsbeginn in der Phase 2 mit einer Temperatursteigung von 5,5 K/min am maßgebenden Thermoelement 1. Der Übergang in die Phase 3 erfolgt bei einer Temperatur von ca. 200 °C. Diese Phase dauert etwa 2,5 Minuten bei einer Steigung von ca. 11 K/min. Bei ca. 225 °C erfolgt der Übergang in die Phase 5 mit einer Steigung von 59 °C/min. Dementsprechend wird eine Minute später die kritische Temperatur von 270 °C überschritten.

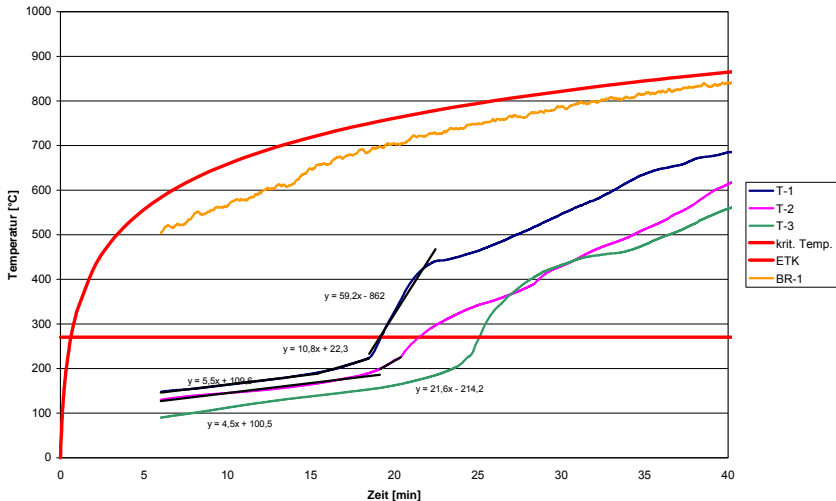


Bild 39: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1,5 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 12 a

Der Versuch mit der Formulierung RAB 6- S 12 b wurde durchgeführt, um das Potenzial kühlender Reaktionen zu untersuchen. Dazu wurde der unbehandelte Fichtenholzprobekörper

über 12 Stunden gewässert und im Anschluss mit der Formulierung S 12 beschichtet. Durch die Wässerung wurde die Holzfeuchte auf einen Wert > 20 % erhöht. Der genaue Wert wurde allerdings nicht bestimmt. Im Vergleich dazu liegt die Ausgleichsfeuchte bei Fichte bei einer Lagerung im Normalklima bei ca. 11 %.

Der positive Einfluss einer erhöhten Holzfeuchte ist in Bild 40 deutlich zu erkennen. Die Phase 2 hält bis zur 24. Versuchminute an. Die Steigung liegt mit 4,4 K/min um mehr als 1 K/min unter dem Vergleichsversuch. Ab der 24. Minute ändert sich die Temperatursteigung auf 21 K/min und erhöht sich 1,5 Minuten später nochmals auf 39 K/min. Dies geschieht bei Temperaturen von 190 °C bzw. 220 °C. Die kritische Temperatur wird 26,5 Minuten nach Versuchbeginn erreicht (Bild 40). Im Vergleich der beiden Versuche ist ein Gewinn an Brandschutzleistung von immerhin ca. 7 min (ca. 35 % Zugewinn) bis zum Erreichen der kritischen Temperatur erzielt worden.

In der weiteren Diskussion der Ergebnisse ist zu beachten, dass die im Nahbereich der Proben gemessene Temperatur um ca. 80 °C unter der ETK Temperatur lag. Vor diesem Hintergrund sind die Steigungen mit 5,5 K/min des Probekörpers RAB 6- S 12 a deutlich schlechter einzuschätzen, als bei der Formulierung RAB 6- S 11, zumal es sich hier um eine Schichtdicke von 1,5 mm handelt.

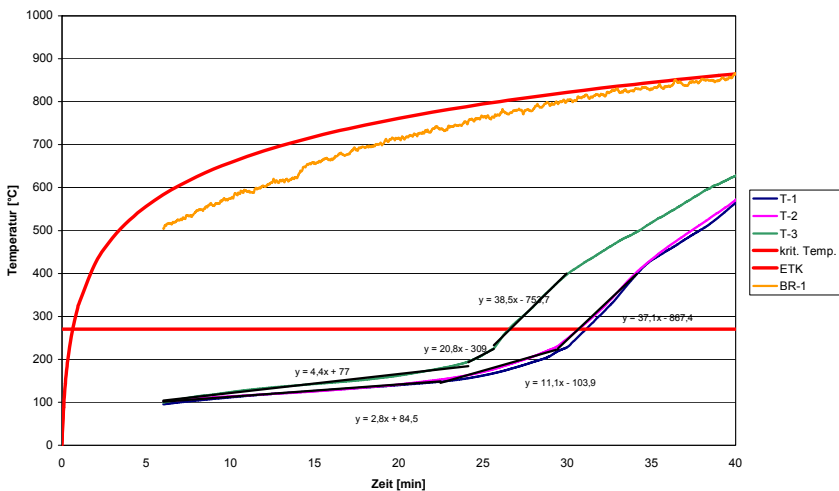


Bild 40: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1,5 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 12 b

Für die Formulierung RAB 6- S 12 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Brandschutzleistung in Beistellversuchen ist bei dieser Formulierung schlechter als bei der Formulierung RAB 6- S 11.
- Kühlreaktionen können theoretisch auch in das Holz eingebaut werden. Die kühlende Wirkung durch Verdampfen von Wasser wird durch die entstehende Dämmschicht nicht behindert.
- Durch Kühlreaktionen ist eine theoretische Steigerung der Brandschutzleistung um bis zu 35 %, bezogen auf den Zeitpunkt des Erreichens der kritischen Temperatur, möglich.

6.2.3 Substitution des Phosphoresters durch endergonische Zusätze

Mit der Formulierung RAB 6- S 20 wurde eine Rezeptur entwickelt, die sich deutlich von der oben beschriebenen Richtrezeptur unterscheidet. So wurde z. B. in Komponente A komplett auf den Phosphorsäureester verzichtet. Die Menge der endergonischen Zusätze und des PF-Harzes in Komponente A wurden erhöht. Als Gerüstbildner wurde Titandioxid anstelle von Siliziumdioxid verwendet. In Komponente B wurde der Anteil des Phosphorsäureesters reduziert. Dafür wurde der Anteil des Glasbildners erhöht. Zusätzlich wurde noch Melamin als Gasbildner eingebaut.

Im ersten Versuch wurde zunächst die Formulierung RAB 6- S 20 mit einer Schichtdicke von 1 mm untersucht.

Die Ausbildung der Schutzschicht der Formulierung S 20 beginnt 1,5 Minuten nach Versuchsbeginn und ist nach weiteren 1,5 Minuten bei einer Grenzschichttemperatur von etwa 120 °C abgeschlossen. Die Steigung in dieser Phase 1 beträgt 54 K/min (Bild 41). Im weiteren Verlauf bis zur 12. Minute beträgt die Temperatursteigung etwa 3,8 K/min, so dass im Vergleich zu den Versuchen der Serie RAB 6- S 11 eine gute Schutzleistung unterstellt werden kann. In der 12. Minute wird bereits die Phase 3 erreicht und die Steigung erhöht sich auf ca. 16 K/min. Zu diesem Zeitpunkt hat die Holzoberfläche eine Temperatur von lediglich 150 °C. Die beiden anderen Thermoelemente folgen zum Teil zeitversetzt mit geringeren Steigungen um 13 K/min. Nach etwa 14 Minuten beginnt bei einer Grenzschichttemperatur von etwa 180 °C die Phase 4 mit einer Temperaturzunahme von 21 °C/min. Diese Phase hält etwa bis zur 18. Minute mit dem Erreichen der kritischen Temperatur von 270 °C an. Bei dieser Temperatur wird die Phase 5 erreicht. Die Steigung nimmt auf ca. 31 K/min zu.

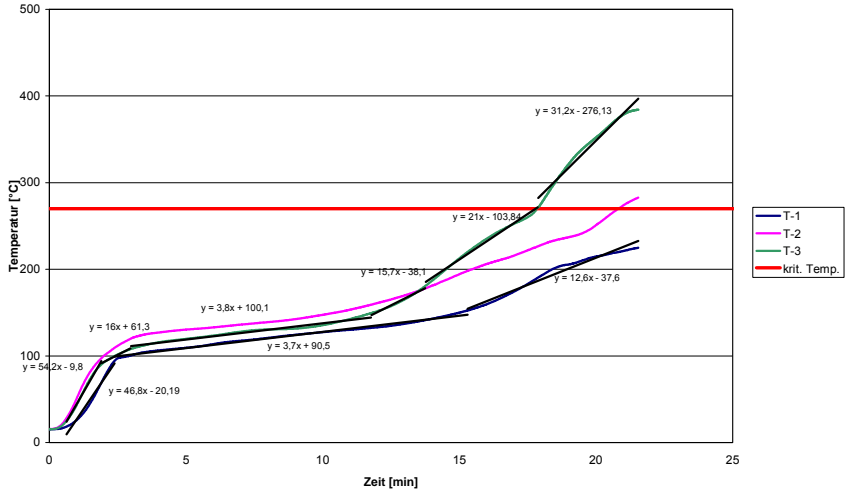


Bild 41: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 20

Bei der Einordnung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die große Steigung in der Phase 1 ein Indiz für Temperatur deutlich oberhalb der ETK ist.

In einem zweiten Versuch wurde die Formulierung RAB 6- S 20 in einer Schichtstärke von 1,5 mm appliziert. Im selben Beistellversuch wurde ein weiterer Probekörper mit RAB 6- S 20 in 1,5 mm Schichtdicke untersucht (Versuch 3). Bei diesem Versuch wurde der Holzprobekörper anlog dem Versuch RAB 6- S 12 b vorbehandelt. Hier wurde allerdings keine Wässerung vorgenommen, sondern es wurde mittels einer salzbasierten Imprägnierung gebundenes Kristallwasser in den Probekörper eingebracht.

Die Ausbildung der Schutzschicht (Bild 42) erfolgt zwischen der 2. und 5. Minute. Danach kommt es an den Thermoelementen 1 und 2 zu einem Bereich, der nicht zugeordnet werden kann. Dieser Bereich ist erst nach 10 Minuten bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 160 °C abgeschlossen. In der Phase 1 liegt die Steigung bei 23 K/min. Die Umgebungstemperaturen im Nahbereich des Probekörpers sind daher vermutlich etwas niedriger als von der ETK vorgegeben.

Das nicht maßgebende Thermoelement 3 zeigt übrigens im Gegensatz zu den Thermoelementen 1 und 2 den typischen Kurvenverlauf. Nach 5 Minuten ist die Phase 1 mit einer Steigung von 18 K/min bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 100 °C abgeschlossen. Danach schließt sich eine ca. 28 Minuten andauernde Phase 2 mit einer Steigung von 3,3 K/min an.

Nach insgesamt 33 Minuten bei einer Grenzschichttemperatur von etwa 210 °C beginnt die Phase 3 mit einer Steigung von 17 K/min. Diese Phase dauert etwa 3 Minuten. Bei ca. 260 °C beginnt die Phase 5 mit einer Steigung von 46 K/min.

Am maßgebenden Thermoelement 2 ist eine Phase 2 zwischen der 10. Minute und etwa der 22. Minute mit einer Steigung von 3,3 K/min zu erkennen. Der Übergang in die Phase 2 erfolgt bei relativ hohen Grenzschichttemperaturen von ca. 160 °C. Ab der 22. Minute nimmt die Steigung auf einen Wert von 10 K/min für einen Zeitraum von etwa 3 Minuten zu. Dieser Bereich kennzeichnet die Phase 3. Die Grenzschichttemperatur beim Übergang von der Phase 2 in die Phase 3 liegt bei ca. 200 °C. Ab der 25. Minute wird bei einer Temperatur von ca. 230 °C bereits die Phase 5 mit einer Steigung von 55 K/min erreicht. Die kritische Temperatur wird an Thermoelement 2 nach 26 Minuten erreicht. Die Thermoelemente 1 und 3 folgen nach 2 bzw. 10 Minuten.

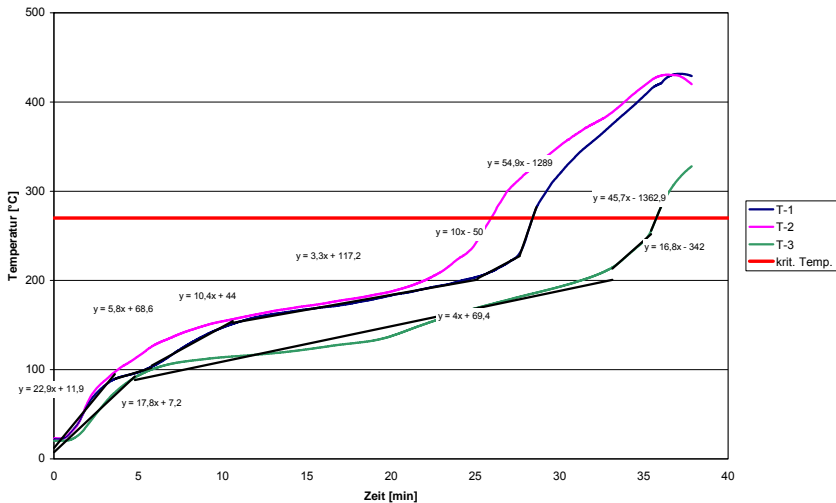


Bild 42: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1,5 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 20

Bei diesem Versuch ist, neben dem Kurvenverlauf der Thermoelemente 1 und 2, insbesondere die vergleichsweise hohe Grenzschichttemperatur von etwa 160 °C in der Phase 2, angesichts vermutlich eher zu geringer Umgebungstemperaturen, überraschend. Es wird vermutet, dass in der Phase 1 eine Störung in der Ausbildung der Schutzschicht aufgetreten ist. Eine Ursache konnte allerdings nicht ermittelt werden. Bei der Einordnung der Leistungsfä-

higkeit ist ein Zugewinn an 10 Minuten im Vergleich zu der 1 mm dicken Schicht aus Versuch 1 zu beobachten.

Der Versuch 3 unterscheidet sich von Versuch 2 nur durch die Imprägnierung des Fichtenholzabschnitts mit einem Salz, welches üblicherweise im Holzschutz eingesetzt wird. Der positive Effekt ist bereits in der Phase 1 auffallend (Bild 43). Die Steigung liegt in den ersten 5 Minuten bei 17 K/min. Danach schließt sich innerhalb der Phase 1 ein Bereich mit einer Steigung von etwa 5,8 K/min an. Nach ca. 8 Minuten ist die Phase 1 bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 100 °C abgeschlossen. In der Phase 2 liegt die Steigung beim maßgebenden Thermoelement bei lediglich 1,9 K/min. In der 21. Minute beginnt Phase 3. Die Steigung in dieser Phase liegt bei 8,7 K/min. Die Temperatur in der Grenzschicht liegt zu Beginn der Phase 3 bei etwa 130 °C. Die Phase 3 hält bis Versuchsabbruch nach ca. 38 Minuten an. Die kritische Temperatur wird innerhalb dieses Zeitraums nicht erreicht.

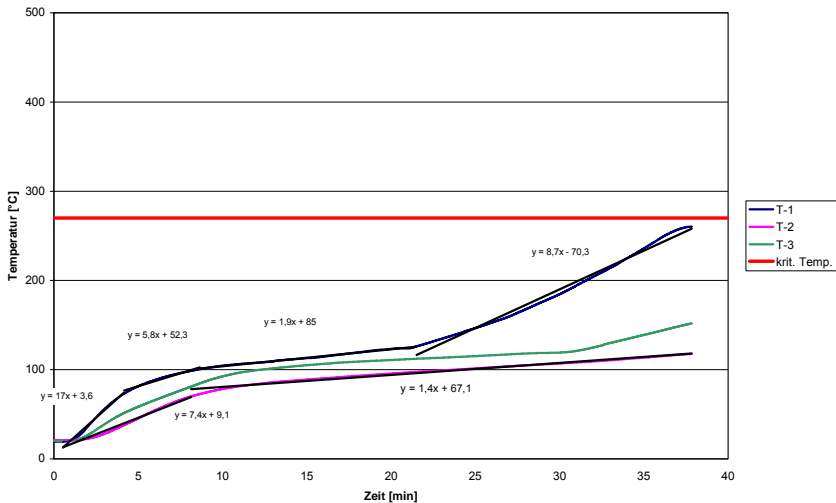


Bild 43: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1,5 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 20 (imprägniert)

Dieser Versuch bestätigt den positiven Einfluss von endergonischen Mechanismen. Der Zugewinn an Brandschutzleistung beträgt mehr als 12 Minuten im Vergleich zu Versuch 2.

Im Versuch 4 wurde wiederum eine 1 mm dicke Schicht der Formulierung RAB 6- S 20 untersucht. Im gleichen Beistellversuch wurde eine 1 mm dicke Schicht der Formulierung RAB 6-S 11 geprüft. Die Idee war, einen Vergleich der Leistungsfähigkeit der beiden Formulierungen unter möglichst identischen Randbedingungen zu ermöglichen. Die Formulierung S 20 bildet

zwischen der 2. und 4. Minute die Schutzschicht aus. In dieser Phase 1 liegen Steigungen von 56 K/min sowie 15 K/min vor. Mit Erreichen einer Grenzschnitttemperatur von ca. 140 °C ist die Phase 1 abgeschlossen. In der Phase 2 liegt die Steigung bei etwa 5,5 K/min am maßgebenden Thermoelement. In der 22. Minute wird eine Grenzschnitttemperatur von ca. 250 °C erreicht. Hier erfolgt der Übergang in die Phase 3 mit einer Steigung von 28 K/min. Diese Phase dauert etwa 2 Minuten. Die Grenzschnitttemperatur steigt in diesem Zeitraum auf etwa 300 °C an. In der anschließenden Phase 5 wird eine Steigung von 68 K/min registriert. Die kritische Temperatur von 270 °C wird nach etwa 23 Minuten erreicht (Bild 44).

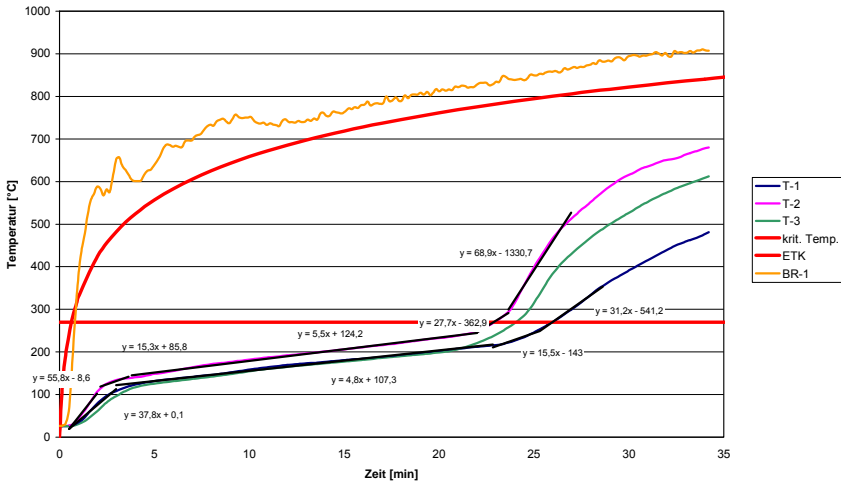


Bild 44: Grenzschnitttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 20

Bei der Einordnung der in diesem Versuch gewonnenen Daten ist zu beachten, dass die Umgebungstemperaturen in der Phase 1 um bis zu 200 °C über der ETK lagen. Dies ist zum einen durch die Messwerte des Mantelthermoelements im Nahbereich des Probekörpers belegt, zum anderen weist auch die große Steigung von 56 K/min in der Phase 1 darauf hin. Auch in der Phase 2 liegt eine Temperaturüberschreitung vor.

Im Vergleich zu dem im selben Beistellversuch untersuchten System RAB 6- S 11 verfügt RAB 6- S 20 über eine etwas geringere Brandschutzleistung. Bei einer um 0,5 K/min größeren Steigung in der Phase 2 wird die kritische Temperatur von 270 °C bereits nach etwa 23 Minuten erreicht, im Vergleich zu 26 Minuten für die RAB 6- S 11. Auffallend ist, dass die Kurvenprofile beider Versuche nahezu identisch sind. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die

Versuche gut miteinander verglichen werden können. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die RAB 6- S 11 eine um etwa 10 % höhere Leistungsfähigkeit aufweist.

Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse aus der Versuchsreihe RAB 6- S 20 ist in der folgenden Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6: Zusammenstellung der Parameter Steigung, Dauer und Temperatur nach Phasen für die Versuchsreihe RAB 6- S 20

Phase	Parameter	Einheit	V1	V2	V3	V4
			1 mm	1,5 mm	1,5 mm	1 mm
P1	Steigung	°C/min	54	23 (10)	17 (5,8)	56 (15)
	Dauer	min	3	5 (10)	5 (8)	4
	Temperatur	°C	120	160	100	140
P2	Steigung	°C/min	3,8	3,3	1,9	5,5
	Dauer	min	9	12	13	17
	Temperatur	°C	150	200	130	250
P3	Steigung	°C/min	16	10	8,7	28
	Dauer	min	2	3	17	2
	Temperatur	°C	180	230	270	300
P4	Steigung	°C/min	21	xx	xx	xx
	Dauer	min	4	xx	xx	xx
	Temperatur	°C	270	xx	xx	xx
P5	Steigung	°C/min	31	55	xx	68
Tkrit		min	18	26	> 38	23

Auch bei der Auswertung dieser Versuchsreihe ist zu beachten, dass analog zu den bereits diskutierten Versuchen eine unterschiedliche thermische Belastung in den verschiedenen Beistellversuchen vorlag. Alle weiteren bereits getroffenen Aussagen zu Einflussfaktoren/ Fehlerquellen wie z. B. Schichtdicke haben auch für diese Versuchsreihe Gültigkeit.

Die Steigungen in der Phase 2 liegen bei einer Schichtdicke von 1 mm zwischen 3,8 K/min und 5,5 K/min. Die Temperaturen in der Grenzschicht beim Phasenübergang von Phase 1 in Phase 2 betragen zwischen 120 °C und 140 °C. Ein Vergleich mit den Beschichtungen der Serie S 11 ist aufgrund der hohen Steigungen in der Phase 1 schwierig. Mit Einschränkungen kann ein Vergleich mit Versuch 1 bzw. Versuch 7 aus der Serie S 11 erfolgen, da hier ähnliche Anfangssteigungen vorliegen. Bis zum Erreichen der kritischen Temperatur braucht das System der Serie S 11 unter diesen Randbedingungen im Mittel etwa 16,5 Minuten. Dies ist deutlich weniger als beim System S 20, welches im Mittel etwa 20,5 Minuten braucht. Die mögliche Ursache liegt in der Menge der endergonischen Bestandteile. Durch die Abspaltung von Kristallwasser und anschließendem Verdampfen kommt es zu einer Kühlung der Schutzschicht. Im Ergebnis führt dies zu einer geringeren Wärmeleitung durch die Beschichtung. Eine weitere Ursache könnte die Verwendung von Melamin als Gasbildner sein. Die Entwicklung der Schutzschicht ist vermutlich nachhaltiger und die Schutzschichtdicke größer.

Bei einer Schichtdicke von 1,5 mm wurde eine Steigung von 3,3 K/min in der Phase 2 gemessen. Dieser Wert liegt um etwa 1,1 K/min niedriger als der der Formulierung RAB 6- S 11 (Versuch 5). Die Grenzschichttemperatur bei dem Übergang von Phase 1 zu Phase 2 liegt allerdings mit 160 °C um etwa 50 °C höher. Der Übergang in die Phase 3 erfolgt bei diesem System bei etwa 200 °C. Dies liegt noch um etwa 20 K über der Temperatur des vergleichbaren Systems RAB 6- S 11 aus Versuch 5. In der Phase 3 liegt die Steigung bei 10 K/min (S 20) bzw. 8,4 K/min (S11). Die kritische Temperatur wird nach 26 Minuten durch das System RAB 6- S 20 erreicht. Im Vergleich dazu schneidet das System S 11 um zwei Minuten besser ab.

Im Vergleich der Versuche 2 und 3 wird der positive Einfluss einer in das Holz eingebrachten Kühlreaktion deutlich. So liegt die Steigung bei sehr niedrigen 1,9 K/min in der Phase 2. Die kritische Temperatur wird erst nach mehr als 38 Minuten im Vergleich zu 26 Minuten erreicht. Die Brandschutzleistung wird also um nahezu 50 % gesteigert.

Aus den Versuchen kann leider kein Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Brandschutzleistung abgeleitet werden, da sich die Versuchsbedingungen bei den 1 mm-Versuchen deutlich von den Bedingungen der 2 mm-Versuche unterscheiden.

Für die Formulierung RAB 6- S 20 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Prinzipiell ist es mit dieser Formulierung möglich, die Kapselklasse $K_{2,30}$ zu erzielen. Hierzu sind vermutlich Ausgangsschichtdicken um die 2 mm notwendig.
- Die Zunahme der Dämmschicht schwächt sich über die Versuchsdauer ab. Dies korrespondiert mit der sich über die Zeit abschwächenden Steigung der ETK.
- Die Brandschutzleistung in Beistellversuchen ist bei dieser Formulierung etwas schlechter als bei der Formulierung RAB 6- S 11.
- Durch die Versuche konnte bestätigt werden, dass Kühlreaktionen einen signifikanten Einfluss auf die Brandschutzleistung haben. Die kühlende Wirkung durch Verdampfen von Wasser wird durch die entstehende Dämmschicht nicht behindert.
- Durch Kühlreaktionen ist eine theoretische Steigerung der Brandschutzleistung um ca. 50 % möglich.

6.2.4 Transparentes System mittels nano- und mikroskaliger Zuschläge

Bei der Formulierung RAB 6- S 22 handelt es sich um ein transparentes System. Im Vergleich zur Formulierung RAB 6- S 11 wurde die Wassermenge in der Beschichtung halbiert. Weiterhin wurde wie bei der Formulierung RAB 6- S 12 ein mikronisiertes APP verwendet. In einem Beistellversuch wurde eine Schichtdicke von 1 mm untersucht. Auffällig bei dem Versuch ist der große Temperaturanstieg zu Beginn des Versuches mit einer Steigung von ca. 117 K/min am Thermoelement 1 (Bild 45). Dies deutet auf deutlich zu hohe Temperaturen im Nahbereich des Probekörpers hin. Typischerweise bildet sich in der Phase 1 noch eine Zwischenphase mit einem Temperaturanstieg von 20 K/min aus. Die Phase 1 ist nach etwa zwei Minuten abgeschlossen. Zu diesem Zeitpunkt zeigt das Thermoelement 1 in der Grenzschicht bereits eine Temperatur von ca. 190 °C an. Die Phase 2 hält etwa bis zur achten Minute an. Bei einer Steigung von 4,9 K/min wird eine Grenzschichttemperatur von ca. 220 °C erreicht. In der folgenden Phase stellt sich der Temperaturanstieg von 25 K/min ein. Die kritische Temperatur wird dementsprechend nach etwa 10,5 Minuten überschritten.

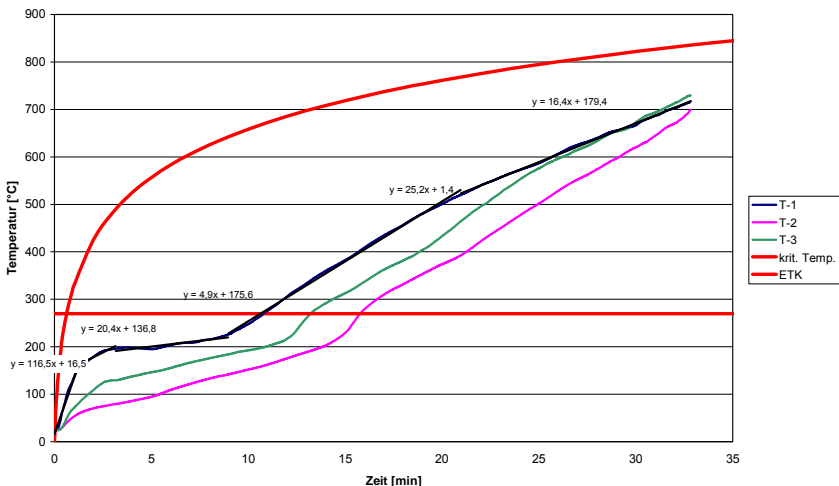


Bild 45: Grenzschichttemperaturen im Normbrandversuch bei einer Beistellprobe mit 1 mm Trockenschichtdicke des Systems RAB 6- S 22

Vor dem Hintergrund der vermutlich deutlich zu hohen Temperaturen wurden die Ergebnisse für die weitere Diskussion weitgehend vernachlässigt. Lediglich die Steigung in der Phase 2 mit etwa 4,9 K/min ist verwertbar. Der Wert liegt in etwa im Bereich der RAB 6- S 12.

6.2.5 Brandschutzbeschichtung nach dem Stand der Technik

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurde ein Beistellversuch mit einer marktverfügbaren Brandschutzbeschichtung auf Dispersionsbasis zur schwerentflammaren Ausrüstung von Holz / Holzwerkstoffen nach DIN 4102–1 im trockenen Innenbereich durchgeführt. Die Schichtdicke des untersuchten Systems betrug 2 mm.

Die Auswertung des Versuchs zeigt, dass in der Phase 1 eine nur leicht erhöhte Temperatursteigerung von 40 K/ min gemessen wurde (Bild 46). Der Übergang in die Phase 2 erfolgt nach etwa 3 Minuten bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 120 °C. Diese Phase dauert etwa 6,5 Minuten bei einer Steigung von 2,3 K/min. Bei Erreichen einer Grenzschichttemperatur von ca. 130 °C erfolgt der Übergang in die Phase 3. Diese Phase fällt mit ca. 2 Minuten vergleichsweise kurz und zeichnet sich durch eine Temperaturzunahme von ca. 25 K/min aus. In der Phase 4 nimmt die Temperatursteigerung auf ca. 72 K/min zu. Dementsprechend wird die kritische Temperatur nach ca. 13,5 Minuten erreicht. Als Vergleich kommt nur die RAB 6-S 11 in Frage, die im Versuch 2 ebenfalls mit einer Schichtdicke von 2 mm ausgestattet war. Bei diesem Versuch wurde die kritische Temperatur erst nach 34,5 Minuten erreicht (Bild 31). Im Vergleich zum Stand der Technik konnte die Brandschutzleistung unter den Bedingungen der Versuchsmethodik der Beistellversuche um 250 % gesteigert werden.

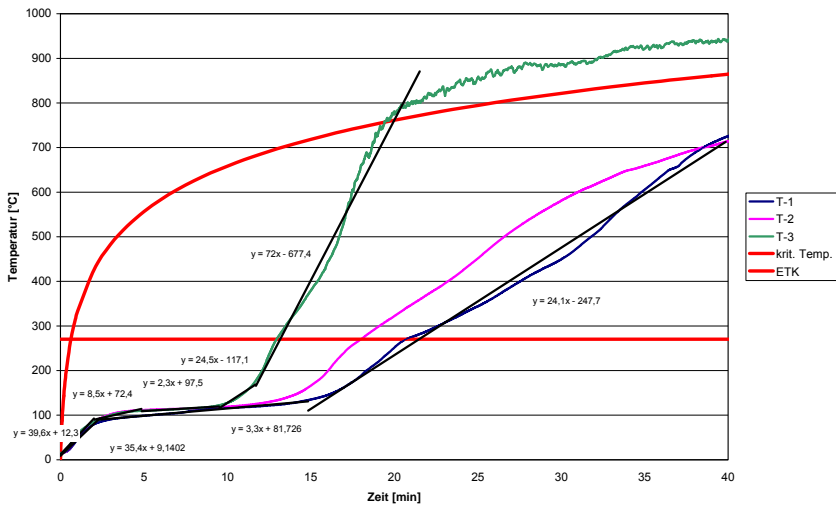


Bild 46: Marktüblicher B1 Dämmschichtbildner mit 2 mm Trockenschichtdicke

6.3 Streuung der Versuchsergebnisse

Um die Streuung der Versuchsergebnisse quantifizieren zu können, wären systematische Reihenuntersuchungen notwendig. Dies konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden. Hilfsweise wurden neben einer Auswertung der einzelnen Beistellversuche auch Industrierversuche an unterschiedlichen dämmschichtbildenden Brandschutzbeschichtungssystemen für Stahl ausgewertet. Die Daten wurden freundlicherweise von der Materialprüfanstalt Braunschweig anonymisiert zur Verfügung gestellt.

Bei der Auswertung wurde zum einen die Streubreite ΔT auf der Temperaturachse 30 Minuten nach Versuchbeginn und zum anderen die Streubreite Δt auf der Zeitachse bei Erreichen des Kapselkriteriums (270 °C) ermittelt (Bild 47).

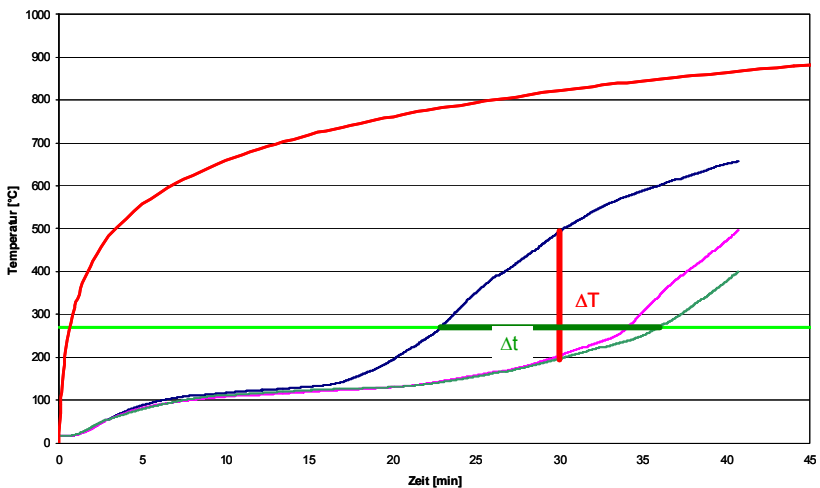


Bild 47: Ermittlung der Streuungsgrößen

In der folgenden Tabelle 7 sind die Streubreiten von fünf Stahlbrandschutzbeschichtungen dargestellt.

Tabelle 7: Streuungen der Temperaturverläufe fünf kommerzieller Stahlbrandschutzbeschichtungen

Zeile	Parameter	Produkt A	Produkt B	Produkt C	Produkt D	Produkt E
1	min T [°C] nach 30 min	423	370	267	293	277
2	Max T [°C] nach 30 min	546	439	346	373	456
3	MW [°C] aus 1 und 2	485	404	306	333	367
4	ΔT [°C] nach 30 min	123	69	79	79	179
5	ΔT [aus 4 in % von 3] nach 30 min	22,6	15,7	22,8	21,3	39,3
6	min t [min] nach 270 °C	8,0	8,3	19,5	19,1	14,2
7	Max t [min] nach 270 °C	12,8	12,8	31,4	26,1	27,0
8	MW [min] aus 6 und 7	10,4	10,5	25,5	22,6	20,6
9	Δt [min] bei 270 °C	4,8	4,6	11,9	7,0	12,8
10	Δt [aus 9 in % von 8] nach 30 min	37,7	35,7	38,0	26,8	47,4

Die absoluten Streubreiten ΔT in den Versuchen, die nach 30 Minuten ETK- Beanspruchung entlang der Temperaturachse zu beobachten sind, umfassen einen relativ großen Wertebereich von $\Delta T = 69,2$ °C bis $\Delta T = 179,3$ °C (Tabelle 7, Zeile 4). Die relative Streuung in der Temperatur nach 30 Minuten beträgt zwischen 15,7 und 39,3 %. Auch bei der Darstellung der Zeit bis zum Erreichen der für Holz relevanten Temperatur von 270 °C ergeben sich Differenzen von 4,6 bis zu 12,8 Minuten zwischen dem minimalen und dem maximalen Zeitpunkt. Ausgedrückt in Prozent liegt die Streuung zwischen 26,8 und 47,4 %.

Eine vergleichbare Auswertung wurde für das System RAB 6- S 11 vorgenommen. In Tabelle 8 wurden Mittelwerte und Standardabweichungen für die drei vergleichbaren Versuche in den verschiedenen Phasen ermittelt. Die Auswertung der Steigung zeigt, dass die drei ausgewerteten Versuche unterschiedliche Werte erzielen. Die Steigung in der Phase 1 braucht dabei nicht betrachtet werden, da sie maßgeblich von den Randbedingungen (Ofengeometrie, Temperatur im Probennahbereich etc.) beeinflusst wird. In der Phase 2 liegt die Steigung im Mittel bei 3,9 K/min bei einer Standardabweichung von 0,8 K/min. Ausgehend von der Tabelle der Standardnormalverteilung ergibt sich, dass ca. 68 % aller Messwerte in dem Intervall $3,9 \pm 0,8$ K/min liegen. Wird das Intervall auf ca. 95 % aller Messwerte erweitert, ergibt sich ein Wertebereich von $3,9 \pm 1,6$ K/min. Die angegebenen Werte sind aufgrund der kleinen Stichprobe mit statistischen Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 8: Mittelwerte / Standardabweichungen Versuchsreihe RAB 6- S 11 innerhalb der einzelnen Phasen

Phase	Parameter	Einheit	V3	V4	V6	Mittelwert	Standardabweichung
			1mm	1mm	1mm		
P1	Steigung	K/min	17,4	29,1	27,6	24,7	5,2
	Dauer	Min	5	3,5	3,5	4,0	0,7
	Temperatur	°C	100	100	120	106,7	9,4
P2	Steigung	°C/min	3,6	3	5	3,9	0,8
	Dauer	Min	11,5	10	19,5	13,7	4,2
	Temperatur	°C	120	150	210	160,0	37,4
P3	Steigung	°C/min	21,3	10,8	25,8	19,3	6,3
	Dauer	Min	6,5	10,5	4	7,0	2,7
	Temperatur	°C	270	265	300	278,3	15,5
P4	Steigung	°C/min	xx	Xx	xx	xx	xx
	Dauer	Min	xx	Xx	xx	xx	xx
	Temperatur	°C	xx	Xx	xx	xx	xx
P5	Steigung	°C/min	38	22,7	62	40,9	16,2
Tkrit		Min	23	25,5	26	24,8	1,3

Die absoluten Streubreiten ΔT in den Versuchen V3, V4 und V6 umfassen einen relativ großen Wertebereich von $\Delta T = 95 \text{ °C}$ bis $\Delta T = 288 \text{ °C}$ (Tabelle 9, Zeile 4). Die relative Streuung in der Temperatur nach 30 Minuten beträgt zwischen 29 % und 84 %. Auch bei der Zeit bis zum Erreichen der Entzündungstemperatur von 270 °C ergeben sich Differenzen von 3,2 bis zu 13 Minuten zwischen dem minimalen und dem maximalen Zeitpunkt. Ausgedrückt in Prozent liegt die Streuung zwischen 12 % und 44 %.

Tabelle 9: Streuungen in den Temperaturwerten bei der Versuchsreihe RAB 6- S 11

Zeile	Parameter	V3	V4	V6	Mittelwerte	Standardabweichung
1	min T [°C] nach 30 min	200	285	315	267	49
2	max T [°C] nach 30 min	488	380	470	446	47
3	MW [°C] aus 1 und 2	344	333	393	356	26
4	ΔT [°C] nach 30 min	288	95	155	179	80
5	ΔT [aus 4 in % von 3] nach 30 min	84	29	39	51	24
6	min t [min] nach 270 °C	23	25	25,8	25	1
7	max t [min] nach 270 °C	36	29,2	29	31	3
8	MW [min] aus 6 und 7	29,5	27,1	27,4	28	1
9	Δt [min] bei 270 °C	13	4,2	3,2	7	4
10	Δt [aus 9 in % von 8] nach 30 min	44	15	12	24	14

6.4 Druckfestigkeit eines Probekörpers nach Brandversuch

Exemplarisch wird im Folgenden auf einen Beistellversuch mit einem Probekörper, der mit der Laborformulierung S 11 beschichtet war, genauer eingegangen. Bei dem beschriebenen Versuch war es möglich, den Innenraum des Brandofens schnell abzukühlen und den Probekörper zeitnah zu bergen. Dies ermöglichte bei der Beurteilung der Beschichtung neben den Temperaturmessungen auch die mechanische Durchführungsuntersuchung zur Ermittlung der Resttragfähigkeit. Trotz der vergleichsweise raschen Kühlung des Probekörpers muss bei der Interpretation der folgenden Ergebnisse ein Fortschreiten der Verkohlung über die Dauer von 1 h nach Ende der Beflammung aufgrund der erhöhten Temperaturen im Brandofen unterstellt werden.

Der Probekörper war allseitig mit der Laborformulierung SEF 11 geschützt. Es handelt sich hierbei um ein weißes, deckendes Beschichtungssystem. Bild 48 zeigt den Probekörper vor und nach dem Brandversuch.



Bild 48: Probekörper S11 vor und nach Ofenbrandversuch

Die Beflammungsdauer im Ofen betrug bei diesem Versuch 30 Minuten. Auf dem rechten Bild ist gut zu sehen, dass der Stützenabschnitt von der Schutzschicht eingehüllt ist. Die Aufschäumhöhe der Beschichtung nach Ende des Versuches betrug hier ca. 4,0 cm. Im Laufe des Brandversuches war diese etwas höher und hat infolge einer Oxidation des Kohlenstoffes wieder abgenommen.

Zwei von drei Thermoelementen zeigten nach 30 Minuten noch Temperaturen von weniger als 200 °C; ein Element erreichte etwa in der 24. Minute die kritische Temperatur von 270 °C. Auf Basis der Vorüberlegungen ist daher anzunehmen, dass das Bauteil etwa ab dieser Zeit durch Temperatureinwirkung geschädigt wurde. Als Ursache für das signifikant unterschiedliche Verhalten der Thermoelemente wird entweder eine lokal dünnere Schicht oder eine vorzeitige Beschädigung der Schutzschicht vermutet. Für die zweite Erklärung spricht, dass sich

ein großer Riss in dem Probekörper gebildet hatte (Bild 49). Es ist vorstellbar, dass dieser Trocknungsrisse einen Defekt in der Schutzschicht verursacht haben könnte. Bei einem Vergleich der gemessenen Temperaturwerte der jeweiligen Thermoelemente mit den mikroskopischen Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten an diesen Stellen zeigt sich eine gute Korrelation von gemessener Temperatur und Pyrolyse.

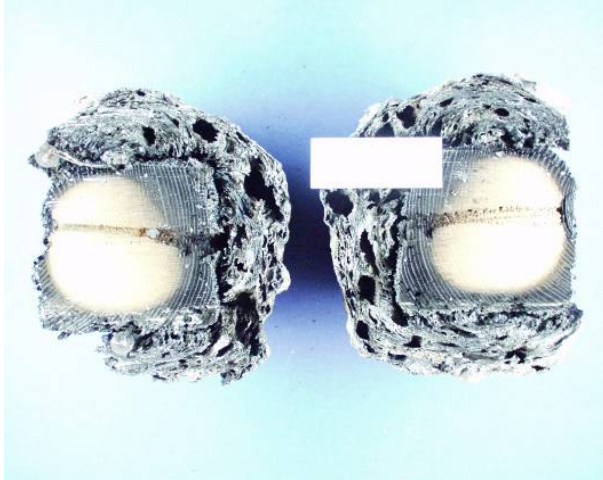


Bild 49: Schnitt durch den Probekörper S 11 nach der thermischen Belastung

An dem Probekörper wurden weitere Untersuchungen zur Beurteilung von Pyrolysetiefe und Resttragfähigkeit vorgenommen. Zunächst wurde mit Hilfe eines Bohrwiderstandsmessgerätes die relative Festigkeit der einzelnen Holzschichten untersucht. Die Bohrung wurde senkrecht zu den Jahresringen des Holzes vorgenommen. Die benötigte Kraft wurde qualitativ gemessen und als Kurve in einem Diagramm ausgedruckt. Der Vergleich von Geräteausdruck mit der Schnittfläche ist in Bild 50 dargestellt. Die Ergebnisse der Bohrung geben keine quantitative Aussage über die Festigkeiten des Holzes. Die unterschiedlichen Festigkeiten der einzelnen Schichten korrelieren allerdings gut mit dem Bohrwiderstand. Die Randzone, welche die größten thermischen Belastungen erfahren hat, weist eine deutlich geringere Festigkeit auf als der unbelastete innere Teil des Holzes.

Weiterhin wurden die Pyrolysetiefen an den jeweils am stärksten geschädigten Stellen per Mikroskop ermittelt.



Bild 50: Ergebnis der Bohrwiderstandsmessung am Probekörper S 11

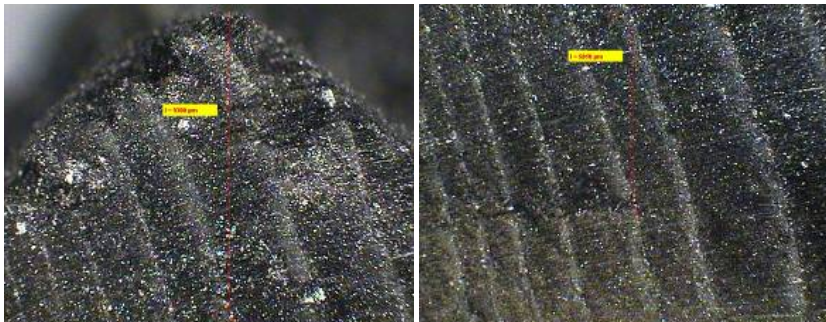


Bild 51: Stärke der Verkohlung von Probekörper S 11 im Eckbereich

Die verkohlte Schichtdicke beträgt am Probekörper im Eckbereich ca. 1,51 cm (Bild 51) und im Seitenbereich ca. 0,74 cm (Bild 52). Der Vergleich mit den Bohrwiderstandsmessungen zeigt, dass innerhalb dieser Schicht ein vollständiger Festigkeitsverlust eingetreten ist.

An die verkohlte Schicht schließt eine Schicht verminderter Festigkeit, infolge teilweiser Substanzerstörung durch thermische Einwirkung, an.

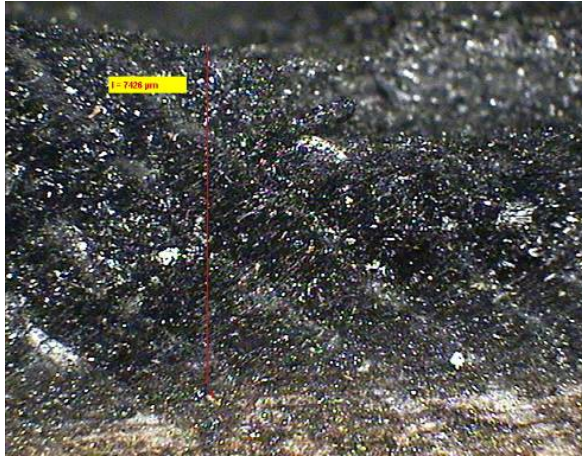


Bild 52: Stärke der Verkohlung von Probekörper S 11 im Seitenbereich.

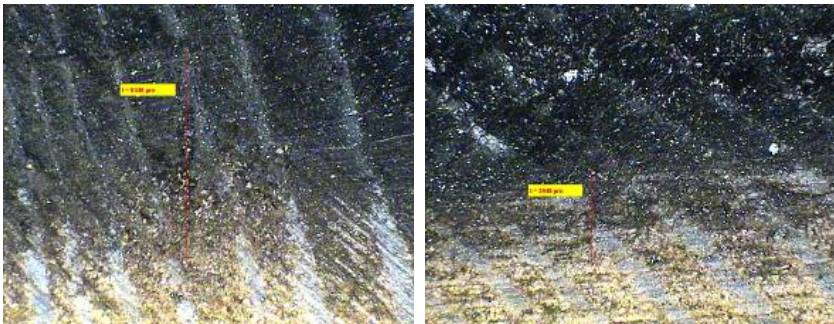


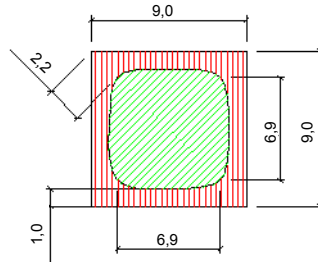
Bild 53: Stärke der thermischen Zersetzung Probekörper S 11 im Eck- und Seitenbereich


Die Schichtdicke des teilweise thermisch zersetzten Bereichs beträgt beim Probekörper S 11 im Eckbereich ca. 0,64 cm und im Seitenbereich ca. 0,29 cm (Bild 53). Zur Vermeidung eines vorzeitigen Tragfähigkeitsverlustes muss der ungeschädigte Restquerschnitt in der Lage sein, die vorhandenen Lasten aufnehmen zu können. Der Restquerschnitt ermittelt sich aus dem Gesamtquerschnitt abzüglich der Summe der verkohlten Schicht und der Schicht der thermischen Zersetzung.

Der Abtrag im Eck- und im Seitenbereich ermittelt sich zu:

$$D_{\Sigma \text{Ecke}} = D_{\text{Verkohlung, Ecke}} + D_{\text{thermischeZersetzung, Ecke}} = 1,51\text{cm} + 0,64\text{cm} = 2,15\text{cm}$$

$$D_{\Sigma \text{Seite}} = D_{\text{Verkohlung, Seite}} + D_{\text{thermischeZersetzung, Seite}} = 0,74\text{cm} + 0,29\text{cm} = 1,03\text{cm}$$



 Querschnitt vor Brandeinwirkung


 Querschnitt nach Brandeinwirkung

Bild 54: Schematische Darstellung des Probekörpers S 11

In den Eckbereichen dieses Querschnitts ist die Schädigung also um 1,12 cm größer als im Seitenbereich. Dieses Ergebnis bestätigt die durchgeführten FEM- Berechnungen. Die Ursache für die größere Schädigung des Eckbereichs ist der Energieeintrag von beiden Seiten. In Bild 54 ist der verbliebene Restquerschnitt der Beistellprobe schematisch dargestellt.

Der Restquerschnitt wurde anschließend im Druckversuch hinsichtlich seiner Tragfähigkeit untersucht. Den Versuchsaufbau zeigt Bild 55.



Bild 55: Versuchsaufbau Druckfestigkeitsprüfung

Bei dieser Prüfung hat der Probekörper noch eine maximale Druckkraft von ca. 170 kN aufnehmen können. Das Bild 56 zeigt den Probekörper nach der Druckfestigkeitsprüfung. Man sieht deutlich, dass der thermisch belastete Teil keinen Druck aufnehmen kann. Dieser Bereich ist nahezu komplett weg gebrochen. Die Resttragfähigkeit wird ausschließlich durch den thermisch nicht belasteten Teil des Probekörpers gewährleistet.



Bild 56: Stütze S 11 nach der Druckfestigkeitsprüfung

Die Versuche dienen als weiterer Beleg dafür, dass der prinzipielle Schutzmechanismus durch Hochleistungsbrandschutzbeschichtung funktioniert. Es wird daher möglich sein, neben der Erzielung einer Kapselwirkung auch eine Verbesserung des Feuerwiderstands zu erreichen. Die Möglichkeit einer Einbindung dieser Wirkungsweise in rechnerische Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall wird in einer laufenden Dissertation am iBMB vertiefend untersucht werden.

7 Anwendungsspezifische Untersuchungen

7.1 Eignung unter Aspekten des Denkmalschutzes

Die Untersuchungen für das Anwendungsgebiet Denkmalschutz wurden im Rahmen einer betreuten Diplomarbeit durchgeführt /44/. Baudenkmäler weisen zum Teil erhebliche Mängel im Brandschutz auf. Neben unzureichenden Rettungswegen, fehlenden Brandabschnitten und mangelhaft ausgebildeten Installationsführungen sowie -durchdringungen erfüllt auch die bauliche Substanz insgesamt häufig nicht die brandschutztechnischen Anforderungen. Holz wurde aus Sicht des Brandschutzes in unzureichenden Abmessungen verbaut, sodass die Bauteile nicht die geforderte Feuerwiderstandsklasse erreichen oder dort als Baustoff eingesetzt sind, wo nach heutiger Gesetzeslage mindestens schwerentflammbare oder sogar nichtbrennbare Baustoffe gefordert sind. In einem ersten Schritt wurde mit der obersten Denkmalbehörde des Landes Sachsen an einem konkreten Beispiel untersucht, unter welchen Randbedingungen Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen zur Ertüchtigung von Baudenkmälern heran gezogen werden können. Insbesondere sollten die spezifischen Anforderungen aus dem Denkmalschutz berücksichtigt werden.

Um den Anstrich auf historisch wertvollen Oberflächen anwenden zu können, war eine zentrale Forderung seitens der obersten Denkmalbehörde des Landes Sachsen, die Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen reversibel aufzubringen. Reversibel im Sinne des Denkmalpflegers bedeutet, dass der Brandschutzanstrich wieder entfernt werden kann, ohne dass die darunter liegende historische Oberfläche beschädigt oder verändert wird. Darüber hinaus soll der Schutzlack über eine hohe Transparenz verfügen und die Optik (und teilweise auch die Haptik) möglichst gering beeinflussen. Die Untersuchungen wurden beispielhaft auf vier historischen Anstrichstoffen durchgeführt. Dies waren (Bild 57):

- a) eine Schellackpolitur bestehend aus drei Grundierschichten (Spiritus, Schellack, Bismehl), drei Deckpolituren (Schellack, Spiritus, Polieröl) und einer Abpolitur
- b) ein Heiß-Hartwachs aus Bienen- und Carnaubawachs auf einer Leinölgrundierung
- c) ein Leimanstrich bestehend aus einer Schicht Vorleimer (Hasenhautleim), vier Grundierungsschichten (Kreidegrund), einer weiteren Vorleimung und vier Leimfarbenanstrichen (Hasenhautleim) mit blauen Pigmenten
- d) ein dreischichtiger Ölanstrich, der dem historischen „Ochsenblut“ entspricht

Auf diese Oberflächen wurde eine transparente Formulierung der Hochleistungsbrandschutzbeschichtung (Laborkennung RAB 6- S 12) aufgetragen und untersucht. Auf der unbehandel-

ten Referenzprobe a) erscheint der Brandschutzanstrich vollständig transparent und der Untergrund erhält eine Anfeuerung. Nahezu vollständige Transparenz ist ebenfalls auf dem Schellack b) und dem Wachs c) vorhanden. Auf dem tierischen Leim d) sind milchige Spuren sichtbar, die ansatzweise auch auf der Ölfarbe e) ab einer Trockenschichtdicke von 240 µm sichtbar sind.

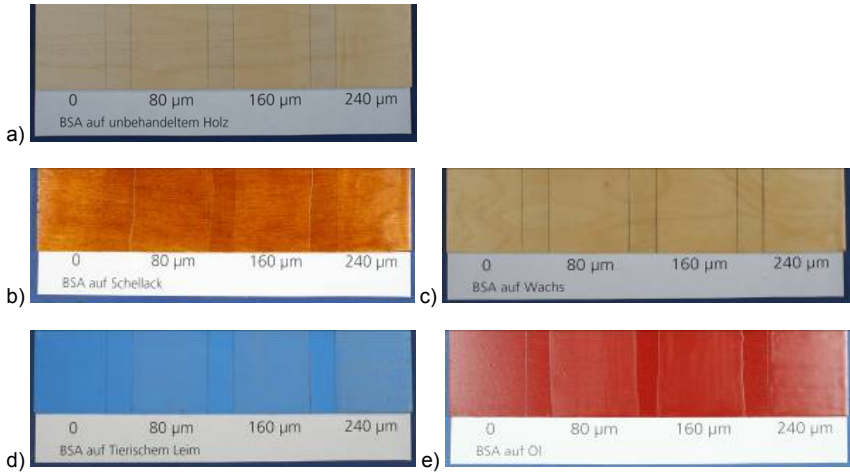


Bild 57: Historische Anstrichstoffe mit einem Brandschutzdecklack (RAB 6- S 12)

Die untersuchte Brandschutzformulierung verändert die Untergründe in unterschiedlichen Facetten. Farbige Untergründe erleben eine Farbtonveränderung, Strukturen werden eingeebnet, und völlige Transparenz ist nicht gegeben. Der Glanzgrad der Brandschutzbeschichtung lässt sich auf den Glanzgrad unterschiedlicher Untergründe einstellen. Lediglich hoch glänzende Oberflächen wie die Schellack-Politur können wahrscheinlich nicht erreicht werden. Auf den farbigen Untergründen sind die Farbveränderung und die nicht ausreichende Transparenz aus Sicht des Denkmalschutzes noch ein Schwachpunkt. Hinzu kommt eine Veränderung der Oberflächenstruktur, die den Einsatz bei Wachsen, Ölen oder unbearbeiteten Oberflächen unter dem Aspekt einer unveränderten Oberflächencharakteristik zunächst einschränkt. Die grundsätzliche Möglichkeit, den Brandschutzanstrich wieder von einer historischen Oberfläche zu entfernen, wurde mittels Wasserdampf nachgewiesen. Eine technische Lösung wären Geräte, die einem herkömmlichen Dampfstrahler ähneln. Hinsichtlich des Brandschutzes wurde in Laborbrandversuchen untersucht, ob negative Wechselwirkungen zwischen Brandschutzschicht und historischer Oberfläche bestehen. Tendenziell waren die Brandschutzeigenschaften des Anstrichs auf allen Untergründen sogar besser als zunächst erwartet. Während der Versuche wurden keine Haftungsprobleme festgestellt. Allerdings lassen unterschiedliche Arten der Schaumbildung darauf schließen, dass in Abhängigkeit

des Anstrichstoffes und der Temperatur Reaktionen mit dem Brandschutzanstrich stattfinden. Hier sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Die Dauer der Schutzwirkung war unterschiedlich. Es wurden Laborbrandversuche nach Kapitel 4.4 durchgeführt, bei denen 3 mm dicke Sperrholzplatten beschichtet und anschließend mit einem Bunsenbrenner beflammt wurden. Bei dieser Versuchsanordnung erreichten beispielsweise die Schellack-Proben im Mittel 21 Minuten, bis die definierte Entzündungstemperatur von 270 °C erreicht wurde.



Bild 58: Brandschutzdecklack (RAB 6- S 12) auf Schellack nach Brandversuch

Nach dem Abkühlen der Schaumschicht wurde diese vom Rand her entfernt. Der Schellack sah unter der Schutzschicht weitgehend unversehrt aus. Zur Probenmitte verdunkelte sich die Oberfläche (Bild 58). Ein ungeschützter Vergleichsprobekörper verbrennt bei dieser Versuchsanordnung innerhalb von 1-2 Minuten vollständig.

7.2 Verbesserung der Feuerwiderstandsdauer von Nagelplattenbindern

Ein spezielles Anwendungsgebiet, für das Lösungen untersucht wurden, sind Nagelplattenbinder. Hierzu wurde die RAB 6- S 11 auf ihre Anwendbarkeit und ihr Potenzial zum Schutz der Verbindung untersucht.

Nagelplattenbinder werden durch Einpressen der Nagelplatte in entsprechende Binder hergestellt. Um einen optimalen Prozess zu gewährleisten, wurde die Möglichkeit untersucht, Nagelplatten vorzubeschichten und im Anschluss zu verpressen.

Die Untersuchungen wurden mit verzinkten Nagelplatten und der Laborformulierung RAB 6-S 11 durchgeführt. Die Nagelplatten konnten gut beschichtet werden und verfügten offensichtlich über eine ausreichende Haftung. Mit entsprechend beschichteten Nagelplatten wurden Einpressversuche mit unterschiedlichen Pressdrücken vorgenommen (Bild 59). Bei einem Pressendruck von bis zu 30 bar zeigte das verwendete System S 11 keine Schäden (Bild 60).



Bild 59: Pressversuche

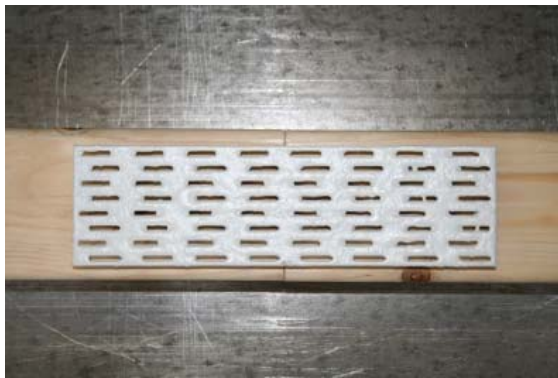


Bild 60: Eingepresste Nagelplatte

In Normbrandversuchen am iBMB wurde mittels der RAB 6- S 11 nachgewiesen, dass entsprechend beschichtete Nagelplattenbinder unter voller statischer Auslastung die Feuerwiderstandsklasse F 30 erreichen können. Da die Versuche im Rahmen einer zukünftigen Dissertation eingehender ausgewertet werden, erfolgt an dieser Stelle keine weitere Diskussion.

Das grundsätzliche Potenzial eines Schutzes der Nagelplatte konnte somit nachgewiesen werden. Allerdings zeigen Langzeituntersuchungen, dass es zu Enthaltungen der Formulierung auf der verzinkten Oberfläche kommt (Bild 61). Hier sind Sperranstriche bzw. haftvermittelnde Schichten notwendig.

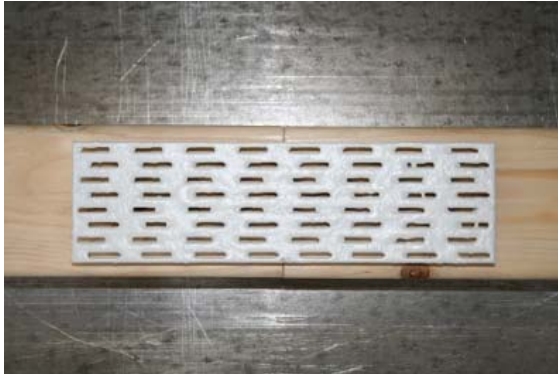


Bild 61: Nagelplatte nach 24 Monaten Lagerung im Normklima

7.3 Ertüchtigung von Bauteilen in der Innenanwendung

Die grundlegenden Konstruktionen wurden durch Unternehmen der Holzbauindustrie kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Beschichtung der Bauteile erfolgte am Fraunhofer WKI und die Durchführung der Brandversuche am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig.

Mit diesen ersten Versuchen in einem größeren Maßstab wurden zwei Hauptziele verfolgt. Zum einen sollte die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit der entwickelten Rezepturen im Bauteilmaßstab verifiziert werden. Zum anderen sollten erstmalig Daten zum Bauteilverhalten in Kombination mit einer Hochleistungsbrandschutzbeschichtung ermittelt werden. Auch wenn die Wechselwirkungen nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, wurden doch wichtige Daten für die weitere Entwicklung gewonnen.

Gemäß den Anwendungsfällen wurden 5 verschiedene Grundkonstruktionen in verschiedenen Variationen untersucht. Dabei handelt es sich um die folgenden Konstruktionen / Bauteile:

- Holztreppen,
- Ausschnitte filigraner Fachwerkkonstruktionen,
- Holzrahmen mit Brandschutzverglasung,
- Deckenbauteil in Holztafelbauweise,
- Wandbauteil in Brettschichtholz.

Für die Planung der Versuche wurden zunächst die Abmessungen des im iBMB zur Verfügung stehenden Kleinbrandofens herangezogen. Der Kleinbrandofen hat eine Grundfläche von ca. 1,0 m x 1,5 m. Die Höhe beträgt 1,5 m. Der Raum ist nach oben offen, was den Einbau eines Deckenelementes möglich macht. Daraus ergibt sich für das Deckenelement eine beflamte Fläche von 1,0 m x 1,5 m (Bild 62).

In den beiden 1,5 m langen Seitenwänden befindet sich jeweils eine Öffnung für den Einbau eines Wandelementes mit einer Öffnungsfläche von 0,77 m x 1,13 m. Die zu untersuchenden Wandelemente wurden dementsprechend in einer Größe von 0,7 m x 1,0 m gefertigt.

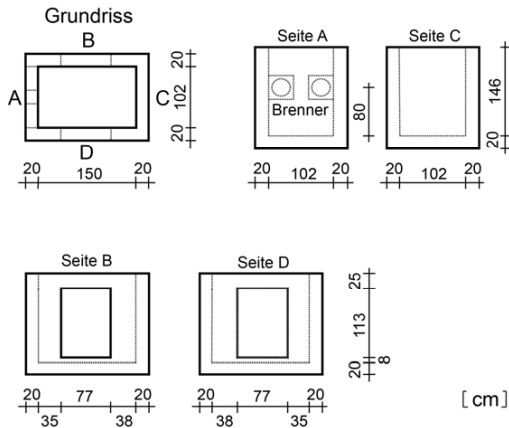


Bild 62: Skizze des Kleinbrandofens

Um die Flächen bei diesen kostenintensiven Versuchen maximal auszunutzen, wurde zusätzlich zu den Wand- und Deckenelementen ein weiteres, freistehendes Bauteil (z. B. Eckelement, Treppenabschnitt) im Brandofen positioniert.

Die Temperatur im Brandraum wurde gemäß der Einheitstemperaturzeitkurve entsprechend DIN 4102-2 gesteuert. Die Steuerung erfolgte über zwei Steuer-Thermoelemente, die ca. 15 cm unterhalb der Decke angebracht wurden. Eine weitere Kontrolle der Brandraumtemperatur wurde durch jeweils 8 Thermoelemente sichergestellt, die entsprechend Bild 63 ca. 10 cm vor der Oberfläche der Wandbauteile angebracht wurden. Ein weiteres Thermoelement wurde in der Nähe des freistehenden Bauteils angeordnet.

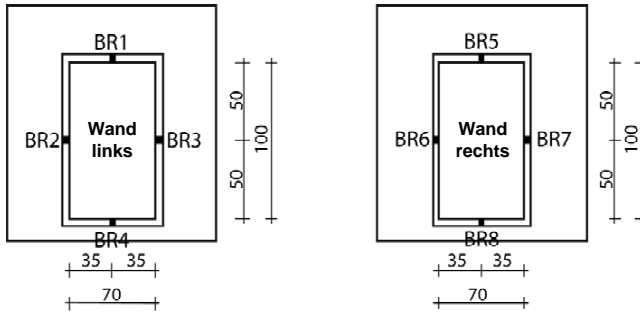


Bild 63: Lage der Thermoelemente zur Kontrolle der Brandraumtemperatur

Insgesamt wurden vier Versuche durchgeführt und ausgewertet. Je Versuch konnten maximal zwei Wandelemente, ein Deckenelement und ein freistehendes Bauteil eingebaut und entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) in Anlehnung an DIN 4102-2 beflammt werden. Die Proben wurden mit Thermoelementen versehen, um die Temperaturentwicklung auf der Holzoberfläche, sowie im Bauteilinnern beobachten und beurteilen zu können.

7.3.1 Untersuchungen an Festverglasung, OSB-Platte, Akustikdecke und Treppe

In diesem Versuch wurden zwei Wandelemente (Bild 64), ein Deckenbauteil (Bild 65) sowie als freistehendes Element eine Treppe (Bild 66) untersucht.



Bild 64: Wandelemente (links Holzrahmen mit Brandschutzverglasung, rechts OSB-Platte auf Ständerwerk) im Versuch 1

Ein Wandbauteil bestand aus einem 75 mm starken Holzrahmen. Im oberen Teil des Holzrahmens war eine F 30 Feuerschutzverglasung „Promaglas 30 Typ 1-0“ eingebaut. Im untere-

ren Teil befand sich eine 38 mm dicke Spanplattenfüllung der Baustoffklasse B1. Das Bauteil war mit dem Beschichtungssystem S 11 beschichtet. Die Beschichtungsstärke betrug 1,5 mm.

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur wurden Thermoelemente auf der beflamnten Seite unterhalb der Beschichtung ins Holz eingelassen. Zwei weitere Elemente wurden unterhalb der Falzleiste platziert. Ebenso wurden auf der Rückseite des Bauteils Thermoelemente zur Kontrolle des Raumabschlusses (mittlere Temperaturerhöhung ≤ 140 K) angebracht.

Zum Vergleich wurde das zweite Wandelement unbeschichtet eingebaut. Die beflamnte Oberfläche bildete eine OSB- Platte mit einer Grundkonstruktion in Ständerbauweise. Der innere Aufbau ist zweigeteilt und durch einen FJI- Ständer getrennt. Auf der einen Seite befand sich zwischen den Ständern ein brennbarer Cellulosedämmstoff, die andere Seite war mit nichtbrennbarer Mineralwolle gedämmt. Die Thermoelemente waren innenliegend an den FJI- Profilen und der Rückseite der beflamnten OSB- Platte, sowie auf der Rückseite der Wand befestigt.

Das Deckenbauteil wurde als Kastenelement in den Maßen 120 cm x 170 cm gefertigt. Auf der beflamnten Seite wurde eine gelochte, 21 mm dicke Akustikplatte aus Furnierschichtholz angeordnet. Die Löcher hatten einen Durchmesser von 10 mm. Hinter der gelochten Platte lag eine Folie mit darüber liegender Mineralfaserdämmung. Der Rahmen bestand aus FJI- Trägern. Den Abschluss auf der Rückseite des Elementes bildete eine OSB- Platte. Als Brandschutz wurde die Beschichtung S 11 in einer Stärke von 1,5 mm aufgebracht (Bild 65).

Das Bauelement wurde mit einer Reihe von Thermoelementen ausgerüstet. Abweichend von dem üblichen Vorgehen, wurden in diesem Fall die Thermoelemente nicht direkt unter der Brandschutzbeschichtung angeordnet. Dies war aufgrund der Lochstruktur der Akustikplatte nicht möglich. Die Thermoelemente wurden auf der Rückseite der beflamnten Akustikplatte angebracht. Ein Teil der Elemente wurde über Löchern der andere auf den Lochstegen angeordnet. Weitere Thermoelemente wurden an den innenliegenden FJI- Trägern befestigt. Auch bei der Decke wurden zur Kontrolle des Raumabschlusses Thermoelemente an der Rückseite des Bauteils auf der OSB- Platte angebracht.

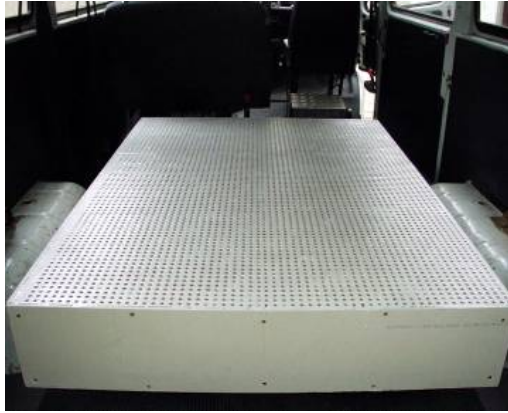


Bild 65: Deckenelement

Als freistehendes Element wurde eine Standardtreppe ohne Feuerwiderstand eingebaut. Auf der einen Seite wurden die Stufen über Stahlstangen am Treppengeländer aufgehängt, auf der gegenüberliegenden Seite wurden die Stufen über Metallstifte in einer eigens gemauerten Porenbetonwand verankert. Als Brandschutzschicht wurde die transparente Formulierung S 12 mit einer Dicke von 0,75 mm aufgetragen. Die Stahlstangen wurden ebenfalls beschichtet. Allerdings verursachte die mangelhafte Haftung der für Holzoberflächen entwickelten Formulierung auf der Stahloberfläche Probleme. Eine kontrollierte Schichtdicke konnte daher auf den Stahlstangen nicht realisiert werden.

Um die Tragfähigkeit der Treppe unter Belastung zu prüfen, wurden Gewichte von jeweils 100 kg mit einer Fläche von 20 cm x 20 cm auf die Treppenstufen gestellt.



Bild 66: Treppe im Brandraum

Die meisten Thermoelemente waren in der Grenzschicht Holz-Beschichtung angeordnet und geben daher Auskunft über die Oberflächentemperatur des Bauteils. Weitere Thermoelemente waren in den Stoßfugen Geländer-Stufe platziert.

In dem folgenden Bild 67 ist die Temperaturentwicklung im Brandraum dargestellt. Zu Beginn des Versuches konnten noch die Reaktionen über die Brandschutzverglasung beobachtet werden. Allerdings schäumte diese nach wenigen Minuten zu. Danach konnte nur noch die Unterseite des Deckenbauteils über zwei kleine Öffnungen beobachtet werden.

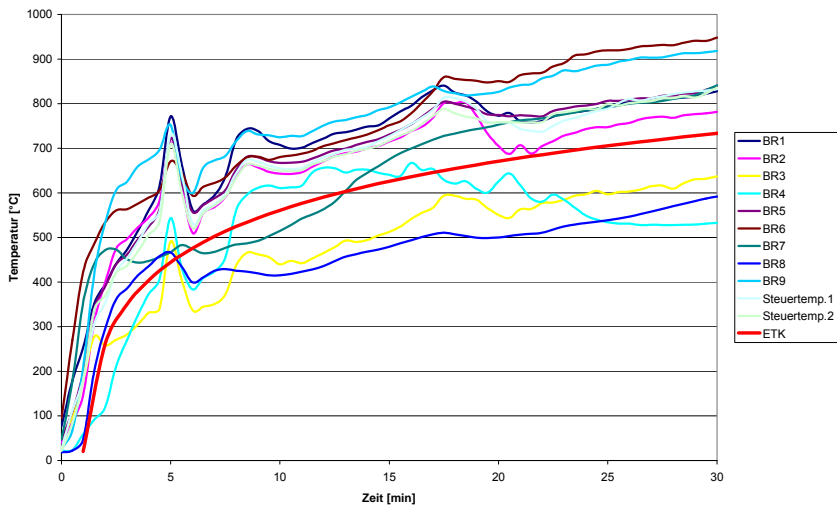


Bild 67: Temperaturentwicklung im Brandraum

In der 5. Minute entzündete die OSB- Platte des ungeschützten Wandbauteils. Dies führte zu einem kurzzeitigen Überschreiten der ETK. Nach ca. 20 Min war eine Temperaturerhöhung auf der Rückseite dieser Wand feststellbar. Etwa in der 28. Minute wurde eine Entzündung des Deckenbauteils sowie des Wandbauteils mit der Brandschutzverglasung beobachtet.

In der 30. Minute wurden die Brenner abgestellt. Ein Einblasen von Luft brachte keinen Kühlungseffekt. Ca. 5 Minuten nach Versuchende wurde die Decke abgenommen und gelöscht. Die maximalen Temperaturen im Brandraum betragen zu diesem Zeitpunkt ca. 950 °C.

Bei den Thermoelementen der Holzrahmenkonstruktion mit der Brandschutzverglasung wurde die erste Überschreitung der Entzündungstemperatur von 270 °C in der 13. Minute festgestellt, die letzte in der 24. Minute. Lediglich die zwei Thermoelemente unter der Falzleiste lagen deutlich unter dem Entzündungsbereich bei ca. 170 °C (Bild 68).

Der Raumabschluss dieses Wandbauteils blieb über die gesamte Versuchsdauer von 30 Minuten erhalten.

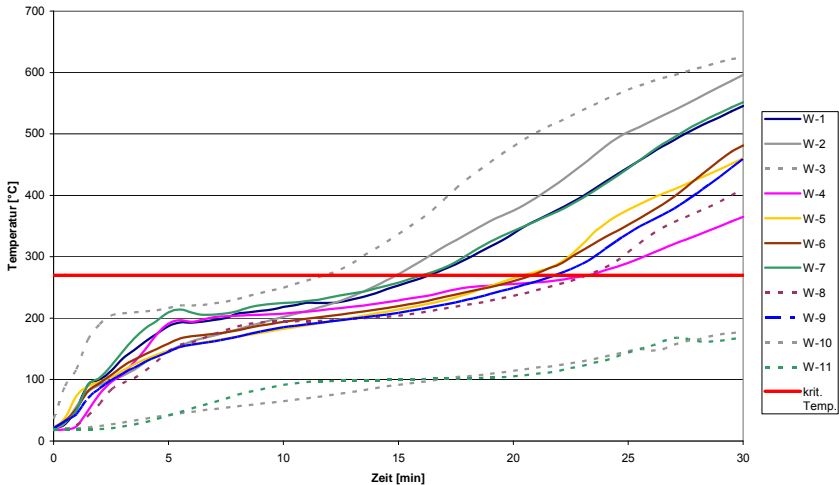


Bild 68: Temperaturen an der Oberfläche der Holzrahmenkonstruktion mit Brandschutzverglasung

Im Vergleich zu dem ungeschützten Wandbauteil, das bereits nach 5 Minuten brennt, ergibt sich eine deutliche Verzögerung der Entzündung. Eine Überschreitung der kritischen Grenztemperatur von 270 °C nach bereits ca. 13 Minuten ist allerdings kein zufriedenstellendes Ergebnis und steht auch im Widerspruch zu den Vorergebnissen. Nach den Versuchen mit Beistellproben wäre ein Entzündungsschutz von ca. 30 Minuten erwartet worden.

Um die Leistungsfähigkeit der Beschichtung genauer analysieren zu können, werden Messwerte von Thermoelementen mit vergleichsweise ähnlichem Kurvenverlauf in dem folgenden Bild 69 als Mittelwerte dargestellt und in ihre Phasen gemäß Kapitel 4.1 aufgeteilt. Kurven mit geringem Aussagewert hinsichtlich der Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Formulierung werden dabei nicht berücksichtigt. Die Bezeichnung der Kurven gibt an, welche Thermoelemente für die Mittelwertbildung heran gezogen wurden (Bsp.: W-1,8 stellt den Mittelwert der Thermoelemente 1 und 8 dar).

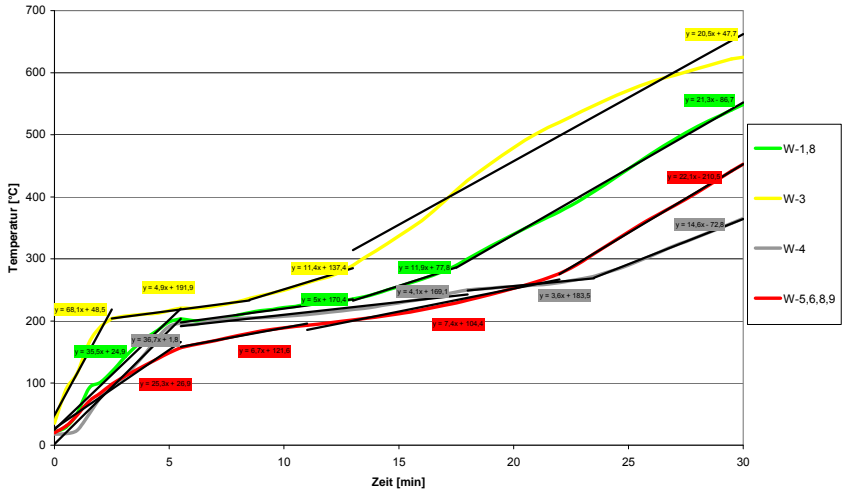


Bild 69: Darstellung der Temperaturentwicklung (Wandelement 1) nach Phasen in zusammengefassten Gruppen

Bei allen Kurven lassen sich vier Phasen erkennen. In der ersten Phase tritt die größte Steigung bei der Kurve W-3 auf. Diese liegt mit 68 K pro Minute vergleichsweise hoch. Die Steigungen der Kurven W-1,8 und W-4 sind mit 36 K/min bzw. 37 K/min ähnlich und im Vergleich zur Kurve W-3 deutlich geringer. Die geringste Steigung weist die Kurve W-5,6,8,9 auf. Dies Verhalten ist auf die Anordnung der Thermoelemente zurückzuführen. Das Thermoelement W-3 liegt im direkten Wirkungsbereich der Brennerflammen. Dementsprechend liegen hier die höchsten Temperaturen vor und in der zeitlichen Auflösung erreichen werden diese Temperaturen auch früher erreicht.

In der Phase 2 liegen die Steigungen der Mittelwerte bei 4,1 K/min (W-4) und 4,9 K/min (W-3) bzw. 5,0 K/min (W-1,8). Lediglich die Thermoelemente der Gruppe W-5,6,8,9 erreichen etwas höhere Steigungen mit 6,7 K/min. In der dritten Phase wird die Steigung bei zwei Kurven signifikant größer. Bei den Kurven W-3 und W-1,8 kommt es zu mehr als einer Verdopplung der Steigung mit 11 K/min (W-3) bzw. 12 K/min (W-1,8). Offensichtlich bildet sich zu diesem Zeitpunkt kein Material mehr nach und alle endergonischen Mechanismen sind vermutlich aufgebraucht. Bei der Kurve W-5,6,8,9 ist auch ein Anstieg zu verzeichnen, allerdings fällt dieser sehr moderat aus. Die Steigung verändert sich von 6,7 K/min auf 7,4 K/min. Bei der Kurve W-4 sinkt die Steigung sogar leicht auf 3,6 K/min.

In der letzten Phase kommt es zu einem Anstieg der Temperaturzunahme auf 21 K/min (W-3 und W-1,8) bzw. 22 K/min (W-5,6,8,9). Nur bei der Kurve W-4 liegt eine deutlich geringere Steigung mit 15 K/min vor.

Wie oben andiskutiert, ist die Ursache für das unterschiedliche Verhalten die räumliche Anordnung der Thermoelemente. Das Thermoelement W-4 liegt am tiefsten Punkt im Ofen. Hier wird die ETK-Belastung deutlich unterschritten. Die Thermoelemente W-3 und W-1,8 liegen hingegen im Brennernahbereich. Hier liegt eine deutlich höhere Belastung durch Temperaturen und durch heiße Gasströmungen vor. Die Kurve W-3 erreicht daher erwartungsgemäß auch die höchsten absoluten Temperaturen. Die gemessenen Werte für die Steigungen sind bei allen Kurven ähnlich und im Wesentlichen nur auf der Zeitachse verschoben. Die Kurve W-3 erreicht die Maximalwerte der jeweiligen Phasen etwa 3 Minuten früher.

In der Analyse der Versuche zeigt sich, dass die lokalen Temperaturverhältnisse im Nahbereich des Probekörpers einen erheblichen Einfluss auf die gemessenen Temperaturwerte haben. Dies wurde bereits bei den Beistellversuchen näher diskutiert. Im Vergleich zu den Beistellversuchen zeigt sich, dass die Steigungen in der Phase 2 um etwa 2 K/min größer sind. Dies ist zum einen auf die bereits angesprochenen lokalen Temperaturen zurückzuführen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Schutzschichten teilweise im direkten Wirkungsbereich der Ölbrenner des Ofens liegen. Die hier entstehenden Strömungen stellen eine erhebliche Zusatzbelastung der Schutzschichten dar und dürften zu einem erhöhten Abtrag führen. Aus dieser Vermutung lässt sich die verkürzte Zeitdauer der Phase 2 erklären. Ein Ansatz könnte eine Erhöhung der Standfestigkeit durch keramisierende Mechanismen sein. In der Gesamtbeurteilung erreicht die Formulierung bei einem Bauteilversuch nicht die aus den Beistellversuchen erwartete Leistung.

Eine Diskussion der Ergebnisse des ungeschützten Wandbauteils wird nicht geführt. Der Versuch diene vorrangig dazu, den Einfluss einer Mineralwolldämmung im Vergleich zu einer Cellulosedämmung zu untersuchen, was aber nicht Gegenstand dieser Arbeit war. Als wichtiger Beleg für die Leistungsfähigkeit der Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen dient nur die frühe Entzündung der ungeschützten OSB- Platte.

Bei der Beurteilung der Temperaturentwicklung des Deckenbauteils ist zu beachten, dass keine Thermoelemente direkt auf der brandseitigen Holzoberfläche befestigt waren. Der Entzündungszeitpunkt der gelochten Akustikplatte kann daher nur auf Grund der Versuchsbeobachtung festgelegt werden. Die Entzündung des Deckenbauteils war demnach in der 28. Minute zu beobachten. Die gelochte Platte des Deckenbauteils war nach Versuche allerdings verkohlt, während die FJI- Träger jedoch nahezu unversehrt waren. Die Werte der Thermoelemente an den Trägern sowie an der äußeren OSB- Platte blieben jederzeit deutlich

unter 270 °C (Bild 70). Der Raumabschluss und die Tragfähigkeit (Materialprüfung nach Versuchende) blieben erhalten. Die Feuerwiderstandsdauer F 30 wurde somit erreicht.

Der Versuch zeigte, dass die Beschichtung in der Lage ist Löcher und Risse von 10 mm Breite im Brandfall sicher zu verschließen. Der beobachtete Entzündungszeitpunkt in der 28. Minute zeigt, dass die grundsätzliche Leistungsfähigkeit der Beschichtung gegeben ist.

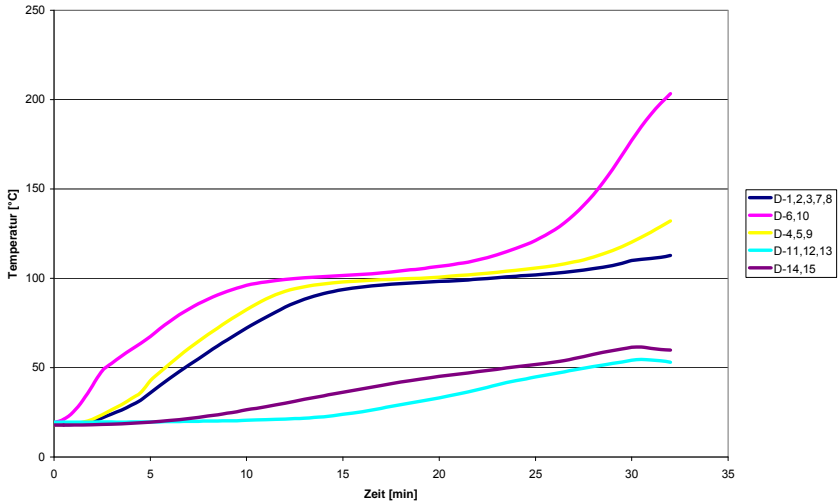


Bild 70: Temperaturentwicklung an den inneren FJI- Trägern und der rückseitigen OSB-Platte

Die Temperaturentwicklung an den Messstellen der Holzterasse ist Bild 71 zu entnehmen. Eine Überschreitung des Temperaturkriteriums von 270 °C ist bei den ersten beiden Thermoelementen bereits in der 8. Minute zu beobachten. Die Auswertung ergab, dass sich diese beiden Thermoelemente am oberen Handlauf auf der den Brennern zugewandten Seite befanden. Dies lässt vermuten, dass die erhöhte Wärmestrahlung in diesem Bereich für das frühzeitige Versagen verantwortlich war. Außerdem ist in diesem Bereich eine hohe Strömungsgeschwindigkeit von Heißgasen vorhanden. Diese Strömungen belasten die Schutzschicht in einem hohen Maße, so dass es zum Abtrag des sich bildenden Schutzschlums kommt. Dies konnte zum Teil auch beobachtet werden.

Die weiteren Thermoelemente im oberen Teil des Ofens im Heißgasbereich überschritten ebenfalls frühzeitig die 270 °C-Grenze. Die Thermoelemente in geschützten Bereichen, die nicht direkt dem Heißgasstrom ausgesetzt waren, blieben dagegen bis zur 26. Minute unterhalb der kritischen Temperatur von 270 °C. Die Temperaturen innerhalb der Treppenbauteile,

wie in der Grenzfläche Geländer-Stufe, blieben ebenfalls unterhalb dieses Grenzwertes. Auch dieser Versuch zeigt, dass lokale Effekte einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben.

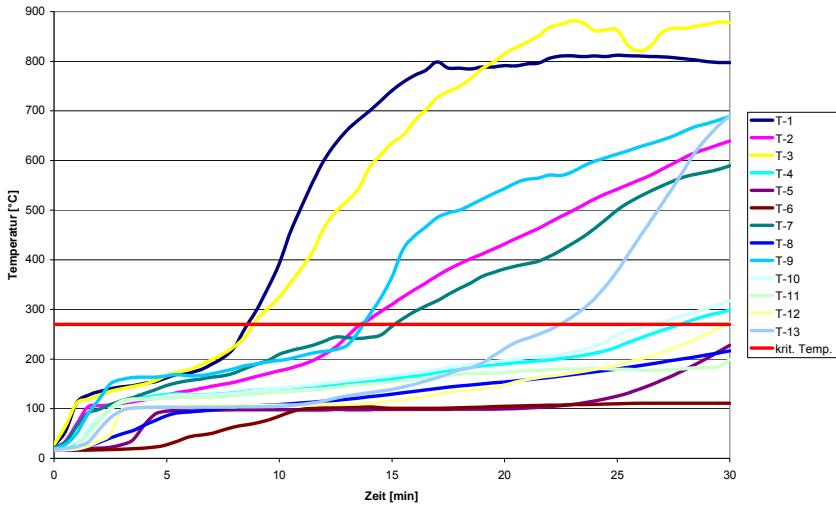


Bild 71: Temperaturen an der Oberfläche der Treppe

Trotz der teilweise frühen Entzündung war die Treppe in der Lage, ihre Tragfähigkeit über 30 Minuten zu behalten. Die Auswertungen haben allerdings ergeben, dass der Handlauf zu Versuchende verbrannt war. Es ist daher zu vermuten, dass die Stufen durch die Einspannung in der Porenbetonwand tragfähig blieben. Da es sich im Brandversuch um eine verkürzte Stufenbreite handelte, wäre auf Grund des größeren Hebelarms bei normaler Stufenbreite ein frühzeitiges Versagen nicht auszuschließen.

Aus den bislang diskutierten Ergebnissen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Leistungsfähigkeit der Formulierung ist bei den Bauteilprüfungen um ca. 50 % niedriger, als aufgrund der Vorversuche erwartet wurde.
- Lokale Effekte haben einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis.
- Filigrane, dreidimensionale Konstruktionen verhalten sich kritischer als flächige Bauteile.
- Strömungseinflüsse durch die Ölbrenner im Brandprüfraum verfälschen das Ergebnis.

- Ein geeignetes Prüfverfahren ist notwendig, um zu reproduzierbaren Ergebnissen zu kommen.

7.3.2 Untersuchungen an Akustikwand und feuerhemmender Treppe

In diesem Versuch wurde eine Akustikwand und als freistehendes Element eine Treppe untersucht (Bild 72). Das Wandbauteil bestand aus einer Rahmenkonstruktion mit FJI- Trägern, die mit einer gelochten Akustikplatte bekleidet war. Als Dämmung wurde Mineralwolle eingesetzt. Das Bauteil entsprach in seinem Aufbau dem Deckenbauteil aus dem Bauteilversuch 1. Die beflamnte Seite der Akustikplatte wurde in einer Beschichtungsstärke von 2 mm mit dem System S 11 beschichtet.

Als freistehendes Element wurde wiederum eine Treppe mit drei Stufen und Handlauf eingebaut. Die Treppe wurde in der Konstruktion so ausgelegt, dass sie auch ohne Schutz die Feuerwiderstandsklasse F 30 erreichen sollte. Die Treppe verfügte gegenüber der Standardtreppe aus Versuch 1 über brandschutztechnisch ertüchtigte Verbindungsdetails und stärkere Bauteilabmessungen. So wurden die Stahlaufhängungen der Treppenstufen mit Holzröhren eingehüllt. Die seitliche Montage erfolgte wiederum an einer Porenbetonwand. Mit dem Versuch wurde das Ziel verfolgt, den Feuerwiderstand zu verbessern und vorzugsweise die Klasse F 60 zu erreichen. Um die Tragfähigkeit der Treppe nach DIN 4102 Teil 2 unter Belastung zu prüfen wurden die Treppenstufen mit Gewichten von jeweils 100 kg belastet. Als Brandschutzbeschichtung wurde die transparente Formulierung S 12 mit einer Beschichtungsstärke von 1 mm aufgetragen. Auf den Einbau eines Deckenbauteils wurde verzichtet und der Ofen stattdessen mit einer Porenbetonplatte geschlossen.



Bild 72: Anordnung der Akustikwand und der Treppe im Brandofen

Der Brandversuch wurde nach 60 Minuten beendet. Die Brandraumtemperaturen sind in Bild 73 dargestellt. Eine Analyse der Daten zeigt zum einen die Temperaturschichtung im Ofen. In Teilbereichen kommt es zu einer Überschreitung der ETK um bis zu 200 °C. Weiterhin wurde zwischen der 20. und der 25. Minute eine Temperaturerhöhung beobachtet. Dies deutet auf zusätzliche Energiefreisetzung, verursacht durch brennende Materialien, hin. Im Versuch wurde schon in der 1. Minute ein Aufschäumen an der Decke beobachtet. In der 20. Minute fiel dieser Schaum teilweise auf großer Fläche ab, die Dämmschichtdicke betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 15 cm. Drei Minuten später war zu beobachten, dass sich die Dämmschicht geringfügig nachbildete.

In der 58. Minute ging der Raumabschluss des Wandbauteils mit der Akustikplatte verloren. Um ein Durchschlagen der Flammen zu verhindern, wurde die Öffnung mittels einer Feuer-schutzplatte abgedichtet.

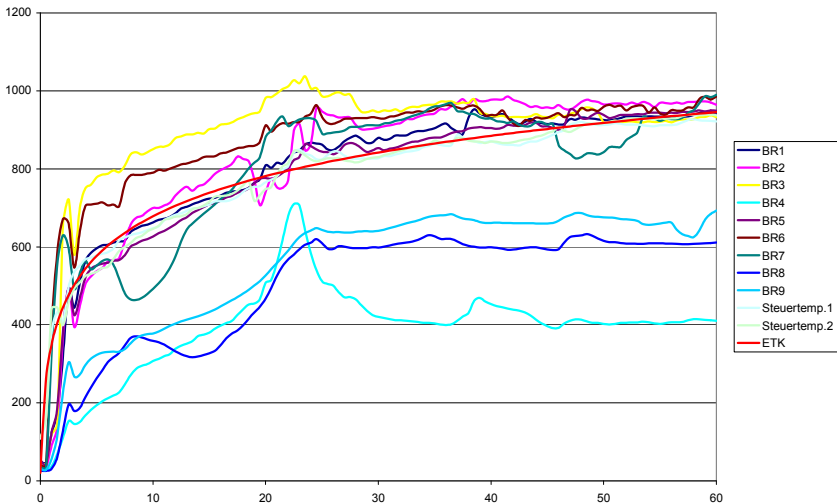


Bild 73: Temperaturentwicklung im Brandraum

In den ersten 35 Minuten des Versuches lagen die Temperaturen des Wandelements mit der gelochten Akustikplatte unterhalb von 200 °C. Ab diesem Zeitpunkt ist ein sehr rascher Temperaturanstieg einiger Thermoelemente auf bis zu 900 °C zu beobachten (Bild 74). Diese Entwicklung ist auf einen zumindest teilweisen Verlust der Akustikplatte zurückzuführen, da die betreffenden Thermoelemente direkt auf der Rückseite der Platte angeordnet waren. Ab der 50. Minute messen alle Thermoelemente eine Temperatur von ca. 900 °C. Ein signifikan-

ter Unterschied zwischen den Thermoelemente, die direkt über einem Loch angebracht waren, und denen hinter den Stegen konnte nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse korrelieren gut mit den Ergebnissen der Akustikdecke aus dem Bauteilversuch 1. So bestätigt sich, dass die Beschichtung in der Lage ist, Löcher bzw. Spalte bis 10 mm zu überbrücken. Eine Schädigung der eigentlichen Tragstruktur findet bei dieser Wand erst nach mehr als 30 Minuten statt. Auch bei der Decke wurden nahezu keine Schäden der Träger beobachtet. Nach den Versuchsergebnissen wird vermutet, dass die Entzündung der Akustikplatte etwa nach 23 Minuten erfolgt ist. Dies basiert auf dem erwarteten Abbrand von etwa 0,7 mm/min und dem signifikanten Temperaturanstieg nach etwa 35 Minuten. Innerhalb von 12 Minuten würde der Abbrand etwa 8,4 mm bei einer Plattendicke von 1,0 cm betragen. Außerdem korrespondiert der Zeitpunkt auch gut mit dem im Brandraum festgestellten zusätzlichen Energieeintrag.

Der Raumabschluss blieb bei diesem Wandelement nicht erhalten und ging auf Grund des Durchschlagens von Flammen in der 58. Minute verloren.

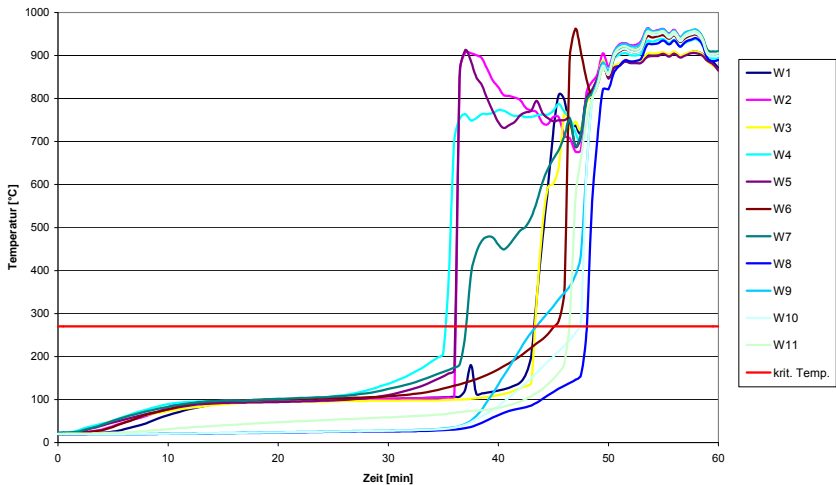


Bild 74: Temperaturen des Akustik-Wandelements

Die Ergebnisse bestätigen insoweit die Ergebnisse aus Versuch 1. Eine Verdopplung der Schichtstärke führt hier zu einem Zuwachs an Brandschutzleistung um den Faktor 1,75. Dieser Wert erscheint im Vergleich zu den Beistellversuchen deutlich zu hoch (Bild 38). Bei den Beistellversuchen ist bei einer Verdopplung der Schichtstärke von 1,0 auf 2,0 mm ein Faktor von ca. 1,45 ermittelt worden.

Die in diesem Versuch ermittelte Leistungsfähigkeit erreicht lediglich ca. 65 % der aus den Vorversuchen zu erwartenden Leistungsfähigkeit. Es werden die gleichen Ursachen, wie unter Versuch 1 bereits diskutiert, vermutet.

Bei der Treppe ist eine Verletzung des 270 °C-Kriteriums an einem Thermoelement bereits in der 15. Minute zu beobachten (Bild 75). 5 Minuten später folgt das zweite Thermoelement. Mit einer 1 mm dicken Schicht wurde bei den Beistellversuchen die kritische Temperatur nach etwa 24 Minuten erreicht. Im Vergleich zu diesen Versuchen liegt die Leistungsfähigkeit wiederum bei etwa 65 %.

Diese beiden Thermoelemente befinden sich allerdings am oberen Handlauf in der Nähe der Brennerflammen. Auch hier liegt die Vermutung nahe, dass durch die extreme Temperaturbelastung und den hohen Heißgasstrom die Schutzschicht erheblich geschwächt wurde. Ein Vergleich mit den Beistellversuchen ist daher nur eingeschränkt möglich.

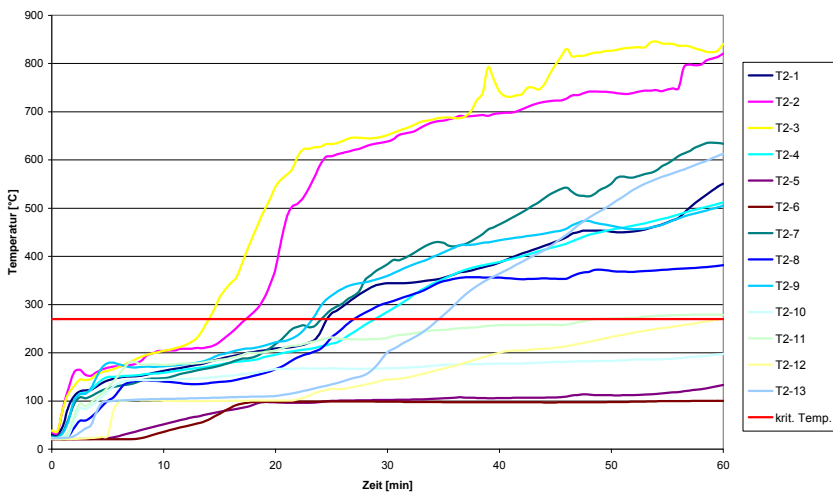


Bild 75: Temperaturen an der Oberfläche der Treppe

Die Standsicherheit der Treppe blieb 60 Minuten erhalten. Nach Versuche wurde auch bei diesem Versuch festgestellt, dass der Handlauf der Treppe verbrannt ist und die Tragfähigkeit nur über die Einspannung der Stufen in der Wand erhalten blieb. Fünf Minuten nach Versuche trat das Versagen der Treppe ein.

Aus dem Versuch lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Leistungsfähigkeit lag bei diesem Versuch bei etwa 65 % der Leistungsfähigkeit aus den Beistellversuchen.
- Die lokalen Effekte haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Versuchsergebnis.
- Das Ziel einer Tragfähigkeit der Treppe bei Brandbeanspruchung über 60 Minuten wurde erreicht.

7.3.3 Untersuchungen an Festverglasung, Fachwerkwand und verstärkter Treppe

In diesem Versuch wurden zwei Wandelemente sowie als freistehendes Element eine Treppe untersucht.

Das erste Wandbauteil war ein Holzrahmenelement mit einer F 30 Feuerschutzverglasung. Der Aufbau des Probekörpers war identisch mit dem des ersten Bauteilversuches. Die Thermolemente zur Ermittlung der Oberflächentemperatur wurden auch hier auf der innen liegenden Seite unter der Beschichtung bzw. zwei der Elemente unter der Falzleiste angebracht. Ebenso wurden auf der Rückseite des Probekörpers Thermolemente angebracht. Das zu untersuchende Beschichtungssystem war wiederum die Formulierung S 11 in einer Trockenschichtdicke von 1,5 mm.

Das zweite Wandelement war ein offener Fachwerkrahmen, der über Stahlknoten miteinander verbunden wurde. Um den Raumabschluss im Ofen zu erhalten, wurde die Rückseite des Bauteils mit einer Feuerschutzplatte bekleidet. Die Thermolemente wurden an den Verbindungen zwischen Holz und Stahlknoten sowie an der Oberfläche der Balken unter der Beschichtung angebracht. Sowohl das Fachwerk als auch die freiliegenden Stahlknoten wurden mit dem Beschichtungssystem S 11 in 1,0 mm Dicke beschichtet. Bild 76 zeigt eine Ansicht des Bauteils im eingebauten Zustand.

In die Feuerschutzplatte wurde ein Sichtfenster eingebaut, um eine Beobachtung des freistehenden Elementes über die Versuchsdauer zu ermöglichen.



Bild 76: Ansicht Fachwerkrahmen

Als freistehendes Element wurde eine verstärkte Standardtreppe eingebaut. Es handelte sich hierbei um den prinzipiell gleichen Aufbau wie aus dem ersten Versuch. Allerdings wurden die Bauteilabmessungen verstärkt. Die aufwändigen und kostenintensiven Details zum Schutz der Verbindungen der F 30-Treppe aus Versuch zwei entfielen jedoch. Auch in diesem Versuch wurde die Treppe belastet geprüft. Zur Anwendung kam wieder das transparente Beschichtungssystem S 12 mit 0,6 mm Stärke.

Der Brandversuch wurde nach 30 Minuten beendet. Die Temperatur im Ofen lag zu diesem Zeitpunkt bei bis zu 900 °C (Bild 77). Die Daten zeigen wiederum die Temperaturschichtung im Ofen. In der Anfangsphase des Versuches kommt es im oberen Bereich zu einer Überschreitung der ETK um bis zu 200 °C. Im unteren Bereich hingegen wird die Temperatur um bis zu 250 °C unterschritten (Bild 77).

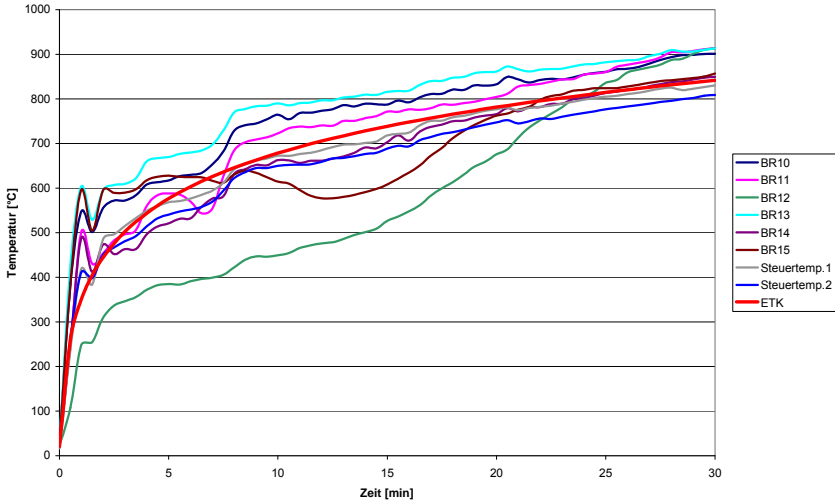


Bild 77: Temperaturentwicklung im Brandraum

Etwa in der 8. Minuten kommt es an einigen Thermoelementen zu einem signifikanten Anstieg der Temperatur. Dies deutet auf zusätzliche Energiefreisetzung im Nahbereich dieser Thermoelemente hin, die vermutlich durch ein Entzünden von Teilen der Bauelemente verursacht wurde. Dies korrespondiert mit den Versuchsbeobachtungen. Etwa in der 8. Minute wurde nämlich wiederum ein Entzünden des Handlaufs der Treppe beobachtet.

Bei den Thermoelementen des Wandbauteils mit der Feuerschutzverglasung wurde die Entzündungstemperatur von Holz in der Grenzschicht Beschichtung - Holz zwischen der 17. und der 27. Minute überschritten. Zuerst überschritten die Thermoelemente auf Höhe des Flammenkegels diese Temperatur. Lediglich die beiden Thermoelemente W10 und W11 unter der Falzleiste lagen zu Versuchsende deutlich unter dem Entzündungsbereich bei ca. 170 °C. (Bild 78)

Der Raumabschluss blieb bei der Wand über 30 Minuten erhalten. Die Untersuchungen des Probekörpers nach dem Brandversuch ergaben eine Pyrolysetiefe von 15 - 20 mm. Im Bereich des Flammenkegels betrug die Pyrolysetiefe 25 - 35 mm.

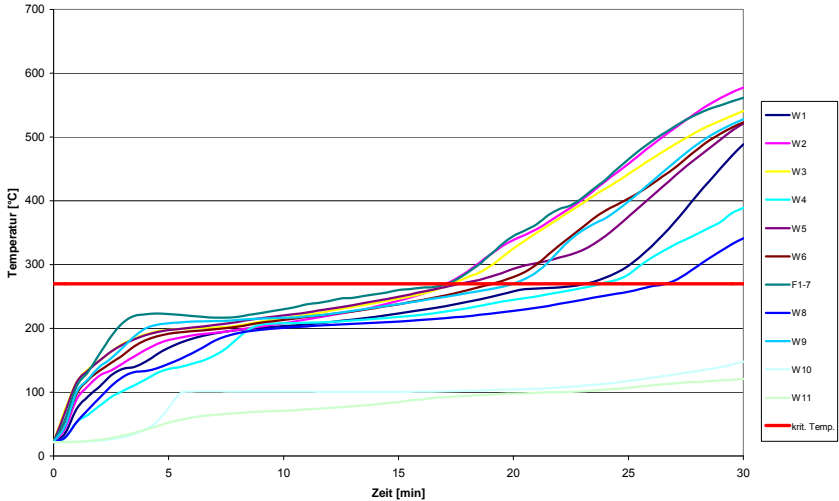


Bild 78: Temperaturen an der Oberfläche des ersten Wandbauteils

Im Vergleich zu den Beistellversuchen liegt die Brandschutzleistung bei diesem Versuch bei etwa 61 %. Dies bestätigt die in den vorangegangenen Versuchen ermittelten Werte.

Beim Fachwerkrahmen wurde das Temperaturkriterium von 270 °C an sieben Thermoelementen in der 20. bis 25. Minute überschritten. Diese befanden sich auf dem mittleren Riegel in Höhe des Brennerkegels. Die restlichen dreizehn Thermoelemente lagen unterhalb dieser Grenze (Bild 79). Dies waren der obere und untere Riegel sowie die Messstelle 11, die in der Grenzfläche Holz-Stahlknoten angebracht war. An den innen liegenden Ankern stieg die Temperatur auf 78 °C. An den Stahlknoten wurden auch sehr geringe Temperaturen gemessen, was einerseits auf die Beschichtung und andererseits auf die günstige Position im Brandofen zurückzuführen war. Im Vergleich zu den Beistellversuchen wird eine Leistungsfähigkeit von etwa 85 % erreicht.

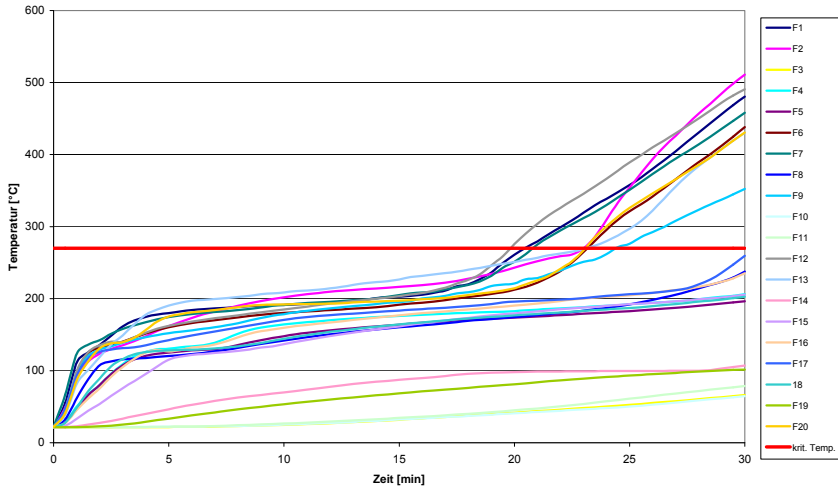


Bild 79: Temperaturen an der Oberfläche des Fachwerkrahmens

Bild 80 zeigt den Probekörper kurz nach Beendigung des Brandversuchs. Es ist zu erkennen, dass die Beschichtung gleichmäßig, auch auf den Eckverbindungen aus Stahl, aufgeschäumt ist.



Bild 80: Fachwerkrahmen nach 30-minütiger Beflammung

Bei der Treppe wurde beobachtet, dass sich bereits in der ersten Minute am Handlauf Schaum entwickelte, der jedoch sofort vom Heißgasstrom im Brandofen abgetragen wurde. Diese frühe Reaktion zeigt auch, dass an dieser Stelle die höchsten Temperaturen vorherrschten. In den folgenden Minuten löste sich neugebildeter Schaum am Handlauf immer

wieder ab. Dies wurde etwa bis zur 8. Minute beobachtet. Zu diesem Zeitpunkt wurde die schützende Dämmschicht an einer Stelle vollständig abgetragen. Zwangsläufig erfolgte eine Entzündung des Handlaufs an dieser Stelle. Nach 15 Minuten brannten die vordersten 20 cm des Handlaufs. Auf der dem Brenner abgewandten Seite wurden keine Schäden in der Schutzschicht beobachtet. Die Versuchsbeobachtungen bestätigen die Vermutungen der ersten Versuche. Damit kann auch erklärt werden, warum es am Handlauf zu den starken Schädigungen kommt.

Der Temperaturverlauf der einzelnen Thermoelemente in Bild 81 zeigt, dass der Grenzwert von 270 °C an der Treppe ab der 23. Minute überschritten wurde. Die Thermoelemente T3-1, T3-2 und T3-7 gehören zum im Heißgasstrom stehenden Handlauf und überschritten diese Temperaturgrenze bereits ab der 14. Minute. Bei der Beurteilung dieser Werte ist zu beachten, dass eine vergleichsweise dünne Beschichtung von 0,6 mm gewählt wurde. Ausgehend von den Vorversuchen sollte der Entzündungsschutz bei diesem Versuch eine Größenordnung von etwa 15 Minuten erreichen. Dies wurde abgesehen von dem Handlauf in etwa erreicht.

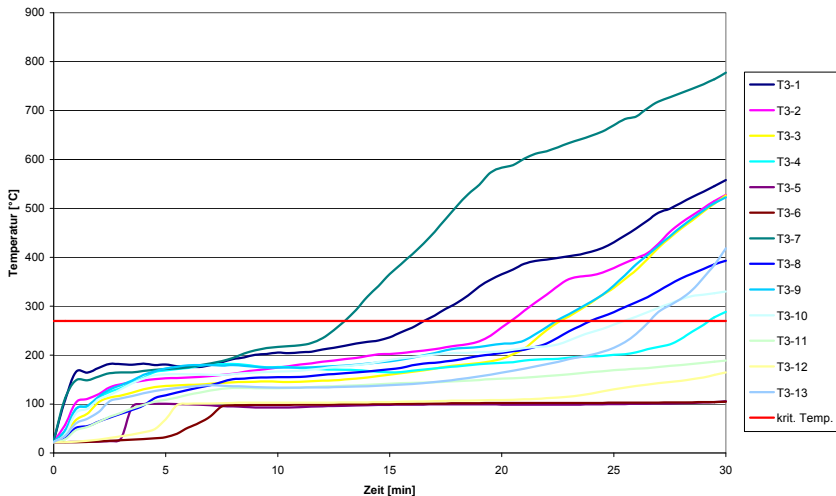


Bild 81: Temperaturen an der Oberfläche der Treppe

Die Standsicherheit der Treppe blieb über die Versuchsdauer erhalten. Der Handlauf wurde aufgrund der Schädigungen allerdings stark in seiner Tragfähigkeit beeinträchtigt.

Aus den Versuchsergebnissen können die folgenden Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die Belastung des Handlaufs der Treppen stellt eine Sondersituation dar, die das Versuchsergebnis negativ beeinflusst.
- Selbst durch ein vergleichsweise dünnes System kann die Tragfähigkeit einer Treppe in Verbindung mit konstruktiven Maßnahmen auf 30 Minuten erhöht werden.
- Massivere Elemente zeigen bessere Ergebnisse als eher filigrane Bauteile.
- Der Schutz von Stahlknoten ist ebenfalls durch Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen möglich.

7.3.4 Entzündungsschutz eines Brettsperrholzwandelements

Aufgrund der Erfahrungen aus den durchgeführten Bauteilversuchen wurde entschieden, im vierten Versuch die Belegungsdichte des Ofens deutlich zu reduzieren. Damit sollte sichergestellt werden, dass keine gegenseitigen Beeinflussungen auftreten. Außerdem wurde in die zweite Wandöffnung ein Beobachtungsfenster eingebaut, um eine Möglichkeit zur Beobachtung der Probekörper zu erhalten. In diesem Versuch wurde daher lediglich ein Wandelement untersucht.

Das Wandelement bestand aus einem 81 mm dicken Vollholzelement aus kreuzweise verleimten Fichtenholzlamellen und hatte eine Größe von 70 cm x 100 cm. In der Grenzfläche von Holz und Beschichtung wurden insgesamt 6 Thermoelemente angebracht, um die Entwicklung der Oberflächentemperatur über die Zeit aufzunehmen. Als Beschichtung wurde die Formulierung S 11 in einer Dicke von 3 mm aufgetragen. Derartige Beschichtungsstärken sind von Stahlbrandschutzbeschichtungen bekannt. Im Bereich der Holzbeschichtungen sind sie eher ungewöhnlich. Eine Anwendung kommt nur als deckende Beschichtung in Frage, so dass der Betrachter die Dicke der Beschichtung nicht wahrnimmt.

Der Versuch wurde nach 40 Minuten gestoppt. Die Temperaturen im Brandraum betragen zu diesem Zeitpunkt mehr als 900 °C (Bild 82). Die Auswertung der Thermoelemente im Brandraum zeigt bis auf eine Temperaturüberschreitung in den ersten fünf Minuten keine Auffälligkeiten. Bei diesem Versuch stimmten die Brandraumtemperaturen ab der 5. Minute nahezu exakt mit dem Sollwert der ETK überein.

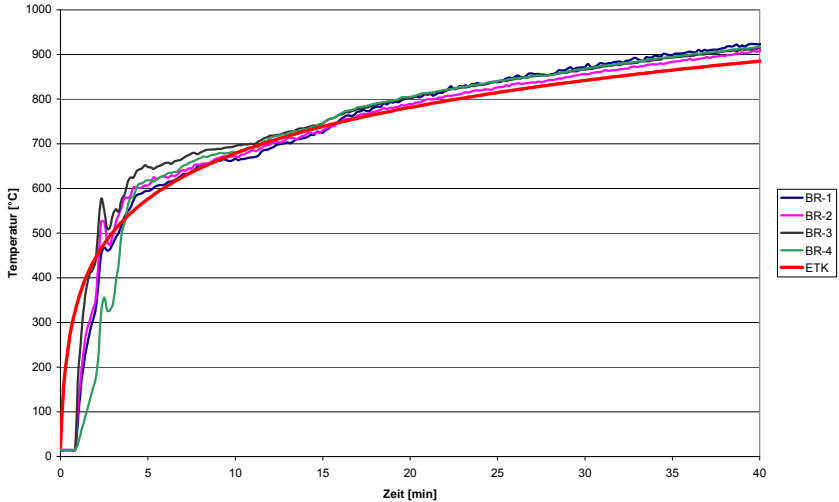


Bild 82: Temperaturentwicklung im Brandraum

Beim Wandbauteil begann die Beschichtung nach etwa 2 Minuten vollflächig aufzuschäumen und eine Schutzschicht auf dem Holz auszubilden. Die maximale Dicke der aufgeschäumten Schicht betrug geschätzte 15 cm. Etwa in der 20. Versuchsminute wurde ein Glühen in der Fuge Wandbauteil – Ofen erkennbar. Etwa 5 Minuten später wurden erste Flammen in der Nähe der Fuge beobachtet, die sich langsam ausbreiteten. Bei zwei Thermoelementen des Wandbauteils wurde in der 36. und 37. Minute eine Überschreitung der definierten Entzündungstemperatur von 270 °C festgestellt (Bild 83). Zwei weitere Thermoelemente lagen zu Versuchsbeginn etwa im Entzündungsbereich von ca. 270 °C, die beiden anderen Thermoelemente lagen deutlich darunter.

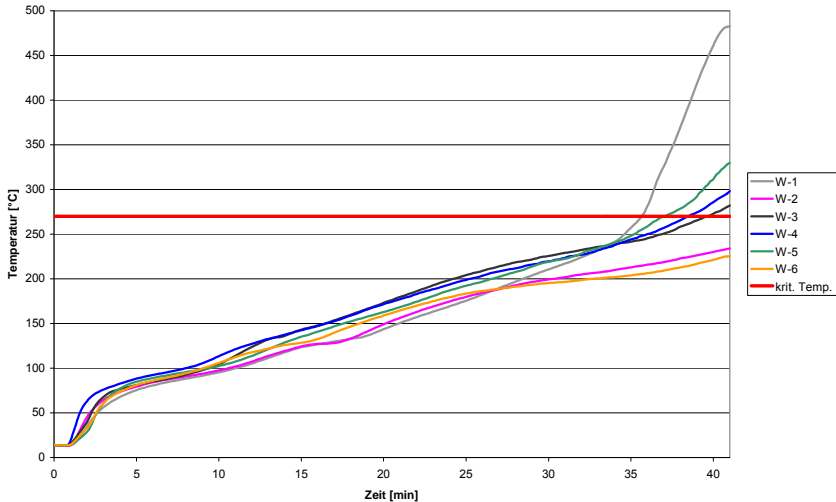


Bild 83: Grenzschichttemperatur auf der Holzoberfläche des Wandbauteils

Nach Entnahme des Probekörpers aus dem Brandofen und Entfernen der Schutzschicht war teilweise noch nicht reagiertes Beschichtungsmaterial auf der Holzoberfläche vorhanden. Bild 84 zeigt den Probekörper nach dem Brandversuch. Mittels eines Flächenschleifautomaten wurden 0,2 mm von der Holzoberfläche abgeschliffen. Gut zu erkennen ist, dass die mittigen Bereiche des Probekörpers nahezu keine Pyrolyse aufweisen. Lediglich in den Randbereichen ist die Pyrolyse stärker ausgeprägt und erreicht eine Tiefe von ca. 5 mm. Dies stimmt mit den Versuchbeobachtungen und dem Verlauf der Temperaturmessungen überein.



Bild 84: Oberfläche der geprüften Wand nach dem Entfernen der Schutzschicht

Auch bei diesem Versuch zeigte sich eine geringere Brandschutzleistung, als durch die Vorversuche mittels Beistellproben zu erwarten gewesen wäre. Die erwartete Brandschutzleistung sollte ca. 45 Minuten betragen.

Hierfür sind verschiedene Ursachen verantwortlich. Die Pyrolyse in den Randbereichen wurde offensichtlich durch Randeffekte hervorgerufen. Als Ursachen werden ein zusätzlicher Temperatureintrag in das Bauteil durch die anschließenden massiven Ofenwände oder ein nicht ausreichend geschützter Eckbereich des Bauteils vermutet. Für weitere Brandversuche ist auf eine ausreichend dimensionierte thermische Isolierung des Holzbauteils von den Ofenwänden zu achten.

Ein weiterer Einfluss sind die auf das System wirkenden mechanischen Beanspruchungen durch Eigengewicht und Biegung aufgrund von Exzentrizität, die wesentlich von den geometrischen Abmessungen des Wandbauteils und der Schutzschichtdicke der Beschichtung bestimmt werden. Bei den vergleichsweise kleinen Beistellproben können diese Effekte nicht beobachtet werden. Hinzu kommt, dass eine Verflüssigung des Bindemittels notwendig ist, damit die Intumeszenzreaktionen ablaufen können. Diese verflüssigte Schicht wird nicht nur an der Oberfläche zum Start der Reaktionen erwartet, sondern sollte sich auch in Abhängigkeit der Temperaturfront immer wieder in tieferen Schichten bilden (Bild 85).

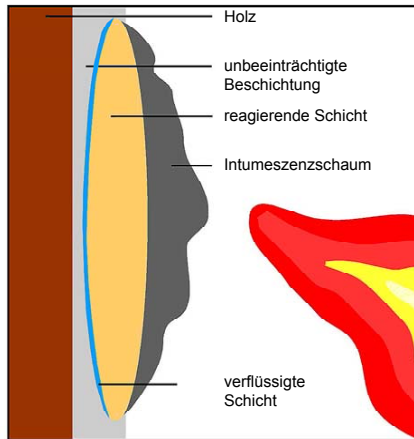


Bild 85: Erweitertes Schichtenmodell für Brandschutzbeschichtungen

Bei vergleichsweise großen Ausgangsschichtdicken werden auch entsprechende isolierende Schichten entstehen. Das bedeutet aber auch, dass der Temperatureintrag in die Polymerschicht immer stärker behindert wird. Dies wird zu einer immer stärker ausgeprägten verflüssigten Schicht führen, da die Folgereaktionen langsamer starten werden. Im Ergebnis führt dies zu einer Abnahme der Kräfte, die in dieser Schicht aufgenommen werden können. Daher besteht insbesondere bei dickeren Schichten die Gefahr eines Abrutschens bei Wandbauteilen bzw. eines Abfallens bei Deckenbauteilen (Bild 86). Solche Effekte konnten teilweise bei diesem Versuch beobachtet werden.

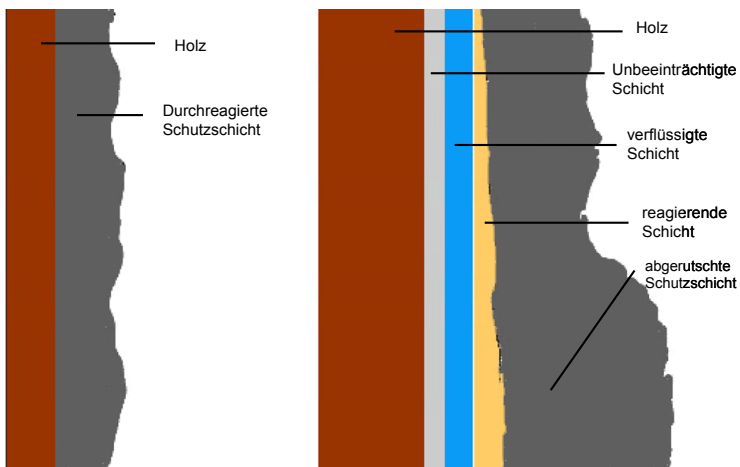


Bild 86: Modellhafter Vergleich einer dünneren Schutzschicht (links) mit einer dickeren Schutzschicht

Aus den Versuchbeobachtungen und Überlegungen können die folgenden Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Wärmebrücken z. B. über die Umfassungsbauteile des Ofens müssen vermieden werden.
- Eine Kapselung von bis zu 45 Minuten ist realisierbar, wenn eine Trockenschichtdicke von mehr als 3 mm vorgesehen wird.
- Die Trockenschichtdicke kann nicht beliebig erhöht werden, da ansonsten die Kräfte in der verflüssigten Schicht zu groß werden. Es droht ein Abrutschen/ Abfallen.
- Die elasto-mechanischen Eigenschaften der verflüssigten Schicht werden bei großen Schichtdicken maßgebend.

7.4 Systemeinfluss realer Konstruktionen

Die Untersuchungen an Innenbauteilen zeigten, dass ein erheblicher geometrischer Einfluss auf das elasto-mechanische Verhalten (Abrutschen) der Schichten vorliegt. Es wurde daher für notwendig erachtet, die Geometrien der Bauteile in einem weiteren Schritt zu vergrößern. Der Versuch diente einerseits als Beleg für die Leistung und andererseits zur Absicherung der geometrischen Abhängigkeiten. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für Weiterentwicklungen zur Stabilität der Schutzschichten, die unter Kapitel 9 diskutiert werden.

7.4.1 Versuchsaufbau

Der Großbrandversuch wurde am iBMB in einem Brandraum mit der Größe von 3,6 m x 3,6 m x 3,6 m durchgeführt. In dem Großbrandversuch wurden eine Buchentreppe, 2 Wandbauteile und zwei Deckenbauteile untersucht. Die Treppe stand während des Holzversuchs auf einem 1 m hohen Podest, die Wandbauteile wurden in eine gemauerte Zwischenwand eingesetzt, die Deckenbauteile lagen auf den Ofenwänden und der Zwischenwand auf. Beflammt wurde der Ofen über 4 im Boden sitzende Ölbrenner. Die Flammen erreichen eine Höhe bis ca. 75 cm. Der Rauchabzug erfolgte über eine Absaugung im Deckenbereich. Eine Skizze des Versuchsaufbaus zeigt Bild 87.

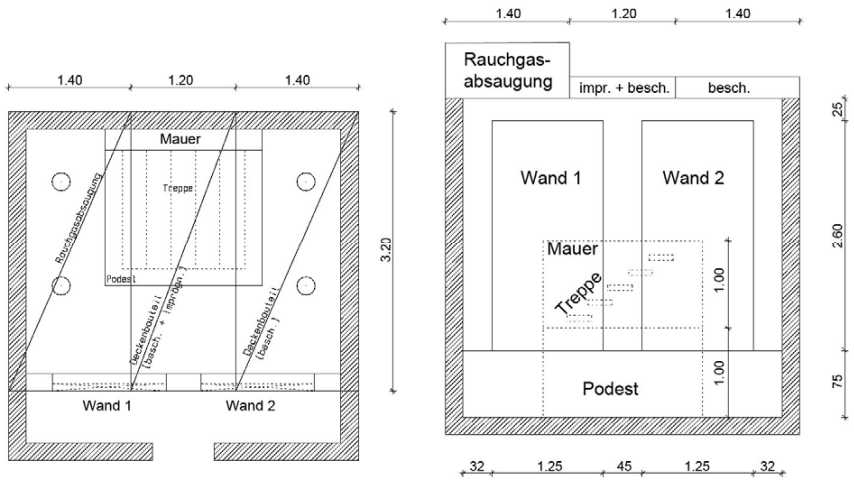


Bild 87: Versuchsaufbau bei Großbrandversuch

Die Bauteile wurden gemäß der ETK beflammt und hinsichtlich des Entzündungsschutzes der Beschichtung untersucht. Thermoelemente an den einzelnen Bauteilen geben Auskunft über die Oberflächentemperaturen. Die zu beschichtende Oberfläche betrug ca. 25 m². Um diese Größe bewältigen zu können, musste zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit den Beschichtungssystemen Lösemittel zugemischt werden. Die Wandelemente bestanden aus 81 mm dicken, kreuzweise verleimten Fichtenholzlamellen. Die Fläche eines Wandbauteils betrug 125 cm x 260 cm (Bild 88). Die Beschichtungsstärke betrug 1,5 mm.



Bild 88: Ansicht der Wandelemente

In der Grenzfläche zwischen Holzoberfläche und Beschichtung waren insgesamt 11 Thermo-elemente angebracht. In einem Wandbauteil wurden zusätzlich Thermo-elemente über die Bauteiltiefe zur Erstellung eines Temperaturprofils angeordnet. Die Elemente wurden in 2 cm, 4 cm und 6 cm Tiefe montiert.

Die zwei Deckenelemente entsprachen in ihrem Aufbau dem Deckenelement des Kleinbrandversuchs. Eine Konstruktionszeichnung des Deckenaufbaus zeigt Bild 89. Ein Kasten-element hatte eine Größe von 120 cm x 320 cm. Die beflamnte Unterseite bestand aus einer 21 mm dicken, gelochten Furnierschichtholzplatte. Die Löcher hatten einen Durchmesser von 10 mm. Auf der gelochten Platte lag eine Folie mit darüber liegender Mineralfaserdämmung. Die Tragwirkung der Deckenelemente wurde durch 3 FJI- Träger übernommen. Die Seiten-flächen des Kasten-elementes waren mit 10 mm dicken Gipskartonplatten verkleidet. Auf der Oberseite der Decke bildete eine OSB- Platte den Abschluss.

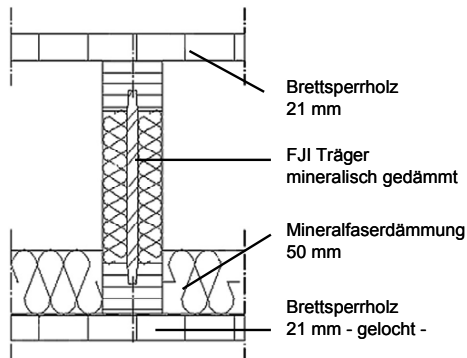


Bild 89: Aufbau der Deckenelemente des Großbrandversuchs

Die Beschichtungsdicke (Laborformulierung S 11) beträgt ca. 1,5 mm. Das zweite Deckenelement war in seinem Aufbau mit dem soeben beschriebenen identisch. Zusätzlich zur Beschichtung erhielt es jedoch eine Brandschutzimprägnierung, um die Auswirkung kühlender Prozesse zu untersuchen.

Je Deckenbauteil waren 48 Thermo-elemente angeschlossen. 26 der Thermo-elemente wurden auf der Rückseite der gelochten Platte angebracht, teilweise direkt oberhalb der Bohrungen. Die restlichen Thermo-elemente wurden an den FJI- Trägern sowie auf der Innenseite der OSB- Platte angeordnet.

Bild 90 zeigt das Treppenbauteil im Brandofen. Die Treppe aus Buchenholz wurde auf ein Podest gestellt, um eine größere Entfernung zu den Brennern herzustellen und den direkten

Einfluss der Wärmestrahlung etwas zu minimieren. Die fünf Treppenstufen hingen auf der einen Seite über Stahlstangen am Treppengeländer und waren auf der anderen Seite über Stahlstifte in einer Porenbetonwand verankert. Die Stahlstangen waren nicht durch eine Holzummantelung geschützt, da versucht werden sollte, mit Hilfe der Beschichtung ebenfalls die Stahlstangen zu schützen.

Es waren insgesamt 83 Thermoelemente an der Treppe in der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Holz sowie auf den Ober- und Unterseiten der Stufen und dem Geländer verteilt. Die Treppe wurde im Gegensatz zu den anderen Bauteilen mit dem transparenten Beschichtungssystem S 12 versehen. Die Beschichtungstärke betrug 0,8 mm. Die erste und die fünfte Stufe waren zusätzlich imprägniert.



Bild 90: Treppenbauteil im Großbrandraum

Die Treppe wurde unbelastet geprüft, da als weiterreichendes Ziel der Entzündungsschutz formuliert wurde.

7.4.2 Versuchsdurchführung

Die Probekörper wurden über 30 Minuten entsprechend der ETK beflammt. Bereits in der ersten Minute war ein Aufschäumen der Beschichtung zu erkennen. In der dritten Minute war das Geländer vollständig von dem Isolationsschaum geschützt. In der 6. Minuten waren alle Bauteile von einer gleichmäßigen Schutzschicht überdeckt. Nach etwa 15 Minuten entflammte die Decke. Die Flammen schlugen später auf die Wand über. Zu diesem Zeitpunkt war ein deutliches Glühen der zweiten und dritten Treppenstufe zu beobachten. Das Geländer glühte ebenfalls und war stellenweise entflammt. In der 18. Minuten entflammte auf Grund der Flammenwirkung der Decke der obere Teil eines Wandbauteils. Das zweite Wandelement

glühte ebenfalls sehr stark, ist zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht entflammt. Eine größere Stichflamme am Handlauf des Geländers war etwa eine Minute später zu beobachten. In der 22. Minute schlugen die Flammen auf die Treppenstufe über, diese brannte jedoch noch nicht. In der 23. Minute brannte auch die zweite Wand. Etwa drei Minuten später entflamte die 2. Stufe der Treppe. In der 28. Minute standen alle Bauteile in Flammen. In der 30. Minute wurde der Versuch beendet. Die Brandraumtemperatur betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 840 °C. Die Deckenbauteile wurden mit einem Kran abgenommen, um den Brandraum schnellstmöglich zu kühlen. Letzte Flammen wurden durch Wasser gelöscht.

7.4.3 Versuchsergebnisse

Bild 91 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur der Wandbauteile. Die definierte Entzündungstemperatur von 270 °C wurde von dem ersten Thermoelement bereits in der 18. Minute überschritten. Die sichtbare Entzündung fand etwa in der 22. Minute statt. Das letzte Thermoelement überschritt etwa in der 23. Minute das Temperaturkriterium. Die Schutzwirkung trat verspätet ein, zu erkennen daran, dass die Temperaturentwicklung erst bei ca. 160 °C deutlich abflacht. Aus den Kleinbrandversuchen wäre dieses Verhalten bereits bei ca. 120 °C zu erwarten gewesen.

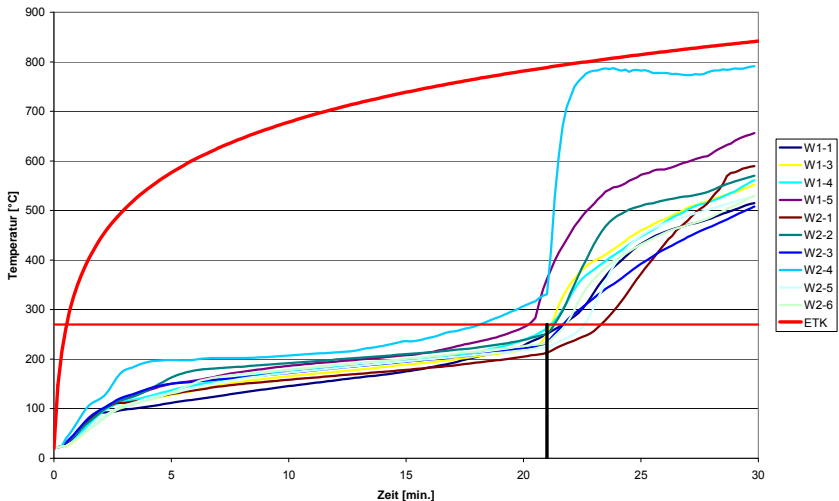


Bild 91: Grenzschichttemperaturen an der Oberfläche der Wandbauteile

Die erste Entzündung erfolgte nach etwa 22 Minuten. Dies ist im Vergleich zum Kleinbrandversuch eine Verschlechterung um ca. 5 Minuten. Eine Verbesserung des Entzündungsschutzes durch die Imprägnierung konnte überraschenderweise nicht festgestellt werden.

Die Temperaturentwicklung im Innern der beiden Deckenbauteile lässt sich in Bild 92 ablesen. Das zusätzlich imprägnierte Deckenelement ist blau gekennzeichnet, das nicht imprägnierte Bauteil wird durch die roten Linien symbolisiert. Die obere Schar der Thermoelemente liegt auf der Rückseite der Kerto Q. Die Thermoelemente mit den niedrigeren Temperaturen befinden sich tiefer im Bauteil. Aufgrund der großen Anzahl der Thermoelemente ist eine detaillierte Analyse von Bild 92 nicht möglich. Dennoch kann aus der Darstellung die zentrale Aussage abgeleitet werden, dass ein signifikanter Unterschied durch die Imprägnierung nicht erkennbar ist.

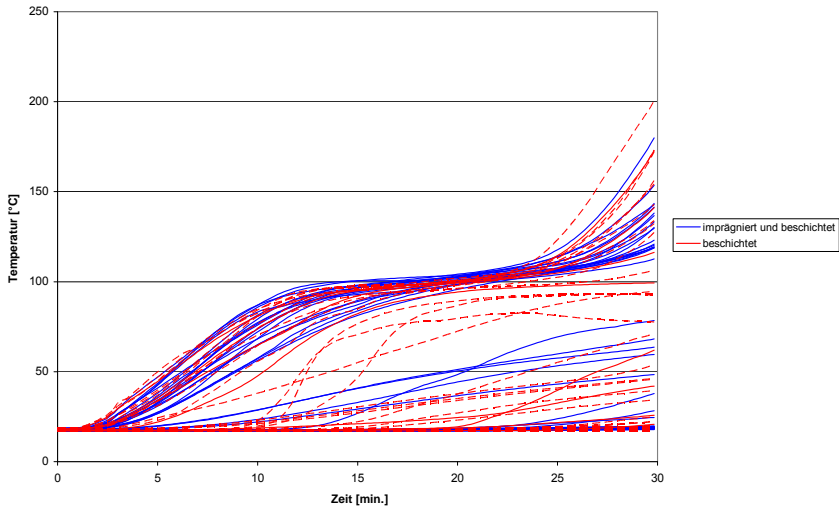


Bild 92: Temperaturen an der Oberfläche der Deckenbauteile

Bild 92 zeigt weiterhin, dass für die FJI- Träger keine Schädigungen zu erwarten sind. Die kritische Temperatur von 270 °C wird nicht überschritten. Dies belegen auch nachträglich durchgeführte Festigkeitsuntersuchungen der Träger (Tabelle 10).

Bild 93 zeigt die Unterseite des Deckenbauteils nach dem Brandversuch. Die hohe Schädigung der Unterseite ist unter anderem auch darauf zurückzuführen, dass der Probekörper auf Grund der hohen Brandraumtemperaturen erst spät gekühlt werden konnte und infolgedessen die Verbrennung und Verkohlung auch nach Ablauf der 30 Minuten fortschreiten konnte.



Bild 93: Ansicht des Deckenelements nach dem Brandversuch

Auf der Rückseite des Deckenelements sind nach 30 Minuten kaum Veränderungen gegenüber der Raumtemperatur gemessen worden.

Ein Schnitt durch das Bauteil zeigt in Bild 94, dass die gelochte Akustikplatte deutliche Pyrolyse aufweist. An den FJI- Trägern hingegen hat keine sichtbare thermische Zersetzung stattgefunden. An der Stelle, an der die Lochplatte komplett pyrolysiert ist, hat sich lediglich das Dämmmaterial etwas stärker verfärbt als an den übrigen Stellen.



Bild 94: Schnitt durch das Bauteil und Detail mittlerer I-Träger – Lochplatte

Das Deckenelement wurde an zwei Stellen durchgeschnitten. Aus zwei der drei Teilelemente wurde jeweils ein äußerer und ein mittlerer I-Träger ausgebaut (Bild 95). Gut zu erkennen ist, dass an den Trägern lediglich eine oberflächliche Verfärbung stattgefunden hat. Eine in die Tiefe gehende Pyrolyse liegt nicht vor.



Bild 95: Ausgebaute Abschnitte des mittleren und eines äußeren I-Trägers

Die Trägerabschnitte wurden anschließend in einem Drei - Punkt - Biegeversuch auf ihre Festigkeit hin geprüft. Der Versuchsaufbau ist in Bild 96 dargestellt. Die Spannweite beträgt 1,4 m. Die Belastung wird in Form einer Einzellast in Feldmitte aufgebracht.



Bild 96: Versuchsaufbau Drei-Punkt-Biegeversuch

Tabelle 10 zeigt die Bruchlast der Versuche. Auf Grund der geringen Spannweite liegt ein Querkraftversagen vor.

Tabelle 10: Tragfähigkeit der beflamten FJl- Träger

Versuchsnummer:	Bruchlast [KN]	Maximale Querkraft [KN]
1	18,00	9,00
2	19,83	9,92

Die aufnehmbare charakteristische Querkraft des Trägers beträgt nach Zulassung Z-9.1-533, Tabelle A.2 im „Kalten“ 8,76 KN. Die Tragfähigkeit hat demnach nicht abgenommen. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich um lediglich zwei Versuche handelt.

Im Ergebnis wurden sowohl der Raumabschluss als auch die Tragfähigkeit dieser Deckenkonstruktion über 30 Minuten nachgewiesen. Im Falle einer Sanierung müssten lediglich die Lochplatte sowie die Folie und die Dämmung ausgetauscht werden.

Für die Auswertung der Ergebnisse des Treppenbauteils wurden die gemittelten Oberflächentemperaturen der einzelnen Stufen in Bild 97 miteinander verglichen. Je Stufe waren 12 Thermoelemente angebracht, die in diesem Diagramm zu einem Mittelwert zusammengefasst worden sind.

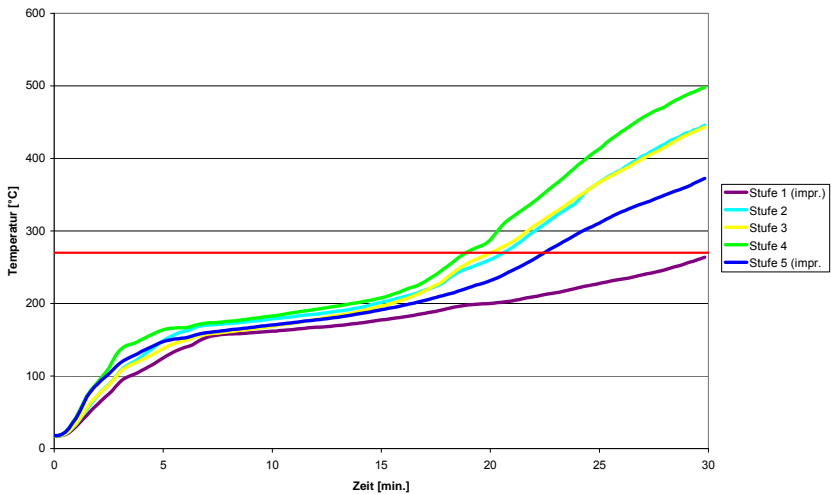


Bild 97: Temperaturen an der Oberfläche der einzelnen Stufen

Es wird deutlich, dass die vierte Stufe das Temperaturkriterium als erste überschritten hat. Dies stimmt mit den Versuchsbeobachtungen überein. Außerdem ist zu erkennen, dass die beiden imprägnierten Stufen die geringsten Temperaturen aufweisen, die Imprägnierung hat sich demnach als Verbesserung erwiesen und die Entzündung (Vergleich 5. Stufe zu 4. Stufe) um 5 Minuten verzögert. Die Beschichtung bildet im Vergleich zu den Ergebnissen der Kleinbrandversuche erst bei einer höheren Temperatur ihre Schutzwirkung aus. Dies ist daran zu erkennen, dass die Steigung der Temperaturverläufe erst bei 160 °C flacher wird. Bei den Kleinbrandversuchen lag dieser Punkt bei ca. 120 °C deutlich niedriger.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ausbildung der Schutzschicht im Großbrandversuch gegenüber den Kleinbrandversuchen später eintrat. Als Folge daraus hat die Entzündung früher als erwartet stattgefunden. Die Imprägnierung bringt zwar eine Verbesserung, jedoch konnte nicht abschließend geklärt werden in welchem Ausmaß. Für das Treppenbauteil war aus dem Vergleich imprägniert - nicht imprägniert eine Verbesserung des Entzündungsschutzes um 5 Minuten deutlich zu erkennen. Für die Deckenbauteile war dieser Unterschied jedoch nicht auszumachen. Das gesetzte Ziel von 30 Minuten Entzündungsschutz konnte mit diesem Versuch nicht nachgewiesen werden. Ein Grund für das verspätete Eintreten der Schutzwirkung kann die Zugabe von Lösemittel sein. Aus fertigungstechnischen Gründen musste Lösemittel hinzugegeben werden. Insgesamt 10 %, davon 7 % Wasser und 3 % organisches, also brennbares Lösemittel. Der Anteil wurde so gering wie möglich gehalten. Vorversuche an Beistellproben haben keine signifikante Änderung der Eigenschaften gezeigt, die Datendecke war allerdings sehr gering.

Verantwortlich für die frühzeitige Entzündung kann neben der verspäteten Schutzwirkung auch ein Restgehalt an Lösemittel sein. Ob dieser Effekt bei dieser Versuchsreihe tatsächlich aufgetreten ist, konnte nicht geklärt werden, weil für weitere Untersuchungen kein Probenmaterial mehr zur Verfügung stand. Ein Einfluss des Lösemittels wurde aber im Anschluss mittels Laborbrandversuchen nachgewiesen. Dabei wurden Probekörper einen Tag, zwei Tage, fünf Tage und 10 Tage nach der Applikation abgebrannt und die Brandschutzleistung ermittelt. Dabei zeigte sich ein deutlicher Trend: die Brandschutzleistung wird mit größerem, zeitlichem Abstand zur Applikation besser.

Für das Treppenbauteil haben sich die Stahlteile als ungünstig erwiesen. Ziel war es, eine Standardkonstruktion allein durch die Beschichtung brandschutztechnisch zu ertüchtigen. Die Beschichtung ist jedoch speziell für Holz entwickelt. Durch Abrutschen der Beschichtung lagten die Stahlteile frei. Dadurch konnte die Temperatur ungehindert in das Bauteil eindringen.

8 Untersuchungen zur klimatischen Beständigkeit

8.1 Allgemeines

Untersuchungen zur klimatischen Beständigkeit mit den Beschichtungsformulierungen der Entwicklungsreihe RAB 6 zeigten, dass diese nicht gegeben ist. Auf Basis der Ergebnisse der in den Kapiteln 6, 7 und 8 beschriebenen Versuche wurde versucht, Lösungen für klimatisch beständigere Formulierungen zu finden. Gleichzeitig wurde versucht, die Leistungsfähigkeit im Brandfall weiter zu steigern. Die Ergebnisse aus diesen unterschiedlichen Ansätzen wurden in der Entwicklungsreihe RAB 7 zusammengeführt.

Brandschutzbeschichtungen gelten gemäß dem Stand der Technik generell als nicht witterungsstabil. Hierfür sind mehrere Eigenschaften verantwortlich.

Zunächst ist die Eignung des Bindemittels entscheidend. Das Bindemittel für die Entwicklungsreihe RAB 6 ist ein Gemisch aus einem methylierten Melamin-Formaldehyd-Harz, einem unmodifizierten Harnstoff-Formaldehyd-Harz und einem Melamin-Pulverharz (Tabelle 3 und Tabelle 4). Durch dieses Bindemittelgemisch erhält man eine sehr harte, aber dadurch auch wenig flexible Schicht. Da klimatisch belastete Holzbauteile aufgrund der Feuchteänderungen grundsätzlich in einem gewissen Maße quellen und schwinden, muss eine Beschichtung diese Bewegungen schadfrei mitmachen.

Ebenfalls entscheidend sind die wirksamen Brandschutzchemikalien, von denen einige notwendige Stoffe hydrophil sind. Diese neigen zu einem Auswaschen aus der Beschichtung, das im Ergebnis neben rein optischen Veränderungen auch zu einem Verlust an Brandschutzleistung führt. Um Lösungen für diese Probleme zu erarbeiten, wurden drei Schwerpunkte systematisch untersucht. Die Modifikationen betrafen die Harzbasis und die wirksamen Brandschutzchemikalien. Abschließend wurde untersucht, ob die Frage der klimatischen Beständigkeit auch über eine eigene Funktionsschicht in Form eines dünn aufgetragenen Decklackes gelöst werden kann.

8.2 Verbesserung der Elastizität

Zunächst wurde versucht, die Elastizität der Formulierungen aus der Entwicklungsreihe RAB6 zu verbessern. Die Untersuchungen wurden in der Regel auf Basis der Formulierung RAB6-S22 durchgeführt.

Dazu wurden langkettige Öle der Bindemittelmischung in Mengen von 0,1 – 1 Masseprozent bezogen auf das Bindemittel beigemischt. Diese Maßnahme führt allerdings zu einer signifikanten Störung der Ausbildung der Schutzschicht. Selbst bei einer Zugabe von lediglich 0,1

Masseprozent wurde durchweg beobachtet, dass die Schutzschicht im besten Fall einige Millimeter Dicke im Laborbrand erreichte. Im Vergleich dazu erreicht die Referenz RAB 6- S 22 mehrere Zentimeter. Dieser Ansatz wurde daher nicht weiter verfolgt.

Ein weiterer Ansatzpunkt, die Elastizität der Beschichtungssysteme zu verbessern, wurde im Vernetzungsgrad des Bindemittels gesehen. Die Entwicklungsreihe RAB 6 zeichnet sich durch eine starke dreidimensionale Vernetzung des Systems aus. Der Vernetzungsgrad kann über den Anteil an Phosphorsäureester beeinflusst werden. Steigt der Anteil in der Formulierung, kommt es zu keiner vollständigen Vernetzung und damit zu einer höheren Elastizität. Allerdings wird die Oberfläche negativ beeinflusst. Diese härtet nicht vollständig aus, bleibt klebrig und kann im Prinzip nicht eingesetzt werden. Daher wurde dieser Ansatzpunkt nicht weiter verfolgt. Eine weitere Idee zur Elastifizierung der Beschichtungssysteme war, ein lineares Melaminharz einzusetzen, um die dreidimensionale Vernetzung zu reduzieren. Da lineare Melaminharze industriell nicht verfügbar sind, wurde auch diese Idee wieder verworfen.

Vielfersprechender erschien es, industriell verfügbare, plastifizierte Bindemittel aus derselben chemischen Familie einzusetzen. Nach Rücksprache mit den Herstellern von Melamin-Formaldehyd- und Harnstoff-Formaldehyd-Harzen wurde für das methylierte Melamin-Formaldehyd-Harz ein plastifiziertes methylverethertes Melamin-Formaldehyd-Harz und für das unmodifizierte Harnstoff-Formaldehyd-Harz ein plastifiziertes Harnstoff-Formaldehyd-Harz ausgewählt. In der Tabelle 11 werden die zu den Harzen verfügbaren Informationen miteinander verglichen.

Tabelle 11: Auswahl von Melamin-Formaldehyd und Harnstoff-Formaldehyd Harzen

Harz-system	Typ	Dispersions-eigenschaften	Lackeigen-schaften	Festkörper (%)	Viskosität (mPas)	pH
MF 1	methylierte Melamin-Formaldehyd-Harz	Dichte: 1,24 g/cm ³ Formaldehyd: 0,7 -0,9 % Methanol: 2,4 – 2,6 %	transparent, harte Schicht, unflexibel	72-80	500	8,5
MF 3	methyl-verethertes Melamin-Formaldehyd-Harz	Dichte: 1,25 g/cm ³ Formaldehyd: 0,2 % Methanol: 0,75 %	transparent, flexibel	84-87	3.000 – 7.000	???
HF 1	Harnstoff-Formaldehyd-Harz	Dichte: 1,29 g/cm ³ Formaldehyd: 0,7 -0,9 % Methanol: 0,3 – 0,7 %	transparent, harte Schicht, unflexibel	64-68	300	7-9
HF 2	plastifiziertes Harnstoff-Formaldehyd-Harz	Dichte: 1,2 g/cm ³	transparent, flexibel	--	2.500 – 3.700	8

Die plastifizierten Harze wurden zur teilweisen oder vollkommenen Substitution der Harze aus der RAB 6- S 22 eingesetzt. Dazu wurden drei unterschiedliche Formulierungen hergestellt und mittels eines Rakels auf Glasplatte aufgezogen. Nach Aushärtung wurden die Filme abgelöst und auf einer Zugprüfmaschine bis zum Bruch gedehnt. Die drei modifizierten Formulierungen wurden in der Harzbasis wie folgt verändert:

- RAB 6- S 22 Mod 1 – 50 % HF 1 durch HF 2 ersetzt
- RAB 6- S 22 Mod 2 – 50 % HF 1 durch HF 2 sowie 50 % MF 1 durch MF 3 ersetzt
- RAB 6- S 22 Mod 3 – HF 1 komplett durch HF 2 ersetzt

In Bild 98 wird die Elastizität der Richtformulierung RAB 6- S 22 mit verschiedenen modifizierten, plastifizierten Harzen verglichen. Der Zugewinn an Elastizität geht allerdings zu Lasten der Brandschutzleistung im Laborbrandversuch (Bild 99).

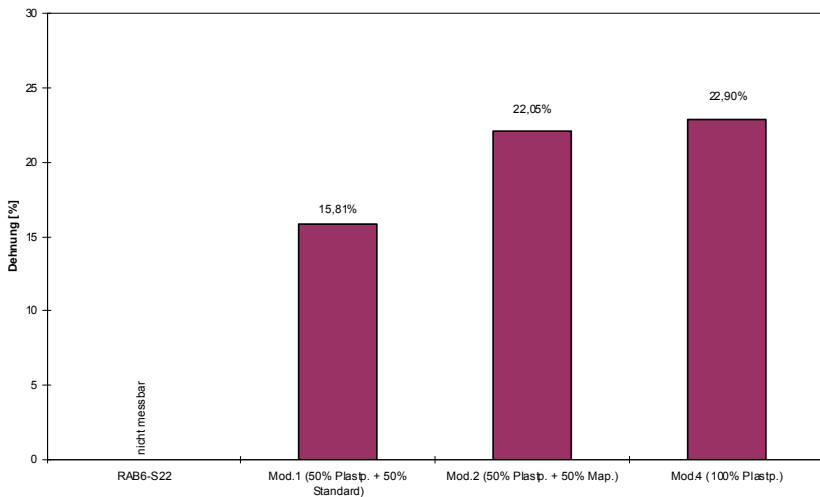


Bild 98: Modifizierte Harzbasen mit erhöhter Elastizität

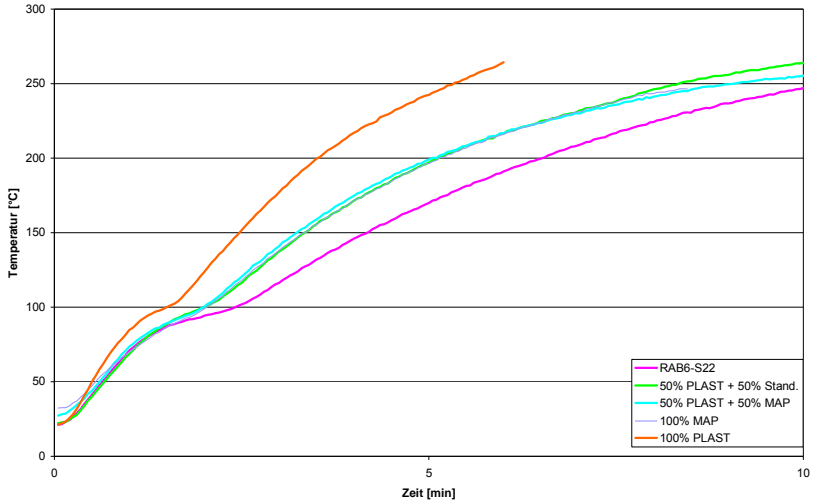


Bild 99: Einfluss der modifizierten Harze auf die Leistungsfähigkeit im Laborbrand

Der Verlust an Brandschutzleistung kann theoretisch durch einen ca. 15 % höheren Schichtaufbau ausgeglichen werden. Bei den Formulierungen, die für höhere Schutzklassen gedacht sind (ab K₂30), ist eine höhere Schichtdicke allerdings weder aus ästhetischen Gründen noch aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll. Weiterhin ist zu beachten, dass eine größere Schichtdicke das Abrutschverhalten an senkrecht positionierten Bauteilen vermutlich negativ beeinflusst.

Mittels dieser Versuche wurde der grundsätzliche Nachweis geführt, dass plastifizierte Harze in das Grundharzsystem eingebaut werden können. Mittels Laborbrandversuchen wurde in Reihenversuchen eine Optimierung der Verhältnisse der Bestandteile vorgenommen. Auf die Darstellung dieser Arbeiten wird verzichtet. Im Ergebnis wurde eine elastische Formulierung entwickelt, die als INMSP bezeichnet wurde. Die Leistungsfähigkeit dieser Formulierung wurde mit verschiedenen Formulierungen der Entwicklungsreihe RAB 6 verglichen. Dabei wurde in der Tendenz unter Laborbrandbedingungen eine gesteigerte Leistungsfähigkeit festgestellt. Es wurde darauf geachtet, dass bei allen Versuchen mit ca. 18,5 g eine nahezu gleiche Menge Material auf die Proben aufgetragen wurde. In Bild 100 werden die Formulierungen RAB 6- S 11 und INMSP nach der Methode der Laborbrandversuche miteinander verglichen. Es ist gut zu erkennen, dass die Steigungen in der Anfangsphase bei beiden Formulierungen ähnlich sind. Nach etwa 6 Minuten nimmt die Steigung der Formulierung INMSP ab. Nach 15 Minuten erreichen die Proben mit der Formulierung INMSP etwa eine Temperatur von 200 °C. Zu diesem Zeitpunkt hat die Probe RAB 6- S 11 (2) eine Temperatur von 250 °C erreicht. Die Probe

RAB 6- S 11 (1) versagt bereits nach etwa 12 Minuten. Dies wird allerdings als Ausreißer bewertet.

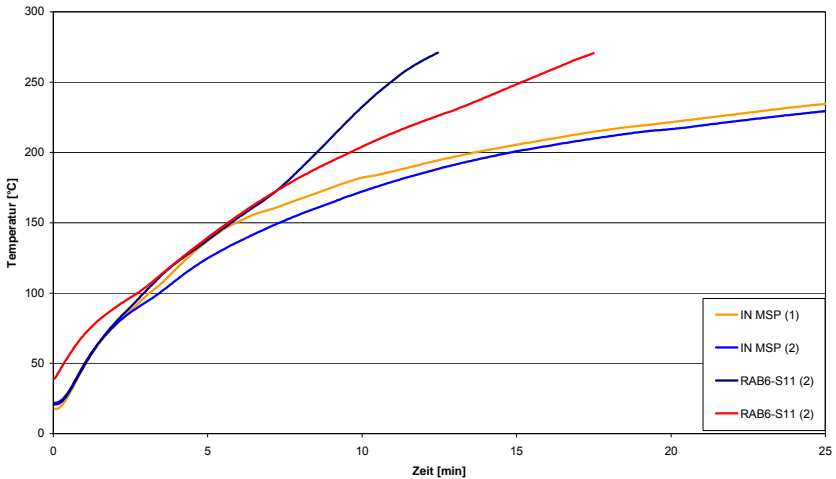


Bild 100: Vergleich der Formulierungen RAB 6- S 11 mit INMSP bei einer Auftragsmenge von ca. 18,5 g

Nach der Methode der Laborbrandversuche verfügt die Formulierung INMSP über eine um den Faktor 1,25 höhere Leistungsfähigkeit. Die Zusammensetzung der aus zwei Teilen bestehenden Formulierung ist in Tabelle 12 und Tabelle 13 beschrieben.

Tabelle 12: Zusammensetzung Teil A der Formulierung INMSP

Gew-%	Stoffklasse	Bezeichnung
28,6	MF1	Marktübliches MF-Harz
9,5	MF4	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
9,5	MF5	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
1,4	HF2	Marktübliches, plastifiziertes HF-Harz
12,9	HF1	Marktübliches HF-Harz
23,9	MF6	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
3,6	PF1	Marktübliches PF-Harz
7,3	Phosphorsäureester	Marktüblicher Phosphorsäureester
3,2	Lösemittel	Wasser

Tabelle 13: Zusammensetzung Teil B der Formulierung INMSP

Gew-%	Stoffklasse	Bezeichnung
34,9	Phosphorsäureester	Marktüblicher partieller Phosphorsäureester
4,3	Lösemittel I	Wasser
14,3	Gasbildner	Ammoniumpentaborat
3,0	Lösemittel II	Xylol
22,9	APP	Säurespender
11,4	Endergon. Zusätze	Aluminiumhydroxid
4,6	Pigment	TiO ₂
4,6	Gasbildner	Melamin

Weitere Untersuchungen wurden vorgenommen, um auch die verbleibenden Harze MF1 und HF1 durch alternative Harzsysteme zu ersetzen. Da die Eignung eines Harzes für Brandschutzanwendungen nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht vorab eingeschätzt werden kann, wurde eine Vorauswahl für weitere Untersuchungen, wiederum in Absprache mit Harzherstellern, getroffen. Hierfür wurden DSC/TG-Vergleiche und Laborbrandversuche an säuregehärteten Harzen und Harzmischungen am Fraunhofer ICT in Pfinztal durchgeführt. Bei den DSC/TG-Messungen wurde nach Übereinstimmungen bzw. Ähnlichkeiten mit den bisher verwendeten Harzen gesucht. Bei den mit Säure gehärteten Harzen konnten keine Übereinstimmungen in zusammengehörenden DSC/TG-Daten gefunden werden. Ähnlichkeiten bestanden entweder in der DSC- oder in der TG-Messung.

Mit den Ergebnissen aus den Messungen an den einzelnen Harzen wurden vom ICT verschiedene Mischungen hergestellt, einzelne Komponenten variiert und anschließend vermessen. Im Ergebnis wurden geeignete Alternativprodukte für weitere Untersuchungen vorgeschlagen. Diese sind in Tabelle 14 im Vergleich zu den bislang verwendeten Harzen beschrieben.

Tabelle 14: Vergleich der alternativen Melamin-Formaldehyd und Harnstoff-Formaldehyd Harze

Harzsystem	Typ	Eigenschaften	Lackeigenschaften	Festkörper (%)	Viskosität (mPas)	pH
MF 2	Unmodifiziertes Melaminharz (Pulver)	Dichte: 1,2 g/ml Formaldehyd: 0,5 -0,7 %	transparent, harte Schicht, unflexibel	100	--	9,5-10,5
MF 4	Melamin-Formaldehydharz	Dichte: 1,2 g/cm ³ Formaldehyd: 0,6 % Methanol: 1,6 %	transparent, flexibel	69-72	500-800	8-9
MF 6	Kondensiertes Melamin- Formaldehydharz, (Pulver)	Dichte: nicht bestimmt Formaldehyd: 0,7 %	pigmentiert, flexibel	100	--	8,9-9,5
HF 3	Harnstoffharzleim (Pulver)	Dichte :1,26 g/cm ³ Formaldehyd: 0,2 %	transparent, harte Schicht, unflexibel	100	3000-4500	7,5-8,7

Durch die modifizierte Harzbasis konnten Formulierungen (RAB 7- xx) mit erhöhter Elastizität entwickelt werden. Damit ist eine bessere Eignung für klimatische Belastungen gegeben. Mit diesen alternativen Harzen wurden Musterproben hergestellt und im geschützten Außenbereich gelagert. Die Proben wurden dabei keiner direkten UV-Strahlung und keiner Beregnung ausgesetzt. Nach 9 Monaten waren die Beschichtungen erwartungsgemäß optisch vollkommen intakt (Bild 101).



Bild 101: Probekörper nach 9-monatiger Lagerung in geschützten Bereichen

Eine länger anhaltende Belastung mit Feuchte- und Temperaturwechseln halten diese Formulierungen allerdings nicht aus. Daher wurden für weitere Versuche Harze aus anderen chemischen Familien unter dem Aspekt der Eignung für Witterungsstabilität erneut untersucht.

Die Harze wurden auch hinsichtlich ihrer Eignung für hohe Füllgrade und ihrer Stabilität gegen Salze und ähnlich aggressive Verbindungen ausgesucht. Im Allgemeinen werden Epoxy,

Polyurethan, Alkyd und Acrylat Harze für Außenanwendungen genutzt. Vinylacetat basierte Harze können genutzt werden, wenn Vinylester von Versäuren (VEOVA) verwendet werden. Latexfarben können ebenfalls aus VEOVA und verschiedenen Acrylaten hergestellt und als Holzanstriche genutzt werden. Mittels VEOVA können die Hydrophibilität und die Elastizität in polymeren Systemen positiv beeinflusst werden. Derartig modifizierte Systeme zeigen eine gute Chemikalienresistenz, verfügen über eine gewisse Witterungsstabilität und erlauben die Benetzung von Anti-aging Pigmenten etc. Auf Basis dieser Anmerkungen wurden fünf unterschiedliche Harze für die Versuche ausgewählt (Tabelle 15).

Tabelle 15: Auswahl der Harze

Harzsystem	Typ	Dispersions-eigenschaften	Lackeigenschaften	Festkörper (%)	MFFT (°C)	Viskosität (mPas)	pH
Acrylat A	Buthylacrylat/ Methylmethacrylat	Anionisch Teilchengröße: 100 nm Dichte: 1,06 g/cm ³ Frostempfindlich	transparent, witterungsstabil, gute Chemikalienresistenz, lichtecht, hohe Elastizität, blockfest, dauerhaft, resistent gegen Hagel	50	< 1	100-300 ^{a)}	7.5-9
Acrylat B	2-Ethylhexylacrylat/ Methylmethacrylat	Anionisch Teilchengröße: 150 nm Dichte: 1,04 g/cm ³ Frostempfindlich	transparent, glänzend, witterungsstabil, gute Chemikalienresistenz, hohe Elastizität, Wasseraufnahme 16% ^{b)}	50	< 1	50-250 ^{a)}	6.5-8
Acrylat C	2-Ethylhexylacrylat/ Methylmethacrylat	Anionisch Teilchengröße: 80 nm Dichte: 1,03 g/cm ³ Frostempfindlich	blockfest, witterungsstabil, gute Wasser- und Chemikalienresistenz, flexibel, Wasseraufnahme 15% ^{b)}	45	< 3	100-400 ^{a)}	7.5-8.5
Acrylat D	Buthylacrylat/ Acrylnitril	Anionisch Teilchengröße: 90 nm, Dichte: 1,03 g/cm ³ Frostempfindlich	blockfest, flexibel	41	25	10-50 ^{a)}	7.0-8.0
Acrylat E	Acrylat/ VEOVA	Anionisch Teilchengröße: 100 nm Frostempfindlich	blockfest, flexibel Wasseraufnahme 5% ^{b)}	50	0	300-2000	7.0-8.0

a) DIN EN ISO 3219

b) nach 24 Stunden Wasserverlagerung

MFFT – Mindestfilmbildetemperatur

In Voruntersuchungen wurde der Nachweis erbracht, dass eine Verträglichkeit mit einfachen Intumeszenzmischungen gegeben ist. Mit diesen, prinzipiell für bewitterte Bereiche geeigneten

ten Harze wurden weiterführende Untersuchungen mit modifizierten wirksamen Zuschlägen vorgenommen.

8.3 Verringerung der Wasserlöslichkeit

Die Empfindlichkeit eines Brandschutzanstriches gegenüber Feuchtigkeit hängt auch von der Wasserlöslichkeit der Chemikalien und der brandschutztechnisch wirksamen Zuschlagstoffe ab.

Kommerziell verfügbar sind Ammoniumpolyphosphate (APPs) mit geringer Wasserlöslichkeit (0.5g/ 100ml) und Melamin beschichtete Ammoniumpolyphosphate mit sehr geringer Wasserlöslichkeit (0.05g/ 100ml). Neben APP wurde in unterschiedlichen Formulierungen häufig Pentaerythritol mit vier Hydroxylgruppen eingesetzt. Die Wasserlöslichkeit kann gesenkt werden, sofern Di- oder Tripentaerythritol verwendet wird. Weitere Pigmente, die die Witterungsstabilität beeinflussen, sind Titandioxide.

Eine Idee, die Wasserlöslichkeit positiv zu beeinflussen, war die Einkapselung von wasserempfindlichen Substanzen durch wasserunlösliche Stoffe, analog der kommerziell verfügbaren Melamin-beschichteten APPs. Eine Möglichkeit der Einkapselung bietet der Hybridizer-Prozess. Dieser Prozess arbeitet in der Trockenphase und erlaubt die Kombination verschiedenster Stoffe (Partikel) mit ihren jeweiligen gewünschten Eigenschaften zu neuen hybriden Stoffkombinationen. Im Hybridizer-Prozess können Partikel mit einer Korngröße von 1 - 500 µm für das Kernpartikel und 0,1 – 50 µm für das Beschichtungspartikel verarbeitet werden.

Eine prinzipielle Prozessskizze ist in Bild 102 dargestellt. Die beiden Pulver auf der linken Seite stellen die zu verarbeitenden Rohstoffe dar. In einem ersten Schritt erfolgte ein Vermischung. Dies führt zu einer lockeren Pulverkombination. Im eigentlichen Prozessschritt werden die kleineren Hüllpartikel auf die größeren Kernpartikel geschossen. Durch die wirkenden Kräfte kommt es in der Theorie zu einer Fixierung der Hüll- auf den Kernpartikeln. Eine Separierung ist nur möglich, wenn erneut mechanische Kräfte auf die Hybridpartikel einwirken. Theoretisch ist es möglich, durch eine Wiederholung des Prozesses weitere Schichten auf das Hybridpulver aufzubringen. Derzeit ist noch gar nicht abschätzbar, welche Stoffkombinationen überhaupt hergestellt werden können. Untersuchungen finden derzeit in einer betreuten Diplomarbeit statt.

An die Hüllpartikel, die die wasserempfindlichen Stoffe einkapseln sollten, wurde die Anforderung definiert, dass sie zum einen empfindliche Kernpartikel gegen Feuchtigkeit schützen müssen und zum anderen entweder zum Intumeszenzprozess beitragen oder diesen zumindest nicht behindern sollten.

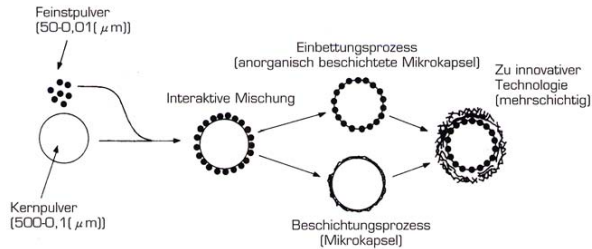


Bild 102: Schema des Beschichtungsprozesses (Quelle: Nara Machinery Europe)

In einem ersten Schritt wurden kommerziell verfügbare Natriumhydrogencarbonat Pulver als wasserempfindliche Kernpartikel genutzt. Natriumhydrogencarbonat wurde verwendet, da es theoretisch als Gasspender im Intumeszenzprozess genutzt werden kann. Problematisch bei Carbonaten ist allerdings die mangelnde Stabilität gegenüber Wasser und insbesondere sauren Medien. Unbeschichtete Natriumhydrogencarbonat-Partikel lösen sich in Wasser und setzen dabei Kohlendioxid frei. Im sauren Milieu wird dieser Prozess zusätzlich beschleunigt. Eine Einarbeitung in die Formulierungen der Entwicklungsreihe RAB 6 bzw. RAB 7 war daher nicht möglich, da in den Formulierungen als Lösungsmittel überwiegend Wasser enthalten ist und sie außerdem sauer (pH ~ 1-3 je nach Formulierung) sind.

Als Hüllpartikel wurde Carnauba-Wachs verwendet. Carnauba-Wachs wurde ausgewählt, da es sich durch einen Schmelzpunkt von ca. 72 °C auszeichnet und theoretisch Kernpartikel ab ca. 72 °C wieder freigibt. Außerdem ist das Wachs unempfindlich gegen Wasser und saure Medien.

Um die Partikelgrößen anzupassen, wurde das Wachs in mehreren Schritten aufgemahlen und in einem Siebturm getrennt. Die Herstellung der Hybridpulver erfolgte in einem Massenverhältnis von 10 Teilen Carnauba Wachs auf 100 Teile von Natriumhydrogencarbonat in einem Typ 0 Hybridizer. Um die Effizienz des Prozesses zu überprüfen, wurde zunächst eine einfache Testmethode eingesetzt. Jeweils 1 Gramm der Rohstoffe und des Hybridpulvers wurden in 50 g Wasser eingerührt. Im Anschluss wurde der pH-Wert bestimmt. In weiteren Tests wurde das Wasser gegen eine 0,1 mol Salzsäure ausgetauscht.

Die Ergebnisse waren sehr vielversprechend. Natriumhydrogencarbonat zeigte in Wasser typische pH-Werte. Beim Hybridpulver wurde lediglich eine leichte Veränderung des pH-Wertes beobachtet. Auch in Salzsäure wurde keine signifikanten Veränderungen mit dem mikrobeschichteten Natriumhydrogencarbonatpulver beobachtet. Eine Gasbildungsreaktion trat nicht ein. In Tabelle 16 sind die Untersuchungsergebnisse nochmals zusammengefasst.

Tabelle 16: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse von unbeschichtetem und beschichtetem Natriumhydrogenkarbonat

	pH-Wert in destilliertem Wasser	Verhalten in einer 0,1 molaren Salzsäurelösung
NaHCO_3	8.4	Auflösung unter Blasenbildung
Carnauba Wachs	7.2	Keine Auffälligkeiten
NaHCO_3 plus Carnauba Wachs	7.3	Keine Auffälligkeiten

Die Hybridpulver wurden auch in einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Im Vergleich zum unbeschichteten Pulver (Bild 103) ist die Carnaubabeschichtung offensichtlich erkennbar (Bild 104).

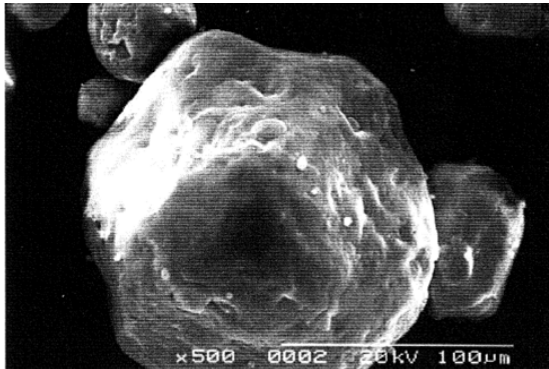


Bild 103: Natriumhydrogenkarbonatpulver (REM, 500-fache Auflösung)

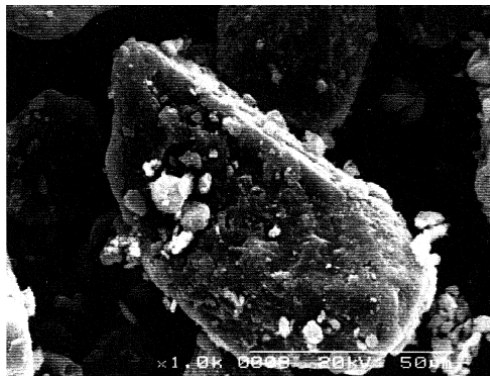


Bild 104: Beschichtetes Natriumhydrogenkarbonatpulver (REM, 1000-fache Auflösung)

In weiteren Untersuchungen wurde ein Ammoniumpolyphosphat (APP) mit einer Ausgangskorngröße von 100-200 µm mit 1, 2, 3, 4 und 5 Gewichts-Prozent Melamin mit einer Korngröße von 20 - 50 µm gekapselt. Um den Nachweis zu führen, dass die Einkapselung keinen negativen Einfluss auf die Brandschutzleistung hat, wurde das Hybridpulver in ein vereinfachtes Intumeszenzsystem bestehend aus APP, Melamin, Pentaerythrit und TiO₂ eingearbeitet. Die Harzbasis bildete dabei das Acrylat A. Der Einfluss auf die Brandschutzleistung wurde im Laborbrandversuch vergleichend zu einer Referenz mit ungekapseltem APP untersucht (Bild 105). Unter Berücksichtigung der gegebenen Messtoleranzen ist kein signifikanter Unterschied zwischen der Referenzprobe und den fünf Proben mit gekapselten APP erkennbar. Bei allen Proben wird nach etwa 2 Minuten eine Temperatur von 300 °C auf der Rückseite erreicht. Zwischen der 2. und 4. Minute kommt es zu einem leichten Anstieg auf bis zu 330 °C. Dieses Temperaturniveau bleibt bis zum Versuchsabbruch nach 10 Minuten konstant. Im Mittel aller Versuche liegt die Temperatur bei etwa 320 °C ± 10 °C.

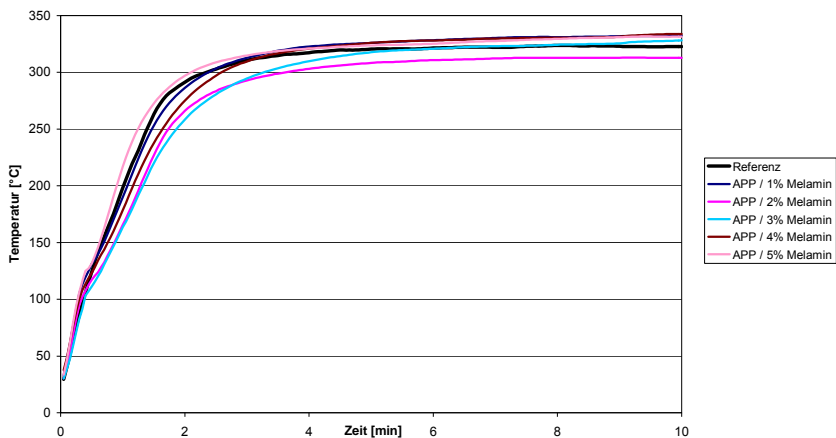


Bild 105: Brandschutzleistung von Beschichtungen mit Melamin beschichtetem Ammonium Polyphosphat

Um die Wasserlöslichkeit positiv zu beeinflussen, wurden Versuche mit APP (Korngröße 50 µm) mit einem Carnuba-Wachs-Typ (Schmelzpunkt 82 – 86 °C / Korngröße 5 µm) durchgeführt. Das gekapselte APP wurde in gleicher Form wie oben beschrieben eingearbeitet. Die Formulierung wurde zunächst im Laborbrandversuch untersucht. Dabei wurde ein geringfügiger Verlust an Brandschutzleistung ermittelt. In einem nächsten Schritt erfolgte eine Schnellbewitterung von Proben in Anlehnung an DIN EN 927-6. Dabei wurden die Proben über eine Woche mit dem Zyklus gemäß Tabelle 17 belastet.

Tabelle 17: Bewitterungszyklus in Anlehnung an DIN EN 927-6

Stufe	Funktion	Temperatur	Dauer	Bedingung
1	Kondensation	(45 ± 3) °C	24 h	
2	Nebenzyklus Stufe 3+4		48x Zyklen von je 3 h, bestehend aus den Stufen 3 und 4	
3	Stufe 3	(60 ± 3) °C	2,5 h	(0,89 ± 0,1) W/(m ² nm) bei 340 nm
4	Stufe 4		0,5 h	6 l/min bis 7 l/min, keine UV-Strahlung

Mittels Laborbrandversuchen wurde der Nachweis geführt, dass durch die Kapselung mit Carnuba-Wachs kein signifikanter Einfluss auf die Brandschutzleistung gegeben ist. Die Abweichungen nach Bild 106 liegen im Rahmen der Messtoleranzen.

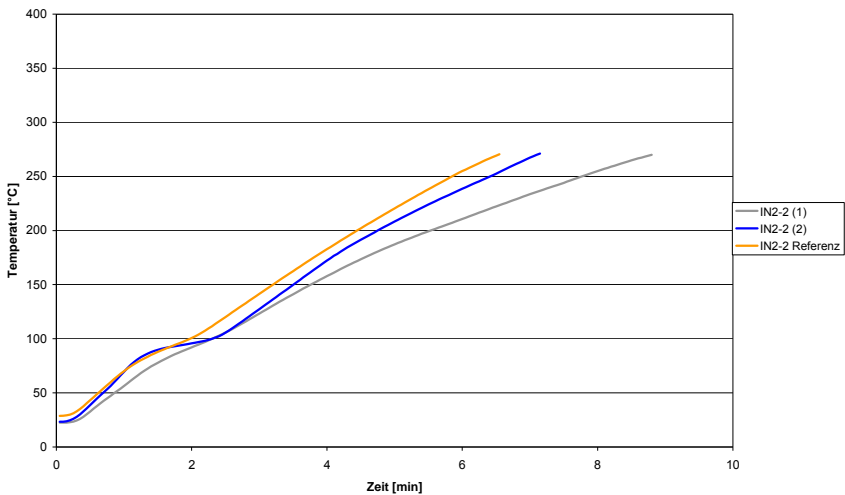


Bild 106: Brandschutzleistung Formulierung IN2-2 mit gekapselten (Carnauba-Wachs) und ungekapseltem Ammoniumpolyphosphat

Neben den Versuchen mit Schnellbewitterung wurden auch Versuche unter natürlichen Bedingungen vorgenommen. Probekörper wurden unter voller klimatischer Belastung mit Süd- ausrichtung unter einem Winkel von 45° ausgelegt. Dieser Belastung sind die Formulierungen trotz prinzipiell geeigneter Bindemittel und modifizierter wirksamer Zuschläge nicht dauerhaft

gewachsen. Erste Schäden traten nach etwa 12 Wochen auf. Auf die Durchführung eines eigentlich geplanten Brandschachtversuchs wurde daher verzichtet.

8.4 Schutz durch Decklack

Neben den Versuchen mit alternativen Harzbasen und modifizierten wirksamen Brandschutzzuschlägen wurde auch untersucht, inwieweit durch geeignete Schutzlacke ein verbessertes Bewitterungsverhalten erzielt werden kann. Ein geeigneter Schutzlack sollte dabei einen möglichst geringen Einfluss auf die Brandschutzleistung haben. In einem ersten Screening wurden zwei unterschiedliche Systeme auf Acryl- und Silikonbasis untersucht. Die Untersuchungen wurden mit einem speziell für Brandschutzanwendungen entwickelten Schutzlack vertieft. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Feuchtebeständigkeit verbessert werden konnte. Diese wurde gemäß EN 927-5 mittels Wasserlagerung über einen Zeitraum von 72 Stunden bestimmt. Bei diesen Versuchen zeigte sich ein signifikanter, positiver Einfluss des Decklackes. Die unbeschichtete Referenzprobe RAB 6- S 11 hatte eine bis zu 8-fach höhere Flüssigwasseraufnahme (Bild 107).

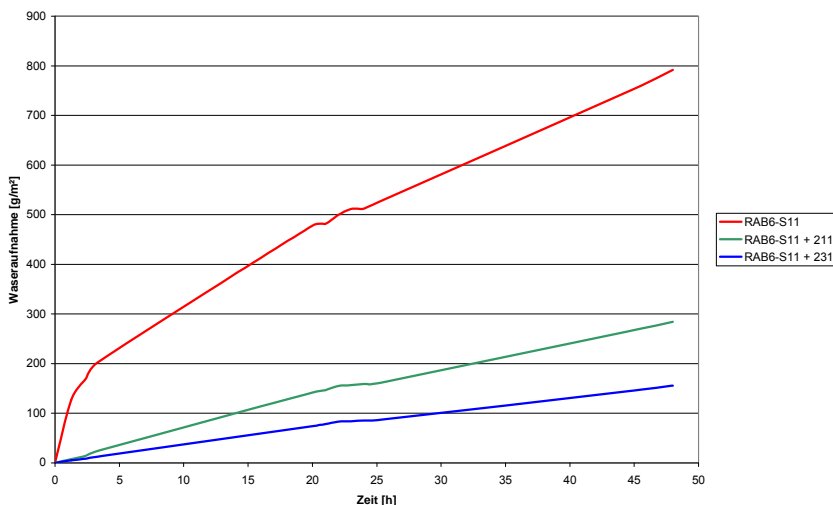


Bild 107: Wasseraufnahme verschiedener Decklackkombinationen gemäß EN 927-5

Der Einfluss des Decklackes auf die Brandschutzleistung wurde durch Laborbrandversuche überprüft. Dabei wurden die in Tabelle 18 beschriebenen, lösemittelbasierten Decklackssysteme auf die Formulierung RAB 7 - 9 appliziert und im Laborbrandversuch untersucht. Im Vergleich zur Referenzprobe RAB7-9 (ohne Decklack) zeigt sich, dass alle Decklacke die Brandschutzleistung reduzieren. Unter den Decklacken lassen sich allerdings signifikante

Unterschiede erkennen (Bild 108). Die Systeme 211, 231 und die Lasur 565 haben den geringsten Einfluss auf die Brandschutzleistung gemäß Laborbrandversuch.

Tabelle 18: Beschreibung der verschiedenen Decklacksysteme

Decklack-system	Typ	Eigenschaft	Charakterisierung
510	Alkyd	Lasur	Lösemittelhaltiger Anstrichstoff, Titandioxid (je nach Farbton), anorganische/organische Buntpigmente (je nach Farbton), Füllstoffe, Aliphate und Additive
620	Alkyd	Lasur	Lösemittelhaltiger Anstrichstoff, Titandioxid (je nach Farbton), anorganische/organische Buntpigmente (je nach Farbton), Füllstoffe, Aliphate und Additive
860	Alkyd	Lack	Lösemittelhaltiger Anstrichstoff, Titandioxid, Aliphate und Additive
231	Blend	Lack	Lösemittelhaltiger Überzugslack
J-3277-4	Blend	Lack	Keine Angaben
822	Alkyd	Lack	Lösemittelhaltiger Anstrichstoff, Titandioxid (je nach Farbton), anorganische/organische Buntpigmente (je nach Farbton), Füllstoffe, Aliphate und Additive
565	Alkyd	Dickschicht-lasur	Lösemittelhaltiger Anstrichstoff, Titandioxid (je nach Farbton), anorganische/organische Buntpigmente (je nach Farbton), Füllstoffe, Aliphate und Additive
211	Alkyd/Phenol	Lack	Lösemittelhaltiger Überzugslack

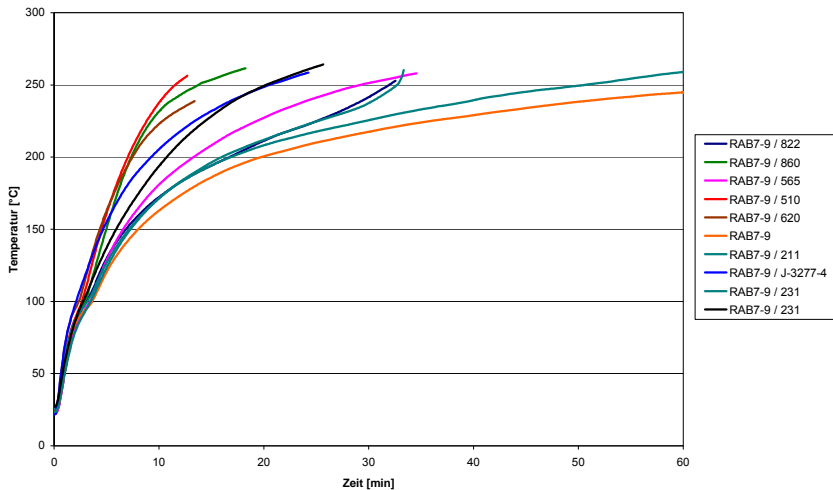


Bild 108: Laborbrandversuche mit Decklacksystemen im Vergleich zu einem Referenzsystem

9 Energieverbrauchende Reaktionen und Stabilisierung der Schutzschicht

Parallel zu den Untersuchungen zur Verbesserung der klimatischen Beständigkeit der Beschichtungen wurden die Parameter Energieverbrauch und Stabilisierung der Schutzschichten untersucht, um Potenzial für eine Steigerung der Brandschutzleistung zu identifizieren. Die Untersuchungen wurden auch notwendig, da durch die Änderungen in der Harzbasis die mechanische Festigkeit der im Brandfall entstehenden Schutzschicht beeinflusst wurde.

Die prinzipielle Wirksamkeit energieverbrauchender Reaktionen konnte bereits über Beistellversuche (Bild 43) nachgewiesen werden. Bei diesen Versuchen wurden Holzproben mit einer erhöhten Feuchtigkeit untersucht. Durch das Verdampfen des Wassers wird das Aufheizen der Probe aufgrund einer Kühlung der Schutzschicht verzögert.

Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung des Energieverbrauchs der Schutzschicht ist, endergonisch wirkende Zuschläge direkt in die Formulierung einzubauen. Auch hier kann gebundenes Kristallwasser im Brandfall verdampfen und über die Verdampfungsenthalpie die Schicht kühlen. Diese Idee wird beim Schutz der Isolierung von Kunststoffkabeln bereits industriell mittels Magnesiumhydroxid umgesetzt. Neben Magnesiumhydroxid wurden die in Formulierungen enthaltenen Borate aufgrund ihres Wasseranteils näher untersucht. Üblicherweise wurde Ammoniumpentaborat in einigen der Formulierungen eingesetzt. In Versuchsreihen wurde geprüft, inwieweit der Einsatz von Octaborat und Decaborat aufgrund der größeren Kristallwassermenge Vorteile bringt. Gleichzeitig wurde untersucht, ob über die Borate die mechanische Festigkeit der Schutzschichten beeinflusst werden kann.

Die Untersuchungen erfolgten anhand der Formulierung RAB 7- 2, die auf plastifizierten und alternativen Harzen gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 8.2 basiert. Die Grundformulierung besteht aus zwei Teilen, die in Tabelle 19 und Tabelle 20 beschrieben sind.

Tabelle 19: Zusammensetzung Teil A der Formulierung

Gew-%	Stoffklasse	Bezeichnung
27,5	MF3	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
8,6	MF4	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
8,6	MF5	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
1,3	HF2	Marktübliches, plastifiziertes HF-Harz
7,8	HF3	Marktübliches, plastifiziertes HF-Harz
21,4	MF6	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
3,2	PF2	Marktübliches PF-Harz
6,4	Phosphorsäureester	Marktüblicher Phosphorsäureester
10,3	Endergonischer Zusatz	Aluminiumhydroxid
5,0	Lösemittel	Wasser

Tabelle 20: Zusammensetzung Teil B der Formulierung

Gew-%	Stoffklasse	Bezeichnung
39,4	Phosphorsäureester	Marktüblicher partieller Phosphorsäureester
5,1	Lösemittel I	Wasser
8,0	Glasbildner	Variabel
3,4	Lösemittel II	Xylol
25,8	APP	Säurespender
5,2	Pigment	Marktübliches, plastifiziertes MF-Harz
5,2	Glasbildner	Marktübliches PF-Harz

Der Einfluss verschiedener Borate wurde zunächst im Laborbrandversuch untersucht. Dazu wurden Ammoniumpentaborat Tetrahydrat (RAB 7- 2), Zinkborat (RAB 7- 5) und Ammoniumpentaborat Octahydrat (RAB 7- 15) in die Grundformulierung eingearbeitet. Die Ergebnisse im Mittelwert von jeweils zwei Versuchen sind in Bild 109 dargestellt.

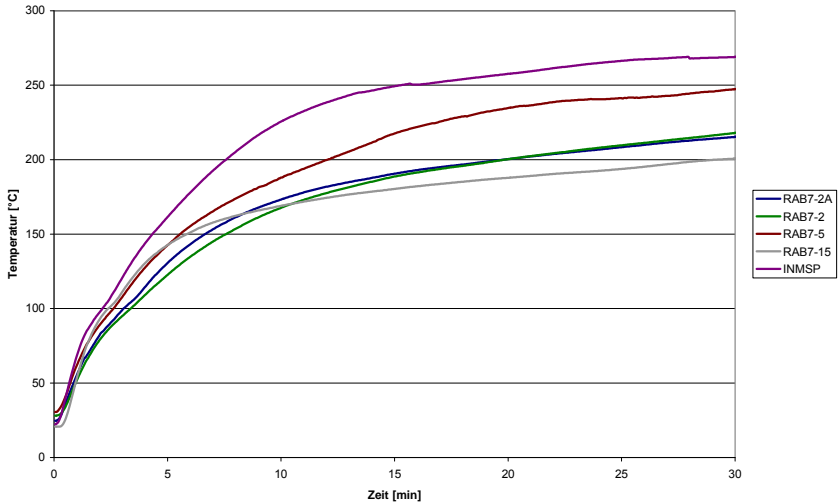


Bild 109: Vergleich verschiedener Borate mit einer Referenzformulierung (RAB7-2A) und INMSP

In Bild 109 ist zusätzlich zu den Formulierungen der Entwicklungsreihe RAB 7 noch das Laborbrandergebnis der INMSP dargestellt. Dies dient dem Vergleich der Leistungsfähigkeiten der grundsätzlich unterschiedlichen Formulierungen. Bei der INMSP handelt es sich um eine Formulierung mit einer teilweise geänderten Harzbasis im Vergleich zur Entwicklungsreihe RAB 6. Die Entwicklungsreihe RAB 7 hat dagegen eine vollständig geänderte Harzbasis. Unter den Randbedingungen eines Laborbrandversuches zeigt sich, dass die Entwicklungsreihe RAB 7 der INMSP hinsichtlich der Leistungsfähigkeit signifikant überlegen ist. Nach 30 Minuten beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den Formulierungen etwa 50 – 70 °C.

Der Vergleich der einzelnen Borate zeigt überraschende Ergebnisse. Im Laborbrandversuch zeigt sich zunächst, dass Zinkborat in der Formulierung RAB 7- 5 zu einem Verlust an Brandschutzleistung führt. Der Leistungsverlust macht sich signifikant nach etwa 5 Minuten bemerkbar. Die Steigung in der Kurve nimmt zu diesem Zeitpunkt bei der RAB 7- 5 nur geringfügig ab. Im Gegensatz dazu kommt es bei der RAB 7- 15 zu einer signifikanten Änderung.

Erstaunlicherweise ist kein Unterschied zwischen den Formulierungen RAB 7- 2 mit Ammoniumpentaborat Tetrahydrat und RAB 7- 2 A ohne Ammoniumpentaborat Tetrahydrat erkennbar. Hingegen ist ein signifikant positiver Effekt durch das Ammoniumpentaborat Octahydrat aus der RAB 7- 15 erkennbar. Die Ursache wird aber aufgrund des gleichen Verhaltens der Formulierungen RAB 7- 2 und RAB 7- 2 A nicht in dem erhöhten Anteil an Wassermolekülen

vermutet. Der weitere Effekt, der theoretisch durch ein Borat erzielt werden kann, ist die Verstärkung der entstehenden Schutzschicht mittels verglasender Reaktionen.

Um dies zu überprüfen, wurden Untersuchungen mittels eines Texture Analyser vorgenommen. Das Gerät dient in der Lebensmittelindustrie dazu, weiche Schäume, Gelees und Kekse hinsichtlich ihrer Festigkeit zu charakterisieren. Im vorliegenden Fall wurden die Probekörper unmittelbar nach dem Laborbrandversuch mittels des Texture Analysers mit einem Stempel mit einer Fläche von 1,0 cm² belastet. Der Vorschub des Stempels wurde konstant gehalten und die notwendige Kraft über den Weg gemessen. Die Ergebnisse (2-fach Bestimmung) sind in Bild 110 dargestellt.

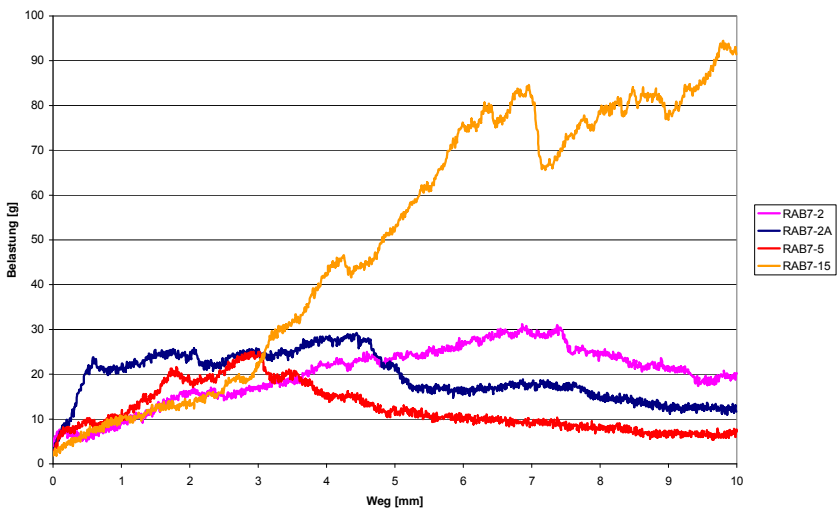


Bild 110: Bestimmung der Festigkeit der Schutzschichten von Formulierungen mit unterschiedlichen Boraten

Der Kurvenverlauf der Formulierung RAB 7- 2 A (ohne Borat) steigt auf den ersten 0,5 mm relativ steil auf einen Wert von 20 g an. Im Abschnitt von 0,5 bis 4,5 mm flacht die Kurve stark ab und steigt lediglich auf ca. 30 g. Nach 4,5 mm erfolgt in der Schicht ein Bruch. Dies deutet auf eine Verfestigung der äußeren Schicht hin. Die innere Schicht ist von geringerer Festigkeit bzw. möglicherweise auch mit Hohlräumen versehen.

Bei den Formulierungen mit Borat sind die Kurvenverläufe auf den ersten Millimetern konstant ansteigend und vergleichsweise ähnlich. Nach 3 mm bei einer Kraft von etwa 25 g erfolgt eine Separierung. Bei der Formulierung RAB 7- 5 (Zinkborat) ist ein Bruch erkennbar und die Kraft fällt im weiteren Verlauf auf unter 10 g ab. Die Formulierung RAB 7- 2 (Ammo-

niumpentaborat Tetrahydrat) zeigt einen konstanten Anstieg in der Last-Weg Kurve. Nach etwa 7 mm wird die maximale Last von 30 g aufgenommen. Nach etwa 7,5 mm kommt es zum Bruch und die Last nimmt im weiteren Verlauf auf ca. 20 g ab.

Bei der RAB7-15 nimmt die Lastaufnahme nach 3 mm stark zu. Nach etwa 7 mm wird ein Wert von ca. 85 g erreicht. Danach kommt es zu einem Zwischenbruch, der vermutlich durch einen kleineren Hohlraum ausgelöst wurde. Im weiteren Verlauf steigt die Lastaufnahme auf den Maximalwert von 95 g an.

Die Ergebnisse zeigen deutlich den positiven Einfluss des Ammoniumpentaborat Octahydrat auf die Festigkeit der Schutzschicht. Diese erhöhte Festigkeit wird auch als Ursache für die erhöhte Leistungsfähigkeit der Formulierung RAB 7- 15 im Laborbrandversuch vermutet. Die Schutzschicht setzt der Strömungsbelastung und einem damit verbundenen Abtrag einen stärkeren Widerstand entgegen. Möglicherweise sind auch weitere synergistische Effekte vorhanden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen entwickelt, die alternativ zu gipsgebundenen Plattenwerkstoffen eine Kapselung von Holzbauteilen ermöglichen. Aus den Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass eine Kapselung bis zu ca. 45 Minuten möglich ist. Abschließend kann dies allerdings erst beurteilt werden, wenn ein geregeltes Prüfverfahren zur Verfügung steht.

Die durchgeführten Arbeiten sind eng verknüpft mit der Arbeit von Simon /50/, der die grundlegenden chemischen Entwicklungsarbeiten, sowie die Kombination von Brandschutz und verschiedenen Gebrauchseigenschaften bei Brandschutzbeschichtungen bearbeitet hat. Ein Teil der Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit sind auch in die Arbeit von Simon eingeflossen. Wesentliche eigene Leistungen dieser Arbeit sind:

- Die Entwicklung der Idee
- Die Definition von Gebrauchseigenschaften gemäß Anwendungsfall
- Die Entwicklung eines chemisch-physikalischen Modells
- Die Entwicklung eigener Versuchsmethoden
- Die Weiterentwicklungen der Entwicklungsreihe RAB 6 unter dem Aspekt der ETK Beanspruchung
- Die Organisation von anwendungsspezifischen Brandversuchen
- Die Weiterentwicklungen hinsichtlich Flexibilität und klimatischer Beständigkeit unter dem Aspekt der ETK-Beanspruchung

Ausgehend von der Idee, eine Hochleistungsbrandschutzbeschichtung auf Basis der keramisierenden Elastomere zu entwickeln, wurde zunächst analysiert, welche Erwartungen die Eigenschaften einer Hochleistungsbrandschutzbeschichtung bestehen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Arbeiten von Simon.

Um eine gezielte Entwicklung zu ermöglichen, wurde in einem ersten Schritt ein chemisch-physikalisches Modell entwickelt. Das Modell diente dazu, die grundsätzliche Machbarkeit abzuschätzen und geeignete Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Brandschutzleistung

zu identifizieren. Weiterhin wurde es nötig, eine geeignete Versuchsmethodik für eine schnelle Beurteilung der Brandschutzleistung zu entwickeln. Dies ist mit der Methode der Laborbrandversuche gelungen. Für den Gesamterfolg der Arbeit stellte dies einen entscheidenden Schritt dar. Bis Ende der Arbeit wurden ca. 2500 Versuche nach dieser Methode durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Laborbrandversuchen erlaubten keine abschließende Beurteilung der Brandschutzleistung unter ETK-Bedingungen. Zwar konnte über Messungen nachgewiesen werden, dass die Wärmestromdichte beim Laborbrandversuch im Zentrum zwischen 70 kW/m^2 und 100 kW/m^2 liegt. Dies entspricht den Werten, die in einem ETK-Versuch erreicht werden. Allerdings ist zu beachten, dass diese Wärmestromdichten beim Laborbrandversuch nur punktuell erzielt werden, während sie bei einem Normbrandversuch auf der gesamten Fläche auf das Material einwirken. Auch sind geometrische Effekte in dieser Methode nur begrenzt abzubilden. Daher musste eine Methode entwickelt werden, die eine Beurteilung des Verhaltens unter der ETK-Belastung erlaubte. Dies ist mit der Methode der Beistellversuche gelungen. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen wurden analog dem entwickelten chemisch-physikalischen Modell ausgewertet und lieferten wichtige Hinweise für die eigentlichen chemischen Entwicklungsarbeiten. Allerdings erlaubt auch diese Methode keine Beurteilung des Einflusses aus der Geometrie eines Bauteils. Daher wurden entsprechend den definierten Anwendungsfällen auch Bauteilversuche durchgeführt. Hierbei zeigten sich zum Teil unerwartete Resultate. Eine Übertragbarkeit der Resultate aus den Brandversuchen vom Laborbrand bis zum Bauteilversuch ist nicht gegeben. Allenfalls finden sich die Tendenzen wieder. Für eine abschließende Bewertung und einen Transfer der Ergebnisse in den Markt der entwickelten Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen ist daher eine geregelte Prüfmethode erforderlich.

Aus den ca. 1.500 Formulierungen, die im Rahmen dieser Arbeit mitentwickelt und untersucht wurden, wurden zwei Entwicklungsreihen erarbeitet. Beide Entwicklungsreihen verfügen über eine Brandschutzleistung, die den Stand der Technik weit übertreffen. Die Entwicklungsreihe RAB6 ist dabei ausschließlich für Innenanwendungen geeignet. Kurzzeitige Feuchtigkeitsbelastungen stellen die Formulierungen vor keine Probleme. Eine länger einwirkende Feuchtigkeit führt allerdings zu Schäden. Die Entwicklungsreihe RAB 6 zeichnet sich durch eine sehr hohe mechanische Festigkeit aus. Aufgrund der hohen Festigkeiten verfügt sie allerdings über kein elastisches Verhalten. Die Entwicklungsreihe RAB 7 hat ähnliche Eigenschaften, wie die RAB 6. Im Gegensatz zur RAB 6 verfügt sie über ein elastisches Verhalten. Daher ist sie auch für nicht bewitterte Außenanwendungen (z. B. Hinterlüftungsspalt einer Fassade) geeignet. Den klimatischen Einwirkungen in voll bewitterten Bereichen hält auch die RAB 7 nicht stand. Für beide Entwicklungsreihen stehen sowohl pigmentierte als auch transparente Ansätze zur Verfügung.

Die Problematik der klimastabilen Formulierungen wurde im Rahmen der Arbeit nicht zufriedenstellend gelöst. Die verfolgten Ansätze der Verwendung besser geeigneter Harzsysteme, der Verbesserung der Wasserbeständigkeit der wirksamen Brandschutzchemikalien sowie der Verwendung geeigneter Decklacke führten zwar zu Verbesserungen der Witterungsstabilität, aber eine Dauerhaftigkeit im Sinne von mehreren Jahren konnte nicht erreicht werden.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde eine innovative Technologie entwickelt, die erweiterte Möglichkeiten zur Lösung brandschutztechnischer Problemstellungen bei der Verwendung von Holzbauteilen zur Verfügung stellt. Primäres Anwendungsgebiet ist der mehrgeschossige Holzbau. Neben der Anwendung bei sichtbaren massiven Holzbauteilen im mehrgeschossigen Holzbau der Gebäudeklasse 4 liegt ein erhebliches Marktpotenzial in der Ertüchtigung des alten Bauwerksbestands bzw. der Umnutzung bestehender Gebäude. Die Idee sowie ein Teil der Ergebnisse sind zu einem internationalen Patent angemeldet worden.

10.2 Ausblick auf weiterführende Forschung

Im Rahmen der Bearbeitung der vorliegenden Arbeit haben sich weitere Forschungsansätzen ergeben. Die Anwendung der Hochleistungsbrandschutzbeschichtung als Kapselung von brennbaren Holzbauteilen hat einen bislang unbekanntem Einfluss auf die mechanischen Werte eines brandbeanspruchten Holzbauteils und damit auf die Tragfähigkeit. Dieser Einfluss ist in den derzeit gültigen Bemessungsregeln für Holzbauteile im Brandfall nicht erfasst. Die Entwicklung eines geeigneten Bemessungskonzeptes für Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen erscheint sinnvoll, um das volle Potenzial der entwickelten Lösungen zu nutzen.

Darüber hinaus stellt sich die Frage der chemischen Prozesse im Intumeszenzprozess. Hier liegen bislang nur grundlegende Modelle vor. Systematische Untersuchungen der Zersetzungsreaktionen von intumeszierenden Brandschutzformulierungen und deren Einzelkomponenten mittels thermischer, thermomechanischer und chemischer Analyse und deren Einfluss auf die Intumeszenz könnten wesentlich zum besseren Verständnis der zugrunde liegenden chemischen Reaktionen beitragen und damit eine gezielte Weiterentwicklung ermöglichen.

Die Zielsetzung eine Brandschutzbeschichtung für die Fassade zu entwickeln, wurde nicht erreicht. Die im Rahmen der Arbeit verfolgten Ansätze der Beeinflussung der wirksamen Zuschläge sowie eine mögliche Entwicklung einer speziellen Deckbeschichtung bieten aber interessante Ansatzpunkte für weiterführende Forschungen.

Aufgrund der Leistungsfähigkeit der entwickelten Lösungen ist ein weiterer interessanter Forschungsansatz die Übertragung der Technologie auf andere Werkstoffe neben dem Holz.

11 Literatur

Fachbücher und Artikel

- /1/ Bartholmai, M., Schartel, B.: Layered silicate polymer nanocomposites: new approach or illusion for fire retardancy? Investigations of the potentials and the tasks using a model system. *Polymer for advanced technologies* 15 (2004), S. 355 ff
- /2/ Beard, A.: Brandschutz ist Verbraucherschutz – wie man Produkte brandsicher machen kann. VFDB Jahresfachtagung Dresden 2002, Juni 2002
- /3/ Becker, J., Tichelmann, K., Hosser, D., Wesche, J.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz mehrgeschossiger Gebäude in Holzbauweise; Forschungsauftrag der deutschen Gesellschaft für Holzforschung; Untersuchungsbericht Teil 1, Juli 1997
- /4/ Bermes, B., Hölemann, H.: Simulation der Wirkungsweise von im Brandfall aufschäumenden Materialien. VFDB (2008), Nr. 4, S. 181 ff
- /5/ Blanke, W.: Thermophysikalische Stoffgrößen. 2. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 1989
- /6/ Brabrauskas, V.: Ignition Handbook. Fire Science Publishers, 2003
- /7/ Bobacz, D.: Zum Brandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz-Zentralblatt* (2005), Nr. 88, S. 1188 ff
- /8/ Browne, F. L.: Theories of combustion of wood and its control. *Forest Products Laboratory* (1958), Research Note FPL-2136
- /9/ Camino, G.: Intumescent Fire-retardant Systems. *Polymer Degradation and stability* 23 (1989), S. 359 ff
- /10/ Camino, G.: Fire retardancy of polymers, the use of intumescence; *The royal society of chemistry*, 1998
- /11/ Di Blasi, C.: The state of the art of transport models for charring solid degradation. *Polymer International* 49 (2000), S. 1133 ff

- /12/ Glos, P.: Holz – Potenziale des nachhaltigen Baustoffes. Informationsdienst Holz Spezial, Bonn, 2008
- /13/ Greixa, O. u.a.: Intumescence in fire retardancy of lignocellulosic panels. *Polymer Degradation and Stability* 82 (2003), S. 373 ff
- /14/ Groth, C., Müller, G.: FEM für Praktiker - Die Methode der finiten Elemente mit dem Programm ANSYS, 3. Auflage, expert-Verlag, 1997
- /15/ Hall, G. S.: World- Wide Research on fire and Behavior of timber and wood-based Materials. British Wood Pulp Association, Annual Convention 1971
- /16/ Hammerschmidt, U.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit von dielektrischen Feststoffen nach der Heizstreifen-Methode, *Phys.-Techn. Bundesanstalt (PTB) - Fachlab. 3.12 „Viskosität“*, 1997
- /17/ Hellwig, M.: Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe, Dissertation TU München, 1988
- /18/ Hicks, B. L.: Theory of ignition considered as a chemical reaction. *The Journal of Chemical Physics* Vol. 22 (1954), Nr. 3, S. 414 ff
- /19/ Hosser, D.: Mehrgeschossiger Holzbau: ökologisch, wirtschaftlich und brandsicher. *Carolo Wilhelmina*, Jahrgang 35, Heft 2, 2000
- /20/ Hosser, D.: Brandkapselung forciert mehrgeschossigen Holzbau. *Holz-Zentralblatt* (2001), Nr. 73, S. 946 ff
- /21/ Hosser, D., Dehne, M., Zehfuß, J.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise; Forschungsauftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung unter Beteiligung des iBMB/MPA der TU Braunschweig sowie der VHT Heusenstamm; Stufe 1: Theoretische Grundlagenuntersuchungen, Stufe 2: Experimentelle Grundlagenuntersuchungen; Abschlussbericht Juli 2000
- /22/ Huntierova, Z.: Abbrandverhalten von Spanplatten. Hamburg: Springer Verlag, 1994
- /23/ Kampmeier, B.: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau. Dissertation TU Braunschweig, 2008

- /24/ Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Zweite Auflage, Springer Verlag, 1951
- /25/ Kollmann, F.: Neuere Ergebnisse über das Verhalten von Holz und Holzbauteilen im Feuer. Holz – Zentralblatt (1966), Nr. 64/65, S. 1199 ff
- /26/ Kordina, K; Meyer-Ottens, C.: Holz Brandschutz Handbuch. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, München, Mai 1983
- /27/ Laoutid, F. u.a.: New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. Materials Science and Engineering 63 (2008), S. 100 ff
- /28/ Leonhardt, Th.: Seminarvortrag: Flammschutz für Holzwerkstoffe. Offenbach: BHF-Chemie. 2001
- /29/ Lipska, A., Parker, W. J.: Kinetics of the pyrolysis of cellulose over the temperature range 250°C-300°C. Journal of Applied Polymer Science (1966), Nr. 10, S. 1439 ff
- /30/ Lüdemann, A.: Weiterentwicklung eines Konzeptes zur Berechnung des Wärmedurchgangs durch keramische Elastomerschichten auf Holz. Studienarbeit TU Braunschweig, Januar 2004
- /31/ Lukowsky, D.: Optimierung des chemischen Holzschutzes im Fensterbau. 25. Holzschutz-Tagung der DGfH, 20./21. September 2007, Biberach
- /32/ MacKay, G.: Mechanism of thermal degradation of cellulose: a review of the literature. Wood, fire behaviour and fire retardant treatment, Can. Wood Council, Nov. 1966
- /33/ Malhotra, H. L.: Fire behaviour and acceptability of timber. British Wood Pulp Association, Annual Convention 1979
- /34/ Marutzky, R.: Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten. Habilitationsschrift, WKI-Bericht Nr. 26, Eigenverlag Wilhelm-Klauditz-Institut, Braunschweig, 1991
- /35/ Marutzky, R.; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse. DRW-Verlag Stuttgart, 1999

- /36/ Meinschmidt, P.; Zülch, M.: Schnelle Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem THS Verfahren. WKI-Bericht Nr. 10/2000, Eigenverlag Wilhelm-Klauditz-Institut, Braunschweig, 2000
- /37/ Metz, L.: Herabsetzung der Brennbarkeit des Holzes. Mitteilung Fachausschuss für Holzfragen, Heft 13, Berlin, 1936
- /38/ Mikkola, E.: Charring of wood. Technical Research Centre of Finland, 1991
- /39/ Neumüller, O.A.: Römpps Chemie Lexikon. 8. Auflage. Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1979
- /40/ n.n.: Timber and wood based materials in fire. Section 4, Sheet 11. Trada wood information, 1991
- /41/ Okoshi, M., Nishizawa, H.: Flame retardancy of nanocomposites. Fire and Materials (2004), Nr. 28, S. 423 ff
- /42/ Patzak, W: Zur Theorie des Brandgeschehens von Holz. VDI-Forschungsheft 552, Düsseldorf 1972
- /43/ Radicke, S.: Entwicklung eines Konzeptes zur Berechnung des Wärmedurchgangs durch keramische Elastomerschichten auf Holz. Diplomarbeit TU Braunschweig, Mai 2002
- /44/ Ratz, A.: Hochleistungsbrandschutzbeschichtung in Baudenkmälern. Diplomarbeit TU Braunschweig. Februar 2006
- /45/ Riedel, E.: Anorganische Chemie: Walter de Gruyter. Berlin, New York, 1990
- /46/ Roberts, A. F.: The heat of reaction during the pyrolysis of wood. Combustion and Flame (1971), Nr. 17, S. 79 ff
- /47/ Rüsche, H.: Reaktionskinetik des Massenverlustes bei Wärmebehandlung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 31 (1973), S. 307 ff
- /48/ Scheer, C.: Bemessung von Holzkonstruktionen für den Brandfall nach DIN 4102-22. In: Tagungsband zum Seminar „Neue Regelungen und Innovationen im Holzbau–Chancen für die Praxis“, Darmstadt, Braunschweig, Berlin, April 2005

- /49/ Simms, D. L.: Ignition of Cellulosic Materials by Radiation. Combustion and Flame 4 (1969), S. 293 ff
- /50/ Simon, S.: Untersuchungen zur systematischen Entwicklung von intumeszierenden Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen. Dissertation TU Braunschweig, Fraunhofer IRB Verlag, 2006
- /51/ Spearpoint, M. J.: Predicting the ignition and burning of wood in the cone calorimeter using an integral model. Dissertation Universität von Maryland, 1999
- /52/ Springer, S., Marutzky, R.: Läßt Blumen wachsen, aber brennt schlecht – Ein moderner und umweltverträglicher Holzwerkstoff: die B1-Spanplatte. Holzbau Magazin 1 (1999), S. 38 ff
- /53/ Syska, A.D.: Exploratory investigation of fire-retardant treatments for particleboard. Forest Products Laboratory (1969), Research Note FPL-0201
- /54/ Thomas, P.H.; Bowes, P. C.: Some aspects of the self-heating and ignition of solid cellulosic materials. British Journal of Applied Physics (1961), Nr. 12, S. 222 ff
- /55/ Topf, P.: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. Holz als Roh- und Werkstoff (1971), Nr. 8, S. 295 ff
- /56/ Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1998
- /57/ von Halasz u.a., R.: Holzbau Taschenbuch. 7. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 1974
- /58/ Walker, I. K. u.a.: The effect of dry heat on the ignition temperature of cellulose. New Zealand Journal of Science 12 (1969), S. 98 ff

Benutzte Normen und Richtlinien:

- DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; Ausgabe: 1998-05
- DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; Ausgabe: 1977-09

- DIN 4102-4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Ausgabe: 1994-03
- DIN 4102-14: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bodenbeläge und Bodenbeschichtungen; Bestimmung der Flammenausbreitung bei Beanspruchung mit einem Wärmestrahler; Ausgabe: 1990-05
- DIN 4102-15: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Brandschacht; Ausgabe: 1990-05
- DIN 18180: Gipskartonplatten; Arten, Anforderungen, Prüfung; Ausgabe: 2007-01
- DIN 18184: Gipskarton-Verbundplatten mit Polystyrol- oder Polyurethan-Hartschaum als Dämmstoff; Ausgabe: 2008-10
- DIN 18800-1: Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion; Ausgabe: 2008-11
- DIN 50050-1: Prüfung von Werkstoffen; Brennverhalten von Werkstoffen; Kleiner Brennkasten; Ausgabe: 1986-04
- DIN EN 438-2: Dekorative Hochdruck-Schichtpressstoffplatten (HPL) - Platten auf Basis härtpbarer Harze (Schichtpressstoffe) - Teil 2: Bestimmung der Eigenschaften. Ausgabe: 2005-04
- DIN EN 927-5: Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 5: Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit. Ausgabe: 2007-03
- DIN EN 927-6: Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Teil 6: Künstliche Bewitterung. Ausgabe: 2006-10
- DIN EN 13329: Laminatböden - Spezifikationen, Anforderungen und Prüfverfahren. Ausgabe: 2009-01
- DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen. Ausgabe: 2003-12
- DIN EN 14135: Brandschutzbekleidungen - Bestimmung der Brandschutzwirkung. Ausgabe: 2004-11
- DIN EN ISO 2409: Lacke und Anstrichstoffe - Gitterschnittprüfung (ISO 2409:1992). Ausgabe: 1994-10

- DIN EN ISO 2812-2: Lacke und Anstrichstoffe - Bestimmung der Beständigkeit gegen Flüssigkeiten - Teil 2: Verfahren mit Eintauchen in Wasser. Ausgabe: 2007-05
- ISO 834-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Bauteile - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Ausgabe: 1999-09
- ISO 5660-1: Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzung , Rauchentwicklung und Masseverluste - Teil 1: Wärmefreisetzung (Cone-Calorimeter-Verfahren); Ausgabe: 2002-12
- Lösemittelverordnung: Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen - 31. BImSchV
- MBO: Musterbauordnung; Fassung November 2002
- M-HFH HolzR: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise; Fassung Juli 2004
- VDL-RL 14 Anforderungen an Beschichtungssysteme für die werkseitige Beschichtung von Holzfenstern, Holz-Metallfenstern und Holz-Haustüren. Ausgabe Februar 2009

VERZEICHNIS DER BISHER IN DER SCHRIFTENREIHE DES IBMB ERSCHIENENEN HEFTE (ISSN 1439-3875)

In der Schriftenreihe "Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig - ISSN 0178-5796 (Heft 1 bis 16 als "Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig", Heft 17 bis 39 als "Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig") sind bisher die nachfolgend aufgeführten Hefte erschienen.

Sie können bezogen werden von:

Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Bibliothek
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig

Tel. (05 31) 3 91-54 54
Fax (05 31) 3 91-5900
E-Mail o.dienelt@tu-bs.de

oder über jede Buchhandlung.

Kosten:
Je nach Umfang zwischen €7 und €30
(zuzüglich Versandkosten)

Das aktuelle Verzeichnis unter:
www.ibmb.tu-bs.de (• Bibliothek)

Vergriffene Hefte können als Kopien gegen Erstattung der Kopierkosten bezogen werden.

Heft 1:

Deters, R.: Über das Verdunstungsverhalten und den Nachweis ölgiger Holzschutzmittel. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1962; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1962

Heft 2:

Kordina, K.: Das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1963; Sonderdruck aus: Beton 13(1962), S. 11-18, 81-84

Heft 3:

Eibl, J.: Zur Stabilitätsfrage des Zweigelenkbogens mit biegeweichem Zugband und schlaffen Hängestangen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1963; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1963

Heft 4:

Kordina, K.; Eibl, J.: Ein Verfahren zur Bestimmung des Vorspannverlustes infolge Schlupf in der Verankerung. Zur Frage der Temperaturbeanspruchung von kreiszylindrischen Stahlbetonsilos. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1964; Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbetonbau 58(1963), S. 265-268; 59(1964), S. 1-11

Heft 5:

Ertingshausen, H.: Über den Schalungsdruck von Frischbeton. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1965; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Hannover, 1965

Heft 6:

Waubke, N.V.: Transportphänomene in Betonporen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1966; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 7:

Ehm, H.: Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967

Heft 8:

Steinert, J.: Möglichkeiten der Bestimmung der kritischen Last von Stab- und Flächentragwerken mit Hilfe ihrer Eigenfrequenz. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967

Heft 9:

Lämmke, A.: Untersuchungen an dämmschichtbildenden Feuerschutzmitteln. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967

Heft 10:

Rafla, K.: Beitrag zur Frage der Kippstabilität aufgehängter Träger. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1968; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 11:

Ivanyi, G.: Die Traglast von offenen, kreisförmigen Stahlbetonquerschnitten: Brazier-Effekt. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1968; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 12:

Meyer-Ottens, C.: Brandverhalten verschiedener Bauplatten aus Baustoffen der Klassen A und B. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1969

Heft 13:

Fuchs, G.: Zum Tragverhalten von kreisförmigen Doppelsilos unter Berücksichtigung der Eigensteifigkeit des Füllgutes. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1968; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 14:

Meyer-Ottens, C.: Wände aus Holz und Holzwerkstoffen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970; Sonderdruck aus: Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, H.56(1969)

Heft 15:

Lewandowski, R.: Beurteilung von Bauwerksfestigkeiten anhand von Betongüewürfeln und -bohrproben. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1970

Heft 16:

Neubauer, F.-J.: Untersuchungen zur Frage der Rissesicherung von leichten Trennwänden aus Gips-Wandbauplatten. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1969

Heft 17:

Meyer-Ottens, C.; Kordina, K.: Gutachten über das Brandverhalten von Bauteilen aus dampfgehärtetem Gasbeton: aufgestellt für den Fachverband Gasbetonindustrie. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1970

Heft 17:

Meyer-Ottens, C.; Kordina, K.: Gutachten über das Brandverhalten von Bauteilen aus dampfgehärtetem Gasbeton. Erw. Neuaufll. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974

Heft 18:

Bödeker, W.: Die Stahlblech-Holz-Nagelverbindung und ihre Anwendung: Grundlagen und Bemessungsvorschläge. Braunschweig. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1971, ISBN 3-89288-057-3

Heft 19:

Meyer-Ottens, C.: Bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften: Beispiele für ihre Erfüllung bei Wänden, Brandwänden und Decken. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971

Heft 20:

Liermann, K.: Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1972; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972, ISBN 3-89288-056-5

Heft 22:

Nürnberger, U.: Zur Frage des Spannungsrißkorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1972; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972, ISBN 3-89288-054-9

Heft 23:

Meyer-Ottens, C.: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1972; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972

Heft 24:

El-Arousy, T.H.: Über die Steinkohlenflugasche und ihre Wirkung auf die Eigenschaften von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge im frischen und festen Zustand. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1973; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973, ISBN 3-89288-053-0

Heft 25:

Rieche, G.: Mechanismen der Spannungs-korrosion von Spannstählen im Hinblick auf ihr Verhalten in Spannbetonkonstruktionen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1973; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973, ISBN 3-89288-052-2

Heft 26:

Tennstedt, E.: Beitrag zur rechnerischen Ermittlung von Zwangsschnittgrößen unter Berücksichtigung des wirklichen Verformungsverhaltens des Stahlbetons. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-051-4

Heft 27:

Schneider, U.: Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1973; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973

Heft 28:

Neisecke, J.: Ein dreiparametrisches, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-050-6

Heft 29:

Kordina, K.; Maack, P.; Hjorth, O.: Traglastermittlung an Stahlbeton-Druckgliedern. Schlußbericht (AIF-Nr. 956). Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-048-4

Heft 30:

Eibl, J.; Ivanyi, G.: Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit von Randbalken bei Stahlbetondecken. Schlußbericht, Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974

Heft 31:

Kordina, K.; Janko, B.: Stabilitätsnachweise von Rahmensystemen im Stahlbetonbau. Schlußbericht (AIF-Nr. 1388), Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-049-2

Heft 32:

Hjorth, O.: Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1976; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1975

Heft 33:

Klingsch, W.: Traglastberechnung instationär thermisch belasteter schlanker Stahlbetondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1976; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1976

Heft 34:

Djamous, F.: Thermische Zerstörung natürlicher Zuschlagstoffe im Beton. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977

Heft 35:

Haksever, A.: Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall. Braunschweig. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977

Heft 36:

Storkebaum, K.-H.: Ein Beitrag zur Traglastermittlung von vierseitig gelagerten Stahlbetonwänden. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977, ISBN 3-89288-045-X

Heft 37:

Bechtold, R.: Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977, ISBN 3-89288-046-8

Heft 38:

Steinert, J.: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton aus dem Wassereindringverhalten. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Unveränderter Nachdruck der Erstveröffentlichung Bad Honnef, Osang, 1977 (Zivilschutzforschung, Bd. 7)

Heft 39:

Weiß, R.: Ein haufwerkstheoretisches Modell der Restfestigkeit geschädigter Betone. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1978; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978, ISBN 3-89288-047-6

Heft 40:

Alda, W.: Zum Schwingkriechen von Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1978; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978, ISBN 3-89288-035-2

Heft 41:

Teutsch, M.: Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken mit rechteckigem Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979, ISBN 3-89288-036-0

Heft 42:

Schneider, U.: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979

Heft 43:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Veröffentlichungen 1967 bis 1979. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979, ISBN 3-89288-037-9

Heft 44:

Kordina, K.; Fröning, H.: Druckmessungen in Silozellen mit einer neu entwickelten Sonde. Abschlußbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979, ISBN 3-89288-038-7

Heft 45:

Henke, V.: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirkung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1980; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1980

Heft 46:

Schneider, U.; Haksever, A.: Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen (Teil 1). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1980

Heft 47:

Walter, R.: Partiiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken: Berechnung des inneren Zwanges mit einem Scheibenmodell. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1981; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1981, ISBN 3-89288-039-5

Heft 48:

Svensvik, B.: Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbetonbalken unter Einschluß der Mitwirkung des Betons auf Zug in Abhängigkeit von Last und Zeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1981; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1981, ISBN 3-89288-040-9

Heft 49:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Veröffentlichungen 1967 bis 1981. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1981, ISBN 3-89288-041-7

Heft 50:

Ojha, S.K.: Die Steifigkeit und das Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982, ISBN 3-89288-042-5

Heft 51:

Henke, V.: Zusammenstellung und Anwendung Bayes'scher Verfahren bei der Stichprobenbeurteilung. Projekt D1 des SFB 148. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982, ISBN 3-89288-043-3

Heft 52:

Haksever, A.: Stahlbetonstützen mit Rechteckquerschnitten bei natürlichen Bränden. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982; Zugl.: Habil.-Schr., Technische Universität Istanbul, 1982, ISBN 3-89288-044-1

Heft 53:

Weber, V.: Untersuchung des Reiß- und Verformungsverhaltens segmentärer Spannbetonbauteile. Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1982, ISBN 3-89288-017-4

Heft 54:

Ranisch, E.-H.: Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton: geklebte Bewehrung. Unveränderter Nachdruck der Ausgabe 1982. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1982, ISBN 3-89288-010-7

Heft 55:

Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1982

Heft 56:

Timm, R.: Ein geometrisch und physikalisch nichtlineares Rechenmodell zur optimalen Biegebemessung ebener Stahlbetonrahmen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1982; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1982, ISBN 3-89288-018-2

Heft 57:

Diederichs, U.: Untersuchungen über den Verbund zwischen Stahl und Beton bei hohen Temperaturen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-019-0

Heft 58:

Schneider, U.: Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Versuchen in Brandräumen (Teil 2). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-020-4

Heft 59:

Dobbernack, R.: Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen unter Berücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung (Teil 3). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-021-2

Heft 60:

Hillger, W.: Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschallprüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-014-X

Heft 61:

Blume, F.: Zur Wirklichkeitsnähe der Lastannahmen in Silovorschriften für Zellen aus Stahlbeton und Spannbeton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1984, ISBN 3-89288-013-1

Heft 62:

Nölting, D.: Das Durchstanzen von Platten aus Stahlbeton : Tragverhalten, Berechnung, Bemessung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1984, ISBN 3-89288-012-3

Heft 63:

Wesche, J.: Brandverhalten von Stahlbetonplatten im baupraktischen Einbauzustand. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-009-3

Heft 64:

Droese, S.: Untersuchungen zur Technologie des Gleitschalungsbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-000-X

Heft 65:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Forschungsarbeiten 1978 - 1983. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984, ISBN 3-89288-001-8

Heft 66:

Hegger, J.: Einfluß der Verbundart auf die Grenztragfähigkeit von Spannbetonbalken. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-002-6

Heft 67:

Kepp, B.: Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaser-verbundwerkstoff als Bewehrung im Spannbetonbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-003-4

Heft 68:

Sager, H.: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-004-2

Heft 69:

Haß, R.: Zur praxisgerechten brandschutz-technischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-005-0

Heft 70:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: 17. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, März 1986, Kurzfassungen der Beiträge. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-006-9

Heft 71:

Ehm, C.: Versuche zur Festigkeit und Verformung von Beton unter zweiachialer Beanspruchung und hohen Temperaturen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-007-7

Heft 72:

Hartwich, K.: Zum Riß- und Verformungsverhalten von Stahlfaserverstärkten Stahlbetonstäben unter Längszug. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-008-5

Heft 73:

Scheuermann, J.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Verbund und Rißbildung von Stahlbetonbauteilen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-011-5

Heft 74:

Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-015-8

Heft 75:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Fachseminar Neue Bemessungsregeln durch Änderung der Stahlbeton- und Spannbetonvorschriften DIN 1045, DIN 4227, Juni 1986, Kurzfassungen der Beiträge. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-022-0

Heft 76:

Budelmann, H.: Zum Einfluß erhöhter Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-016-6

Heft 77:

Großmann, F.: Spannungen und bruchmechanische Vorgänge im Normelbeton unter Zugbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-023-9

Heft 78:

Rohling, A.: Zum Einfluß des Verbundkriechens auf die Rißbreitenentwicklung sowie auf die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-024-7

Heft 79:

Henning, W.: Zwangrißbildung und Bewehrung von Stahlbetonwänden auf steifen Unterbauten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-025-5

Heft 80:

Richter, E.: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spann-betonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-026-3

Heft 81:

Kiel, M.: Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächentragwerke unter Ein-schluß von Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-027-1

Heft 82:

Konietzko, A.: Polymerspezifische Auswirkungen auf das Tragverhalten modifizierter zementgebundener Betone (PCC). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-028-X

Heft 83:

Grzeschkowitz, R.: Zum Trag- und Verformungsverhalten schlanker Stahlbetonstützen unter besonderer Berücksichtigung der schiefen Biegung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-030-1

Heft 84:

Wiese, J.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-031-X

Heft 85:

Rudolph, K.: Traglastberechnung zwei-achsig biegebeanspruchter Stahlbetonstützen unter Brandeinwirkung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-032-8

Heft 86:

Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.; Noack, I.: Einfluß der Eigenbrandlast auf das Brandverhalten von Bauteilen aus brennbaren Baustoffen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989, in Vorbereitung, ISBN 3-89288-058-1

Heft 87:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Forschungsarbeiten 1984 - 1989. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989, ISBN 3-89288-034-4

Heft 88:

Grossert, E.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Massivbrücken mit zweizelligem Kastenquerschnitt. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1989, ISBN 3-89288-059-X

Heft 89:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Weiterbildungsseminar "Bauen in Europa", 15.-16. November 1990 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-063-8

Heft 90:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Claußen, T.; Voß, K.-U.: Vorspannung im Hochbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1991, ISBN 3-89288-064-6

Heft 91:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachtagung Spannbeton im Hoch- und Industriebau, Kurzreferate, 1991, ISBN 3-89288-065-4

Heft 92:

Heins, T.: Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung in ausgedehnten Räumen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1991; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, ISBN 3-89288-066-2

Heft 93:

Hagen, E.: Zur Prognose des Gefährdungspotentials von Raumbränden. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1992; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1991, ISBN 3-89288-072-7

Heft 94:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachseminar "Instandsetzung und Ertüchtigung von Massivbauten", 14.-15. November 1991 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-068-9

Heft 95:

Qualitätssicherung im Bauwesen, VMPA-Tagung 1992, 25.-26.06.1992, Tagungsbericht, ISBN 3-89288-071-9

Heft 96:

Weiterbildungsseminar "Brandschutz im Industriebau", 30.09.1992 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-070-0

Heft 97:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachseminar "Neue Technologien im Bauwesen", 12.-13.11.1992 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-073-5

Heft 98:

Gunkler, E.: Verstärkung biegebeanspruchter Mauerwerkswände durch bewehrte Ergänzungsschichten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1992, ISBN 3-89288-074-3

Heft 99:

Dorn, T.: Zur Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Träger-Stützen-Anschlüsse. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1992, ISBN 3-89288-075-1

Heft 100:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachseminar "Stahlfaserbeton", 04.03.1993 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-076-X

Heft 101:

Falkner, H.; Teutsch, M.: Vergleichende Untersuchungen an unbewehrten und stahlfaserbewehrten Industriefußböden. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-077-8

Heft 102:

Falkner, H.; Teutsch, M.: Comparative studies of plain and steel fiber reinforced concrete industrial ground slabs. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-078-6

Heft 103:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 1993: Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis. 06.-07.10.1993, Kurzreferate, ISBN 3-89288-079-4

Heft 104:

Thienel, K.-C.: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993
Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-080-8

Heft 105:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Braunschweiger Bauseminar 1993 "Dauerhafte Bauwerke aus Faserbeton", 11.-12.11.1993 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-081-6

Heft 106:

Neuentwicklungen im baulichen Brandschutz. Dr. Meyer-Ottens 60 Jahre; Fachseminar 18.03.1994 in Braunschweig, ISBN 3-89288-085-9

Heft 107:

Bunte, D.: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994
Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-086-7

Heft 108:

Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodell des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994
Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1994, ISBN 3-89288-087-5

Heft 109:

Forschungsarbeiten 1990 - 1994. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994, ISBN 3-89288-088-3

Heft 110:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Rohde, S.: Untersuchung der Schubtragfähigkeit und der Wasserundurchlässigkeit von Arbeitsfugen unter Verwendung von Stremaform-Abschalelementen.
Falkner, H.; Teutsch, M.; Claußen, T.: Schubtragfähigkeit des Vergußbetons zwischen Köcher-, Block oder Hülsenfundamenten und Stützenfuß bei unterschiedlich profilierten Betonoberflächen.
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994, ISBN 3-89288-089-1

Heft 111:

Voß, K.-U.: Zum Trag- und Verformungsverhalten bei Schwellbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-090-5

Heft 112:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 05./06.10.1994 in Braunschweig; Kurzreferate, 1994, ISBN 3-89288-092-1

Heft 113:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Aus der Forschung in die Praxis: 10./11.11.1994; Braunschweiger Bauseminar 1994, ISBN 3-89288-091-3

Heft 114:

Warnecke, P.: Tragverhalten und Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk, 1995

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-094-8

Heft 115:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 1995: 6. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 04.-05.10.1995, Kurzreferate, ISBN 3-89288-093-X

Heft 116:

Huang, Z.: Grenzbeanspruchung gebetteter Stahlfaserbetonplatten, 1995

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-095-6

Heft 117:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Huang, Z.: Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-096-4

Heft 118:

Kubat, B.: Durchstanzverhalten von vorge-spannten, punktförmig gestützten Platten aus Stahlfaserbeton, 1995

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-097-2

Heft 119:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Dichte Bauwerke: 09./10.11.1995; Braunschweiger Bauseminar 1995, ISBN 3-89288-091-3

Heft 120:

Steinert, C.: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall, Abschlußbericht, 1995, ISBN 3-89288-099-9

Heft 121:

Schütte, J.; Teutsch, M.; Falkner, H.: Fugenlose Betonbodenplatten, Forschungsbericht, 1996, ISBN 3-89288-100-6

Heft 122:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 24./25.09.1996 in Braunschweig, Kurzreferate, 1996, ISBN 3-89288-101-4

Heft 123:

Droese, S.; Riese, A.: Belastungsversuche an zwei Durchlauf-Plattenstreifen aus Elementplatten mit Aufbeton aus Stahlfaserbeton, 1996, ISBN 3-89288-102-4

Heft 124:

Hankers, C.: Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung, 1996

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996, ISBN 3-89288-103-0

Heft 125:

Schmidt-Döhl, F.: Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe, 1996

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996, ISBN 3-89288-104-9

Heft 126:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Ingenieurbauwerke mit neuen Konzepten: 14./15.11.1996, Braunschweiger Bauseminar 1996, ISBN 3-89288-105-7

Heft 127:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1990 - 1993, 1996, ISBN 3-89288-106-5

Heft 128:

Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy: Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung, 1997, ISBN 3-89288-107-3

Heft 129:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1994, 1997, ISBN 3-89288-108-1

Heft 130:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1995, 1997, ISBN 3-89288-109-X

Heft 131:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Klinkert H.: Trag- und Verformungsverhalten dynamisch beanspruchter Fahrbahnen aus Beton- und Stahlfaserbeton, Forschungsbericht, 1997, ISBN 3-89288-110-3

Heft 132:

Schütte, J.: Einfluß der Lagerungsbedingungen auf Zwang in Betonbodenplatten, 1997

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1997, ISBN 3-89288-111-1

Heft 133:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 1997: 7. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 01.-02.10.1997, Kurzreferate, ISBN 3-89288-112-X

Heft 134:

Ameler, J.: Betonverhalten bei hohen Temperaturen und triaxialer Beanspruchung - FE-Modell auf der Basis der Betonstruktur, 1997

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1997, ISBN 3-89288-113-8

Heft 135:

Tagung Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk: 06./07.11.1997 in Braunschweig, ISBN 3-89288-114-6

Heft 136:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Innovatives Bauen: 13./14.11.1997, Braunschweiger Bauseminar 1997, ISBN 3-89288-115-4

Heft 137:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1996 - 1997. 1998. ISBN 3-89288-116-2

Heft 138:

Scheibe, M.: Vorhersage des Zeitstandsverhaltens unidirektionaler Aramidfaserverbundstäbe in alkalischer Umgebung. 1998.

Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 1998. ISBN 3-89288-117-0

Heft 139:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten : 29./30.9.1998 in Braunschweig ; Kurzreferate. 1998. ISBN 3-89288-118-9

Heft 140:

Gutsch, A.: Stoffeigenschaften jungen Betons - Versuche und Modelle. 1998. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. ISBN 3-89288-119-7

Heft 141:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.] Beton auf neuen Wegen : 12.-13.11.1998 ; Braunschweiger Bauseminar 1998. ISBN 3-89288-120-0

Heft 142:

Betonbau - Forschung, Entwicklung und Anwendung : Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing Horst Falkner am 20.4.1999. 1999.
ISBN 3-89288-121-9

Heft 143:

Teutsch, M ; Klinkert, H.
Leistungsklassen von Stahlfaserbeton.
1999.
ISBN 3-89288-122-7

Heft 144:

Forschungsarbeiten 1995 - 1999. 1999.
ISBN 3-89288-123-5

Heft 145:

Braunschweiger Brandschutztage 1999: 8. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis ; 4.-5. Oktober 1999 in Braunschweig., Kurzreferate. 1999.
ISBN 3-89288-124-3

Heft 146:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Bauen im nächsten Jahrtausend : 11.11.-12.11.1999 ; Braunschweiger Bauseminar 1999.
ISBN 3-89288-125-1

Heft 147:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 28./29.3.2000 in Braunschweig; Kurzreferate, 2000.
ISBN 3-89288-126-X

Heft 148:

Hariri, K.: Bruchmechanisches Verhalten jungen Betons - Laser-Speckle-Interferometrie und Modellierung der Rißprozeßzone. 2000.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-127-8

Heft 149:

Wigger, H.: Rissbildung in historischem Natursteinmauerwerk : Beobachtung, Versuche und Berechnungsmodelle. 2000.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-128-6

Heft 150:

Neubauer, U.: Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstoffaser – Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen. 2000
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-129-4.

Heft 151:

Brandschutz in Chemikalienlagern. 2000.
ISBN 3-89288-130-8

Heft 152:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Trends und Entwicklungen im Bauwesen : 9.-10.11.2000 ; Braunschweiger Bauseminar 2000.
ISBN 3-89288-131-6

Heft 153:

Rostásy, F.S. ; Budelmann, H. [Hrsg.]
Rissbeherrschung massiger Betonbauteile : Bauwerk, Werkstoff, Simulation ; Braunschweig, 20.3.2001.
ISBN 3-89288-132-4

Heft 154:

Krauß, M. ; Hariri, K. ; Rostásy, F.S.
Hydratationsgrad, Ultraschall-Technik zur Beschreibung der Erhärtung, bruchmechanisches Verhalten jungen Betons : Berichte ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 3-89288-135-9.

Heft 155:

Gutsch, A. ; Rostásy, F.S.
Spannungs-Dehnungslinie, viskoelastisches Verhalten und autogenes Schwinden jungen Betons : Berichte ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 3-89288-136-7

Heft 156:

Rostásy, F.S. ; Krauß, M. ; Gutsch, A.
Spannungsberechnung und Risskriterien für
jungen Beton – Methoden des iBMB : Be-
richt ; Forschungsprojekt der EU (Brite
Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 3-89288-137-5

Heft 157:

Rostásy, F.S. ; Krauß, M. ; Gutsch, A.
Früher Zwang in massigen Sohlplatten :
Bericht ; Forschungsprojekt der EU (Brite
Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 4-89288-138-3

Heft 158:

Braunschweiger Brandschutztage 2001: 9.
Fachseminar Brandschutz - Forschung und
Praxis ; 1.-2. Oktober 2001 in Braun-
schweig., Kurzreferate. 2001.
ISBN 3-89288-139-1

Heft 159:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Bauen im Wandel der Zeit : 8.-9.11.2001 ;
Braunschweiger Bauseminar 2001. 2001.
ISBN 3-89288-140-5.

Heft 160:

Beiträge zum 40. Forschungskolloquium
des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton :
11.-12.10.2001 in Braunschweig. 2001.
ISBN 3-89288-141-3

Heft 161:

Dora, B.: Hydraulisch erhärtende Baustoffe
aus Betonbrechsand – Phasenveränderun-
gen durch Temperaturbehandlung und Ein-
satzmöglichkeiten.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2001.
ISBN 3-89288-142-1.

Heft 162:

RO 70 : 50 Jahre Forschung und 25 Disser-
tationen ; Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. zum
70 Geburtstag gewidmet. 2002.
ISBN 3-89288-143-X.

Heft 163:

Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbau-
ten : 1. und 2. Oktober 2002 in Braun-
schweig ; Kurzreferate.
2002.
ISBN 3-89288-144-8

Heft 164:

Stahlfaserbeton : Ein unberechenbares Ma-
terial? ; 14.-15. November - Braunschwei-
ger Bauseminar 2002.
ISBN 3-89288-145-6

Heft 165:

Niemann, P.
Gebrauchverhalten von Bodenplatten aus
Beton unter Einwirkungen infolge Last und
Zwang. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.,
2002.
ISBN 3-89288-146-4

Heft 166:

Budelmann ; H. ; Falkner, H. [Hrsg.]
Bauen im Bestand : 25. März 2003.
ISBN 3-89288-147-2

H. 167:

Blume, G.W.: Ingenieurmodell zur brand-
schutztechnischen Bemessung von Bautei-
len auf der Basis von experimentell ermit-
telten Verbrennungseffektivitäten. 2003.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2002.
ISBN 3-89288-148-0

H. 168:

Braunschweiger Brandschutztage 2003: 10.
Fachseminar Brandschutz - Forschung und
Praxis ; 30.9. - 1.10.2003 in Braunschweig.,
Kurzreferate. 2003.
ISBN 3-89288-149-9

H. 169:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Bauforschung und -praxis in schwierigen
Zeiten : 13. und 14. November ; Braun-
schweiger Bauseminar 2003.
ISBN 3-89288-150-2

H 170:

Hemmy, O.: Zum Gebrauchs- und Tragverhalten von Tunnelschalen aus Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2003. ISBN 3-89288-151-0

H. 171:

Dehne, M.: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. 2003. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2003. ISBN 3-89288-153-7

H. 172:

Paliga, K.: Entstehung und Vermeidung von Betonabplatzungen bei Tunnelbränden. 2003. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2003. ISBN 3-89288-154-5

Heft 173:

Festschrift zum 60 Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hossler : Brandschutz und mehr... 2003. ISBN 3-89288-152-9

Heft 174:

Timm, M.: Verbundwirkung des Betons im Bereich von STREMAFORM - Abschalelementen : Untersuchungsbericht ; Okt. 2000. 2004. ISBN 3-89288-156-1

Heft 175:

Zehfuß, J.: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004. ISBN 3-89288-155-3

Heft 176:

Nause, P.: Berechnungsgrundlagen für das Brandverhalten von Druckgliedern aus hochfestem Beton. 2004. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004. ISBN 3-89288-157-X
Nicht in der Schriftenreihe erschienen.

Heft 177:

Budelmann ; H. ; Falkner, H. [Hrsg.]
Bauen im Bestand : 23. März 2004.
ISBN 3-89288-158-8

H. 178:

Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten : 29. – 30.9.2004 in Braunschweig ; Kurzreferate. 2004. ISBN 3-89288-159-6

H. 179:

Krauß, M.: Probabilistischer Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen gegen frühe Trennrisse in massigen Betonbauteilen. 2004. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004. ISBN 3-89288-160-X.

H. 180:

Weiske, R.
Durchleitung hoher Stützlasten bei Stahlbetonflachdecken. 2004. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004. ISBN 3-89288-161-8.

H. 181:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Qualität im Bauwesen : 11. und 12. Nov. ; Braunschweiger Bauseminar 2004. ISBN 3-89288-162-6

H. 182:

Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Großkurth : Struktur und Anwendung der Baustoffe. 2005. ISBN 3-89288-163-4

H. 183:

Budelmann, H. ; Laube, M. ; Hinrichs, W. [Hrsg.]
Bauen im Bestand : 23. Februar 2005. ISBN 3-89288-164-2

H. 184:

Hinrichs, W.

Charakterisierung einer einheitlichen Messmethodik und Validierung ausgewählter Verfahren für die Bestimmung der Maschenweiten von Stahldrahtgeweben : Das Forschungsvorhaben wurde von der Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V. gefördert (Az: A 182/S24/10036/02. 2005). ISBN 3-89288-166-9.

H. 185:

Braunschweiger Brandschutz-Tage '05 : 11. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 28. und 29. Sept. 2005 in Braunschweig, Tagungsbericht. ISBN 3-89288-167-7.

H. 186:

Will, J.: Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden. 2005. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2005. ISBN 3-89288-168-5.

H. 187:

Rigo, E.M.: Ein probabilistisches Konzept zur Beurteilung der Korrosion zementgebundener Baustoffe durch lösenden und treibenden Angriff. 2005. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2005. ISBN 3-89288-169-3.

H. 188:

Budelmann, H. ; Gutsch, A.-W. [Hrsg.] Bauen im Bestand : Beton in der Abwassertechnik ; 6. Sept. 2005. ISBN 3-89288-170-7.

H. 189:

Gerritzen, D.P.

Zur Frage der Nachnutzbarkeit verbundlos vorgespannter Stahlbetondecken nach Brandeinwirkung. 2005. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2005. ISBN 3-89288-171-5.

H. 190:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]

Bewe(ä)rter Betonbau : 10. und 11. November ; Braunschweiger Bauseminar 2005. ISBN 3-89288-172-3

H. 191:

Kurzberichte aus der Forschung 2005. 2006. ISBN 3-89288-173-1

H. 192:

Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten : 26.-27. Sept. 2006 ; Kurzreferate. ISBN-10: 3-89288-174-X ISBN-13: 978-3-89288-174-2.

H. 193:

Sperling, D.

Eine Methode zur automatisierten Überwachung von Spannbetonfahrwegträgern. 2006. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2006. ISBN-10: 3-89288-175-8 ISBN-13: 978-3-89288-175-9.

H. 194:

Grunert, J.P.

Zum Tragverhalten von Spannbetonfertigteilbalken aus Stahlfaserbeton ohne Betonstahlbewehrung. 2006. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2006. ISBN-10: 3-89288-176-6 ISBN-13: 978-3-89288-176-6.

H. 195:

Budelmann, H. ; Gutsch, A.-W. [Hrsg.] Bau Symposium Braunschweig (BSB 2007) : Stand und Entwicklung des Trockenbaus ; 8. März. 2007. ISBN 978-3-89288-177-3.

H. 196:

Bruder, S.

Adaptive Modellierung der Dauerhaftigkeit im Zuge der Überwachung von Betonbauwerken. 2007. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 1996. ISBN 978-3-89288-178-0.

- H. 197:
 Holst, A.
 Korrosionsmonitoring und Bruchortung
 vorgespannter Zugglieder in Bauwerken.
 2007.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
 ISBN 978-3-89288-179-7.
- H. 198:
 Forell, B.
 A Methodology to assess Species Yields of
 Compartment Fires by means of an ex-
 tended Global Equivalence Ratio Concept.
 2007.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
 ISBN 978-3-89288-180-3.
- H. 199:
 Braunschweiger Brandschutz-Tage '07 : 21.
 Fachseminar Brandschutz – Forschung und
 Praxis, 26. und 27. Sept. 2007 in Braun-
 schweig, Tagungsband.
 ISBN 978-3-89288-181-0.
- H. 200:
 Nothnagel, R.
 Hydratations- und Strukturmodell für Ze-
 mentstein. 2007.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
 ISBN 978-3-89288-182-7
- H. 201:
 Riese, O.
 Ein Brandausbreitungsmodell für Kabel.
 2007.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
 ISBN 978-3-89288-183-4
- H. 202:
 Braunschweiger Brandschutz-Tage '08 : 22.
 Fachtagung ; Brandschutz bei Sonderbauten
 , 30.9. – 1.10.2008 – Tagungsband.
 ISBN 978-3-89288-185-8
- H. 203:
 Klinzmann, C.
 Methodik zur computergestützten, probabi-
 listischen Bauwerksbewertung unter Einbe-
 ziehung von Bauwerksmonitoring. 2008.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
 ISBN 978-3-89288-186-5.
- H. 204:
 Schnetgöke, R.
 Zuverlässigkeitsorientierte Systembewer-
 tung von Massivbauwerken als Grundlage
 für die Bauwerksüberwachung. 2008.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
 ISBN 978-3-89288-187-2.
- H. 205:
 Budelmann, H. ; Gutsch, A.-W. [Hrsg.]
 Bau Symposium Braunschweig (BSB
 2008): Konstruktiver Holzbau ; 4. Novem-
 ber 2008.
 ISBN 978-3-89288-188-9.
- H. 206:
 Kampmeier, B.
 Risikogerechte Brandschutzlösungen für
 den mehrgeschossigen Holzbau. 2008.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2008.
 ISBN 978-3-89288-189-6.
- H. 207:
 Husemann, U.
 Erhöhung der Verbundtragfähigkeit von
 nachträglich aufgeklebten Lamellen durch
 Bügelumschließungen.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2009.
 ISBN 978-3-89288-190-2
- H. 208:
 Braunschweiger Brandschutz-Tage '09 : 23.
 Fachtagung Brandschutz – Forschung und
 Praxis, 29.9.2008 – 30.9.2009 ; Tagungs-
 band.
 ISBN 978-3-89288-191-9
- H. 209:
 Sperbeck, S.T.
 Seismic Risk Assessment of Masonry Walls
 and Risk Reduction by Means of Prestress-
 ing. 2009.
 Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2009.
 ISBN 978-3-89288-192-6

H. 210:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 2010 : :
24. Fachtagung ; Brandschutz bei Sonder-
bauten , 21. und 22.9.2010 – Tagungsband.
ISBN 978-3-89288-194-0

H. 211:

Hohm, V.
Wärmetransportmodell für gekoppelte Pro-
zesse in der Brandsimulation. 2010.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
ISBN 978-3-89288-195-7.

H. 212:

Kruse, D.
Entwicklung von Hochleistungsbrand-
schutzbeschichtungen zum Entzündungs-
schutz von Holz unter Vollbrandbedingun-
gen. 2011.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2010.
ISBN 978-3-89288-196-4.

H. 213:

Twelmeier, H.
Dauerhaftigkeitsprognose der Verfügu-
ng von gipshaltigem historischem Mauerwerk.
2011.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2010.
ISBN 978-3-89288-197-1.

