

Christoph Gengnagel, Alexander Pfriem  
Jan Friedrich, Tom Brodhagen

# **Entwicklung von Fassadenelementen mit pyrolysierte Oberfläche mit ver- besserten Brandschutzeigenschaften – PyroForCE 2.0**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0500-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00  
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

# ZUKUNFTBAU

## FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

### Entwicklung von Fassadenelementen mit pyrolysierten Oberfläche mit verbesserten Brandschutzeigenschaften

Kurztitel:

#### PyroForCE 2.0 (Pyrolysis for Constructional Elements 2.0)

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gengnagel

Prof. Dr.-Ing. Alexander Pfriem

Jan Friedrich M.Sc.

Tom Brodhagen M.Sc.





**Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau  
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.**

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.21)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.



Zuwendungsempfänger:

**Universität der Künste Berlin (UdK)**

Institut für Architektur

Hardenbergstraße 33

10623 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gengnagel

Tel: +49 (0)30 3185 2993

Fax: +49 (0)30 3185 2992

E-Mail: gengnagel@udk-berlin.de

Projektpartner:

**Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE)**

Arbeitsgruppe Chemie und Physik des Holzes

Alfred-Möller-Straße 1

16225 Eberswalde

Prof. Dr.-Ing. Alexander Pfriem

Tel: +49 (0)3334 657 377

Fax: +49 (0)3334 657 372

E-Mail: alexander.pfriem@hnee.de

**Webber Brennertechnik GmbH**

Landmannweg 18

44149 Dortmund

Herr David Webber

Tel.: +49 (0)2302 890890

Fax.: +49 (0)2302 8908910

E-Mail: Info@webber-group.de

Gefördert durch:

**Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung**

Referat II 3, Forschung im Bauwesen

Deichmanns Aue 31-37

53179 Bonn

Tel.: +49 228 99401-2733

Fax.: +49 228 9910401-2733

E-Mail: zb@bbr.bund.de

**Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-16.21**

In Erinnerung an Torben Jacobsen.

*„Es ist in dieser wichtigen Sache wohl zu erwägen, daß es bei einem ausbrechenden Feuer oft auf die erste kräftige Hilfe, das beginnende Feuer zu dämpfen, ankömmt, um dessen Umsichgreifen zu verhindern und großem Unglück vorzubeugen, vielleicht eine Stadt oder ein Dorf zu retten.“<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Creuzburg 1864, Seite 49

# Inhalt:

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Einleitung</b>                                                                                 | <b>12</b> |
| Holz als Fassadenmaterial                                                                         | 12        |
| Pyrolyse als Methode des Brandschutzes                                                            | 13        |
| <b>1. Forschungsfragen und Arbeitsprogramm</b>                                                    | <b>14</b> |
| 1.1 Oberflächenpyrolyse für unterschiedliche Holzarten, insbesondere heimische Nadelhölzer        | 14        |
| 1.2 Bau einer Pyrolyseanlage im Technikumsmaßstab                                                 | 14        |
| 1.3 Stabilisierung der pyrolysierten Oberfläche                                                   | 15        |
| 1.4 Arbeitsprogramm                                                                               | 16        |
| AP 1: Grundlagenermittlung                                                                        | 16        |
| AP 2: Verfahrensentwicklung                                                                       | 16        |
| AP 3: Entwicklung von Fassadensystemen für pyrolysierte Hölzer                                    | 16        |
| AP 4: Ermittlung der Oberflächeneigenschaften                                                     | 17        |
| AP 5: Entwicklung von Gegenzuglösungen                                                            | 17        |
| AP 6: Entwicklung von Fassadenprototypen und Test dieser nach B1-Prüfung                          | 17        |
| AP 7: Entwicklung von Oberflächen-Vergütungsverfahren zur zusätzlichen Stabilisierung             | 17        |
| AP 8: Entwicklung eines Baustellensystems zur Nachbehandlung von Schnittflächen auf der Baustelle | 18        |
| AP 9: Aufbau einer Referenzfassade                                                                | 18        |
| <b>2. Oberflächenpyrolyse zur Erhöhung des Feuerwiderstands</b>                                   | <b>20</b> |
| 2.1 Oberflächenpyrolyse bei Bauhölzern                                                            | 20        |
| 2.1.1 Oberflächenpyrolyse zur Erhöhung des Brandschutzes                                          | 20        |
| 2.1.2 Shou Sugi Ban – Eine traditionelle Methode, Fassadenhölzer zu pyrolysieren                  | 20        |
| 2.1.3 Markt für pyrolysierte Fassaden                                                             | 21        |
| 2.1.4 Pyrolyse als Methode des nachhaltigen Brandschutzes                                         | 21        |
| 2.2 Pyrolyseverfahren                                                                             | 22        |
| 2.2.1 Pyrolyse und Verbrennung                                                                    | 22        |
| 2.3 Bau einer Pyrolyseanlage im Technikumsmaßstab                                                 | 23        |
| 2.3.1 Direkte und indirekte Pyrolyse                                                              | 23        |
| 2.3.2 Pyrolyseschicht als Brandschutz                                                             | 23        |
| 2.4 Brandschutz bei Fassaden aus Holz                                                             | 24        |
| 2.4.1 Klassifizierungen und normative Verweise                                                    | 24        |
| 2.4.2 Spezifische Brandschutzklassifikationen für hinterlüftete Fassaden aus Vollholz             | 25        |
| 2.4.3 Konstruktiver Holzschutz bei hinterlüfteten Fassaden                                        | 26        |
| 2.5 Pyrolyseanlage als Prototyp                                                                   | 27        |
| 2.5.1 Brennertechnologie                                                                          | 28        |
| 2.5.2 Gas-Steuer-Einheit                                                                          | 28        |
| 2.5.3 Brenner                                                                                     | 29        |
| 2.5.4 Vorschub                                                                                    | 30        |
| 2.5.5 Steuerung und Interface zur Kontrolle der Vorschubgeschwindigkeit                           | 30        |
| 2.5.6 Auswertung einzelner alternativer Verfahrenstechniken                                       | 31        |

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.7 Ausschluss der Kontaktpyrolyse                                             | 31        |
| 2.5.8 Kritik                                                                     | 32        |
| 2.6 Entwicklung von Baustellensystemen                                           | 33        |
| 2.6.1 Lösungsansatz 1 – Direktbeflammung                                         | 33        |
| 2.6.2 Lösungsansatz 2 – Kontaktmethode                                           | 34        |
| <b>3. Stabilisierung der Oberfläche</b>                                          | <b>36</b> |
| 3.1 Mineralische Stoffe zur Stabilisierung der Pyrolyseschicht                   | 36        |
| 3.2 Wasserglas                                                                   | 38        |
| 3.2.1 Wasserglas – Herstellung                                                   | 38        |
| 3.2.2 Wasserglas – Anwendung und Wirkungsweise                                   | 39        |
| 3.2.3 Wasserglas – traditionelles Bindemittel zur Stabilisierung von Oberflächen | 40        |
| 3.2.4 Wasserglas zur Stabilisierung von Holzoberflächen                          | 41        |
| 3.2.5 Wasserglas als Flammenschutzmittel, insbesondere von Holz                  | 41        |
| 3.3 Wasserglasarten                                                              | 43        |
| 3.3.1 Auswahl des Wasserglases                                                   | 43        |
| 3.3.2 Natrium-Wasserglas                                                         | 43        |
| 3.3.3 Kalium-Wasserglas                                                          | 44        |
| 3.3.4 Fixierungs-Wasserglas                                                      | 44        |
| 3.4 Auftrag des Wasserglases - Imprägnierverfahren                               | 45        |
| 3.4.1 Auftrag des Wasserglases auf Holz                                          | 45        |
| 3.4.2 Traditionelle Auftragsverfahren                                            | 45        |
| 3.4.3 Auftrag des Wasserglases auf die Pyrolyseschicht - Imprägnierverfahren     | 47        |
| 3.4.3.1 Kali-Wasserglas mittels Pinsel-Auftrag                                   | 47        |
| 3.4.3.2 Imprägnierung im Unterdruckverfahren                                     | 47        |
| 3.4.3.3 Natrium-Wasserglas mittels Imprägnierung                                 | 47        |
| 3.4.4 Mikroskopische Untersuchungen der Imprägnierverfahren                      | 48        |
| <b>4. Experimentelle Untersuchungen</b>                                          | <b>50</b> |
| 4.1 Material                                                                     | 50        |
| 4.2 Probekörper                                                                  | 51        |
| 4.3 Pyrolyse                                                                     | 52        |
| 4.3.1 Materialverformungen durch die Pyrolyse                                    | 53        |
| 4.4 Imprägniermethoden                                                           | 54        |
| 4.4.1 Pinsel-Imprägnierung mit Kaliumwasserglas                                  | 54        |
| 4.4.2 Auswertung der Pinsel Imprägnierung                                        | 54        |
| 4.4.3 Imprägnieren von Natriumwasserglas im Unterdruckverfahren                  | 56        |
| 4.4.3.1 Imprägnierung im Autoklav                                                | 56        |
| 4.4.3.2 Imprägnieren im Vakuum-Sack                                              | 56        |
| 4.4.4 Auswertung der Imprägnierungen im Unterdruckverfahren                      | 57        |
| <b>5. Klassifizierung und Prüfverfahren</b>                                      | <b>58</b> |
| 5.1 B2-Test                                                                      | 59        |
| 5.1.1 Beobachtungen                                                              | 60        |
| 5.1.2 Zusammenfassung und Schlussfolgerung                                       | 61        |
| 5.2 Gitterschnitt-Test                                                           | 62        |
| 5.2.1 Auswertung der Gitterschnitt-Test                                          | 62        |
| 5.2.2 Schlussbetrachtung Gitterschnitt Test                                      | 64        |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3 Taber-Test                                                     | 65         |
| 5.3.1 Auswertung der Taber-Tests                                   | 65         |
| 5.4 Bewitterungstest                                               | 68         |
| 5.4.1 Vorbereitung der Probekörper                                 | 68         |
| 5.4.2 Beschreibung des Testprogramms                               | 68         |
| 5.4.3 Bewertungskriterien                                          | 69         |
| 5.4.4 Ergebnisse der Bewitterung                                   | 70         |
| 5.4.4.1 Ergebnisse der Bewitterung bei den einzelnen Probekörpern  | 71         |
| 5.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Bewitterung               | 72         |
| 5.5 SBI-Test                                                       | 74         |
| 5.5.1 SBI-Test 1 und 2 – Festlegung der Parameter                  | 76         |
| 5.5.2 Probekörper 1 - Vertikale Leisten-Deckel-Schalung            | 77         |
| 5.5.2.1 Durchführung                                               | 78         |
| 5.5.2.2 Auswertung                                                 | 79         |
| 5.5.3 Probekörper 2 - Horizontale Stülpchalung                     | 81         |
| 5.5.3.1 Durchführung und Auswertung                                | 83         |
| 5.5.4 SBI Test 2.0 – Weitere Entwicklung: Probekörper 3 bis 5      | 86         |
| 5.5.5 SBI-Test 3 - Boden-Deckel-Schalung                           | 87         |
| 5.5.6 SBI-Test 4 - Boden-Deckel-Schalung                           | 90         |
| 5.5.7 SBI-Test 5 - Boden-Deckel-Schalung                           | 93         |
| 5.5.8 Zusammenfassung und Auswertung der SBI-Tests und Ausblick    | 97         |
| 5.6 Langzeitbewitterung – Freibewitterung nach DIN 2810            | 100        |
| 5.6.1 Versuchsaufbau                                               | 101        |
| 5.6.2 Fassadentypen und Holzarten                                  | 101        |
| 5.6.3 Vorbereitung und Montage                                     | 102        |
| 5.6.4 Erste Beobachtungen aus dem Aufbau                           | 105        |
| 5.6.5 Erste Beobachtungen aus der Langzeitbewitterung              | 106        |
| 5.6.6 Verbesserungen und Ausblick                                  | 108        |
| <b>6. Schlussbetrachtung und weiterführende Forschungsfragen</b>   | <b>110</b> |
| 6.1 Pyrolysemethode und Pyrolyseanlage                             | 111        |
| 6.2 Stabilisierung der pyrolysierten Oberfläche                    | 112        |
| 6.2.1 Voruntersuchungen zur Oberflächenstabilisierung              | 112        |
| 6.2.2 Imprägnieren mit Wasserglas                                  | 113        |
| 6.3 Zusammenfassung der SBI-Tests und der getesteten Fassadentypen | 114        |
| 6.4 Langzeitbewitterung - Erkenntnisse zur Montage                 | 115        |
| 6.4.1 Langzeitbewitterung - erste Erkenntnisse                     | 115        |
| 6.5 Forschungsfrage - Forschungsergebnis                           | 117        |
| 6.6 Weiterführende Forschungsfragen                                | 118        |
| 6.7 Wirtschaftliche Verwertung                                     | 120        |
| <b>7. Anhang</b>                                                   | <b>122</b> |
| 7.1 Normen und Vorschriften - Auszug                               | 122        |
| 7.2 Literatur - Auszug                                             | 124        |
| 7.3 Berichte HNEE                                                  | 126        |
| 7.4 Internetseiten - Auswahl                                       | 126        |
| <b>8. Mitarbeiter und Projektpartner</b>                           | <b>128</b> |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9. Bildanhang und Berichte - Auswahl</b>                                 | <b>130</b> |
| 9.1 B2-Test: Testergebnisse und Mikroskopie                                 | 132        |
| 9.2 Taber-Test: Abrieb der Oberfläche                                       | 136        |
| 9.3 Bewitterungstests                                                       | 140        |
| 9.3.1 Veränderung der Oberfläche bei Eiche                                  | 140        |
| 9.3.2 Veränderung der Oberfläche bei Fichte                                 | 144        |
| 9.3.3 Veränderung der Oberfläche bei Lärche                                 | 148        |
| 9.4 SBI-Tests                                                               | 152        |
| 9.4.1 SBI-Test 1: Leisten-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, imprägniert | 152        |
| 9.4.2 SBI-Test 2: Stülpchalung, Lärche, pyrolysiert, imprägniert            | 155        |
| 9.4.3 SBI-Test 3: Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert                | 158        |
| 9.4.4 SBI-Test 4: Boden-Deckel-Schalung, Eiche, pyrolysiert                 | 159        |
| 9.4.5 SBI-Test 5: Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, imprägniert   | 160        |
| 9.4.6 Filmstills der SBI-Tests                                              | 162        |
| 9.5 Prüfbericht der BAM - Auszug                                            | 168        |





# Einleitung

## Holz als Fassadenmaterial

*„Wer sich für eine Fassade aus Holz entscheidet, entscheidet sich für ein natürliches, klimaschonendes Material, das sich durch Wahl der Holzart, Art der Montage und Oberflächenbehandlung ganz individuell gestalten lässt. Die Praxis zeigt, dass Holzfassaden bei werkstoffgerechtem Einsatz oft eine längere Lebensdauer als Sichtbeton- oder Putzfassaden erreichen.“<sup>2</sup>*

Holz ist ein klimaneutraler Baustoff. Ein Kubikmeter Holz speichert je nach Holzart etwa eine Tonne CO<sub>2</sub>, welches über den gesamten Zyklus seiner Verwendung gebunden bleibt. Damit liegt es nah, Holz auch als Fassadenmaterial, insbesondere auch bei energetischen Gebäudesanierungen einzusetzen. Der Markt hierfür ist sehr groß. Aktuell gängige Verfahren der energetischen Fassadenertüchtigung wie Wärmedämmverbundsysteme sind jedoch aufgrund der hier eingesetzten Dämmstoffe aus petrochemischen Grundstoffen nicht nur aus ökologischer Sicht als kritisch zu bewerten.

Holz ist aber „brennbar“ und so gibt es Beschränkungen für Zulassung als Baumaterial, welche sich zunächst in den Bauordnungen der Länder widerspiegeln. Unbehandelte Hölzer sind demnach nur für bestimmte Gebäudeklassen zulassen, was eine Verwendung zum Bau von Fassaden, insbesondere im innerstädtischen Kontext, nahezu ausschließt. Nur durch brandhemmende Imprägnierungen kann Holz so ausgerüstet werden, dass es auch dort eingesetzt werden darf, wo gesetzliche Regelungen die Verwendung „schwerentflammbarer“ Bauprodukte vorschreiben. Die hierzu in Frage kommenden Verfahren sind jedoch ökologisch bedenklich. Gleichzeitig müssen Holzelemente im Außenbereich auch witterungsstabil sein – eine Anforderung, die insbesondere für Fassadenmaterialien relevant ist.<sup>3</sup>

Eine Besonderheit des Materials Holz liegt in seinem Abbrandverhalten. Zunächst verbrennen austretende Holzgase und an der Oberfläche bildet sich eine Kohleschicht. Für das weitere Verbrennen dieser Kohleschicht sind allerdings deutlich höhere Temperaturen erforderlich als zum Entzünden der Holzgase. Gleichzeitig wirkt diese Kohleschicht aufgrund ihrer hohen Porosität isolierend und verzögert den weiteren Abbrand darunterliegender nativer Holzbereiche. Eine vollständige Verbrennung von Holz erfolgt also nur, sofern durch den Verbrennungsprozess genügend Energie freigesetzt wird, um weiterhin Holzgase aus tieferen Schichten freizusetzen und damit Temperaturen zu erzeugen, die ausreichend sind, auch die Kohleschicht zu verbrennen.

Sind die Oberflächen von Hölzern allerdings bereits verkohlt, sorgt die Kohleschicht dafür, dass bei erneuter Brandeinwirkung die innenliegenden nativen Holzteile nicht so schnell bis auf die zur Entzündung der Holzgase erforderliche Temperatur erhitzt werden. Die Kohleschicht wirkt als Brandschutz.

---

<sup>2</sup> aus: [www.holzistgenial.at/blog/fassaden-aus-holz-die-wichtigsten-grundlagen/](http://www.holzistgenial.at/blog/fassaden-aus-holz-die-wichtigsten-grundlagen/)

<sup>3</sup> vgl. auch Scheer 2009, Seite 478: „Grundsätzlich wären die Fassaden aufgrund der benötigten Mengen ein sehr interessanter Markt für schwerentflammbare Holzwerkstoffe. Allerdings müssen bewitterte Holzbauteile auch witterungsstabil sein. Schwerentflammbar ausgerüstete Holzwerkstoffe sind es derzeit nicht. Hier sind weiterführende Forschungen notwendig.“

# Pyrolyse als Methode des Brandschutzes

Schon lange wird die Oberflächenpyrolyse als Methode des Holz- und Brandschutzes eingesetzt. Erste schriftliche Hinweise hierzu finden sich bereits in den frühesten Traktaten zur Architektur, bei Vitruv ebenso wie bei Alberti. Unter dem Namen Shou Sugi Ban wurde in Japan eine Technik entwickelt, die Oberfläche von Fassadenhölzern gezielt mit einer Pyrolyseschicht zu überziehen, um die Ausbreitung von Feuern in den vorwiegend aus Holz errichteten mittelalterlichen Städten und Siedlungen zu verhindern.

Traditionell werden bei dieser Methode drei Bretter vertikal zusammengestellt und in dem so gebildeten Kamin ein Feuer entzündet. Die Bretter beginnen einseitig zu brennen und werden gelöscht, sobald eine ausreichend dicke Kohleschicht entstanden ist.



Abbildung 1 und 2

Shou Sugi Ban - traditionelle Herstellungsmethode für die Oberflächenpyrolyse Bildquelle: <https://www.dwell.com>

Das Forschungsprojekt PyroForCE greift diese Idee eines "natürlichen Brandschutzes" für Holzfassaden durch Oberflächenpyrolyse auf. Grundlegend für die wissenschaftliche Bewertbarkeit ist hierfür zunächst, eine steuerbare und reproduzierbare Methode zur Herstellung von Pyrolyseschichten auf Fassadenbrettern zu entwickeln. Dann soll gezeigt werden, dass mit der Oberflächenpyrolyse eine qualitative Verbesserung des Feuerwiderstands erreicht werden kann, die auch den Anforderungen europäischer Brandschutznormen entsprechen. Letztlich sollen durch die Klassifizierung der vorgeschlagenen Methode und die Erarbeitung von Gestaltungsbeispielen Möglichkeiten des Einsatzes von Holzfassaden, insbesondere für den städtischen Kontext aufgezeigt werden.

# 1. Forschungsfragen und Arbeitsprogramm

Im Vorgängerprojekt PyroForCE 1.0 (01.04.2015 bis 31.07.2016, FNR 22010714) konnte gezeigt werden, dass durch die Oberflächenpyrolyse naturbelassener Holzbretter der Feuerwiderstand signifikant erhöht werden kann. Das Projekt war als Machbarkeitsstudie angelegt und diente dazu, die Problemstellung für weitere Forschungen näher einzugrenzen.<sup>4</sup> Das für eine zweijährige Laufzeit konzipierte Folgeprojekt PyroForCE 2.0 baut auf den Ergebnissen dieser Machbarkeitsstudie auf. Der Fokus liegt jetzt insbesondere auf drei Schwerpunkten: Der Untersuchung des Zusammenhangs Pyrolyseschicht und Feuerwiderstand bei unterschiedlichen Holzarten, der Entwicklung einer technischen Herstellungsmethode der Pyrolyseschichten und Untersuchungen zu Möglichkeiten der Stabilisierung der pyrolysierten Oberflächen.

## 1.1 Oberflächenpyrolyse für unterschiedliche Holzarten, insbesondere heimische Nadelhölzer

Mit Hilfe von Brennkasten-Tests<sup>5</sup> konnte bereits in dem Vorgängerprojekt PyroForCE 1.0 gezeigt werden, dass die Oberflächenpyrolyse einen Einfluss auf den Feuerwiderstand hat. Dieser Effekt war bei den Vortests jedoch nur bei Fassadenhölzern aus Eiche stark genug, um damit eine Brandschutzklassifikation erreichen zu können. Bei den ebenfalls getesteten Nadelhölzern Fichte und Lärche, konnte durch die Pyrolyse nur eine geringfügige Verbesserung des Feuerwiderstandes ermittelt werden. Da Fassaden mehrheitlich aus Nadelhölzern gebaut werden, gilt es, die Pyrolysemethode so zu verändern, dass insbesondere auch für Fassadenhölzer aus Fichte und Lärche eine Erhöhung des Feuerwiderstands erreicht werden kann. Als Maßstab wurde das Ziel gesetzt, eine Klassifizierung zu erreichen, die den Einsatz als Fassadenmaterial im urbanen Kontext ermöglicht. Fassadenhölzer, welche in nativem Zustand in die Baustoffkategorie „*brennbar*“ fallen, müssen so zu verbessert werden, dass sie der Kategorie „*schwerentflammbar*“ entsprechen.

## 1.2 Bau einer Pyrolyseanlage im Technikumsmaßstab

Die traditionelle japanische Methode des Shou Sugi Ban ist eine handwerkliche Technik, die sich nicht unmittelbar in einen industriellen Prozess übertragen lässt. Schon die Vorversuche erforderten den Nachweis einer technischen Lösung für den Pyrolyseprozess, um die Machbarkeit des Einsatzes des Verfahrens zur Erhöhung des Brandschutzes von Fassaden in großem Maßstab erforschen zu können. Die Pyrolyse erfolgte bei PyroForCE 1.0 zunächst mit einem Infrarotbrenner, da eine direkte Beflammung und damit ein Entzünden und Brennen der Oberfläche vermieden werden sollte. Die so maximal erzielbare und damit extrem niedrige Vorschubgeschwindigkeit von weniger als 0,1 m/s erlaubt aber keine Weiterentwicklung für eine Produktion im industriellen Maßstab. Ein zentrales Anliegen des Projekts PyroForCE 2.0 bestand also in der Entwicklung eines Prozesses der Oberflächenpyrolyse mit deutlich erhöhter Vorschubgeschwindigkeit, einschließlich einer präzisen Steuerungsmöglichkeit.

---

<sup>4</sup> vgl. Gengnagel/Pfriem: Endbericht zu PyroForCE 1.0

<sup>5</sup> vgl. DIN 4102-1

Die zu entwickelnde Vorstufe eines industriellen Prozesses sollte es ermöglichen, unterschiedlich starke Pyrolyseschichten auf unterschiedlichen Fassadenhölzern präzise gesteuert und reproduzierbar zu erzeugen, um damit eine wissenschaftliche Auswertbarkeit zu garantieren.

## 1.3 Stabilisierung der pyrolysierten Oberfläche

Unabhängig von der Methode der Herstellung der Oberfläche, deren spezifischer Schichtstärke und auch den unterschiedlichen getesteten Holzarten, konnte bereits im Vorfeld aufgezeigt werden, dass zusätzliche Maßnahmen unternommen werden müssen, um die pyrolysierte Oberfläche dauerhaft gegen mechanischen Abrieb und witterungsbedingten Abtrag zu schützen. Es müssen also Verfahren gefunden werden, mit deren Hilfe die Pyrolyseschichten stabilisiert werden können. Die wichtigste Anforderung an diese Maßnahme zur Stabilisierung der Oberfläche besteht darin, dass sie die Brandlast nicht wieder erhöhen dürfen – idealerweise tragen diese Stabilisierungen selbst noch zur Erhöhung des Feuerwiderstands bei. Im Sinne der Aufgabenstellung liegt eine der wesentlichen Anforderungen an diese gesuchten Methoden darin, dass sie nachhaltig und ökologisch unbedenklich sein müssen.

Mit der Untersuchung nachhaltiger Mittel zur Stabilisierung der Oberfläche und der Entwicklung von Verfahren für deren Auftrag, ist ein weiterer Schwerpunkt für das Forschungsprojekt gesetzt worden.

## 1.4 Arbeitsprogramm

Für das Forschungsprojekt wurden die drei oben genannten Schwerpunkte weiter aufgegliedert und in einzelnen Arbeitspaketen dargelegt.

### AP 1: Grundlagenermittlung

Die Grundlagenermittlung diente der Zusammenstellung notwendiger Rahmenbedingungen, von der Organisation der einzelnen Projektbeteiligten, über die Sichtung vorhandener Literatur zum Thema, der Zusammenstellung normativer wie baupraktischer Regelwerke bis zur Projektplanung und der Festlegung von Zwischenschritten. Einen Schwerpunkt bildete die Recherche zu Holzfassaden und die Zusammenstellung gebauter Fassaden mit pyrolytisch veränderter Oberfläche zu einem umfangreichen Katalog, um daraus konstruktive wie gestalterische Prinzipien ableiten zu können.

### AP 2: Verfahrensentwicklung

Die Verfahrensentwicklung bildet einen der Kernpunkte des Projektes. Ziel ist es, eine Methode zu finden, um mit akzeptablem Zeitaufwand eine reproduzierbare Pyrolyseschicht auf den unterschiedlichen Fassadenhölzern erzeugen zu können. Folgende Anforderungen wurden an die Anlage gestellt: Durch die Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit soll es ermöglicht werden, die Stärke der Pyrolyseschicht gezielt zu bestimmen. Die zur Beflammung eingesetzte Methode soll sowohl die Reproduzierbarkeit als auch die Berechnung der eingesetzten Energiemenge ermöglichen. Das gesamte Setup sollte als autarke und transportable Einheit funktionieren können, um eine Pyrolyse der Hölzer auch am späteren Montageort durchführen zu können und so lange Transportwege zu vermeiden. Neben dieser semistationären Anlage sollen baustellentaugliche Methoden für die Beflammung von Schmalflächen und Schnittkanten erprobt und Werkzeuge hierfür entwickelt werden.

Es wurde letztlich eine modulare Anlage entwickelt, die aus einzelnen Komponenten Vorschub, Gasmischanlage und Brenner besteht. Diese Komponenten wurden in einen Container mit eigener Rauchgasabsaugung eingebaut. Der Container ist autark, kann zu Baustellen transportiert werden und bietet im Rahmen des Projekts zusätzlich die Möglichkeit, mit Referenzfassaden bekleidet werden zu können, an der die Langzeit-Bewitterungstests durchgeführt werden können.

### AP 3: Entwicklung von Fassadensystemen für pyrolysierte Hölzer

Zunächst wurde grundlegend geprüft, inwieweit die Fachregeln für den Bau von Holzfassaden auch auf Fassadenbretter mit pyrolysierte Oberfläche übertragbar sind. Insbesondere bei den qualifizierenden SBI-Tests, bei denen Musterfassaden einer Beflammung ausgesetzt werden, zeigte sich, dass standardisierte Befestigungsmethoden bei der Herstellung der Probekörper zum Einsatz kommen können und einer Beflammung standhalten.

Ein weiterer Schwerpunkt bei der Auswahl spezifischer Fassadensysteme für die pyrolysierten Fassadenbretter lag darin, Fügeprinzipien zu erproben und Bauabläufe an die Spezifika des Materials anzupassen. An dieser Stelle wurden auch die unterschiedlichen Verfahren der nachträglichen Beflammung von Schnittflächen getestet, welche im Rahmen des Projektes entwickelt wurden.

Neben den konstruktiven Aspekten des Materials, bietet die schwarze Oberfläche der pyrolysierten Hölzer ganz eigene gestalterische Möglichkeiten. Eine umfangreiche Sammlung und Analyse traditioneller japanischer Fassaden aus pyrolysierten Hölzern und zeitgenössischer Beispiele diente als Grundlage für die Gestaltung der gewählten Musterfassaden.

#### AP 4: Ermittlung der Oberflächeneigenschaften

Die Eigenschaftsermittlung der Oberflächen stellt einen weiteren Schwerpunkt des Forschungsprojektes dar. Aus den Voruntersuchungen ist bekannt, dass die pyrolysierte Oberflächen nicht abriebfest sind und daher nur eine geringe Resistenz gegen natürliche Bewitterung aufweisen. Ziel ist es, Verfahren zu entwickeln, mit denen die Pyrolyseschicht stabilisiert werden kann. Um deren jeweilige Tauglichkeit prüfen zu können, werden unterschiedliche Beanspruchungen in dafür zu entwickelnden Testverfahren geprüft. Die Resistenz gegen Bewitterung soll durch das Testen des Sorptionsverhaltens mittels künstlicher Bewitterung geprüft werden. Die Proben werden in einem kontinuierlichen Zyklus einer starken UV-Beanspruchung und künstlicher Beregnung ausgesetzt. Durch sich wiederholende Frost-Tau-Wechsel wird die Stabilität getestet. Zur Qualifizierung des Brandverhaltens werden orientierende Brandtests an Probekörpern und Realbrandversuche an gebauten Fassadenausschnitten durchgeführt.

#### AP 5: Entwicklung von Gegenzuglösungen

Bei der traditionellen Methode zur Erzeugung einer Pyrolyseschicht auf der Holzoberfläche, dem *Shou Sugi Ban*, verformen sich die Bretter stark. Dies liegt daran, dass bei dieser Methode drei Fassadenbretter vertikal zusammengestellt werden und dann ein Feuer zwischen diesen Brettern entzündet wird. Die Oberfläche beginnt an der Innenseite über einen längeren Zeitraum zu brennen, bis der Pyrolyseprozess abgeschlossen ist. Dadurch dehnen sich die Bretter einseitig stark aus und es kommt zu anhaltenden Verformungen.

Im Vorfeld des Projektes bestand die Annahme, dass sich die Hölzer auch bei anderen möglichen Pyrolysemethoden verformen würden. Dieser durch den einseitigen Energieeintrag auftretende Effekt konnte durch die hohen Vorschubgeschwindigkeiten, die mit der von uns entwickelten Pyrolyseanlage erreicht werden können, vermieden werden. An dieser Stelle zeigt die neue Methode einen deutlichen Vorteil gegenüber der traditionellen Methode des *Shou Sugi Ban*.

#### AP 6: Entwicklung von Fassadenprototypen und Test dieser nach B1-Prüfung

Aufgrund des Wechsels des Kooperationspartners, von der Firma Opitz Holzbau GmbH zum Brennerhersteller Webber Brennertechnik GmbH, wurden die Prototypen für die klassifizierenden Brandtests in Kooperation zwischen der UdK und der HNEE entwickelt und gebaut. Der Unterauftrag für die qualifizierenden Brandtest wurde an die Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin (BAM) erteilt.

Insgesamt waren fünf dieser Tests eingeplant. Die beiden ersten sollten dazu dienen, anhand unterschiedlicher Fassadensysteme und Holzarten einen Einblick über die Verbesserungen zu erhalten. Die übrigen drei Tests waren dafür vorgesehen, ein bestimmtes Fassadensystem zu klassifizieren und damit die Möglichkeit zu erhalten, dieses künftig ohne weitere Zulassungsverfahren bauen zu können. Nach dem Ausscheiden der Firma Opitz war diese Klassifizierung nicht mehr notwendig und die für eine Zulassung notwendige Testreihe von drei gleichen Probekörpern konnte entfallen. Stattdessen konnten in drei einzelnen Tests unterschiedliche Fassadentypen getestet werden und damit weitere Anwendungsfelder aufgezeigt werden.

#### AP 7: Entwicklung von Oberflächen-Vergütungsverfahren zur zusätzlichen Stabilisierung

In den Voruntersuchungen hatte gezeigt werden können, dass die Pyrolyseschichten nicht stabil genug sind und mit der Zeit durch Witterungseinflüsse abgetragen werden. Damit ist es erforderlich, die pyrolysierten Oberflächen zu stabilisieren. Wichtigste Anforderungen an Mittel zur Oberflächenertüchtigung sind ihre Nachhaltigkeit und ökologische Unbedenklichkeit. Die möglichen Substanzen dürfen zudem selbst keine weitere Brandlast in das Gesamtsystem einbringen. In ersten Versuchsreihen wurden unterschiedliche mineralische Substanzen untersucht. Versuchsreihen zum

Einsatz von Nanosolen wurden aufgrund der hohen Kosten nicht weiter verfolgt, mineralische Schlämme konnten nicht tief genug in die Pyrolyseschicht eingebracht werden und zeigten keine ausreichende Haftung auf der Oberfläche.

Der Fokus der weiteren Untersuchungsreihen richtete sich auf die Verwendung von Wasserglas. Wasserglas wird seit dem 19. Jahrhundert als Flammenschutzmittel eingesetzt, es ist rein mineralisch und ökologisch unbedenklich. Es wurden Natrium- und Kalium-Wasserglas sowie Fixierungs-Wasserglas, eine Mischung aus den beiden oben genannten Wasserglasarten, getestet und mittels unterschiedlicher Auftragsverfahren in die Pyrolyseschicht eingebracht.

## AP 8: Entwicklung eines Baustellensystems zur Nachbehandlung von Schnittflächen auf der Baustelle

Um während des Bauprozesses nachträglich entstandene Schnittflächen pyrolysieren zu können, wurden unterschiedliche Handgeräte entwickelt und beim Bau der Referenzfassaden und der Probekörper für den SBI-Test auf ihre Handhabung geprüft.<sup>6</sup> Die entwickelten Systeme funktionieren gut, sofern die Oberfläche der Fassadenhölzer nicht schon mit dem stabilisierenden Wasserglas beschichtet wurden. Eine Anwendung nach dieser Imprägnierung ist nicht möglich, da es andernfalls sofort zu einer thermischen Reaktion mit dem aufgetragenen Wasserglas kommt.

Ein Nebeneffekt der Pyrolysemethode mit dem geänderten Brenner-System besteht darin, dass mit der Pyrolyse der Oberseite gleichzeitig auch sowohl die Schmalseiten als auch die Schnittkanten pyrolysiert werden. Die Handgeräte zur Kantenbeflammung dienen also ausschließlich zur Beflammung einzelner, nachträglich erfolgter Schnitte.

## AP 9: Aufbau einer Referenzfassade

Ursprünglich sollte eine Referenzfassade vom anfänglichen Industriepartner Opitz Holzbau GmbH auf dessen Firmengelände errichtet werden. Aufgrund des Wechsels des Partners musste diese Musterfassade entfallen. Um weiterhin die Möglichkeit zu haben, die im Forschungsprojekt entwickelten Verfahren und Fassadentypen auch unter Realbedingungen testen zu können, wurden Testfassaden für den Pyrolysecontainer gebaut und montiert. An diesen können die weiteren Beobachtungen zu Langzeitwitterung unter Realbedingungen durchgeführt werden.

---

<sup>6</sup> vgl. Gengnagel/Pfriem, PyroForCE 2.0 Zweiter Zwischenbericht



## 2. Oberflächenpyrolyse zur Erhöhung des Feuerwiderstands

### 2.1 Oberflächenpyrolyse bei Bauhölzern

Durch das oberflächliche Verkohlen können die Eigenschaften von Holzoberflächen verbessert werden. Dies Verfahren erfüllt mehrere Schutzfunktionen. So kann beispielsweise die Resistenz gegen Schimmel und Insektenbefall erhöht werden. Dieses Wissen ist seit der Antike überliefert und die Technik des Verkohlens von Hölzern findet ihre Anwendung in unterschiedlichsten Bereichen der Bautechnik. So beschreibt beispielsweise Alberti in seinem Traktat über die Architektur die Anwendung verkohlter Holzstämme als Material zum Bau von Fundamenten in sumpfigen Gebieten:

*„Man lässt nämlich folgendes machen. Eine große Zahl von Piloten und Pfählen mit angebrannter Spitze schlag´ mit dem Fuß nach oben derart ein, daß die Fläche dieses Pfahlrostes doppelt so breit sei als die darauf kommende Mauer.“<sup>7</sup>*

#### 2.1.1 Oberflächenpyrolyse zur Erhöhung des Brandschutzes

Kohleschichten auf Holzoberflächen haben einen weiteren Effekt. Durch die hohe Porosität der Oberfläche, also den großen Anteil an Luft, wirkt die Kohleschicht isolierend. Damit wird es schwieriger, einen Verbrennungsprozess in Gang zu setzen. Hierfür ist es notwendig, zunächst Holzgase aus den nativen Bereichen des Holzes freizusetzen, bevor sich diese entzünden können. Neben den isolierenden Eigenschaften hat die Kohleschicht selbst einen gegenüber nativem Holz deutlich erhöhten Flammpunkt, was deren Entzündung erheblich erschwert. Diese beiden physikalischen Phänomene sind ursächlich für den signifikant höheren Feuerwiderstand pyrolysierter Hölzer. Die Oberflächenpyrolyse stellt somit eine natürliche und nachhaltige Methode des Brandschutzes von Holz dar. Sie ist ein natürliches Flammenschutzmittel.

#### 2.1.2 *Shou Sugi Ban* – Eine traditionelle Methode, Fassadenhölzer zu pyrolysieren

Die traditionelle japanische Methode des *Shou Sugi Ban* macht sich diese physikalischen Eigenschaften gezielt zunutze, um den Feuerwiderstand von Fassadenhölzern zu erhöhen und damit der Ausbreitung von Feuer, insbesondere in städtischen Siedlungen, vorzubeugen. Dabei werden die brandhemmenden Eigenschaften der Hölzer immer auch mit gestalterischen und konstruktiven Lösungen in Einklang gebracht.

Die Pyrolyseschicht hat jedoch keine hohe Resistenz gegen Bewitterung. Um einen beschleunigten Abtrag dieser Schicht zu verhindern, weisen traditionelle japanische Architekturen meistens konstruktive Lösungen wie große Dachüberstände auf. Stark beanspruchte Bereiche wie Fenster- und Türleibungen werden aus nativen Hölzern hergestellt und setzen so auch gestalterisch einen Kontrast zu den schwarzen Oberflächen der pyrolysierten Hölzer.

---

<sup>7</sup> vgl. Alberti, Drittes Buch, 3. Kapitel Seite 125

### 2.1.3 Markt für pyrolysierte Fassaden

Die faszinierende Ästhetik dieser schwarz-glänzenden, je nach Holzart in unterschiedlichen Mustern aufgerissenen Holzoberflächen führt aktuell zu einer großen Nachfrage und damit auch nach der Suche industrieller Herstellungsmethoden. Unterschiedliche Hersteller<sup>8</sup> bieten pyrolysierte Fassadenbretter für den Innen- und Außenbereich an. Da hier nur eine Oberflächenästhetik vermarktet wird, werden konstruktive Aspekte außer Acht gelassen. Entweder werden die angebotenen Produkte ohne eine die Oberfläche stabilisierende Beschichtung angeboten, oder diese erfolgt durch den Auftrag von Epoxidharz. In dem einen Fall übernehmen die Hersteller keine Garantie für die Langlebigkeit der Oberfläche, in dem anderen Fall wird durch das Aufbringen von Epoxidharz aus einem zunächst vollständig biologisch abbaubaren Produkt nicht recyclebarer Sondermüll. Die für einen natürlichen Brandschutz nutzbaren Eigenschaften der pyrolysierten Oberflächen werden in keinem der beiden Fälle genutzt.



Abbildung 3 bis 5

Muster der Firma Mocupinus: Pyrolysierte Fichte, sibirische Lärche und Red Cedar (v.l.n.r.)

### 2.1.4 Pyrolyse als Methode des nachhaltigen Brandschutzes

Mit dem Forschungsprojekt PyroForCE soll eine Brücke zwischen Gestaltungspotential und bautechnischer Ertüchtigung geschlagen werden. Die Vorteile einer nachhaltigen Verbesserung des Brandschutzes durch Pyrolyse sollen genutzt werden, um auch im heutigen städtischen Kontext Fassaden aus Holz errichten zu können. Ziel ist es, aufbauend auf den traditionellen Methoden eine Erhöhung des Feuerwiderstands von Holz zu erreichen, die sich im Kontext heutiger Baunormen klassifizieren lässt und damit eine Zulassung als Bauprodukt mit verbessertem Feuerwiderstand ermöglicht.

---

<sup>8</sup> z.B.: Mocupinus, Swathout etc.

## 2.2 Pyrolyseverfahren

### 2.2.1 Pyrolyse und Verbrennung

Um zu verstehen, inwieweit die pyrolysierte Oberfläche von Fassadenhölzern einen Beitrag zur Erhöhung des Feuerwiderstands liefern kann, ist es hilfreich, zunächst den Prozess einer Verbrennung von Holz beziehungsweise Holzoberflächen zu beschreiben:

Verbrennungen allgemein sind der Spezialfall einer Redoxreaktion, bei der ein Stoff durch Sauerstoff oxidiert wird. In einer Redoxreaktion gibt der zu oxidierende Stoff Elektronen an das Oxidationsmittel (hier Sauerstoff) ab und erhöht seine Oxidationszahl. Das Oxidationsmittel nimmt die Elektronen auf und wird reduziert. So auch bei Holz:

*„[Holz] verbrennt bei Wärmezufuhr unter Umwandlung der chemisch gebundenen Energie in Licht (Feuer und Glut) und Wärme, wenn leichtflüchtige Stoffe im Holz in den gasförmigen Zustand überführt oder durch Pyrolyse freigesetzt werden.“<sup>9</sup>*

Damit der Verbrennungsprozess in Gang gesetzt werden kann, muss zunächst Energie in das System eingebracht werden. Die Verbrennung läuft dann in vier Phasen ab:

Bis zu einer Temperatur von 100 °C trocknet das Holz, freies, nicht gebundenes Wasser verdunstet. Bei Temperaturen von 150 °C bis 270 °C wird Lignin abgebaut und die Zellulosen verändern sich. Es bilden sich erste Zersetzungsgase. Bei Temperaturen ab 270 °C zersetzen sich auch die Zellulosen. Auf der Holzoberfläche bildet sich eine Kohleschicht und das freigesetzte Gasgemisch kann sich in Gegenwart einer initialen Flamme entzünden. Ab dieser Temperatur beginnt der Prozess der exothermen Verbrennung. Bei Temperaturen von über 800 °C verglüht die zurückbleibende Holzkohle ohne Flamme zu Asche.<sup>10</sup>

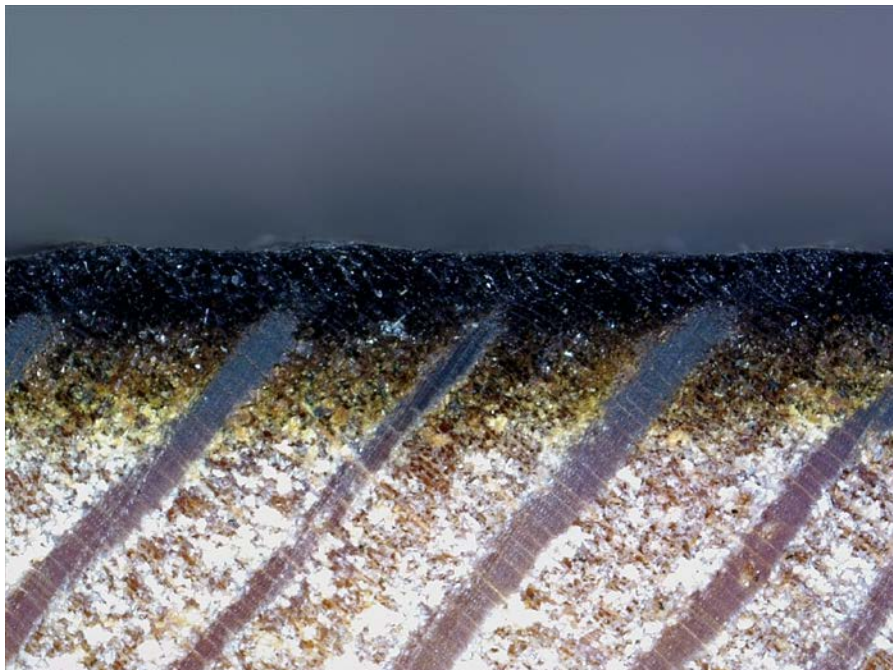


Abbildung 6

Schichten bei der Verbrennung: Holzkohle - Pyrolysefront - Karamellisierte Schicht - (natives) Holz

---

<sup>9</sup> vgl. Scheer 2009, Seite 475  
<sup>10</sup> ebd.

## 2.3 Bau einer Pyrolyseanlage im Technikumsmaßstab

### 2.3.1 Direkte und indirekte Pyrolyse

Der Pyrolyseprozess kann direkt oder indirekt in Gang gesetzt werden. Bei der indirekten Pyrolyse werden die zur thermo-chemischen Spaltung der organischen Verbindungen Lignin und Zellulose notwendigen Temperaturen durch eine indirekte Beheizung, idealerweise in gezielt sauerstofffreien oder -armen Umgebungen erreicht. Dies kann beispielsweise mit elektrischen Heizsystemen erfolgen und hat den Vorteil, dass der Energieeintrag in das System genau kontrolliert werden kann. Im Gegensatz dazu wird bei der direkten Pyrolyse das Pyrolysegut durch Verbrennungsgase erhitzt. Die notwendige Energie kann hier durch den exothermen Verbrennungsprozess auch aus Pyrolysegut selbst gewonnen werden.<sup>11</sup> Im Vorprojekt PyroForCE 1.0 wurde mit einem Infrarotbrenner zunächst ein indirektes Pyrolyseverfahren getestet. Aufgrund der sehr geringen Leistung dieser Brenner ist der Pyrolyseprozess sehr zeitaufwändig. Daher wird zur Pyrolyse der Hölzer im aktuellen Forschungsprojekt eine Direktbeflammung eingesetzt, womit die Vorschubgeschwindigkeiten deutlich erhöht werden konnten.

### 2.3.2 Pyrolyseschicht als Brandschutz

Bei der Pyrolyse werden die einzelnen Holzbestandteile zersetzt und es bildet sich eine oberflächliche Kohleschicht.

*„Die eigentliche Zersetzung der Holzsubstanz erfolgt in der Pyrolysezone. Hier bildet sich unter der Abgabe brennbarer, flüchtiger Gase eine Holzkohleschicht. Die flüchtigen Gase entzünden sich und sind der Grund für die sichtbare Flammenbildung. Unter der Pyrolyseschicht ist das Holz ungeschädigt. Die Verkohlungsschicht wird im Verlauf des Brandes von oben her oxidiert und abgetragen. Im gleichen Maße wächst sie von unten aus der Pyrolyseschicht [Pyrolysefront] an, die sich immer weiter nach Innen verschiebt. Dieses Verhalten wird als Abbrand bezeichnet und läuft mit einer gleichmäßigen, vorhersehbaren Geschwindigkeit ab. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Holzkohleschicht von ca. 0,1 W/(mK) werden die tiefer liegenden Schichten isoliert und der weitere Abbrand verläuft verhältnismäßig langsam.“<sup>12</sup>*

Dieser physikalische Mechanismus der Verzögerung des Brandablaufs durch die spezifischen Eigenschaften der Kohleschicht, bildet die Grundlage der Idee, diese Kohleschichten gezielt aufzubringen, um sie als natürliche Brandschutzbeschichtungen einzusetzen.

---

<sup>11</sup> vgl. auch [de.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse](https://de.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse), Zugriff: 2019-03-25

<sup>12</sup> Scheer S.476

## 2.4 Brandschutz bei Fassaden aus Holz

### 2.4.1 Klassifizierungen und normative Verweise

Die Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauprodukten stehen in direkter Relation zu den Vorgaben der Bauordnungen zum baulichen Brandschutz. Die hier definierten Schutzziele liegen in vorbeugenden Maßnahmen gegen die Entstehung eines Brandes und dessen Ausbreitung, der Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren und dem abwehrenden Brandschutz, also der Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten.<sup>13</sup>

Diese Regelungen unterscheiden sich bereits in den Bauordnungen der Bundesländer und auch beim Vergleich der europäischen Länder. Dabei liegt die Betrachtung des Brandschutzes aber immer auf dem spezifischen Brandverhalten des Materials selbst und der Klassifizierung des Feuerwiderstands von Bauteilen in Abhängigkeit von deren Einbausituation. Durch normative Verweise werden diese Klassifizierungen mit den jeweiligen gesetzlichen Anforderungen in Übereinstimmung gebracht.

Hinsichtlich ihrer Brennbarkeit und Entflammbarkeit werden Bauprodukte auf nationaler Ebene nach DIN 4102 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen* beziehungsweise auf europäischer Ebene nach DIN EN 13501 *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten* eingeordnet. Diese Baustoffklassen beziehungsweise Brandschutzklassen werden nach DIN 4102 in *nicht brennbare* (Baustoffklasse "A") und *brennbare* Baustoffe (Baustoffklasse "B") unterteilt. Neu zuzulassende Baustoffe müssen hingegen nach der *DIN EN 13501-1* eingestuft werden. Diese DIN sieht eine Unterteilung in sieben Euroklassen vor (A1, A2, B, C, D, E, F). Darüber hinaus wird nach dieser DIN die Rauchentwicklung (s = smoke) mit den Klassen "s1", "s2" und "s3" und brennendes Abtropfen/Abfallen (d = droplets) mit den Klassen "d0", "d1" und "d2" bewertet. Eine direkte Übertragung der Klassifizierungen aus nationaler und europäischer Norm ist nicht möglich, allerdings können die bauaufsichtlichen Benennungen ("*nicht brennbar*", "*schwer entflammbar*", "*normal entflammbar*" und "*leicht entflammbar*") mittels der Bauregelliste<sup>14</sup> A, Anlage 0.2.2 beziehungsweise der Muster-Verwaltungsvorschrift *Technische Baubestimmungen* (MVV TB) sowohl den europäischen als auch die nationalen Bezeichnungen zugeordnet werden.

50

C Nationale Umsetzung - Anpassung der Anforderungen

Tabelle C3.14: Klassifizierung des Brandverhaltens- Vergleich DIN 4102-1 und DIN EN 13501-1

| Klassifizierung des Brandverhaltens von Bauprodukten (ohne Bodenbeläge) |                                           |                                                                                |                           |                       |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Bauaufsichtliche Anforderungen <sup>1)</sup>                            | Nationale Klassifizierung nach DIN 4102-1 | Europäische Klassifizierung nach Bauregelliste A Teil 1 Anlage 0.2.2 Tabelle 1 |                           |                       |
|                                                                         | Euroklasse                                | Kombination <sup>2)</sup>                                                      |                           |                       |
| Nichtbrennbar                                                           | A1                                        | A1                                                                             | keine Zusatzanforderungen |                       |
|                                                                         | A2                                        | A2                                                                             | - s1 d0 <sup>2)</sup>     | - s1 d1               |
| Schwerentflammbar                                                       | B1                                        | A2                                                                             | - s2 d0                   | - s1 d1               |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s3 d0                   | - s3 d2 <sup>2)</sup> |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s1 d0                   | - s1 d1               |
|                                                                         | B                                         |                                                                                | - s2 d0                   | - s1 d2               |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s3 d0                   | - s3 d2 <sup>2)</sup> |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s1 d0                   | - s1 d1               |
| Normalentflammbar                                                       | B2                                        | C                                                                              | - s2 d0                   | - s1 d2               |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s3 d0                   | - s3 d2 <sup>2)</sup> |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s1 d0                   | - s1 d1               |
|                                                                         | D                                         |                                                                                | - s2 d0                   | - s1 d2               |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s3 d0                   | - s3 d2 <sup>2)</sup> |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - s1 d0                   | - s1 d1               |
| Leichtentflammbar                                                       | B3                                        | E                                                                              | - s2 d0                   | - s1 d2               |
|                                                                         |                                           | F                                                                              | - s3 d0                   | - s3 d2 <sup>2)</sup> |
|                                                                         |                                           |                                                                                | - d2 <sup>2)</sup>        |                       |
|                                                                         |                                           |                                                                                | keine Zusatzanforderungen |                       |

<sup>1)</sup> MBO §26 (1) Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.

<sup>2)</sup> Bauaufsichtliche Mindestanforderungen.

<sup>3)</sup> Zusatzanforderungen für Brandnebenerscheinungen

| Rauchentwicklung (s)              | Brennendes Abtropfen / Abfallen (d) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| s1 keine / kaum Rauchentwicklung  | d0 kein Abtropfen                   |
| s2 begrenzte Rauchentwicklung     | d1 begrenztes Abtropfen             |
| s3 unbeschränkte Rauchentwicklung | d2 starkes Abtropfen                |

Tabelle 1

Gegenüberstellung der bauaufsichtlichen Benennungen von Baustoffen zu den europäischen Klassifizierungen nach DIN EN 13501-1 und den nationalen Klassifizierungen nach DIN 4102-1 nach Bauregelliste A, Anlage 0.2.2

<sup>13</sup> vgl. Musterbauordnung §14 *Brandschutz*

<sup>14</sup> vgl. Änderung der Bauregelliste A, Ausgabe 2016/2 vom 22. Dezember 2016

## 2.4.2 Spezifische Brandschutzklassifikationen für hinterlüftete Fassaden aus Vollholz

Die Richtlinien zur Verwendung von Holz als Fassadenmaterial ergeben sich aus den Vorgaben der Bauordnungen<sup>15</sup> und den damit verbundenen normativen Verweisen. In der Musterbauordnung werden zunächst die allgemeinen Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse definiert.<sup>16</sup> Für Fassaden ergeben sich daraus folgende Anforderungen:

Bis einschließlich Gebäudeklasse 3 können Außenwandbekleidungen aus *normal entflammbaren* Baustoffen (Klassifikation "B2" beziehungsweise "D") erstellt werden. Ab Gebäudeklasse 4 müssen Außenwandbekleidungen *schwerentflammbar* (Klassifikation "B1" beziehungsweise "B") sein.<sup>17</sup>

Die Materialkennwerte von Vollhölzern aus Nadel- beziehungsweise Laubholz sind in DIN 14081-1<sup>18</sup> beschrieben. Hier ist deren Brandverhaltensklasse mit "D-s2"<sup>19</sup> definiert, was der Klassifikation "*schwerentflammbar*" entspricht. Diese Klassifikation ermöglicht eine Übertragung auf die frühere nationale Brandverhaltensklasse "B2" aus DIN 4102-1.

Es ist das Zusammenspiel dieser Normierungen woraus sich ergibt, dass native und damit "*normalentflammbare*" Hölzer ausschließlich bis Gebäudeklasse 3, also für Gebäude mit bis zu drei Vollgeschossen, als Fassadenmaterial genutzt werden können. Darüber hinaus wird die Verwendung "*schwerentflammbarer*" Baustoffe zwingend vorgeschrieben. Um diese Kriterien erfüllen zu können, bedürfen native Hölzer einer brandschutztechnischen Ertüchtigung. Eben hierfür soll mit dem pyrolysierten Holz ein geeignetes nachhaltiges Bauprodukt angeboten werden.

| Bauteil            | Geforderte Baustoffklassen nach MBO 2002 für Gebäude mit einer Höhe h des obersten Geschossfußbodens |                                         |                          |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
|                    | h ≤ 7 m<br>Gebäudeklassen<br>1 – 3                                                                   | 7 < h ≤ 22 m<br>Gebäudeklassen<br>4 / 5 | h > 22 m<br>(Hochhäuser) |
| Bekleidung         | B2                                                                                                   | B1 <sup>2)</sup>                        | A                        |
| Unterkonstruktion  | B2                                                                                                   | B2 <sup>1)</sup>                        | A                        |
| Wärmedämmung       | B2                                                                                                   | B1                                      | A                        |
| Verankerungsmittel | A                                                                                                    | A                                       | A                        |

1) nur zulässig, wenn eine Brandausbreitung innerhalb der Konstruktion ausreichend lang begrenzt ist, beispielsweise durch geschossweise Anordnung im Brandfall aufquellender Dichtungsbänder  
2) Hinweis: Bei eingeschossigen Aufstockungen besteht keine Gefahr eines Feuerüberschlags von Geschoss zu Geschoss. In Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde kann in diesen Fällen für die Aufstockung eine Verwendung von Baustoffen der Klasse B2 zulässig sein.

Tabelle 2

Geforderte Baustoffklassen nach Musterbauordnung 2002 für die Konstruktionselemente von Außenwandbekleidungen

## 2.4.3 Konstruktiver Holzschutz bei hinterlüfteten Fassaden

<sup>15</sup> vgl. auch die leicht abweichenden österreichischen Brandschutzrichtlinien OIB-330.2-012/15:  
"3.9.1 Bei Betriebsbauten mit einer Außenwandhöhe von nicht mehr als 14 m müssen Außenwandbekleidungen sowie die Komponenten bzw. das Gesamtsystem von nichttragenden Außenwänden der Klasse C entsprechen. Es können auch Baustoffe aus Holz und Holzwerkstoffen der Klasse D verwendet werden, wobei gegebenenfalls verwendete Dämmstoffe der Klasse A2 entsprechen müssen.  
3.9.3 Bei Betriebsbauten mit mehr als einem oberirdischen Geschoß und einer Außenwandhöhe von mehr als 14 m müssen die Komponenten bzw. das Gesamtsystem von nichttragenden Außenwänden aus A2 bestehen."

<sup>16</sup> vgl. Musterbauordnung § 26

<sup>17</sup> vgl. Musterbauordnung § 28

<sup>18</sup> vgl. DIN EN 14081-1

<sup>19</sup> vgl. DIN EN 14081-1; Tabelle C.1 in Anhang C

Auf das Thema der Brandweiterleitung an hinterlüfteten Fassaden hat die Holzforschung in den letzten Jahren einen besonderen Fokus gelegt.<sup>20</sup> Unabhängig vom Brandverhalten der zum Bau der Fassaden verwendeten Baustoffe, kann durch gezielte konstruktive Lösungen, wie das Einbringen horizontaler Brandsperren aus unbrennbaren Materialien, oder die Kombination mit schwerentflammenden Unterkonstruktionen und unbrennbaren Dämmstoffen, ein erheblicher Einfluss auf das Brandverhalten des "Gesamtsystems Fassade" genommen werden. Die unterschiedlichen Bautraditionen und Baugesetze der einzelnen europäischen Länder haben hier zu unterschiedlichen Definitionen und Schutzziele geführt, woraus sich verschiedene Anforderungen und konstruktive Lösungsansätze in Hinblick auf die Brandweiterleitung an der Fassade ergeben. Auf nationaler Ebene werden diese technischen Bestimmungen in den *Fachregeln des Zimmererhandwerks*<sup>21</sup> beschrieben. Neben der Entwicklung von Herstellungsverfahren für die Pyrolyse der Fassadenbretter liegt einer der Schwerpunkte des Forschungsprojektes darin, zu überprüfen, inwieweit sich die in den entsprechenden technischen Bestimmungen genannten Regeln auf die Montage dieser pyrolysierten Fassadenbretter übertragen lassen, beziehungsweise darin, alternative Methoden zu entwickeln, für den Fall, dass eine direkte Übertragung nicht möglich ist.

---

<sup>20</sup> vgl. [www.proholz.at/fassaden/brandschutz/brandschutzvorschriften-fuer-holzfassaden](http://www.proholz.at/fassaden/brandschutz/brandschutzvorschriften-fuer-holzfassaden)

<sup>21</sup> vgl. Fachregeln des Zimmererhandwerks, Seite 29

## 2.5 Pyrolyseanlage als Prototyp

Ein Schwerpunkt<sup>22</sup> des Forschungsprojektes liegt in der Entwicklung einer Pyrolyseanlage, die es ermöglichen soll, im semi-industriellen Maßstab die Oberflächenpyrolyse von Fassadenbrettern durchzuführen. Einen der wichtigsten Aspekte stellte dabei Steuerung aller einzelnen Teile der Anlage dar, um Versuchsparameter einerseits variieren zu können und andererseits eine Wiederholung dieser Parameter zu gewährleisten, mit dem Ziel, den gesamten Prozess auch wissenschaftlich bewerten zu können. Es wurde eine Anlage entwickelt, die aus einzelnen Modulen besteht, welche unabhängig voneinander gesteuert werden können und welche auch einzeln getauscht werden können. Die Anlage wurde in einem transportablen Container auf dem Hochschulgelände der HNEE in Eberswalde montiert, wobei auch der Container zunächst an die spezifischen Anforderungen der Anlage angepasst werden musste.

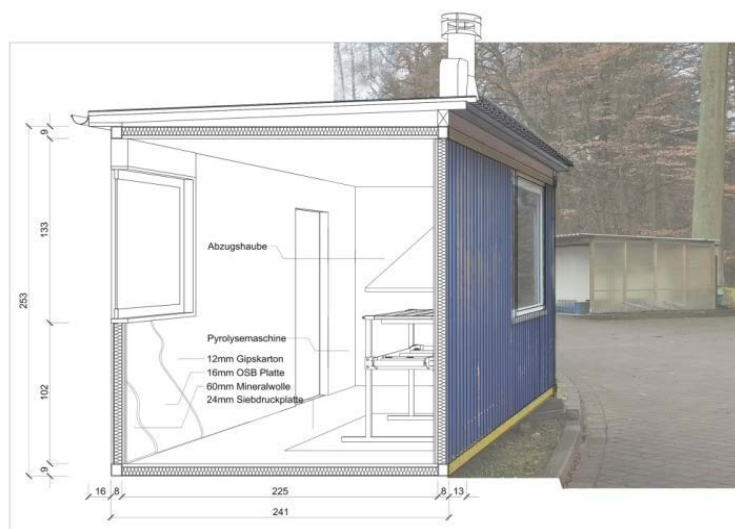


Abbildung 7  
Entwurfszeichnung des Pyrolysecontainers und der Pyrolyseanlage

Abbildung 8  
Pyrolyseanlage - das Bild zeigt die Anlage vor der Installation der Gasmischanlage

<sup>22</sup> vgl. Arbeitspakete 1 und 2

## 2.5.1 Brennertechnologie

Eine wesentliche Schlussfolgerung aus den Erkenntnissen des Vorgängerprojektes PyroForCE 1.0 war, dass die ursprüngliche Konzeption einer Pyrolyse mittels eines Infrarot-Strahlungs-Brenners und Stickstoff als Inertgas keine praktikable industrielle Anwendung ermöglicht. Hauptkritikpunkte waren die fehlende Vorschubgeschwindigkeit aufgrund der niedrigen Temperaturen des Brenners von 700 °C, aber auch die hohe Rauchgasdichte der bei diesem Verfahren entstehenden unverbrannten Holzgase.

Hieraus konnten folgende Anforderungen an die zukünftige Brennertechnologie definiert werden:

- Erhöhung von Brennerleistung und Vorschubgeschwindigkeit
- Einsatz einer Direktbeflammung mit höheren Betriebstemperaturen, um die bei der Oberflächenpyrolyse entstehenden Holzgase direkt verbrennen zu können
- Substitution der Inertgas-Einrichtung



Abbildung 9 und 10

Brenner in Betrieb; Gasmischanlage

## 2.5.2 Gas-Steuer-Einheit

Das Prinzip der Brenner basiert auf der Verbrennung eines Luft-Gas-Gemisches. Der Brennwert des Gemisches kann so viel effektiver genutzt werden, als wenn der zur Verbrennung notwendige Sauerstoff aus der umgebenden Luft zugeführt werden würde. Gleichzeitig lässt sich die Verbrennung viel besser steuern. Mit der Gas-Steuereinheit lässt sich das Verhältnis von Propangas und Druckluft im Brenngas präzise regeln und eine entsprechende Reproduzierbarkeit aller Pyrolyseprozesse sicherstellen. Die in einem Kompressor verdichtete Luft wird in der Anlage mit Propangas gemischt und als Brenngas zu den Brennern geleitet. Durchflussmengenmesser ermöglichen es, sowohl die Menge und den Druck der zugeführten Luft als auch die Menge des beigemischten Propangases genau und reproduzierbar einzustellen und damit auch den Energiegehalt des Brenngases zu bestimmen. Die Steuereinheit erfüllt bereits werkseitig alle Sicherheitsbestimmungen und ist unabhängig vom Vorschub. Beide Module können baukastenartig zusammengestellt werden. Damit ist die Basis für ein nachhaltiges, adaptives System geschaffen, das eine flexible Anpassung auf mögliche Änderungen von Produktionsprozessen erlaubt.

Für die im Folgenden dargestellten Versuche wurde die Anlage so eingestellt, dass pro Minute ein Gemisch aus 130 l Druckluft und 14 l Gas dem Brenner zugeführt wurde. Dies entspricht einer Energieleistung von ca. 20 kW.

### 2.5.3 Brenner

Der eingesetzte Brenner der Firma Webber Brennertechnik GmbH ist ein Gerät zur Direktbeflammung, dem ein Brenngasgemisch aus Druckluft und Propangas aus einer vorgeschalteten Mischanlage zugeführt wird. Die dicht nebeneinanderliegenden Auslassdüsen des Brenners erzeugen einen gleichmäßig breiten Strahl. Der modulare Aufbau des Brenners erlaubt die Herstellung von beliebigen Breiten bis zu 8000 mm. In der aktuellen Anwendungsvariante wird ein Gas-Luft-Bandbrenner mit einer Breite von 300 mm und einer Leistung von 15 kW eingesetzt (Abbildung 9, 11 und 12). Damit ergibt sich ein um 100 mm breiterer Arbeitsbereich als im Vorgängerprojekt bei einer 3fach höheren Leistung. Erste Tastversuche zeigen eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von bis zu 40 %.

Die Leistungssteigerung basiert dabei jedoch nicht auf einem erhöhten Verbrauch an Propangas, sondern wird maßgeblich durch die gezielte Zuführung von Druckluft erreicht. Der damit erhöhte Anteil von Sauerstoff führt zu einem effektiveren Verbrennungsvorgang bei reduzierter Rauchgasentwicklung.



Abbildung 11 und 12

Gas-Luft-Bandbrenner eingebaut in der Pyrolyseanlage mit elektronischer Zündüberwachung (rechts)

Der Brenner verfügt über eine elektronische Zündung, die eine Überwachung des Ionisationsstrahls ermöglicht und potentielle Fehlzündungen einschließlich des unabsichtlichen Austritts von Propangas vermeidet. Damit ist ein gefahrloser Betrieb der Anlage auch in geschlossenen Räumen möglich. Ein weiterer Vorteil dieser Variante der Steuerung liegt darin, dass die Gleichmäßigkeit der Beflammung und damit der Erzeugung einer homogenen Kohleschicht auf den Holzoberflächen sichergestellt werden kann.

Begünstigt durch die große Breite des Brenners, gelingt es, mit dem Aufbringen der Pyrolyseschicht auf der Oberseite, gleichzeitig die Kanten zu beflammen und auch dort eine entsprechend dicke Schicht aufzubringen. Damit entfällt ein nachträgliches Beflammen der Schmalflächen. Als Nebeneffekt aus der Architektur des Vorschubs mit einem durchgängigen Blech auf der Unterseite, werden die Flammen, die an den Seiten der Bretter vorbeischießen, an diesem Blech zurückgeworfen und temperieren während der Pyrolyse auch die Unterseite der Bretter. Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite bleibt so gering und es kommt kaum zu spannungsinduzierten Verformungen.

### 2.5.4 Vorschub

Bisher wurde die tatsächliche Vorschubgeschwindigkeit durch Einzelmessungen ermittelt. In den Vorversuchen zeigte sich, dass neben einer gleichmäßigen Beflammung, insbesondere die Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit einen wichtigen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Pyrolyseschichten hat. Schon kleinste Abweichungen von etwa 5 % (bei einer absoluten Vorschubgeschwindigkeit von einem Meter pro Minute) führten zu einer deutlichen Veränderung der Schichtdicken. Die schlechte Steuerbarkeit der Vorschubgeschwindigkeit begründete sich aus der Vielzahl einzustellender Maschinenparameter zur Regulierung der Geschwindigkeit. Grundsätzlich zeigte sich darüber hinaus, dass Inhomogenitäten in der Holzoberfläche, wie Harzstellen oder Astlöcher, eine dynamische Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit erfordern.

### 2.5.5 Steuerung und Interface zur Kontrolle der Vorschubgeschwindigkeit

Um den Vorschub präzise steuern zu können, wurde der Vortrieb der Pyrolyseanlage mit einer digitalen Steuereinheit verbunden und einem Rechner gekoppelt. Der für die Motorsteuerung verantwortliche Frequenzumformer (FU) wurde hierzu mit Hilfe eines „Arduino Uno“ Boards digital steuerbar gemacht. Die Physical-Computing-Plattform Arduino ist ein gängiges Open-Source-System, das Soft- und Hardware zur Steuerung für die unterschiedlichsten Prozesse liefert. Da es über digitale und analoge Ein- und Ausgänge verfügt, ist es ideal zur digitalen Steuerung analoger Signale geeignet. Zur Verbesserung der Handhabung wurde ein eigenes Interface zur Kopplung an den Rechner programmiert und implementiert. Zur Sicherstellung einer galvanischen Trennung und der Vermeidung von Fehlsignalen erfolgte der Anschluss des Arduino Boards an die analogen Eingänge des FU über einen Optokoppler. Der gewählte Frequenzumrichter Hitachi WJ200 ist dabei in der Lage, Signale zwischen 0 und 10 Volt zu verarbeiten – dies entspricht Stillstand bzw. vollem Vorschub.

Mit Hilfe der integrierten Entwicklungsumgebung wurde ein Programm geschrieben und eine Benutzeroberfläche entwickelt, die es erlaubt, den FU nahezu stufenlos zu steuern. Damit kann nun direkt die gewünschte Geschwindigkeit in m/min eingegeben werden. Des Weiteren überwacht das Programm den Umformer auf Unter- bzw. Übersteuerung und korrigiert diese automatisch. Gleichmaßen lässt das Programm durch hierfür vorgesehene Eingabefelder die Änderung der Motorparameter zu. Dies ist gerade bei Motorschäden und möglichen Abweichungen der Netzfrequenz sowie abweichender Parameter von Ersatzmotoren von großer Bedeutung. Die entwickelte digitale Steuerung ist die Basis für eine spätere vollautomatische Steuerung der Anlage. Denkbar ist beispielsweise der Betrieb in Kombination mit einer Kamera zur Erkennung von Ästen und eine damit einhergehende direkte automatische Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit. So könnte durch die sequenzielle Steuerung des Vorschubs die Oberfläche trotz unterschiedlicher Oberflächenqualitäten gleichmäßiger pyrolysiert werden. Die Vorschubgeschwindigkeit der Anlage lässt sich stufenlos im Bereich von 0,1 bis 1.13 m/min fahren. Für die Pyrolyse der Probekörper wurde nach einigen Vortests eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 m/min gewählt.

## 2.5.6 Auswertung einzelner alternativer Verfahrenstechniken

Vor allem in Hinblick auf die Pyrolyse von Schmalflächen, wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Brenner auf ihre Einsatzfähigkeit zur Pyrolyse untersucht. Es wurde zunächst ein Set handelsüblicher Bunsenbrenner mit unterschiedlichen Aufsätzen getestet. Mit allen Geräten wurden an den Standard-Prüfkörpern (20x100x500 mm, Fichte) verschiedene Serien von Brandproben gemacht. Bewertet wurden, neben der allgemeinen Handhabung der einzelnen Brenner, die Dauer bis zur ersten Verkohlung, die Gleichmäßigkeit der Pyrolyseschicht sowie die Rauch- und Hitzeentwicklung in der direkten Umgebung.

Die eingesetzten Bunsenbrenner funktionieren nach dem Prinzip einer Strahlpumpe: Der für die Verbrennung benötigte Sauerstoff wird im Nebenstrom des zur Verbrennung eingesetzten Propangases aus der Umgebungsluft angesaugt. Die konkrete Zusammensetzung des Brenngases und damit auch die bereitgestellte Energiedichte sind hierbei jedoch nur in geringem Maße steuerbar. Ein weiterer Nachteil dieser Art der Direktbeflammung besteht darin, dass es aufgrund der hohen Temperaturen auf der Holzoberfläche (über 270 °C) zu einer unkontrollierten Verbrennung austretender Holzgase kommt und damit das Risiko einer unregulierten Beschleunigung der Pyrolyse entsteht. Damit ist das Einbinden von Bunsenbrennern in ein stationäres Verfahren gerade in Hinblick auf einen gleichmäßigen und reproduzierbaren Pyrolyseprozess nicht sinnvoll – unabhängig vom gewählten Brenneraufsatz.

Eine Nutzung von Bunsenbrennern im Bereich der Hand- und Kleingeräte ist allerdings nicht zuletzt aufgrund der einfachen Handhabbarkeit denkbar. Die zu bearbeitenden Flächen sind erheblich kleiner, damit fallen die Brennerleistung und deren Effizienz nicht so stark ins Gewicht. Die notwendige Gleichmäßigkeit der behandelten Oberfläche kann durch eine visuelle Kontrolle während der Beflammung gewährleistet werden.

## 2.5.7 Ausschluss der Kontaktpyrolyse

Mit einer indirekten Wärmebehandlung der Versuchskörper kann das Problem der schwer kontrollierbaren Direktbeflammung mittels Bunsenbrenner umgangen werden. Hierbei werden zunächst gut wärmeleitende Materialien durch eine direkter Beflammung erhitzt. Diese geben dann die Energie für den Pyrolyseprozess als Wärmeleitung und Wärmestrahlung an die Holzoberfläche ab. Durch den direkten Kontakt mit der Holzoberfläche und den damit verbundenen Sauerstoffabschluss kann zudem verhindert werden, dass sich die Holzgase unkontrolliert entzünden. Durch den Kontakt des für die Energieübertragung genutzten Körpers mit der Oberfläche des Prüfkörpers, kommt es jedoch unmittelbar zu einer Ablösung der erzeugten Kohleschicht, da die austretenden Teerstoffe mit dem Kontaktkörper verkleben. Auch bei der Verwendung von Trennmitteln wie beispielsweise Ölen auf den Kontaktflächen bleibt die Pyrolyseschicht ganz oder teilweise an der Kontaktfläche haften. Diese Problematik zeigt sich auch bei dem Versuch, die Pyrolyseschicht mit einer Kontaktwalze als Aufsatz für einen Bunsenbrenner herzustellen. Die Pyrolyse mittels Kontaktverfahren wurde nach den Versuchen als mögliche Herstellungsmethode verworfen.

### 2.5.8 Kritik

Die Anlage hat die an sie gestellten Anforderungen bei der Pyrolyse der Probekörper und für die Vorbereitung der Fassadenbretter die SBI-Tests, aber insbesondere bei der Produktion der für die Musterfassade notwendigen Hölzer erfüllt. Für einen semi-industriellen Prozess ist diese Anlage richtig ausgelegt. Zur Erhöhung der Produktion ist es leicht möglich, durch den Einbau breiterer Brenner, die gleichzeitige Beflammung mehrerer Fassadenbretter zu ermöglichen und damit die Geschwindigkeit zu erhöhen. Damit hat sich auch die Auslegung und Konzeption als modulares System bewährt.

## 2.6 Entwicklung von Baustellensystemen

Um Schnittstellen auf der Baustelle nach-pyrolysieren zu können, wurden Handgeräte entwickelt, welche die nachfolgend aufgeführten Kriterien erfüllen:

- Mobiler Einsatz auf Baustellen
- Leichte Handhabbarkeit und Flexibilität
- Genaue Bearbeitung auch kleiner Schnittflächen
- Geringer Einfluss auf die bereits pyrolysierte Fläche
- Pyrolyse von Innenecken

Hierzu wurden zwei Lösungsansätze auf der Basis von mit Propangas betriebenen Bunsenbrennern verfolgt. Der Einsatz von elektrisch betriebenen Infrarotstrahlern wurde aufgrund der niedrigen Leistung und des hohen Bedarfs an Sekundärenergie verworfen. Eine Mischgas-Brennertechnik wie sie in der stationären Pyrolyse zum Einsatz kommt, ist baupraktisch nicht sinnvoll umsetzbar, da die Gas-Mischeinheit und Steuertechnik aufgrund ihrer Größe nicht die notwendige Flexibilität zulassen.

### 2.6.1 Lösungsansatz 1 – Direktbeflammung

Im ersten Lösungsansatz wurden Methoden der Direktbeflammung untersucht:

Hier lag der Fokus auf der Entwicklung von Führungssystemen, um einen möglichst gleichmäßigen Abstand von Brenner und Oberfläche der Fassadenbretter einhalten zu können. Die Führung muss dabei so gestaltet sein, dass der Kontakt mit einer schon behandelten Fläche vermieden wird, um Abrieb zu vermeiden. Wichtig ist weiterhin, dass die Führung weder eine Bearbeitung von Innenecken verhindert noch, dass sie die Beflammung behindert.

Als Führungen eignen sich unterschiedliche Varianten:

- Gleitblechsysteme (Abbildung 13)
- Führungsrollen (Abbildung 14)
- Führungsschienensysteme<sup>23</sup>

Um die Handhabung eines solchen Brenners beurteilen zu können, wurden zwei erste Prototypen gebaut (Abbildung 13 und 14). Als Basis wurde das oben beschriebene Brennersortiment verwendet. Bei der Variante mit dem Gleitblech (Abbildung 13) wird die Flamme aus einem Flachbrenner aus sehr kurzem Abstand auf die Kante des Bretts geleitet. Das Blech ist dabei so geformt, dass die Flamme automatisch im richtigen Winkel von 15° auftrifft und sich danach wieder im Blech fängt. Der untere Teil des Blechs ist so ausgebildet, dass er einerseits als vertikale Führung dient und andererseits eine unkontrollierte Pyrolyse außerhalb der zu beflammenden Kanten verhindert. Durch die große Nähe zur Holzkante kann mit einer relativ geringen Energiemenge eine gute Pyrolyse der Kanten erzielt werden.

Der Handbrenner mit Führungsrolle (Abbildung 12) arbeitet dagegen mit einem Rundbrenner. Die Rolle ermöglicht einerseits zwar ein sehr freies Arbeiten, allerdings muss der zur Pyrolyse ideale Bearbeitungswinkel von 45° immer kontrolliert werden. Neben der hohen eingesetzten Energiemenge ist auch die unkontrollierte Beflammung angrenzender Holzteile problematisch.

---

<sup>23</sup> Aufgrund des voraussichtlich hohen Montageaufwands beim Pyrolyseprozess, waren diese nicht Gegenstand weiterer Untersuchungen

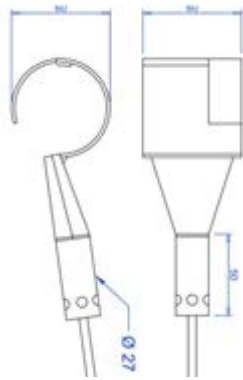


Abbildung 13 und 14  
Handbrenner mit Gleitblech und Handbrenner mit Führungsrolle

## 2.6.2 Lösungsansatz 2 – Kontaktmethode

Da vor Ort auch Fassadenbretter nachbehandelt werden müssen, die sich schon im verbauten Zustand befinden und hier das Arbeiten mit offener Flamme eine potentielle Brandquelle darstellt, wurde eine Kontaktmethode erprobt. Als Basis diente auch hier ein handelsüblicher Bunsenbrenner. Die Flamme erhitzt eine am unteren Ende eines Rohres angebrachte drehbare Walze. Durch Kontakt wird die Energie an die Holzoberfläche abgegeben und so pyrolysiert. Die Walze ist dabei so am Rohr angebracht, dass keine direkte Beflammung der Holzoberfläche stattfinden kann. Dieses Gerät ließe sich leicht in eine elektrisch betriebene Variante umbauen, indem man die Walze mit Induktionsstrom anstatt der Beflammung erhitzt. Dieser Ansatz wurde nicht weiter verfolgt, da sich die Kontaktmethode aufgrund des Ablösens der Pyrolyseschicht bereits in den ersten Versuchen als nicht praktikabel erwiesen hat. Ebenso stellt die Behandlung von Ecken mit dieser Methode ein Problem dar.



### 3. Stabilisierung der Oberfläche

Die auf den Fassadenbrettern erzeugte Pyrolyseschicht ist so weich, dass sie keinen geeigneten Widerstand gegen Abrieb aus Bewitterung oder gar mechanische Beanspruchung bietet. Will man die positiven Eigenschaften des Brandverhaltens dieser pyrolysierten Oberflächen im Sinne eines qualifizierenden Brandschutzes nutzen, ist es unabdingbar, die Oberfläche gegen Abrieb zu schützen, sie also dauerhaft zu stabilisieren. Bei den traditionellen japanischen Architekturen wurden hierfür konstruktive Maßnahmen wie große Dachüberstände genutzt. Bauteile, die unmittelbar einer mechanischen Belastung ausgesetzt sind, wie beispielsweise Fenster- und Türleibungen, wurden von vornherein aus nativen Hölzern hergestellt. Der avisierte Einsatz pyrolysierter Hölzer als Fassadenmaterial für einen städtischen Kontext schließt konstruktive Maßnahmen des Holzschutzes zwar nicht aus, wird aber insbesondere bei mehrgeschossigen Fassaden kaum zu realisieren sein. Insofern müssen andere Lösungen gefunden werden, die Oberfläche zu stabilisieren. Die gesuchten Methoden müssen zwingend den durch die Pyrolyseschicht erhöhten Brandschutz erhalten, leisten bestenfalls einen eigenen Beitrag zur Erhöhung des Feuerwiderstands und müssen im Sinne des Projektes ökologisch unbedenklich sein.

#### 3.1 Mineralische Stoffe zur Stabilisierung der Pyrolyseschicht

Zur Stabilisierung der pyrolysierten Oberfläche wird eine Methode gesucht, die ein ebenso nachhaltiges Verfahren darstellt wie die Pyrolyse selbst, ohne dabei deren positive Brandschutzeigenschaften zu beeinträchtigen. Das gesuchte Mittel muss also ungiftig und ökologisch unbedenklich sein, damit die gesamte Fassade nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer in einen Kreislauf<sup>24</sup> zurückgeführt werden kann. Um eine möglichst lange Nutzungsdauer der Fassade zu garantieren, sollte die Beschichtungsmethode eine Instandhaltung beziehungsweise Instandsetzung erlauben. Das gesuchte Mittel muss die Kohleschicht gegen Abrieb und Bewitterung schützen und idealerweise das Eindringen von Wasser verhindern. Das Mittel darf in keinem Fall die Brandlast erhöhen, bestenfalls trägt es selbst zusätzlich zur Erhöhung des Feuerwiderstands bei.

In Frage kommen hier Substanzen auf rein mineralischer Basis. Im Gegensatz zu organischen Bindemitteln, die in energieaufwändigen Syntheseprozessen auf Basis von Rohöl hergestellt werden und welche nach dem Trocknen einen Film auf der Oberfläche erzeugen, werden mineralische Bindemittel auf der Basis anorganischer Stoffe gewonnen. Beim Auftragen dringen sie in den Untergrund ein, verbinden sich mit diesem und verfestigen sich dort.

*„Der wesentliche Vorteil anorganisch gebundener im Vergleich zu organisch gebundenen Holzwerkstoffen ist die Witterungsbeständigkeit. Sie können daher auch als Fassadenplatten eingesetzt werden.“<sup>25</sup>*

Neben der ökologischen Unbedenklichkeit haben sie also den Vorteil, tief in poröse Untergründe eindringen zu können und diese so zu verfestigen – beides Aspekte, die zur Stabilisierung der oberflächlichen Kohleschicht hilfreich sein können.

---

<sup>24</sup> Angestrebt wird die Weiterverwertung zu anderen Bauprodukten auf Basis von Holzschnitzeln oder -fasern beziehungsweise die Kompostierbarkeit der Fassade nach Ablauf der Nutzungszeit. Eine andere Möglichkeit liegt in der thermischen Verwertung, wodurch das gespeicherte CO<sub>2</sub> wieder in den Kreislauf zurückgegeben würde.

<sup>25</sup> Scheer 2009, Seite 479

In Voruntersuchungen kamen zunächst mineralische Schlämmen auf Basis von Zement zur Anwendung. Eine Stabilisierung mittels vor dem Pyrolyseprozess in die Hölzer eingebrachter Nanosolen, wurden aufgrund der extrem hohen Kosten dieser Stoffe verworfen.

Der Fokus wurde schließlich auf die Untersuchung von Wasserglas gelegt und unterschiedliche Versuchsreihen dazu konzipiert, wie dieses am besten in die Pyrolyseschicht eingebracht werden können. Es wurden Testverfahren entwickelt, um Oberflächeneigenschaften und die Feuerresistenz zu ermitteln.

Um einen Vergleich zu haben, wurden in parallelen Untersuchungen immer auch Beschichtungen mit Epoxidharz durchgeführt. Solche mit Epoxidharz beschichtete Pyrolyseoberflächen werden derzeit von einer Vielzahl von Herstellern<sup>26</sup> für Anwendungen in Innen- und Außenräumen angeboten. Epoxidharz kann aufgrund seiner geringen Viskosität zwar gut in poröse Materialien eindringen und diese nach Aushärtung verfestigen, es ist äußerst resistent gegen Abrieb und Verwitterung, hat allerdings den Nachteil, nicht nachhaltig im Sinne des Untersuchungsziels zu sein und die Brandlast deutlich zu erhöhen. Als Methode zur nachhaltigen Stabilisierung von Fassaden mit pyrolysierten Oberflächen scheiden Epoxidharze daher aus.

---

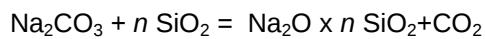
<sup>26</sup> siehe beispielsweise MOCOPINUS: [www.mocopinus.com](http://www.mocopinus.com); Zwarthout Shou-Sugi-Ban: [www.zwarthout.com](http://www.zwarthout.com)

## 3.2 Wasserglas

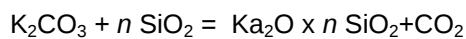
### 3.2.1 Wasserglas – Herstellung

Unter Wasserglas versteht man die Silikate der Alkalimetalle Natrium, Kalium oder Lithium beziehungsweise deren wässrige Lösungen. „Je nachdem, ob überwiegend Natrium-, Kalium- oder Lithiumsilicate enthalten sind, spricht man von Natronwasserglas, Kaliwasserglas oder Lithiumwasserglas.“<sup>27</sup>

Die Gewinnung von Wasserglas erfolgt in einem Schmelzprozess. Quarzsand wird mit Kaliumcarbonat (Pottasche  $K_2CO_3$ ) beziehungsweise Natriumcarbonat ( $Na_2CO_3$ ) bei etwa 1200 °C aufgeschmolzen. Nach dem Abkühlen entsteht eine glasartige, durchsichtige und spröde Substanz, welche zunächst zu Pulver zermahlen wird und dann bei hohen Temperaturen und großem Druck in Wasser gelöst wird.



bzw.



$n = 1 \text{ bis } 4$ <sup>28</sup>

Das nach dem Verdampfen des überschüssigen Wassers gewonnene flüssige Wasserglas ist klar bis gelblich, zähflüssig und stark alkalisch. Je höher der Anteil des noch in der Lösung verbliebenen Wassers ist, desto größer ist seine Viskosität. Im Handel wird Wasserglas üblicherweise in Konzentrationen von 60 % oder 30 % angeboten – je nach Anteil von Wasserglas in der Lösung.<sup>29</sup> Aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen der Ausgangsstoffe können die Konzentrationen in den Lösungen leicht schwanken.



Abbildung 15

"Am Wasserglas-Ofen", Hans Deiters um 1890

aus: Goosmann, Cornelia. Ein Jahrhundert Wasserglas Von Henkel. 1985. Print. Schriften des Werksarchivs der Henkel KgaA Düsseldorf BV001900978 17. Seite 26

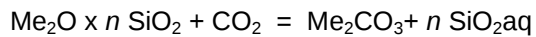
### 3.2.2 Wasserglas – Anwendung und Wirkungsweise

<sup>27</sup> vgl. auch: Wikipedia; Wasserglas: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserglas> Zugriff 2019-05-07

<sup>28</sup> ebd.

<sup>29</sup> vgl. auch Krätzer 1887, Seite 49. Die bereits damals üblichen Konzentrationen werden bis heute durch den Handel zur Verfügung gestellt.

Der Auftrag der wässrigen Wasserglaslösungen kann mittels Pinsel, durch Aufsprühen oder Imprägnieren beispielsweise im Unterdruckverfahren erfolgen. Zunächst verdunstet das überschüssige Wasser, bevor der Prozess der Verkieselung einsetzt. Die chemische Trocknung von Wasserglas erfolgt durch Aufnahme von  $\text{CO}_2$ . Es bildet sich die wasserunlösliche Kieselsäure.



Me = Alkalimetall

*„Dabei bildet sich Alkalicarbonat während Kieselsäure ausfällt, die zu Kieselgel kondensiert. Durch Polykondensation entstehen molekulare Strukturen auf der Basis von  $\text{SiO}_4$  - Tetraedern, die allerdings bei starken Kieselsäure-Überschüssen in den handelsüblichen Wasserglaslösungen schon verkettet und vernetzt sind. Das sich einstellende Gleichgewicht zwischen dem Wassergehalt des Gels und der Luftfeuchte beendet die Kondensation. Getrocknet bildet Kieselgel bei erheblicher Verminderung des Volumens eine spröde glasharte Substanz mit Resten von vermutlich mechanisch im Kristallgitter gebundenem Wasser. In einem Stadium der Trocknung trübt das Gel ein (erster Umschlagspunkt), wird jedoch nach fast vollständiger Abgabe von Wasser wieder klar (zweiter Umschlagspunkt).*

*[...] Getrocknet zerfällt Wasserglas in Kieselgel und Alkalikarbonat, die sich unterschiedlich verhalten. Das klare Kieselgel ist außer gegen Flußsäure chemisch beständig, neigt aber physikalisch zu Brüchen und Rissen, die es trüben können. Die Alkalicarbonate reagieren wie alle Salze je nach den lokalen klimatischen Bedingungen.“<sup>30</sup>*



Abbildung 16

Rohstoffe und das Produkt: Sand und Soda verschmelzen zu Wasserglas

Bildquelle: Goosmann, C. (1985). *Ein Jahrhundert Wasserglas von Henkel*

Diese Verkieselung von Wasserglas ist irreversibel, das heißt, dass auch bei Zugabe von Wasser keine Wasserglaslösung mehr entsteht. Damit bildet das zunächst in gelöster Form aufgebraachte Wasserglas durch das Verkieseln eine wasserunlösliche Imprägnierung.

Als rein mineralische Verbindung ist Kieselsäure unbrennbar und erfüllt damit die Brandschutzklasse "A1" gemäß DIN 4102-1. Da in den rein mineralischen Wasserglaslösungen neben Wasser keinerlei weitere Lösemittel, Weichmacher oder Konservierungsstoffe enthalten sind, sind diese ökologisch unbedenklich und damit letztlich auch kompostierbar.

### 3.2.3 Wasserglas – traditionelles Bindemittel zur Stabilisierung von Oberflächen

<sup>30</sup> vgl. <https://web.archive.org/web/20120104090216/http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege>

Wasserglas wurde im Jahr 1818 von Johann Nepomuk von Fuchs entdeckt – von ihm noch als „Kieselfeuchtigkeit“<sup>31</sup> bezeichnet. Erste Hinweise auf die Herstellung von Wasserglas reichen jedoch zurück ins 16. Jahrhundert.<sup>32</sup> Das sogenannte „kaltflüssige Glas“, gewonnen aus der Schmelze von „Weinsteinsalz und Kieselsteinpulver“, wird dort mit der Eigenschaft beschrieben, „sich auch zur Versteinierung des Holzes oder der Bausteine geeignet zu haben“.<sup>33</sup> Vorteile der Wassergläser liegen in der dauerhaften Stabilisierung poröser Oberflächen durch den Prozess der Verkieselung. Ihren Durchbruch erlebte die Anwendung von Wasserglas mit der Erfindung der Wasserglasmalerei. Bei dieser als Stereochromie bezeichneten Technik werden mineralische Farben mit Wasserglas als Bindemittel vermischt und auf porösen, speziell vorbereiteten Untergründen aufgetragen.

*„Die größte Zukunft wird dem Wasserglas durch seine Anwendung zu den Wasserglasfarben bevorstehen. Diese Farben haben [...] große Vorzüge dadurch, daß sie in wenigen Minuten ohne Geruch trocknen, daß sie die Farbe nie verändern, [...], daß sie einen Schutz gegen Feuersgefahr bilden, weil mit Wasserglasfarben angestrichene Gegenstände nicht mehr brennen, sondern nur schwer verkohlen, also keine Flamme geben. [...] Die Farben halten sich sehr gut auf trockenem Zement, Kalkverputz, Thon, Holz, rostfreien Metallen [...]“<sup>34</sup>*

Mit der Stabilisierung der bearbeiteten Oberflächen und der Erhöhung des Feuerwiderstands werden bereits hier die beiden entscheidenden Vorteile bei der Verwendung von Wasserglas genannt. Ein erstes Patent<sup>35</sup>, welches beide Vorzüge der Wasserglasmalerei beinhaltet, wurde bereits 1877 an Emil Meyer in Köpenick erteilt und beschreibt ein „verbessertes stereochromisches Verfahren, und Imprägnierung von Holz, Leinwand, Gaze und zum Schutz gegen Feuer, Fäulnis und Schwamm.“<sup>36</sup>

Der Herstellungsprozess mineralischer Farben auf der Basis von Wasserglas als Bindemittel wurde Ende des 19. Jahrhunderts von Pettenkofer und Keim weiterentwickelt. Die Farben der Firma Keim sind bis heute marktführend auf dem Gebiet mineralischer Farbsysteme.

Als Fixierungsmittel wird Wasserglas bis heute auch in andere Bereichen der Bautechnik verwendet. Vorteile liegen insbesondere darin, dass es durch Verkieselung eine wasserunlösliche chemische Verbindung mit dem Untergrund eingeht. Der Einsatz von Wasserglas zur Hydrophobierung von Wänden mittels Bohrlochinjektion zum Aufbau von Horizontalsperren gegen aufsteigende Feuchte, ist ein gebräuchliches Verfahren zur Bauwerksabdichtung, insbesondere bei Sanierungen.<sup>37</sup> Insofern stellt die Verwendung von Wasserglas ein erprobtes und zugelassenes Verfahren zur Stabilisierung poröser Oberflächen dar. Es ist ökologisch völlig unbedenklich und entspricht so der Intension des Forschungsprojektes.

---

<sup>31</sup> Krätzer 1887, Seite 10

<sup>32</sup> vgl. Krätzer 1887, Seite 9

<sup>33</sup> ebd.

<sup>34</sup> Trillich 1929, Seite 32f.

<sup>35</sup> D.R.P. 3241, am 12. September 1877

<sup>36</sup> Trillich 1929, Seite 36

<sup>37</sup> vgl. die seit 2017 zurückgezogene DIN 18195-4 Bauwerksabdichtungen Teil 4: *Abdichtungen gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung.*

### 3.2.4 Wasserglas zur Stabilisierung von Holzoberflächen

Bereits in der ersten Veröffentlichung zu Wasserglas und dessen Anwendungsmöglichkeiten durch Johann Nepomuk von Fuchs aus dem Jahr 1857 wird Wasserglas als Mittel der Holzkonservierung genannt:

*„Den porösen Körpern, von welchen das Wasserglas eingesogen wird, theilt es eine ausserordentliche Festigkeit mit. Dazu gehören fast alle Gegenstände von gebranntem Thon [...] und Holzwerke.“*<sup>38</sup>

Ebenso finden sich in Heinrich Creuzburgs *Praktischer Anleitung zum Gebrauch des Wasserglases* aus dem Jahr 1864 bereits Beschreibungen der Vorteile des Auftrags von Wasserglas als dauerhaftes Holzschutzmittel.

*„Sie sind dauerhafter als Firniß, der sich zumal im Freien bald verzehrt, was beim Wasserglas nicht der Fall ist. [...] Sie sichern das Holz gegen Schwamm, Wurm, Fäulniß, und daher sind bei Neubauten die Anstriche des Bauholzes mit Wasserglas, pur oder mit irgend einer Erde abgerieben.“*<sup>39</sup>

Und auch für die Stabilisierung von Kohleschichten finden sich bereits 1916 bei Lange<sup>40</sup> Hinweise auf zwei Reichspatente, die den Einsatz von Wasserglas zur Stabilisierung von Kohle im Zusammenhang mit der Herstellung von Briketts beschreiben. Schon früh wurden demnach Experimente durchgeführt, sich die stabilisierenden Eigenschaften von Wasserglas auch zur Konservierung von Holz nutzbar zu machen. Diese historischen und größtenteils in Vergessenheit geratenen Beschreibungen zur Verwendung von Wasserglas in Verbindung mit Holz oder Kohleschichten dienen als Ausgangspunkt und Orientierung für den von uns gewählten Ansatz, die pyrolysierte Oberfläche von Fassadenbrettern mit Wasserglas zu stabilisieren.

### 3.2.5 Wasserglas als Flammenschutzmittel, insbesondere von Holz

Seit der Erfindung von Wasserglas wurde es insbesondere auch wegen seiner Brandschutzeigenschaften als Imprägniermittel eingesetzt. Johann Nepomuk von Fuchs entwickelte bereits 1823 zusammen mit Franz Xaver Pettenkofer ein Verfahren, mit dem die Entflammbarkeit von Holz herabgesetzt werden sollte.<sup>41</sup> Hinweise über die Verwendung von Wasserglas als Flammenschutzmittel von Holz finden sich auch bei Creuzburg.

Er schreibt:

*„Taucht man einen Holzspan oder einen Streifen Papier in verdünntes Wasserglas bis zur Hälfte ein, und zündet die andere Hälfte nach dem Trocknen an, so brennt der Span oder der Streifen ab bis zu der Stelle, wo das Wasserglas anfängt, welches damit getränkt wurde, und es gelingt nicht, den Span weiter zum Brennen zu bringen. Deßhalb werden jetzt in Theatern leicht feuerfangende Gegenstände, wie Coulissen, Vorhänge, leichtes Holzwerk, mit Wasserglas behandelt.“*<sup>42</sup>

---

<sup>38</sup> von Fuchs 1857, Seite 16,

<sup>39</sup> Creuzburg 1864, Seite 36

<sup>40</sup> vgl. Lange 1916, Seite 557 [Abschnitt 805]: *„Ein Bindemittel für Briketts wird nach D. R. P. 162 637 hergestellt aus Magnesiumhypodurit, Tragant und konzentriertem Wasserglas. Zur Herstellung eines Bindemittels zum Brikettieren von Kohle vermischt man eine Lösung von 4 Tl. Wasserglas in 50 Tl. Wasser mit 1 Tl. eines Breies, den man durch Verreiben von Kalk und Petroleum gewinnt. (D. R. P. 184 225.)“*

<sup>41</sup> vgl. auch: Wikipedia; Wasserglas: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserglas>

<sup>42</sup> Creuzburg 1864, Seite 18

Bei Creuzburg finden sich ebenfalls Beschreibungen der Vorzüge von Wasserglasanstrichen:

*„Sie sichern das Holz gegen Feuer, während der Firnißanstrich bei Feuersgefahr diese noch vermehrt.“*<sup>43</sup>

Auch finden sich konkrete Anweisungen, wie das Wasserglas genau aufzutragen ist:

*„Auf ungehobeltem oder grobgehobeltem Holz, das vorher nicht gestrichen sein darf, ergibt der Anstrich einen flammensicheren Schutz (Holzdecken!). – Zweckmäßig empfiehlt sich ein Vortränken (Voranstrich) mit verdünntem Fixativ.“*<sup>44</sup>

Bereits im 19. Jh. gibt es Patentanmeldungen für Rezepturen feuerfester Anstrichmassen auf Basis von Wasserglas.<sup>45</sup> Das Wissen um die stabilisierenden und feuerhemmenden Eigenschaften von Wasserglas führte zu der weiten Verbreitung von Wasserglasanstrichen für vielfältige Anwendungen im 19. Jahrhundert.<sup>46</sup> Natriumwasserglas zählte noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu den wichtigsten Flammenschutzmitteln für Holz.<sup>47</sup> Der von uns verfolgte Ansatz basiert also auf etablierten Verfahren, die wir in unseren Untersuchungen unter dem Aspekt einer geänderten Fragestellung zusammenbringen.

---

<sup>43</sup> Creuzburg 1864, Seite 36

<sup>44</sup> Trillich 1929, Seite 85

<sup>45</sup> vgl. Lange 1916, Seite 658 [Abschnitt 947]: Lange nennt konkret:

*„Eine feuer- und wasserbeständige Anstrichmasse ist nach D. R. P. 72 801, [...] Eine feuerfeste Anstrichmasse wird nach D. R. P. 58 841 [...] Eine feuerfeste Anstrichfarbe wird nach D. R. P. 247 372 [...]“*

<sup>46</sup> Vgl. Lange 1916, Seite 654 [Abschnitt 942]:

*„Es sei jedoch hervorgehoben, daß alle Verfahren der Malerei mit Wasserglasfarben auf Stein und Holz, die Verwendung des Wasserglases [...] zum Appretieren von Geweben, als Flammenschutzmittel, zur Herstellung künstlicher Steinmassen usf. schon in den Jahren vor 1860 vollständig erkannt waren, und daß die modernen, zum Teil patentierten Methoden, wenn nicht, wie sich häufig aus dem Wortlaute der Vorschriften ergibt, Nachahmungen, so doch im besten Falle nur Verbesserungen meistens unwesentlicher Art sind.“*

<sup>47</sup> vgl. Lange 1927, Seite 553:

*„Das Natronwasserglas (die Kaliumverbindung dient Spezialzwecken) ist das wichtigste anorganische und daher unbrennbare Kleb- und Bindemittel für Appreturzwecke, zur Herabsetzung der Entflammbarkeit von Geweben, Holz (Holzverkieselung), Theaterdekorationen [...]“*

## 3.3 Wasserglasarten

### 3.3.1 Auswahl des Wasserglases

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Wassergläser bezüglich ihres Einflusses auf die Stabilisierung der Oberflächen einerseits und auf den möglichen Einfluss auf das Brandverhalten andererseits in den Untersuchungen berücksichtigen zu können, wurden zunächst exemplarisch zwei Wassergläser ausgewählt: Eine 60%ige Natrium-Wasserglaslösung<sup>48</sup> des Herstellers Carl Roth GmbH und mit dem Fixativ von Keim<sup>49</sup> ein handelsübliches Produkt auf der Basis von 21%igem Kalium-Wasserglas.

Bei der Auswahl wurde gezielt versucht, die beiden vorwiegend verwendeten Wasserglasarten<sup>50</sup> zu vergleichen, aber auch den Einfluss der Konzentrationen der Wasserglaslösungen zu untersuchen. Es ging insbesondere darum, mit dem Wasserglas der Firma Keim ein handelsübliches und somit ein zugelassenes Bauprodukt mit der reinen Chemikalie zu vergleichen. Für das Kaliumwasserglas wie auch das Natriumwasserglas wurden zunächst Vorversuche konzipiert um Auftragsverfahren auf die pyrolysierten Oberflächen zu testen.

### 3.3.2 Natrium-Wasserglas

Die unterschiedlichen Materialverhalten der einzelnen Wassergläser werden bereits im 19. Jh. beschrieben und dementsprechend spezifischen Anwendungen zugeordnet.

*So habe laut von Fuchs Natriumwasserglas „jedenfalls einen Vorzug vor jenem darin, dass es eine grössere Liquidität besitzt, und daher viel leichter als das etwas klebrige und zähflüssige Kali-Wasserglas in die kleinsten Zwischenräume, Poren und Klüfte eindringt, [...] und ein grosses Bestreben hat, mit der Kohlensäure sich vereinigend auszuwitern, so möchte vielleicht darin ein Vorzug für das Natrium-Wasserglas liegen, weil hierdurch die Kieselerde leichter in Freiheit gesetzt und die Verkieselung der Masse schneller erzielt wird, was ich übrigens noch weiteren Erfahrungen überlassen will.“<sup>51</sup>*

Natrium-Wasserglas wurde lange als Brandschutzmittel verwendet. Insbesondere aus diesem Grund wurden Versuchsreihen mit Natrium-Wasserglas entwickelt, um die feuerhemmenden Eigenschaften auch in Kombination mit der Pyrolyseschicht zu erproben. Für die folgenden Untersuchungen kam 60%iges Natrium-Wasserglas unverdünnt zur Anwendung.

---

<sup>48</sup> Sicherheitsdatenblätter zu Natriumwasserglas:  
[https://www.carlroth.com/downloads/sdb/de/7/SDB\\_7561\\_DE\\_DE.pdf](https://www.carlroth.com/downloads/sdb/de/7/SDB_7561_DE_DE.pdf)

<sup>49</sup> Produktdatenblatt zu Keim Fixativ: <https://www.keim.com>

<sup>50</sup> Neben Kalium- und Natrium-Wasserglas gibt es noch Lithium-Wasserglas. Da dies im 19. Jahrhundert noch nicht hergestellt werden konnte, finden sich in der älteren Literatur keine Anwendungen für dessen Anwendung. Da Lithium-Wasserglas bis heute ein Nischenprodukt ist, wurde darauf verzichtet, hierfür eine eigene Testreihe zu konzipieren.

<sup>51</sup> von Fuchs 1857, Seite 32f.

### 3.3.3 Kalium-Wasserglas

Kalium-Wasserglas wurde dagegen hauptsächlich in Verbindung mit Wasserglasmalerei (Pettenkofer-Keim-Technik) eingesetzt. Seine Vorzüge liegen insbesondere in der größeren Stabilisierung von Oberflächen. Für die folgenden Untersuchungen wurde 21%iges Kalium-Wasserglas vom KEIM verwendet. Der Fokus lag in der Untersuchung mehrstufiger Auftragsverfahren. Um eine hier ein vereinfachtes Verfahren zu erproben, welches sich später leicht auch in der Praxis durchführen lässt, wurde da Wasserglas bei diesen Versuchsreihen mit dem Pinsel aufgetragen.

### 3.3.4 Fixierungs-Wasserglas

Werden Kalium- und Natrium-Wasserglas in einem bestimmten Verhältnis gemischt, spricht man von Fixierungswasserglas. Es dient, wie der Name schon erkennen lässt, hauptsächlich der Fixierung von Oberflächen. Eine erste Angabe über das erforderliche Mischungsverhältnis und die Vorzüge gegenüber der Verwendung reiner, gesättigter Wassergläser findet sich bei von Fuchs unter der Überschrift „*Fixierungs-Wasserglas und Darstellung desselben.*“

*„Lange Zeit war ich der Meinung, dass das gewöhnliche mit Kieselerde vollkommen gesättigte Wasserglas das beste und zu allen Zwecken das brauchbarste sey; allein in der Stereochromie hat es sich bei der letzten Operation, dem Fixiren der Farben nämlich, sehr nachtheilig gezeigt und das Fortschreiten dieser Malerei sehr gehemmt, bis ich das Fehlerhafte dabei erkannte, was eben darin besteht, dass dieses Wasserglas wegen seiner schnell eintretenden theilweisen Zersetzung die Bilder gewöhnlich unrein' und fleckig macht, wie es später noch näher dargethan werden wird. Nachdem ich dieses eingesehen hatte, wurde dem Uebel, was Herrn v. Kaulbach und mir viel Sorg,e machte, bald abgeholfen, indem ich auf den Gedanken kam, dass das Wasserglas zu diesem Zwecke nicht vollkommen mit Kieselerde gesättigt seyn darf. Wenige Versuche bestätigten diese Vermuthung und bestimmten mich nach genauer Erwägung aller Umstände dahin, dem gewöhnlichen und mit Kieselerde vollkommen gesättigten Wasserglas eine Portion Natrumkieselfeuchtigkeit beizugeben; was sich auch ganz zweckdienlich erwies. Dieses Gemisch will ich Fixirungs-Wasserglas nennen.*

*Zur Darstellung der dazu verwendeten Natrumkieselfeuchtigkeit werden drei Theile reines wasserfreies kohlensaures Natrium mit zwei Theilen Quarzpulver zusammengeschmolzen, mit dem dadurch erhaltenen Produkte eine concentrirte Auflösung gemacht und davon, da es auf ein genaues quantitatives Verhältniss nicht ankommt, ein Maasstheil zu vier bis fünf Maasstheilen von dem concentrirten und mit Kieselerde vollkommen gesättigten Kali-Wasserglas beigemischt; wodurch es nebst einem Zuwachs von Kieselerde einen grössern Alkaligehalt bekommt, welcher hinreicht, die schnelle Zersetzung zu verhindern, ohne dass seine übrigen Eigenschaften merklich alterirt werden. Das vorher trübe oder opalisirende Wasserglas wird dadurch vollkommen wasserklar und etwas dünnflüssiger.“<sup>52</sup>*

In der Literatur finden sich weitere Beschreibungen für den Einsatz von Fixierungs-Wasserglas speziell zur Stabilisierung von Oberflächen.<sup>53</sup> Bei der Erstellung der Musterfassaden für den im Projekt erbauten Pyrolysecontainer kommt auch Fixierungs-Wasserglas zur Anwendung.

---

<sup>52</sup> von Fuchs 1857, Seite 10f.

<sup>53</sup> vgl. Lange 1916, Seite 233 [Abschnitt 344]: „Zum Fixiren von Farbanstrichen oder Malereien, die auf einem solchen Verputz hergestellt sind, wird das Fixierwasserglas verwendet, [...]“

## 3.4 Auftrag des Wasserglases - Imprägnierverfahren

### 3.4.1 Auftrag des Wasserglases auf Holz

Neben der Art des Wasserglases hat auch die Methode des Auftrags einen erheblichen Einfluss auf die Eignung als Mittel zur Stabilisierung der Pyrolyseschicht. Es bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten an, das Wasserglas auf beziehungsweise in die Pyrolyseschicht einzubringen. Unterschiedliche Auftragstechniken werden hinsichtlich ihrer Effektivität sowie auch ihrer Praktikabilität miteinander verglichen.

### 3.4.2 Traditionelle Auftragsverfahren

Traditionell werden Wassergläser mit Pinseln oder durch Aufspritzen<sup>54</sup> aufgetragen. Gerade bei diesen Verfahren spielt der Anteil des Wassers in den jeweiligen Lösungen, also die Konzentration des Wasserglases<sup>55</sup>, eine große Rolle. Er wirkt sich auf die Eindringtiefe, die Geschwindigkeit mit der der Verkieselungsprozess stattfindet, die Beschaffenheit der Oberfläche und beim verwendeten Material Holz insbesondere auch auf die zwischenzeitliche Veränderungen der Holzfeuchte aus.

Von Fuchs beschreibt bereits den Einfluss der Verdünnungen auf das zu erzielende Resultat und macht Angaben zu Konzentrationen:

*„Bei diesen Versuchen, sowie vorzüglich in der Praxis ist es nicht gleichgültig, in welchem Konzentrationszustande das in Anwendung kommende Wasserglas ist. 1 Maasstheil concentrirtes Wasserglas zu 2 Maasstheilen Wasser soll das Maximum und 1 Maasstheil desselben Wasserglases zu 1 Maasstheil Wasser dürfte das Minimum der Verdünnung seyn, bisweilen auch noch etwas darunter – je nach Umständen. Ist es zu concentrirt oder zu verdünnt, so leistet es in manchen Fällen die Dienste nicht, die man von ihm verlangt. Ist es sehr concentrirt, so dringt es nicht leicht und tief genug in Körper ein [...]“*<sup>56</sup>

Weitere Hinweise für „Wasserglasanstrichen auf Holz“ insbesondere zur Anwendung von Anstrichen mit „purem Wasserglas, ohne Farbe“ finden sich bei Creuzburg:

*„Regel ist es vor Allem, daß man kein concentrirtes Wasserglas zum Anstrich auf Holz und überhaupt gar nicht anwenden darf, weil das starke Wasserglas nicht so leicht in die Poren des Holzes eindringen kann. Man verdünnt dasselbe mit gleichen Theilen heißen Regenwassers, dem Maas nach. Wenn der erste Anstrich nach etwa 12 Stunden gehörig trocken ist, läßt man einen zweiten Anstrich folgen. Ein dritter Anstrich ist kaum nöthig.“*<sup>57</sup>

In dem bereits weiter oben erwähnten Anweisungen von Creuzburg zur Verwendung von Wasserglas als Flammenschutzmittel macht er aber auch auf ein Problem aufmerksam:

*„Wenn man Wasserglas auf Holz oder Metall aufstreicht, so trocknet es ziemlich schnell und hinterläßt, zumal, wenn der Anstrich wiederholt wird, einen firnißartigen Ueberzug, der nicht leicht abspringt, doch nach und nach etwas trübe wird. Ein solcher Anstrich hält aber im Freien nicht*

---

<sup>54</sup> vgl. Krätzer, Seite 79

<sup>55</sup> Die maximalen Konzentrationen von Wassergläsern liegen bei 60%. Verdünnungen von 20-30% sind üblich. Herstellungsbedingt gibt es bei allen Wassergläsern Schwankungen in der Konzentration.

<sup>56</sup> von Fuchs 1857, Seite 31

<sup>57</sup> Creuzburg 1864, Seite 32f.

*vollkommen aus; leichte Regengüsse haben ihm zwar nicht viel an, allein anhaltende nasse Witterung weichen einen solchen Anstrich nach und nach auf.*<sup>58</sup>

Und er fährt weiter unten mit konkreten Anweisungen zur Anwendung fort:

*„Das Holz erhält zuerst einen Anstrich von Wasserglas, welches mit gleichviel heißem Regenwasser verdünnt worden ist. [...] Wenn der erste Anstrich nach etwa 12 Stunden gehörig trocken ist, läßt man einen zweiten Anstrich folgen. Ein dritter Anstrich ist kaum nöthig..“*<sup>59</sup>

Das empirische Wissen der Autoren des 19. Jahrhunderts verweist auf das zugrundeliegende physikalische Phänomen:

*„Die schon früh beobachtete verfestigende Wirkung von Wassergläsern beruht auf der Ablagerung von Kieselgel in den Poren des getränkten Objekts, in denen es nach dem Tränken in kugelförmigen Aggregaten festsitzt. Die mit der Trocknung des Kieselgels einhergehende Volumenverminderung erfordert eine mehrmalige Anwendung, deren Anzahl mit der Konzentration des Wasserglases und der damit verfügbaren Silikatmenge (SiO<sub>2</sub>) abnehmen sollte. Die Menge des Kieselgels bestimmt also den Grad der Festigung, egal ob es in ein silikatisch oder carbonatisch gebundenes System eindringt. [...] Sein geringes Eindringvermögen von nur wenigen Millimetern kann weder durch Verdünnung noch durch Erwärmung verbessert werden.“*<sup>60</sup>

Es liegt die Vermutung nahe, dass bei verdünnten Wassergläsern das Wasser aufgrund seiner geringeren Molekülgröße tiefer in das Holz einzieht. In weiteren Versuchsreihen müsste gezeigt werden, unter welchen Bedingungen und bei welchen Konzentrationen eine optimale Eindringtiefe in das Material erreicht werden kann bei gleichzeitig minimaler Durchfeuchtung des Holzes. Die unterschiedliche Sättigung spielt zunächst eine Rolle bei der Verarbeitung, dem Eindringverhalten in den Untergrund und der Geschwindigkeit der Verkieselung. Zu berücksichtigen ist wie gezeigt insbesondere aber auch, dass beim Auftrag stark verdünnter Wassergläser zunächst weitere Feuchtigkeit in das Holz eingebracht wird, die Holzfeuchte also kurzfristig ansteigt, bis sich wieder eine Ausgleichsfeuchte einstellt.

---

<sup>58</sup> Creuzburg 1864 Seite 18

<sup>59</sup> Creuzburg 1864 Seite 24

<sup>60</sup> Christ, A.; *Warum die festigende Wirkung von Wasserglas überwiegend Nachteile hat?*

in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 1994, ISSN: 0931-7198

<https://web.archive.org/web/20070318173625/http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1997117109309>

### 3.4.3 Auftrag des Wasserglases auf die Pyrolyseschicht - Imprägnierverfahren

In Anlehnung an die zuvor zitierten Beschreibungen zur Verwendung von Wasserglas in Verbindung mit Holz beziehungsweise Kohle, wurden eigene Testreihen für den Auftrag der unterschiedlichen Wasserglasarten auf die Pyrolyseschicht konzipiert. Das Ziel besteht darin, das Wasserglas so tief zu imprägnieren, dass die gesamte Pyrolyseschicht durchdrungen wird. Idealerweise gelingt es, mit dem Wasserglas eine durchgängige Verbindung bis in die nativen Bereiche des Holzes auszubilden. Gleichzeitig soll soviel Wasserglas aufgebracht werden, dass nicht von der Pyrolyseschicht aufgenommenes Wasserglas an der Oberfläche stehen bleibt und dort zu einer geschlossenen, wasserdichten Schicht trocknet. Zunächst werden zwei Verfahren untersucht: Der Auftrag von Kaliumwasserglas mittels Pinsel und das Tauchimprägnieren von Natriumwasserglas im Unterdruckverfahren.

#### 3.4.3.1 Kali-Wasserglas mittels Pinsel-Auftrag

Die Methode des Pinsel-Auftrags wurde mit dem 21%igen Kalium-Wasserglas von KEIM untersucht. Das Wasserglas wurde nach entsprechenden Trocknungszeiten von mindestens acht Stunden in insgesamt drei Schichten aufgetragen.

#### 3.4.3.2 Imprägnierung im Unterdruckverfahren

Eine Methode, Substanzen schnell und tief in Hölzer einbringen zu können ist das Imprägnieren mittels Unter- oder Überdruck. Dieses Verfahren ist gängiger Stand der Technik und wird in industriellem Maßstab als Verfahren zum Einbringen von Holzschutzmitteln verwendet.

Mit den Untersuchungsreihen zur Imprägnierung von pyrolysierten Holzoberflächen erproben wir eine ganz neue Methode. Diese basiert auf der Annahme, dass es mit dem Verfahren der Imprägnierung im Unterdruckverfahren gelingen kann, die konzentrierten und damit sehr viskosen Wassergläser tief in die Pyrolyseschicht einzubringen. Das angestrebte Ziel besteht darin, mit dem Wasserglas nicht nur die komplette Kohleschicht zu durchdringen, sondern das Wasserglas bis in die unverkohlten Holzschichten einzubringen und somit die Kohleschicht zusätzlich mit dem nativen Holz zu "verankern". Durch die Verwendung konzentrierter Lösungen soll gleichzeitig der ins Holz eingebrachte Anteil an Wasser gering gehalten werden.

#### 3.4.3.3 Natrium-Wasserglas mittels Imprägnierung

Zur Erprobung der Methode der Imprägnierung im Unterdruckverfahren, verwenden wir das konzentrierte Natrium-Wasserglas. Die Imprägnierung erfolgt einmalig. Für die Versuche wird das unverdünnte Wasserglas etwa einen Zentimeter hoch in die Imprägnierwanne gegeben und die Probekörper mit der pyrolysierten Seite nach unten in das Wasserglas-Bad gelegt. Dabei wird darauf geachtet, dass die Probekörper im Wasserglas schwimmen und keinen Kontakt zum Boden der Imprägnierwanne haben. Die Imprägnierung erfolgt für die ersten Probekörper im Autoklaven für 30 Minuten bei einem 96%igen Vakuum. Die Fassadenbretter der SBI-Tests und der Musterfassaden wurden in einer eigens dafür gefertigten Vorrichtung unter Verwendung eines Vakuumsacks imprägniert.

### 3.4.4 Mikroskopische Untersuchungen der Imprägnierverfahren

Zur Beurteilung der Eindringtiefe werden die Probekörper nach der Imprägnierung aufgeschnitten und die Schichtdicken unter dem Mikroskop vermessen. Anhand dieser Aufnahmen lässt sich gut zeigen, dass die untersuchten Methoden geeignet sind, das Wasserglas bis in die Übergangszone zwischen pyrolysierte Oberfläche und nativem Holz einzubringen.

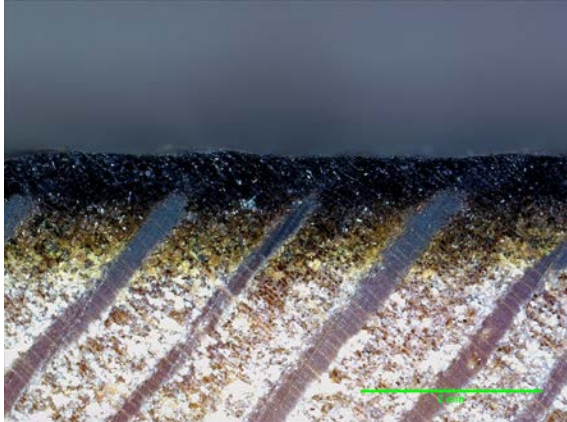


Abbildung 17 und 18

Mikroskopie: Lärche, mit Kalium-Wasserglas tauchimprägniert vor der Bewitterung; Schnitt und Aufsicht

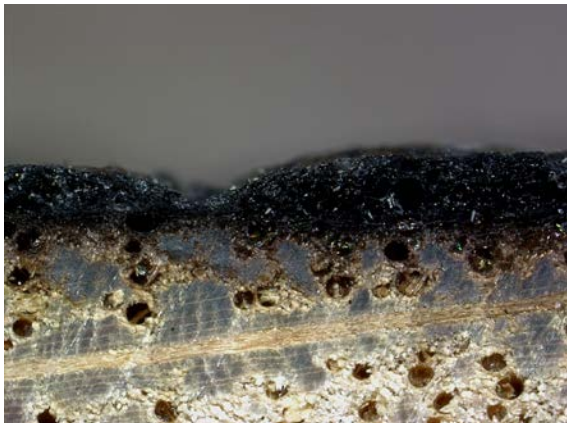


Abbildung 19 und 20

Mikroskopie: Eiche, mit Kalium-Wasserglas pinselimprägniert vor der Bewitterung; Schnitt und Aufsicht



Abbildung 21 und 22

Mikroskopie: Fichte, mit Natrium-Wasserglas tauchimprägniert vor der Bewitterung; Schnitt und Aufsicht



## 4. Experimentelle Untersuchungen

Auf Grundlage der vorangegangenen Recherchen wurden spezifische Untersuchungsreihen konzipiert, um die einzelnen Teilaspekte des Projektes experimentell zu erforschen. Zunächst wurden die Auswirkungen der Pyrolyse auf die unterschiedlichen Holzarten getestet. In einem zweiten Schritt wurden dann unterschiedliche Imprägnierungsverfahren für die pyrolysierten Oberflächen erprobt. Zur wissenschaftlichen Auswertung der Ergebnisse wurden entsprechende Testverfahren herangezogen und die einzelnen Probekörper entsprechend geprüft. Alle Untersuchungen erfolgten unter der Zielvorgabe, ein Setup für die Pyrolyse und eine daran angepasste Form der Stabilisierung der Pyrolyseschicht zu entwickeln, welche es ermöglichen, die Brandschutzklassifikation „schwerentflammbar“ nach den derzeit gültigen normativen Anforderungen zu erhalten.

### 4.1 Material

Bei der traditionellen japanischen Methode des Shou Sugi Ban wird vornehmlich Zedernholz verwendet. Für die Versuchsreihen von PyroForCE 2.0 wurde festgelegt, die heimischen Holzarten Eiche, Lärche und Fichte hinsichtlich der jeweiligen Verbesserung ihres Feuerwiderstandes durch Oberflächenpyrolyse zu testen und untereinander zu vergleichen.

Grundsätzlich sind alle Nadelholzarten wie Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche und Douglasie sowie die sehr dauerhaften Laubholzarten Eiche, Robinie oder Kastanie als Holzfassade geeignet. Fichte ist aufgrund der sehr guten Verfügbarkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit das wirtschaftlichste Bau- und Konstruktionsholz. Zudem lässt es sich leicht bearbeiten. Tanne besitzt ähnliche Eigenschaften, weist jedoch Harzgallen auf. Das Kernholz von Lärche, Kiefer, Douglasie und Eiche ist dauerhafter als das von Fichte und Tanne und kann daher im Fassadenbereich ohne Oberflächenbehandlung eingesetzt, hat jedoch einen deutlich höheren Preis.

Nicht zuletzt aufgrund der geringeren Kosten - auch für den Bau späterer Fassaden - aber auch wegen der guten Verfügbarkeit wurde festgelegt, Testreihen mit Fichte durchzuführen. Gleichzeitig galt es als Herausforderung, ein Verfahren zu entwickeln, um auch für diese Holzart eine Klassifikation zu erreichen.

Im Vergleich mit anderen Nadelhölzern weist Lärche eine sehr hohe spezifische Dichte auf und wird schon seit der Antike wegen ihrer Feuerresistenz geschätzt. Alberti schreibt über Lärchenhölzer:

*„Die althergebrachte Meinung, sie sei gegen Feuersgefahr unbezwinglich, ja fast unverletzlich, besteht heute noch. Ja man läßt an den feuergefährlichsten Stellen lärchene Bohlen anbringen. Ich aber habe sie brennen sehen, doch so, als ob sie über die Flammen ungehalten wäre und sie abzuschütteln schien.“*<sup>61</sup>

Die Einbeziehung der ebenfalls gut verfügbaren Lärche dient unter Anderem folglich auch dazu herauszufinden, inwieweit das spezifische Materialgewicht die Herstellung der Pyrolyseschicht und den Feuerwiderstand beeinflussen.

Aus den Vorversuchen<sup>62</sup> ist bekannt, dass die Wahrscheinlichkeit, mit pyrolysierte Eiche die Klassifikation „schwerentflammbar“ erreichen zu können, sehr hoch ist, insbesondere da native Eiche aufgrund ihrer großen spezifischen Dichte bereits eine gute Feuerresistenz aufweist. Daher wurde mit Eiche auch ein Laubholz als Vergleichsmaterial in die Testreihen aufgenommen.

---

<sup>61</sup> Alberti, Seite 85

<sup>62</sup> vgl. Brennkasten-Tests im Abschlussbericht von PyroForCE 1.0

Neben den genannten pragmatischen sprachen auch gestalterische Kriterien für die Auswahl dieser unterschiedlichen Holzarten. Jede einzelne bildet bei der Pyrolyse ein ganz spezifisches Rissbild aus, welches sich auch im Maßstab einer Fassade deutlich zeigt und deren Charakter bestimmt. Während Fichte kaum Risse bei der Pyrolyse bildet, zeigt sich bei Eiche ein charakteristisches, an Krokodilhaut erinnerndes Rissbild. Auf der Lärche bilden sich schmale, hauptsächlich quer zur Holzfaser verlaufende Risse. Dieses Rissbild ähnelt am ehesten dem der japanischen Zeder.

## 4.2 Probekörper

Für die Vortests zu Erprobung der unterschiedlichen Beschichtungsmethoden wurden Probekörper in den Maßen 500 x 100 x 20 mm aus den Holzarten Fichte, Lärche und Eiche hergestellt. Mit diesen Abmessungen war es möglich, die einzelnen Probekörper nach Pyrolyse und Oberflächenbehandlung in einzelne Teilstücke zu sägen, mit denen dann die unterschiedlichen Testverfahren durchlaufen werden konnten. Alle Oberflächen wurden vor der Pyrolyse gehobelt, konditioniert und gewogen. Vor und nach den einzelnen Behandlungsstufen wurde die Holzfeuchte der Probekörper ermittelt und mittels Differenzwägung Gewichtsveränderungen ermitteln zu können. Jedes einzelne Setup wurde an jeweils fünf Probekörpern durchgeführt, um statistisch haltbare Ergebnisse erhalten zu können.

## 4.3 Pyrolyse

In ersten Voruntersuchungen wurden zunächst die unterschiedlichen Parameter der Pyrolyseanlage getestet. Der Wechsel der Brennertechnologie von der indirekten Pyrolyse mittels Infrarot-Brenner zur direkten Beflammung erforderte eine Anpassung insbesondere der Vorschubgeschwindigkeiten. Neben den unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten wurde der Einfluss unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Drücke des Gas-Luft-Gemischs auf die Pyrolyse untersucht. Das Ziel bestand zunächst darin, in einem Durchlauf<sup>63</sup> eine gleichmäßige Pyrolyseschicht<sup>64</sup> auf der Oberfläche zu erzeugen. Um diese Pyrolyseschicht wirtschaftlich herstellen zu können, aber auch, um nur sehr kurz Energie in das Brett einzubringen und damit Verformungen gering zu halten, musste die Vorschubgeschwindigkeit möglichst hoch gewählt werden. Die dementsprechend hohe durch den Brenner aufgebrachte Energiemenge durfte aber nicht dazu führen, dass die entstehende Kohleschicht gleichzeitig ausgeglüht wird. Insbesondere bei den Längskanten ist dies problematisch, da hier in Relation zur Querschnittsfläche die höchste Energiemenge aufgebracht wird. Eine Möglichkeit, dem Ausglühen der Kanten vorzubeugen, besteht im vorigen Abrunden und der damit einhergehenden Veränderung der Oberfläche. Bei den SBI-Tests 3-5 wurde diese Methode angewendet.



Abbildung 23

Pyrolyse eines Fassadenbretts - auch die Schnittkanten und Schmalseiten können mit pyrolysiert werden

Letztlich mussten die Parameter auch so gewählt werden, dass sich die Oberseiten der Bretter nicht entzündten, was den Pyrolyseprozess unkontrollierbar gemacht hätte. Darüber hinaus wäre es

---

<sup>63</sup> Vorversuche, bei denen die Pyrolyseschicht in mehreren Durchläufen aufgebracht werden sollte hatten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen geführt. Die zuerst erzeugte dünne Kohleschicht verhinderte eine weitere Pyrolyse tieferer Holzschichten und neigte dazu, auszuglühen.

<sup>64</sup> Bei den Probekörpern der Versuchsreihen für die Beschichtungsmethoden wurde darauf geachtet, möglichst astfreie Hölzer auszuwählen. Die Brettern für die Verkleidung des Containers hatten teilweise Aststellen. Hier konnte die Oberfläche deutlich weniger stark pyrolysiert werden. Durch die Kopplung mit einer optischen Erkennung der Aststellen, könnte in einer späteren Anlage die Vorschubgeschwindigkeit individuell angepasst werden, um überall eine gleichmäßig starke Pyrolyseschicht aufbringen zu können.

notwendig geworden, Löschverfahren in den Prozess zu integrieren. Insbesondere ein Löschen durch den Auftrag von Wasser<sup>65</sup> wie bei der traditionellen Methode des *Shou Sugi Ban* sollte vermieden werden, da dies die Holzfeuchte erheblich beeinflussen würde.

Aus den Vorversuchen des Vorläuferprojektes PyroForCE 1.0 hatte sich gezeigt, dass eine Pyrolyseschicht von ein bis zwei Millimeter Stärke einerseits den Feuerwiderstand deutlich erhöht, diese Schicht andererseits gerade noch stabil genug ist, um sich nicht von selbst wieder abzulösen.

Letztlich wurde folgende Einstellung gefunden und für die Pyrolyse der Probekörper eingesetzt:

Vorschubgeschwindigkeit            0,2 m/min

Gas-Luft Gemisch                    14l Gas/Minute gemischt mit 130l Druckluft/Minute

Dies entspricht einer Energieleistung von ca. 20 kW.

### 4.3.1 Materialverformungen durch die Pyrolyse

Die Pyrolysemethode mit einem Infrarotbrenner hatte bei den Voruntersuchungen zu erheblichen Verformungen der Fassadenbretter geführt. Daher war bei der Konzeption des Forschungsprojektes die Suche nach Methoden des Gegenzugs als eigenes Arbeitspaket festgelegt worden. Wider Erwarten verformten sich die Bretter bei der neuen Pyrolysemethode<sup>66</sup> kaum. Die Gründe für diesen Effekt liegen hauptsächlich in der hohen Vorschubgeschwindigkeit. Die eingebrachte Energie dringt nur oberflächlich in die Bretter ein und führt zur Pyrolyse der Oberflächen, der Energieeintrag in die Kernbereiche der Hölzer bleibt sehr gering. Bedingt durch die Bauart der Anlage schlagen die Flammen seitlich an den Brettern vorbei. Als Nebeneffekt gelingt es so, die Schmalseiten ohne einen weiteren Zwischenschritt mit zu pyrolysieren. Die Flammen werden dann zusätzlich vom Unterboden der Pyrolyseanlage zurückreflektiert und ermöglichen es so, auch die Unterseite mit zu temperieren und damit die Differenz der Oberflächentemperaturen zu minimieren.

Entgegen der Erwartungen treten während des Pyrolyseprozesses kurzzeitig Zugspannungen auf der den Flammen abgewandten Brettunterseiten auf. Die Ursprüngliche Annahme ging davon aus, dass der durch das Verkohlen bedingte Materialverlust an der Oberfläche, welcher sich letztlich auch in den gerissenen Oberflächenstrukturen der Kohleschicht zeigt, hier Zugspannungen verursachen würden, die auch das Brett verformen. Daher wurden vorab einzelne Versuche unternommen, durch quer zur Faserrichtung verlaufende Einschnitte in die Oberfläche das erwartete Auftreten von Zugspannungen zu minimieren beziehungsweise zu steuern. Die Einschnitte wurden hierfür vor der Pyrolyse mittels Laser in die Hölzer eingeritzt. Dieses Vorgehen hatte zwar keinen Einfluss auf die Verformung der Bretter während der Pyrolyse, zeigte jedoch deutliche Einflüsse auf die Rissbildung in der Pyrolyseschicht. Durch gezieltes Einbringen von Einschnitten - mittels Laser oder auch durch speziell angefertigte Strukturwalzen - wird es möglich, das spätere Rissbild gezielt zu beeinflussen und damit die pyrolysierten Oberfläche zu gestalten<sup>67</sup>. Hierin liegt ein großes Potenzial für zukünftige Entwicklungen, beispielsweise um das Erscheinungsbild anderer Holzarten, also deren spezifisches Rissbild, zu simulieren.

---

<sup>65</sup> Erste Entwicklungen zum Löschen mittels Sand oder Sprühnebel wurden nicht weiter verfolgt. Der Pyrolyseprozess konnte letztlich so gestaltet werden, dass das Weiterbrennen der Bretter nach der Pyrolyse verhindert werden konnte.

<sup>66</sup> Die geänderte Pyrolysemethode basiert auf der direkten Beflammung der Fassadenbretter mittels Brennern, die mit einem Gas-Luft-Gemisch betrieben werden.

<sup>67</sup> vgl. Abbildung 113 und 114

## 4.4 Imprägniermethoden

Das vordringlichste Ziel der Erprobung der unterschiedlichen Beschichtungsmaterialien und -methoden liegt in der Stabilisierung der Pyrolyseschicht. Es gilt einerseits, die Kohleschicht selbst so zu verfestigen, dass sie nicht durch Bewitterung oder mechanische Beanspruchung abgetragen wird, aber auch darum, die Grenzbereiche zwischen der Kohleschicht und der darunterliegenden karamellisierten Holzschicht beziehungsweise dem nativem Holz zu verfestigen, um so ein Abtrennen der gesamten Pyrolyseschicht zu verhindern. Mit der Beschichtung soll eine möglichst geschlossene Oberfläche auf der Pyrolyseschicht gebildet werden, die das Eindringen von Wasser verhindert.

### 4.4.1 Pinsel-Imprägnierung mit Kaliumwasserglas

In Anlehnung an die traditionellen Methoden des Auftrags von Wasserglas, insbesondere bei Anwendungen auf Holz, wurden ein Versuchs-Setup entwickelt, Wasserglas in mehreren Durchgängen aufzutragen. Das Wasserglas wurde mit einem Pinsel zunächst satt aufgebracht und verstrichen, nicht eingedrungenes Wasserglas nach etwa zwei Minuten wieder entfernt.<sup>68</sup> Der Auftrag erfolgte nur auf der pyrolysierten Oberseite der Probekörper und den ebenfalls pyrolysierten Schmalseiten und Schnittflächen. Die native Unterseite blieb unbehandelt.

Bei dieser Imprägniermethode wurde das 21%ige Wasserglas von Keim benutzt. Der Auftrag erfolgte in drei Schichten. Bei der Wahl des Auftragsverfahrens orientieren wir uns an historischen Beschreibungen. So schreibt Trillich:

*„Auf ungehobeltem oder grobgehobeltem Holz, das vorher nicht gestrichen sein darf, ergibt der Anstrich einen flammensicheren Schutz (Holzdecken!). - Zweckmäßig empfiehlt sich ein Vortränken (Voranstrich) mit verdünntem Fixativ.“*<sup>69</sup>

Nach jedem einzelnen Auftrag wurde eine Trockenzeit von mindestens 8 Stunden eingehalten. Die Proben wurden unmittelbar nach dem Auftrag und nach der Trocknung gewogen, um die jeweiligen Auftragsmengen ermitteln zu können.

### 4.4.2 Auswertung der Pinselimprägnierung

Unabhängig von der Holzart nahmen die Proben bei dem ersten Auftrag eine deutlich größere Menge der Wasserglaslösung auf als bei den folgenden. Aus den Differenzwerten der wieder getrockneten Proben lassen sich die tatsächlichen Mengen des aufgetragenen Wasserglases für die einzelnen Aufträge ermitteln. Über den direkten Gewichtsvergleich vor und nach der Trocknung lässt sich die Menge des Wassers in der aufgetragenen Lösung ermitteln, welche durch Verdunstung bei der Verkieselung des Wasserglases entweicht. Vergleicht man den prozentualen Unterschied dieser Messungen, entspricht der ermittelte Wert dem prozentualen Anteil an Wasser des jeweiligen Wasserglases. Fehlende Herstellerangaben machten es möglich, mit dieser Methode die Zusammensetzung der verwendeten Wassergläser abschätzen zu können.<sup>70</sup>

---

<sup>68</sup> vgl. Trillich 1929, Seite 92 „Überschüssige Fixierung muss nach 3-4 Minuten abgewischt werden.“

<sup>69</sup> Trillich 1929, Seite 85

<sup>70</sup> Anmerkung: Die gemessenen Werte berücksichtigen nicht die durch das Einbringen von Feuchtigkeit verursachten Schwankungen der Holzfeuchte. Zur Ermittlung genauer Werte, müssten nach jedem Auftrag entsprechende Konditionierungen der Proben vorgenommen werden.

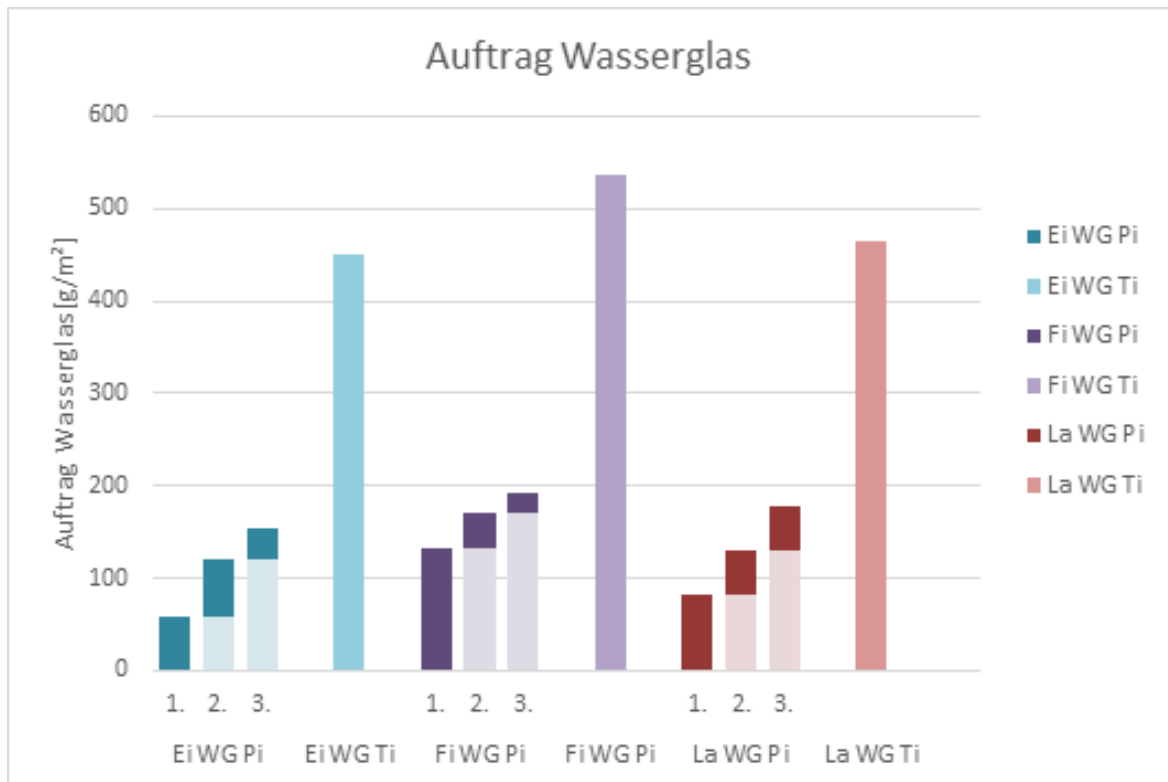


Tabelle 3

#### Auftragsmengen Wasserglas - Vergleich der Auftragsmethoden

Beim Auftrag mittel Pinsel kann bei jedem weiteren Durchgang eine immer geringere Menge Wasserglas aufgebracht werden. Beim Vergleich der beiden Auftragsmethoden wird deutlich, dass durch das Tauchimpregnieren eine signifikant höhere Menge an Wasserglas aufgebracht werden kann.

Durch dreimaliges Auftragen von Wasserglas mittels Pinsel konnten durchschnittlich<sup>71</sup> folgende Mengen Wasserglas auf den einzelnen Holzarten aufgetragen werden:

|                 |             |          |
|-----------------|-------------|----------|
| Auftragsmengen: | bei Eiche:  | 150 g/qm |
|                 | bei Lärche: | 178 g/qm |
|                 | bei Fichte: | 191 g/qm |

Beim Vergleich der Holzarten untereinander zeigte Fichte mit ca. 190 g/qm mit Abstand das größte Aufnahmevermögen an Wasserglas.

<sup>71</sup> Alle Werte stellen den Durchschnitt von jeweils fünf Proben dar. Die Messungen der Auftragsmenge erfolgten, nachdem das aufgetragene Wasserglas vollständig getrocknet war und sich die Ausgleichsfeuchte wieder eingestellt hatte.

### 4.4.3 Imprägnieren von Natriumwasserglas im Unterdruckverfahren

Bei dem Imprägnierverfahren mittels Unterdruck kam die 60%ige Natrium-Wasserglaslösung des Herstellers Carl Roth GmbH zum Einsatz. Mit diesem Setup sollte explizit getestet werden, wie das bis ins 20. Jahrhundert hinein als Brandschutzmittel weit verbreitete Natrium-Wasserglas möglichst tief in die Pyrolyseschicht eingebracht werden kann.

#### 4.4.3.1 Imprägnierung im Autoklav

Die Imprägnierung der auf ca. 10% Holzfeuchte konditionierten Probekörper der Vortests konnte aufgrund ihrer geringen Abmessungen im Autoklaven durchgeführt. Einzelnen Wannen wurden ca. 10 mm hoch mit Wasserglas gefüllt und die Probekörper mit der pyrolysierten Seite nach unten hineingelegt. Die Wannen konnten auf mehreren Etagen in den Autoklav eingebracht werden. Die Imprägnierung erfolgte jeweils über 30 Minuten im etwa 96%igen Vakuum. Anschließend wurden die Proben aus den Wannen genommen und überschüssiges Wasserglas mit dem Pinsel entfernt. Das imprägnierte Wasserglas war nach etwa zwölf Stunden durchgetrocknet. Vor dem Zuschnitt der Probekörper für die unterschiedlichen Testreihen wurden sie klimatisiert.

Durch Differenzwägung wurden die Auftragsmengen an Wasserglas bestimmt.

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| Auftragsmengen: | Eiche: 452 g/qm  |
|                 | Lärche: 464 g/qm |
|                 | Fichte: 537 g/qm |

Auch bei der Imprägniermethode im Unterdruckverfahren, zeigte Fichte das größte Aufnahmevermögen im Vergleich der einzelnen Holzarten.

#### 4.4.3.2 Imprägnieren im Vakuum-Sack

Das Imprägnieren der Fassadenbretter für die SBI-Tests und die Fassadenbekleidung der Pyrolyseanlage erfolgte mit Hilfe eines Vakuum-Sacks. Damit die Probekörper analog zu der Methode im Autoklaven nur einseitig auf der pyrolysierten Oberfläche mit Wasserglas imprägniert werden konnten, wurde eine in Längsrichtung variabel unterteilbare Wanne gebaut. Die äußeren Abmessungen von 1020 mm x 2600 mm erlauben es, problemlos die Bretter der Musterfassade zu imprägnieren. In die einzelnen durch die Unterteilungen gebildeten Fächer kann das Wasserglas eingefüllt und die Proben mit der pyrolysierten Seite nach unten eingelegt werden. Die Wanne wird anschließend mit einem Deckel verschlossen und dann mit Hilfe von Gleitschienen in einen 1500 x 3000 mm großen Vakuumsack eingeschoben. Der Deckel verhindert, dass der Vakuumsack mit den Proben oder dem Wasserglas in Berührung kommt.

Für die Herstellung der Fassadenbretter wurde das Natrium-Wasserglas etwa 10 mm hoch in die einzelnen Fächer eingefüllt und über 40 Minuten Unterdruck<sup>72</sup> erzeugt. Überschüssiges Wasserglas wurde nach dem Imprägnieren mit einem Pinsel entfernt. Die Proben wurden jeweils nur einmal imprägniert.

---

<sup>72</sup> Der Vakuumsack und die zugehörige Pumpe ermöglichten es, ein etwa 70%iges Vakuum zu erzeugen. Industrielle Anlagen wie auch der Autoklav ermöglichen es, bis zu 98% der Luft zu evakuieren.

#### 4.4.4 Auswertung der Imprägnierungen im Unterdruckverfahren

Mittels Vakuum-Imprägnierung gelingt es, das sehr zähflüssige Natrium-Wasserglas so tief in die Pyrolyseschicht einzubringen, dass die gesamte Pyrolyseschicht durchdrungen wird. Dies zeigt sich deutlich an den mikroskopischen Untersuchungen. Damit ist eine Methode aufgezeigt, unverdünnte Wassergläser in nur einem Arbeitsgang in pyrolysierte Hölzer einzubringen. Diese Methode unterscheidet sich deutlich von den traditionellen Verfahren und ermöglicht eine Oberflächenbehandlung im industriellen Maßstab. Allerdings beginnt das unverdünnte Natriumwasserglas bereits während der Behandlung zu verkieseln. Das Unterdruckverfahren scheint dies noch zu begünstigen. Daraus ergibt sich ein ganz praktisches Problem: Überschüssiges Wasserglas, welches nicht von den Hölzern aufgenommen worden war, konnte für maximal einen weiteren Imprägniervorgang genutzt werden. Danach war es zu zähflüssig und die Oberflächen teilweise schon verkieselt. Weitere Testreihen müssen zeigen, inwieweit das Verfahren durch höhere Verdünnungen oder die Veränderung weiterer Parameter wie Temperatur oder Druckwechsel optimiert werden kann.

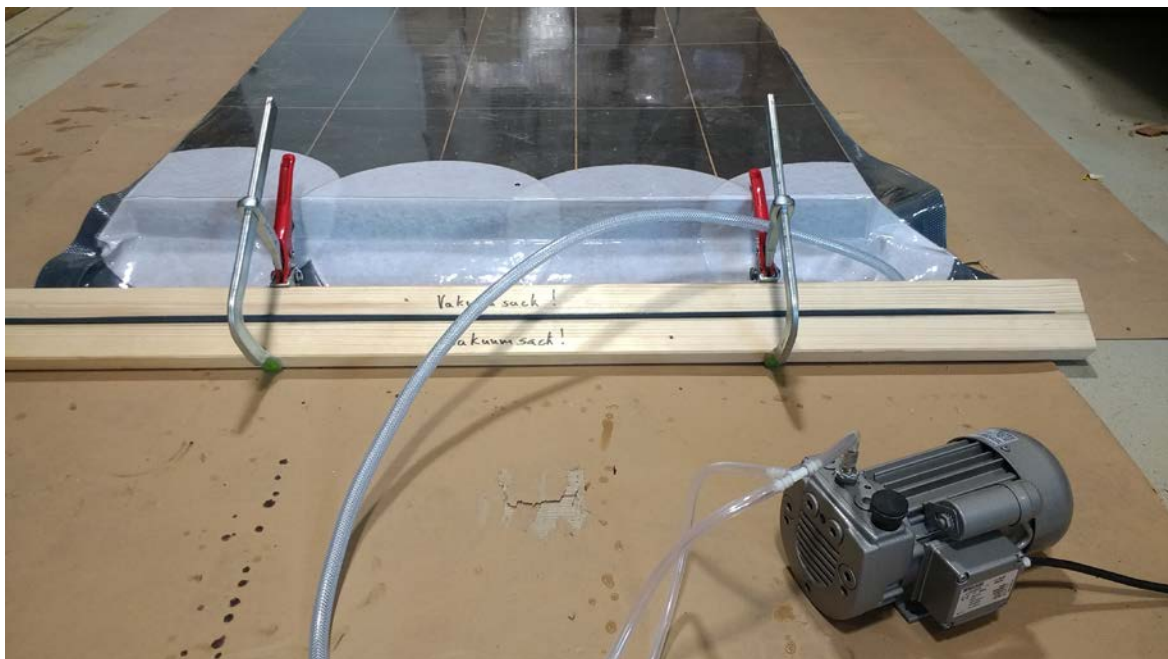


Abbildung 24

Vakuum-Sack: Die Holzbox bildet eine große Wanne, in der die Fassadenbretter schwimmend in das Wasserglas gelegt werden. Die Box wird mit einem Deckel verschlossen und in den Vakuum-Sack eingeschoben. Mit einer Vakuumpumpe wird in dem Sack ein Vakuum von etwa 70% erzeugt.

## 5. Klassifizierung und Prüfverfahren

Zur Klassifizierung des Brandverhaltens müssen Bauprodukte nach vorgeschriebenen Verfahren geprüft werden. Die Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen werden in DIN EN 13501-1 *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten*<sup>73</sup> definiert. Diese Norm beschreibt die unterschiedlichen Brandverhaltensklassen und verweist auf die zur Klassifizierung notwendigen Tests. Für Fassadenmaterialien ergibt sich aus den Bauordnungen der Länder die Notwendigkeit, ab Gebäudeklasse 4 „*schwerentflammbar*“ Bauprodukte zu verwenden. Unbehandelten Fassadenbrettern aus Nadel- beziehungsweise Laubholz wird nach Euronorm DIN EN 14081-1<sup>74</sup> die Brandverhaltensklasse „D“ beziehungsweise nach DIN 4102-1 die Bezeichnung „B1“ zugeordnet<sup>75</sup>. Sie gelten damit als „*normalentflammbar*“ und sind damit nur für eine Verwendung als Fassadenmaterial bis Gebäudeklasse 3 zugelassen.

Für den Einsatz als Fassadenmaterial im urbanen Kontext ist es notwendig, dass die verwendeten Materialien die bauaufsichtlichen Anforderungen an eine „*Schwerentflammbarkeit*“ erfüllen. Dies entspricht der Brandverhaltensklasse „B“ nach Euronorm DIN EN 13501-1 beziehungsweise „B1“ nach DIN 4102-1. Durch die Pyrolyse der Oberfläche wird aus dem zunächst homogenen Baumaterial Holz, ein nichthomogenes Bauprodukt<sup>76</sup>. Die Kohleschicht bildet jetzt einen substantziellen<sup>77</sup> Bestandteil des Bauproduktes und verändert auch dessen Feuerwiderstand. Ziel ist es, durch die Pyrolyse die „*Schwerentflammbarkeit*“ des Bauproduktes zu erreichen.

Zum Nachweis der dieser „*Schwerentflammbarkeit*“ entsprechenden Brandverhaltensklasse „B“, muss der SBI-Test (Single Burn Item) nach DIN EN 13823 herangezogen werden. Dieser SBI-Test ist immer nur in Verbindung mit der Prüfung im Brennkasten nach DIN 4102-1 bzw. der Prüfung der Entzündbarkeit nach DIN EN ISO 11925-2 gültig.<sup>78</sup>

Bauprodukte dürfen nur verwendet werden, wenn sie klassifiziert sind. Dafür ist es notwendig, den SBI-Test an drei identisch aufgebauten Prüfkörpern durchzuführen. Aufgrund des Wechsels des Kooperationspartners - zu Projektbeginn die Opitz Holzbau GmbH, jetzt Webber Brennertechnik GmbH - wird eine Klassifizierung nicht mehr angestrebt. Der neue Kooperationspartner hat kein wirtschaftliches Interesse an dem Einsatz eines bestimmten Fassadensystems, sondern profitiert von Erkenntnissen, die hinsichtlich des Pyrolyseprozesses gewonnen werden konnten.

Die durchgeführten SBI-Tests dienen also nicht mehr wie ursprünglich geplant einer Klassifizierung bestimmter Fassadensysteme, um diese dann als geprüftes System bauen zu dürfen. Stattdessen konnten die Untersuchungen dahingehend ausgeweitet werden, ein breites Spektrum unterschiedlicher Fassadensysteme<sup>79</sup> im SBI-Test auf ihre Feuerresistenz zu prüfen.

---

<sup>73</sup> DIN EN 13501-1; Deutsche Fassung EN 13501-1:2018

<sup>74</sup> Die Zuordnung nach Anhang C Tabelle C.1 der DIN EN 14081-1 erfolgt zur Brandverhaltensklasse „D-s2, d0“

<sup>75</sup> vgl. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Baustoffe für den konstruktiven Holzbau Aktualisierung: Oktober 2017, S. 320-321 Die Einteilungen von Bauholz für tragende Zwecke (Nadelholz, Bauschnittholz einschl. keilgezinktes Vollholz) erfolgt nach DIN EN 15497 *Kanthölzer -Bohlen -Bretter -Latten* (Einteilung nach DIN 4047-1) und damit erfolgt die Zuordnung zum Brandschutz gemäß DIN EN 14081-1 Anhang C Tabelle C.1 zur Brandverhaltensklasse „D-s2, d0“

<sup>76</sup> vgl. DIN EN 13501-1, Abschnitt 3.1.4

<sup>77</sup> vgl. DIN EN 13501-1, Abschnitt 3.1.5

<sup>78</sup> Die Nichtbrennbarkeitsprüfung nach DIN EN ISO 1182 und die Prüfverfahren zur Verbrennungswärme gemäß DIN EN ISO 1716 können entfallen, da diese nur bei Prüfscenarien zur Anwendung kommen, bei denen eine Klassifizierung der Kategorie „A“ erreicht werden soll.

<sup>79</sup> vgl. Gengnagel/Pfriem Abschlussbericht PyroForCE 1.0

## 5.1 B2-Test

Die Prüfung der Probekörper erfolgt zunächst nach DIN 4102-1 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*. Das Prüfverfahren bewertet die Entzündbarkeit eines Baustoffes oder Bauproduktes und dient der Klassifizierung für die Baustoffklasse "B2", "normalentflammbare" Baustoffe.

Bei diesem Versuch werden die Oberflächen von jeweils fünf Probekörper von 90 mm x 230 mm Kantenlänge der Beanspruchung durch eine kleine Flamme, vergleichbar mit einer Streichholz- oder ein Feuerzeugflamme, ausgesetzt. Die Beflammung erfolgt zunächst für 20 Sekunden und dann an einer anderen Stelle nochmals für 60 Sekunden. Bewertet werden brennendes Abtropfen<sup>80</sup> und die vertikale Ausbreitung der Flamme. Innerhalb von 60 s nach Beginn der Beflammung darf die vertikale Flammenausbreitung oberhalb des Beflammungspunktes 150 mm nicht überschreiten<sup>81</sup>.

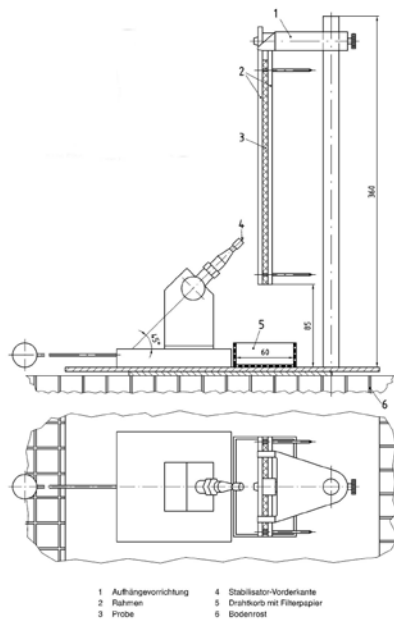


Abbildung 25  
Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus; Quelle DIN 4102-1

Abbildung 26  
B2-Test: Beflammung des Probekörpers

<sup>80</sup> vgl. DIN 4201-1; 6.2.6 Seite 12:

„Wird innerhalb von 20 s nach Beginn der Beflammung ein unter der Probe liegendes Filterpapier nach 6.2.6.2 zur Entzündung gebracht oder brennen Tropfen länger als 2 s auf dem Filterpapier, so gilt der geprüfte Baustoff als brennend abfallend (abtropfend).“

<sup>81</sup> vgl. DIN 13501-1; 11.6 und Tabelle 1

### 5.1.1 Beobachtungen

Getestet wurden Probekörper aus Eiche, Fichte und Lärche, welche jeweils mit Natriumwasserglas tauchimprägniert beziehungsweise mit Kaliumwasserglas pinselimprägniert worden waren.

Alle Proben zeigten ein ähnliches Verhalten: Bereits innerhalb der ersten 20 Sekunden kam es im Bereich der Flamme zu einer weißlichen Verfärbung der Oberfläche. An diesen Stellen sintert das imprägnierte Wasserglas und tritt als feiner Schaum an die Oberfläche. Bei den Beflammungstests über 60 Sekunden sintert weiteres Wasserglas an der Oberfläche und bildet dort nach dem Abkühlen eine glasartige Schicht. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 115-126.)



Abbildung 27 bis 29

B2-Test an mit Kaliumwasserglas imprägnierten Probekörpern: Eiche, Fichte, Lärche

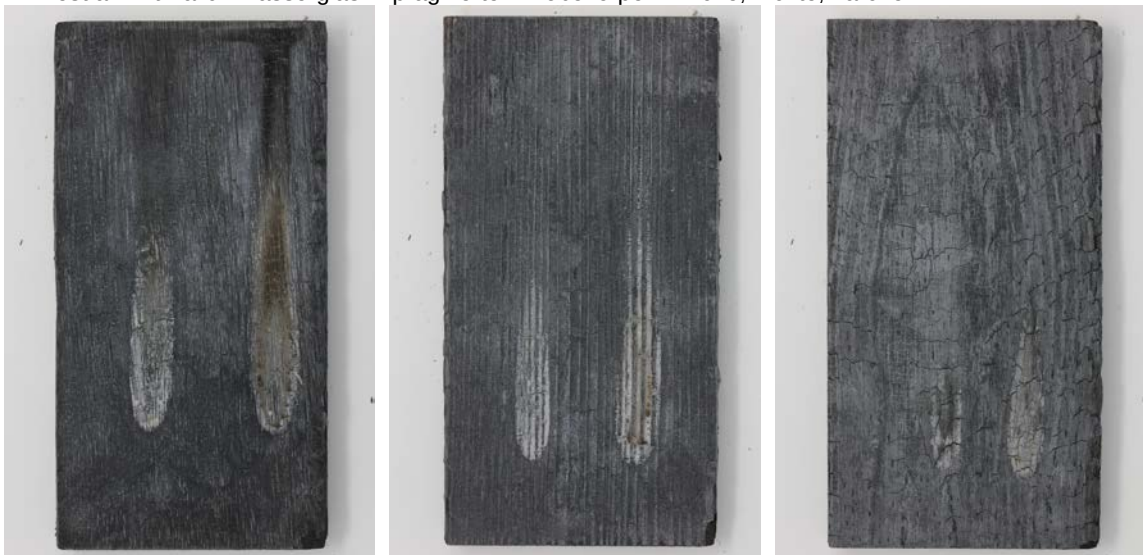


Abbildung 30 bis 32

B2-Test an mit Natriumwasserglas imprägnierten Probekörpern: Eiche, Fichte, Lärche

Die Dicke der ausgetretenen Wasserglasschicht war bei den mit Natriumwasserglas imprägnierten Probekörpern deutlich stärker als bei denen, welche mit Kaliumwasserglas imprägniert worden waren. Hier besteht folglich ein unmittelbarer Zusammenhang zur Gesamtmenge des eingebrachten Wasserglases. Natriumwasserglas bildet in der ersten Phase des Aufschäumens Bläschen mit deutlich größeren Durchmessern. Diese erreichten Durchmesser von mehr als einem Millimeter während beim Kaliwasserglas die größten Bläschen in den aufgeschäumten Bereichen nur wenige Zehntel Millimeter großen sind.

An den Stellen, an denen die Flamme einen direkten Kontakt zur Oberfläche hatte und an denen es demzufolge zum größten Energieeintrag kam, bildeten sich in der Pyrolyseschicht einzelne, wenige Millimeter große Risse. An diesen Rissen kam es zur Entzündung der hier austretenden Holzgase, die jedoch unmittelbar nach Entfernen der Zündflamme wieder erloschen. Diese Verbrennung verursachte die deutliche Verrußung der darüber liegenden Bereiche, welche sich bei den Probekörpern mit Kaliumwasserglas bis in eine Höhe von etwa 10 cm oberhalb des Flammpunktes erstreckte und bei den mit Natriumwasserglas imprägnierten Probekörpern eine maximale Höhe von 5 cm erreichten.



Abbildung 33 bis 35

Details der B2-Test an mit Natriumwasserglas imprägnierten Probekörpern: Eiche, Fichte, Lärche: Die Proben zeigen deutlich, wie das Wasserglas in den Randbereichen der Flamme durch den Energieeintrag aufgeschäumt wurde und dann in mikroskopischen Bläschen erstarrte.

## 5.1.2 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Alle getesteten Probekörper haben den B2-Test bestanden und erfüllen damit die Kriterien für die Einordnung in die Baustoffklasse der "normalentflammbaren" Baustoffe.

Insgesamt zeigte sich bei den tauchimprägnierten Proben eine deutlich höhere Resistenz gegen das kurzzeitige Entzünden der Holzgase. Im Vergleich der einzelnen Holzarten zeigten die Probekörper aus Lärche die beste Resistenz gegen die Beflammung, gefolgt von den Probekörpern aus Fichte. Bei Eiche riss die Oberfläche am stärksten auf und die austretenden Holzgase lieferten einen deutlichen Beitrag zum Brand der Oberfläche. Neben der Holzart spielt die Methode des Auftrags aber insbesondere auch die Menge des aufgetragenen Wasserglases eine entscheidende Rolle bei der Erhöhung des Feuerwiderstands.

Die vergleichend untersuchten Probekörper mit einer Beschichtung aus Epoxidharz entzündeten sich während der Tests und konnten diesen damit erwartungsgemäß nicht bestehen.

## 5.2 Gitterschnitt-Test

Um die Haftfestigkeit der pyrolysierten und imprägnierten Oberfläche abschätzen zu können wurde Gitterschnitt-Test nach DIN EN ISO 2409 angewandt. Hierbei werden mittels einer Schablone oder einem speziellen Gitterschnittmesser zunächst sechs parallele Schnitte in die Beschichtung geritzt. Orthogonal dazu werden sechs weitere Schnitte eingeritzt, so dass ein gleichmäßiges Muster aus kleinen Quadraten entsteht. Alle Schnitte müssen bis auf den Untergrund der Beschichtung, hier also bis auf das native Holz gehen. Der Abstand der Schnitte ist abhängig von der Schichtdicke. Aus der Stärke der Pyrolyseschicht ergibt sich hier ein Abstand von 3 mm.

Zur Beurteilung des Ergebnisses werden zunächst lose Partikel mit Hilfe eines Klebebandes entfernt und das Ergebnis anschließend optisch beurteilt. Anhand von Vergleichszeichnungen kann festgestellt werden, ob und in welchem Ausmaß Teile der Beschichtung ausgebrochen sind. Je nach Zustand unterscheidet man Gitterschnitt-Kennwerte von GT 0 (sehr gut, die Schnittländer sind vollkommen glatt, kein Teilstück des Anstrichs ist abgeplatzt) bis GT 5 (sehr schlecht, der Anstrich ist längs der Schnittländer in breiten Streifen und/oder von einzelnen Teilstücken ganz oder teilweise abgeplatzt und mehr als 65% der Fläche der Teilstücke ist abgeplatzt).

### 5.2.1 Auswertung der Gitterschnitt-Test

Alle getesteten Proben, bei denen die Pyrolyseschicht mit Wasserglas imprägniert wurde, mussten mit GT 5 bewertet werden. Durch die hohe mechanische Beanspruchung, aber auch bedingt durch die für diesen Test zu hohe Schichtstärke, kam es zu großflächigen Abplatzungen von mehr als 65% der einzelnen Gitterfelder. Die einzige Ausnahme bilden die Vergleichsproben, bei denen die Oberfläche mit Epoxidharz beschichtet war. Hier verbleiben die Einschnitte ausschließlich in der Oberfläche des Epoxidharzes. Es wurde erwartungsgemäß mit einer Einteilung in den Zustand GT 0 ein sehr gutes Ergebnis erreicht.

Obwohl alle Proben nach den vorgegebenen Kategorien den Test nicht bestanden haben, zeigten sich doch deutliche Unterschiede bei den Schnittbildern der einzelnen Holzarten und auch den unterschiedlichen Beschichtungsverfahren:

Fichte:

Fichte, pinsel Imprägniert: Alle Gitterfelder wurden weggerissen, die unter der Kohleschicht liegende native Holzstruktur wurde durch den Test ebenfalls stark beschädigt (eingerissen).

Fichte, tauch Imprägniert: Nahezu alle Gitterfelder wurden schon beim Schneiden abgerissen. Die Einschnitte gehen tief bis in die nativen Bereiche des Holzes.

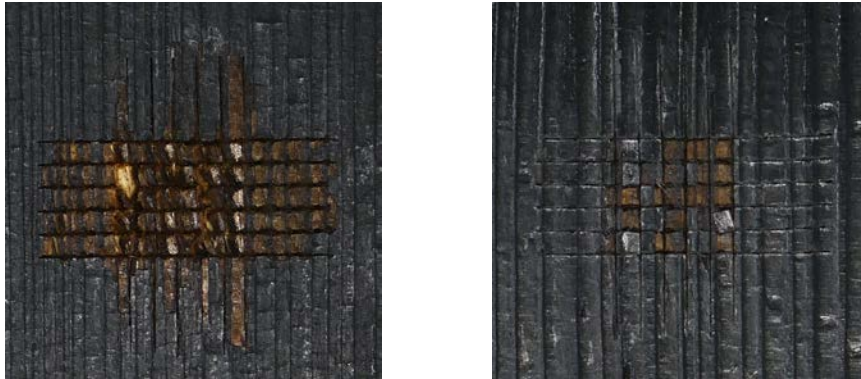


Abbildung 36 und 37

Gitterschnitt-Test bei Fichte: Pinsel Imprägniert (links) und tauch Imprägniert (rechts)

Bei den Probekörpern aus Fichte scheint bei beiden Beschichtungsmethoden die Imprägnierung bis auf das native Holz durchgedrungen zu sein. Damit wäre zu erklären, warum die Kohleschicht vollständig verloren geht und selbst Teile des nativen Holzes mit abgerissen werden.

Eiche:

Eiche pinsel Imprägniert: Beim Abziehen mit dem Klebeband wird die oberste Schicht vollständig weggerissen, es bleiben aber große Teile der Kohleschicht auf dem nativen Holz haften.

Eiche tauch Imprägniert: Beim Abziehen mit dem Klebeband wird auch bei diesen Probekörpern die oberste Schicht vollständig weggerissen, auch hier bleiben aber große Teile der Kohleschicht auf dem nativen Holz haften. Die Oberfläche scheint hier noch spröder zu sein als bei der pinsel Imprägnierten Eiche, was sich in einem noch deutlicheren Abspringen der obersten Teile der Kohleschicht zeigt.

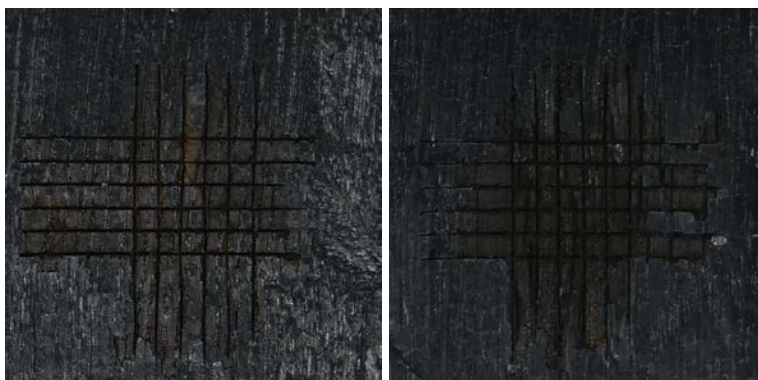


Abbildung 38 und 39

Gitterschnitt-Test bei Eiche: Pinsel Imprägniert (links) und tauch Imprägniert (rechts)

Sowohl die tauch Imprägnierten als auch die pinsel Imprägnierten Proben zeigten bei Eiche deutlich ein Abplatzen der obersten Teile der Pyrolyseschicht. Auf der Probe verblieb aber eine nahezu durchgängige dünne Kohleschicht.

Lärche:

Lärche pinsel imprägniert: Durch das Abziehen mit dem Klebeband wurden mehr als 65% der Gitterfelder abgerissen. Ein Teil der Pyrolyseschicht blieb aber mit dem nativen Holz verbunden.

Lärche tauch imprägniert: Hier wurden nur etwa 15% der Oberfläche beschädigt und auch an den abgelösten Stellen blieben große Anteile der Kohleschicht auf dem nativen Holz erhalten, allerdings waren hier die Schnittkanten stark ausgerissen.

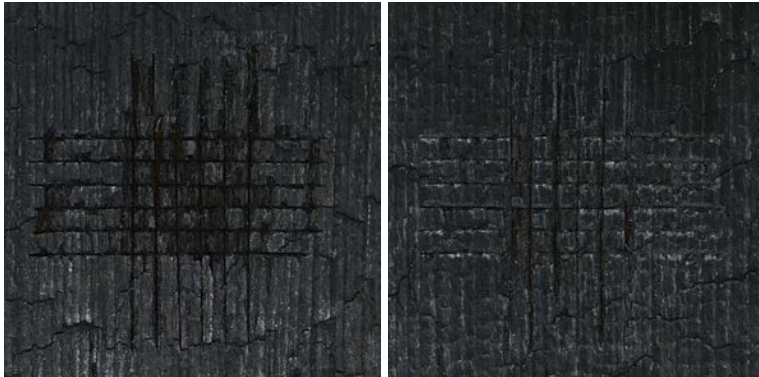


Abbildung 40 und 41

Gitterschnitt-Test bei Lärche: pinsel imprägniert (links) und tauch imprägniert (rechts)

Im Vergleich mit den anderen Proben zeigte die Pyrolyseschicht auf dem Lärchenholz das beste Ergebnis.

### 5.2.2 Schlussbetrachtung Gitterschnitt Test

Keine der untersuchten Proben hat den Gitterschnitttest bestanden. Zwar zeigten sich sowohl hinsichtlich der Pyrolyseschichten auf den unterschiedlichen Holzarten als auch in Hinblick auf die unterschiedlichen Imprägniermethoden Unterschiede in den jeweiligen Ergebnissen, jedoch konnten daraus keine Rückschlüsse auf die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Oberflächen hinsichtlich Festigkeit, Sprödigkeit etc. getroffen werden. Der Test kann für eine Vergleichbarkeit der Proben untereinander nur einen Hinweis über relative Unterschiede der Oberflächenfestigkeit geben.

Letztlich stellt der Gitterschnitt Test keine geeignete Methode zur Prüfung der Festigkeit pyrolysierter Oberflächen dar. Das ursprünglich zur Bewertung lackierter Oberflächen entwickelte Prüfverfahren erweist sich als zu intensiv für die vergleichsweise weiche Pyrolyseschicht. Da die Beanspruchungen durch Bewitterung oder Kontakt-Abrieb in der Praxis deutlich geringer ausfallen dürften, als die Beanspruchung durch den Gitterschnitt Test, sind somit auch keine Schlussfolgerungen auf die Witterungsbeständigkeit möglich. Die Ergebnisse aus der Langzeitbewitterung versprechen hier aussagekräftigere Ergebnisse.

## 5.3 Taber-Test

Zur Prüfung der Resistenz pyrolysierter Oberflächen gibt es kein vorgeschriebenes Prüfverfahren. Um deren Abriebwiderstand bemessen und vergleichen zu können wurde als zweites Testverfahren auf den Taber-Test zurückgegriffen. Bei diesem Prüfverfahren handelt es sich um einen standardisierten Abriebtest nach DIN ISO 9352 *Kunststoffe – Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren*. Dieser Test wird eigentlich zur Prüfung von Kunststoff-Oberflächen verwendet.

Die Abriebbeanspruchung wird von zwei mit Schleifpapier umwickelte Walzen erzeugt, die mit einer festgelegten Kraft auf den rotierenden Prüfling gedrückt werden. Durch die Rotation des Probekörpers schleifen diese Reibräder auf dessen Oberfläche und rufen dabei einen fortschreitenden Materialverlust hervor. Der Abrieb, der durch diese Rotation nach einer festgelegten Anzahl von Umdrehungen entsteht, wird mittels Differenzwägung der Probekörper ermittelt. Beurteilt wird neben dem gemessenen Masseverlust der Proben die optischen Veränderungen der Oberfläche. Sofern die gesamte Oberfläche vor einer vorher festgelegten Anzahl an Umdrehungen abgerieben wird, ist der Test nicht bestanden.

### 5.3.1 Auswertung der Taber-Tests

Der Test wurde mit einem Gerät der Marke TABER® ABRASER 352 G - Typ 5135 durchgeführt. Aus den Reibrädern wurden Gewichte von jeweils 500 Gramm aufgebracht. Als Schleifmittel kam mit "H18" eine mittlere Körnung zur Anwendung.



Abbildung 42

Taber-Test: Taber Abraser



Abbildung 43

Taber-Test: Probekörper nach dem Test. Hier Lärche, mit Kaliumwasserglas pinsel imprägniert.

Für den Test wurden jeweils fünf gleiche Probekörper eines bestimmten Setups aus Holzart, Imprägniermittel und Imprägniermethode vorbereitet. Alle Probekörper hatten eine Kantenlänge von 100x100 mm und wurden vor dem Test klimatisiert. Soweit die pyrolysierte Oberfläche nicht bereits vorher abgerieben war, wurden die Probekörper nach jeweils 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 und 300 Umdrehungen bewertet.

Bewertungskriterien die Resistenz der Pyrolyseschicht waren der durch Differenzwägung gemessene Abrieb, beziehungsweise der Zeitpunkt des vollständigen Abriebs der Kohleschicht. Tabelle 4 zeigt

den Abrieb der einzelnen Proben in Relation zur Anzahl der Umdrehungen. Es wurde jeweils der Mittelwert aus den fünf gleichen Proben gebildet. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 127-140.)

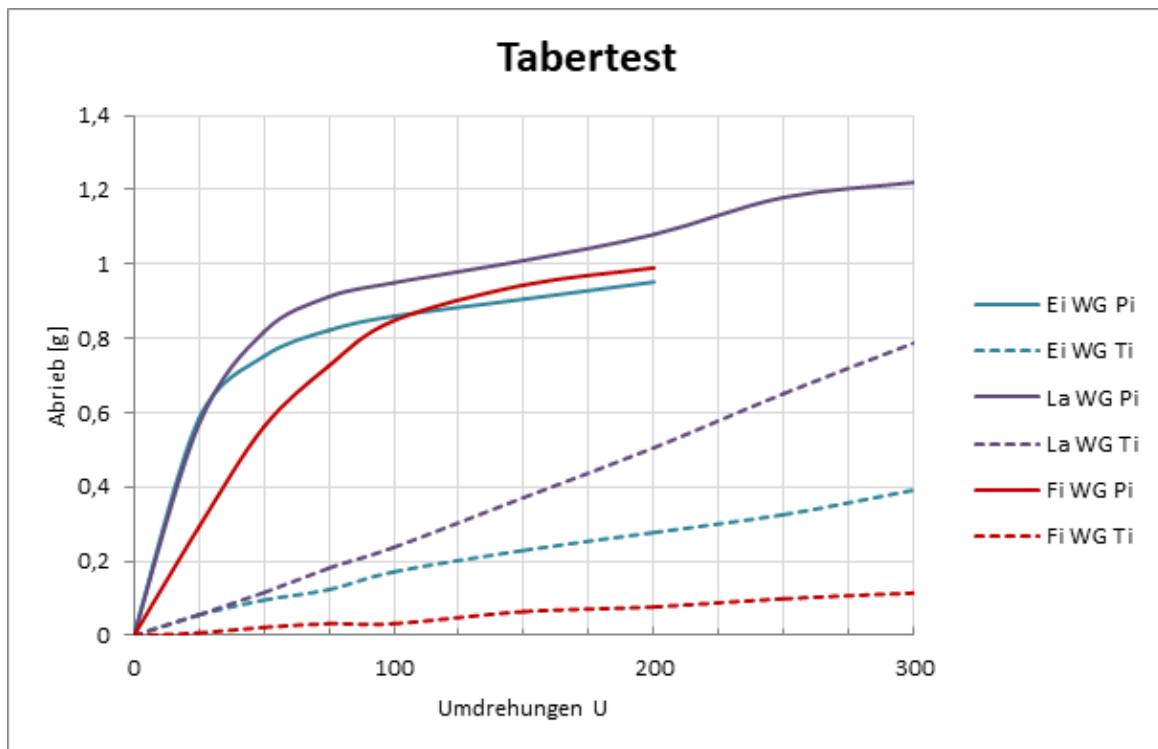


Tabelle 4

Auswertung des Tabertests: Bei den mit Kaliumwasserglas imprägnierten Proben wird bereits nach weniger als 100 Umdrehungen nahezu die gesamte Pyrolyseschicht abgerieben. Die tauchimprägnierten Proben zeigen dagegen einen deutlich erhöhten Widerstand gegen Abrieb. Die Proben aus Fichte zeigen hier die mit Abstand besten Ergebnisse.

Natrium-Wasserglas, tauchimprägniert:

Die Auswertungen des Test zeigen eindeutig, dass durch das Verfahren der Tauchimprägnierung mit Natrium-Wasserglas eine deutlich resistenterere Oberfläche erzeugt werden kann als durch die Pinselimprägnierung mit Kalium-Wasserglas. Bei allen Holzarten war hier der Abtrag signifikant geringer. Das mit Abstand beste Ergebnis konnte bei tauchimprägnierter Fichte erreicht werden. Hier war nicht nur die absolute Abriebmenge am geringsten, auch die Abriebrate blieb bei zunehmenden Umdrehungen konstant, beziehungsweise nahm sogar leicht ab. Die Imprägnierung mit Natrium-Wasserglas garantiert folglich eine signifikant höhere Abriebfestigkeit und lässt den Schluss zu, dass damit auch ein verbesserter Widerstand gegen Witterungseinflüsse erreicht werden kann.

Kalium-Wasserglas, pinselimprägniert:

Die Auswertung des Abrieb-Tests der mit Kalium-Wasserglas imprägnierten Probekörper zeigt eine signifikant erhöhte Abriebrate im Vergleich mit allen tauch-imprägnierten Proben. Erst bei etwa 75 Umdrehungen nimmt diese deutlich ab. Ursächlich hierfür ist, dass zu diesem Zeitpunkt bereits ein Großteil der imprägnierten Kohleschicht abgerieben ist, die Grenzbereiche zum nativen Holz jedoch eine deutlich höhere Abriebfestigkeit aufweisen. Dies zeigt sich insbesondere an den Proben aus Eiche und Fichte, bei welchen nach ca. 200 Umdrehungen die Schicht vollständig abgerieben war. Bei den Probekörpern aus Lärche war der Abrieb insgesamt am höchsten und die Schicht nach 300 Umdrehungen noch immer nicht vollständig abgerieben. Dies liegt entweder daran, dass hier eine insgesamt stärkere und damit schwerere Schicht aufgebracht werden konnte oder an dem höheren spezifischen Gewicht des Materials selbst und damit auch an einer erhöhten spezifischen Dichte der Kohleschicht.

Aus den Messungen, bei denen die Kohleschicht vollständig abgerieben worden war, lässt sich indirekt zeigen, dass das Gewicht der Pyrolyseschicht im Bereich des abrasiven Reibrades etwa ein Gramm beträgt. Ausgehend von der Vermutung, dass auch bei Natrium-Wasserglas das Gewicht der Pyrolyseschicht im Bereich des Reibrades etwa ein Gramm<sup>82</sup> beträgt, würde diese Schicht bei tauchimprägnierter Fichte bei gleichbleibenden Abrieb-Raten erst nach ca. 6000 Umdrehungen vollständig abgerieben sein.

Letztlich waren die Erkenntnisse dieser Tests ausschlaggebend dafür, dass für die Probekörper der qualifizierenden SBI-Tests eine Beschichtung mit Natrium-Wasserglas mittels Tauchimprägnierung gewählt wurde.

---

<sup>82</sup> Da die durch das Verfahren der Tauch-Imprägnierung aufgebrachte Menge an Wasserglas insgesamt höher ist als bei der Pinsel-Imprägnierung, dürfte das Gewicht der im Abrieb-Bereich liegenden Pyrolyseschicht nochmals deutlich höher sein. Damit würde die Probe der Belastung durch den Test noch zusätzlich länger widerstehen.

## 5.4 Bewitterungstest

Maßgeblich für die Gebrauchstauglichkeit pyrolysierter Fassaden ist deren dauerhafte Resistenz gegen Witterungseinflüsse. Eine der entscheidenden Herausforderungen liegt folglich darin, die Oberfläche nicht nur gegen mechanischen Abrieb zu stabilisieren, sondern diese auch vor Witterungseinflüssen zu schützen. Bei den traditionellen japanischen Architekturen wird dies mit konstruktiven Maßnahmen, wie beispielsweise großen Dachüberständen, erreicht. Mit PyroForCE 2.0 werden Beschichtungen für die pyrolysierten Oberflächen entwickelt, um deren Widerstand gegen Abrieb und Bewitterung dauerhaft zu gewährleisten.

Um die unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen hinsichtlich ihrer erhöhten Resistenz gegen Witterungseinflüsse und Sonneneinstrahlung zu testen, wurde mit den Bewitterungstests im Labormaßstab ein Prüfverfahren gewählt, welches es ermöglicht, die Bewitterung der Probekörper beschleunigt zu simulieren.

### 5.4.1 Vorbereitung der Probekörper

Für den Bewitterungstest wurden jeweils zwei gleiche Proben jeder zu testenden Imprägniermethode mit den Maßen 74 x 150 mm passend für den Probenträger der Bewitterungsanlage zugeschnitten. Diese Probenträger bilden letztlich Rahmen von 65 x 95 mm und definieren damit die zu bewitternde Fläche der einzelnen Probekörper.

Getestet wurden folgende Setups, jeweils für die Holzarten Fichte, Lärche und Eiche:

- unbehandelte Oberflächen
- mit Wasserglas imprägnierte Oberflächen
- pyrolysierte Oberflächen, mit Kalium-Wasserglas pinselprägniert
- pyrolysierte Oberflächen, mit Natrium-Wasserglas tauchprägniert
- pyrolysierte Oberflächen, mit Zementschlämmen beschichtet
- pyrolysierte Oberflächen, mit Epoxidharz pinselprägniert
- pyrolysierte Oberflächen, mit Epoxidharz tauchprägniert

### 5.4.2 Beschreibung des Testprogramms

Um die Beanspruchung der Proben über einen Jahresverlauf abbilden zu können, wurde ein Szenario entwickelt, welches insbesondere Frost-Tau-Zyklen beinhaltet, um die Resistenz der jeweiligen Beschichtungsmethoden gerade für diese extremen Belastungen simulieren zu können. Jeder über 24 Stunden laufende Zyklus war unterteilt in folgende Phasen:

- |                    |             |                                              |
|--------------------|-------------|----------------------------------------------|
| - Konditionierung: | 120 Minute  | 100 % Luftfeuchtigkeit, 45 °C Lufttemperatur |
| - Trocknung:       | 120 Minuten | 0 % Luftfeuchtigkeit, 60 °C Lufttemperatur   |
| - Beregnung:       | 30 Minuten  | Besprühen mit Wasserdampf                    |
| - Trocknung:       | 120 Minuten | 0 % Luftfeuchtigkeit, 60 °C Lufttemperatur   |
| - Beregnung:       | 30 Minuten  | Besprühen mit Wasserdampf                    |
| - Frostperiode:    | 900 Minuten | -22 °C                                       |

Mit Ausnahme der Frostperiode wurden die Probekörper in allen anderen Phasen einer intensiven UV-Strahlung von 155 W/m<sup>2</sup>/nm ausgesetzt, was etwa der doppelten Strahlungsintensität der Mittagssonne in Sommermonaten entspricht. UV-Licht ist die fast ausschließliche Ursache für Photodegradation bei haltbaren Materialien im Außenbereich. Mit dem Testverfahren lassen sich die

kritischen kurzwelligen UV-Strahlen reproduzieren beziehungsweise verstärkt erzeugen und damit die vom Sonnenlicht verursachten physikalischen Schäden beschleunigt herbeiführen. Die auftretenden Schäden können Farbveränderungen, Glanzverlust, Reißen, Haarrissbildung, Schleierbildung, Abplatzen, Verspröden, Festigkeitsverlust und Oxidation umfassen.

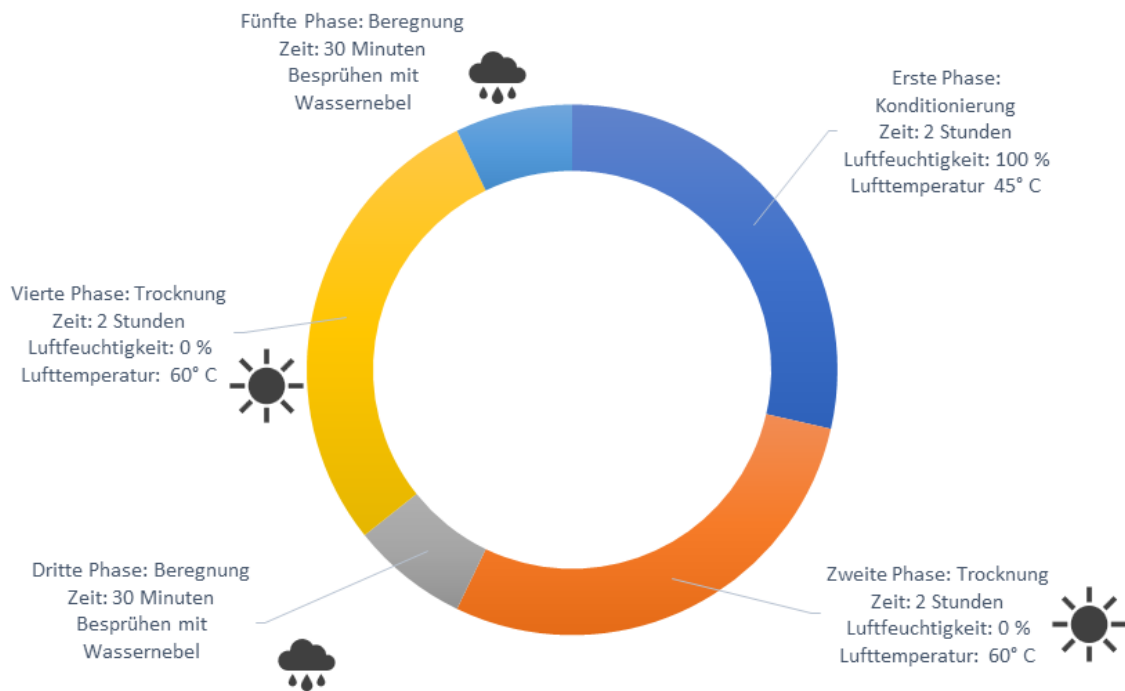


Abbildung 44: Phasen der maschinellen Bewitterung  
Quelle: Henning Meier, HNEE 2019

Diese künstlichen Bewitterung über 10 Tage fand vom 5. März bis zum 15. März 2019 statt.<sup>83</sup>

### 5.4.3 Bewertungskriterien

Bewertet wurde der Einfluss der Bewitterung anhand des Gewichtsverlustes sowie anhand von Veränderungen der Oberfläche wie Verfärbungen, Rissbildung, Abplatzungen und das Ausbrechen von Fragmenten der Pyrolyseschicht. Diese Veränderungen der Oberfläche wurden auch durch mikroskopischer Untersuchungen dokumentiert.

<sup>83</sup> Die Bewitterung wurde als Ingenieurtechnisches Projekt *Erprobung von Beschichtungsverfahren zur Stabilisierung von pyrolysierten Holzoberflächen gegenüber beschleunigter maschineller Bewitterung* von Henning Meier, HNEE durchgeführt und dokumentiert.

#### 5.4.4 Ergebnisse der Bewitterung

Tabelle 5 zeigt den Gewichtsverlust der Proben, umgerechnet auf die Fläche eines Quadratmeters. Bedingt durch sehr kurze Zeiträume der Konditionierung zwischen den einzelnen Bewitterungszyklen, ergaben sich Messfehler<sup>84</sup>. Die Angaben zum Gewichtsverlust liefern somit nur einen Richtwert, liefern aber keine präzisen Werte zum Verlust der Oberflächen beziehungsweise dem Anteil der durch Bewitterung abgetragenen Beschichtungen. Bei der Bewertung der einzelnen Ergebnisse sind daher die visuellen Beobachtungen zur Veränderung der Oberflächen ausschlaggebend.

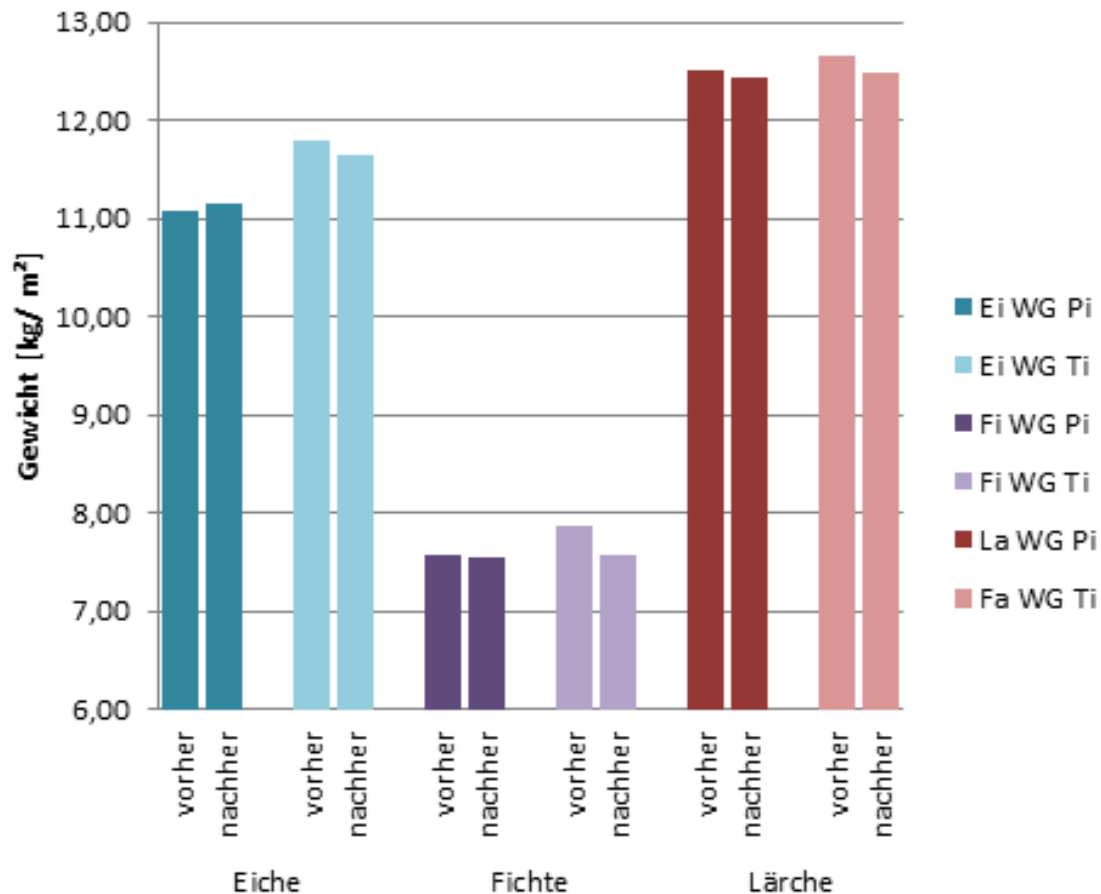


Tabelle 5: Gewichtsveränderung durch Bewitterung

Die Tabelle zeigt eine geringfügige Gewichtsabnahme bei fast allen Probekörpern. Die Gewichtszunahme bei der pinselimprägnierten Eiche macht deutlich, dass die Proben bei der Bewitterung auch Wasser aufgenommen haben. Zur genauen Ermittlung der jeweiligen Abriebverluste durch die Bewitterung müssten vorher und nachher Darrproben genommen werden.

<sup>84</sup> Insbesondere bei den Probekörpern aus Eiche wurde eine Gewichtszunahme gemessen. Da sich bei den Proben deutlich Teile der Oberfläche abgelöst haben, lässt sich diese Gewichtsveränderung nur durch eine geänderte Holzfeuchte bei der zweiten Messung erklären.

#### 5.4.4.1 Ergebnisse der Bewitterung bei den einzelnen Probekörpern

##### Eiche pinsel imprägniert:

Über den ganzen Prüfzeitraum blätterten dünne Schichten von der Oberfläche ab. Stellenweise brach die Oberfläche auf und es kam zu größeren Ausbrüchen. Am Ende des Bewitterungszeitraumes zeigten die Proben große Abtragungen, die in treppenartigen Querrisse über die gesamte Oberfläche verliefen. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 144-146 und 150-151.)

##### Eiche tauch imprägniert:

Bereits nach dem ersten Zyklus führten viele kleinteilige Abplatzungen zum oberflächlichen Abtrag ganzer Regionen der Pyrolyseschicht. In den weiteren Zyklen baute sich die Oberfläche durch fortschreitende Abplatzungen langsam immer weiter ab. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 147-149 und 154-157.)

##### Fichte pinsel imprägniert:

Bereits nach dem ersten Zyklus sind Haarrisse in Querrichtung entstanden. Insgesamt hat die Oberfläche über den Testzeitraum allerdings relativ wenig Substanz verloren. Nur vereinzelt sind kleinere Bereiche ausgebrochen. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 161-163 und 168-171.)

##### Fichte tauch imprägniert:

Schon nach dem ersten Bewitterungszyklus riss die Oberfläche in kleineren Bereichen auf und kleinerer Stellen platzten ab. Das Frühholz wurde durch die Bewitterung ausgewaschen, wodurch Rillen in Faserrichtung entstanden. Im Laufe des Bewitterungszeitraumes kamen einzelne weitere kleinere Abplatzungen und Auswaschungen hinzu. Im direkten Vergleich zu den anderen Holzarten, insbesondere der tauch imprägnierten Eiche, zeigt die tauch imprägnierte Fichte einen deutlich erhöhten Widerstand gegen Materialverlust. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 164-166 und 172-175.)

##### Lärche pinsel imprägniert:

Über den gesamten Verlauf der beschleunigten Bewitterung kam es zu kleineren Abplatzungen und Auswaschungen, letztere insbesondere in den Randbereichen. Insgesamt zeigte sich die Oberfläche jedoch äußerst stabil. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 179-181 und 186, 187.)

##### Lärche tauch imprägniert:

Die Oberfläche zeigt über den gesamten Zeitraum der Bewitterung nur kleinere Aufbrüche, die jedoch nicht zu Abplatzungen führten. Insgesamt ist die Oberfläche recht stabil. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 182-184 und 188-191.)

##### Epoxidharz:

Je nach gewählter Beschichtungsmethode zeigte die Behandlung der Oberfläche durch Epoxidharze eine sehr hohe Resistenz gegen die Bewitterung. Nur einige Proben zeigten oberflächliche Eintrübungen. Der Versuch wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ausschließlich mit der Zielsetzung durchgeführt, einen Vergleich hinsichtlich der Stabilisierung der pyrolysierten Oberflächen aufzuzeigen. Im Sinne des Vorschungszieles, der nachhaltigen Erhöhung des Feuerwiderstands von Fassadenhölzern, scheidet diese Imprägniermethode aus.<sup>85</sup>

---

<sup>85</sup> vgl. HNEE, Ingenieurtechnisches Projekt *Epoxidharz in Verbindung mit karbonisiertem Vollholz*, Weidner, Ebert, Seliger

Schlämmen:

Durch den Bewitterungstest wurde erwartungsgemäß deutlich, dass sich das Auftragen mineralischer Schlämmen zum Schutz der pyrolysierten Oberfläche nicht eignet. Bereits nach dem ersten Bewitterungszyklus waren große Teile der Schlämmen abgetragen worden und die Pyrolyseschicht lag wieder frei.

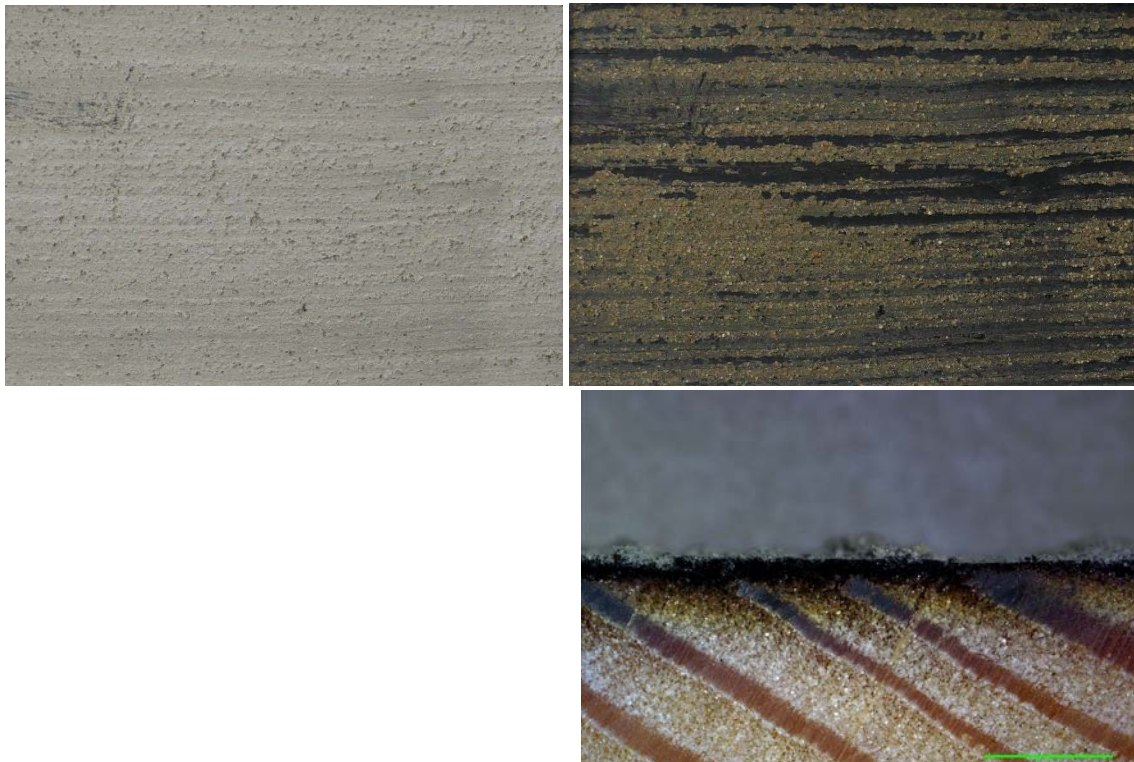


Abbildung 45 bis 47

Probekörper mit Zementschlämmen: vor der Bewitterung (Abbildung 45, linke Seite) und nach der Bewitterung in Aufsicht und Schnitt (Abbildungen 46 und 47, rechte Seite)

#### 5.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Bewitterung

Der deutlichste Materialverlust durch großflächige Abplatzungen an der Oberfläche zeigte sich bei Eiche. Dies ist möglicherweise auf die großen Hohlräume<sup>86</sup> in der Kohleschicht zurückzuführen, welche sich bei der Bewitterung zunächst mit Wasser füllen. Beim Gefrieren dehnt sich das Wasser aus und sprengt die Oberfläche ab.

Die Proben aus Fichte und Lärche zeigten sich weitaus widerstandsfähiger gegen Materialverlust an der Oberfläche, insbesondere kam es nicht zu großflächigen Abplatzungen von Teilen der Oberfläche. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen sind maßgeblich für die Auswahl der in den Brandversuchen zu testenden Materialien und Oberflächen. Neben den beschleunigten Tests im Labor werden die langfristigen Eigenschaften der unterschiedlichen Stabilisierungsverfahren für die pyrolysierten Oberflächen in einer Freibewitterung untersucht.

<sup>86</sup> Die Hohlräume in der Kohleschicht gehen auf die weitleumigen Gefäße-Tracheen der Struktur von Eichenholz zurück.



## 5.5 SBI-Test

Bauprodukte müssen zugelassen sein, um verwendet werden zu dürfen. Das Zulassungsverfahren mit dem die Brandschutzeigenschaften von Bauprodukten ermittelt werden ist der SBI-Test. Dieses Prüfverfahren bewertet den potentiellen Beitrag eines Bauproduktes zu einem sich entwickelnden Brand bei einer Brandsituation. Simuliert wird ein einzelner brennender Gegenstand (engl. Single Burning Item, SBI) in einer Raumecke. Die Parameter für die Zuordnung zu den einzelnen Brandverhaltensklassen sind in DIN 13501-1 *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten* aufgeführt<sup>87</sup>. Das Testverfahren selber ist in DIN 13823 *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten* festgelegt:

*„Ein Probekörper, bestehend aus zwei vertikal stehenden, eine rechtwinklige Ecke bildenden Probeflügeln wird den Flammen eines unten in der Ecke angeordneten Brenners [...] ausgesetzt. Die Flammen werden durch Verbrennen von Propangas, welches durch ein Sandbett strömt, erzeugt. Die Wärmefreisetzungsrate des Brenners beträgt  $(30,7 \pm 2,0)$  kW. Das Brandverhalten des Probekörpers wird über eine Zeitspanne von 20 min beurteilt. Die das Brandverhalten beschreibenden Parameter sind: Wärmefreisetzung, Rauchentwicklung, seitliche (horizontale) Flammenausbreitung und brennendes Abfallen/Abtropfen. [...] Einige Messungen werden automatisch durchgeführt, andere werden durch visuelle Beobachtung gemacht. Das Rauchgas-Abzugsrohr ist mit Messwertaufnehmern zur Messung der Temperatur, der Lichtschwächung, des O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Mol-Anteils und einer strömungsinduzierten Druckdifferenz im Abzugsrohr ausgestattet. Diese Größen werden automatisch aufgezeichnet und zur Berechnung des Volumenstroms, der Wärmefreisetzungsrate (HRR) und der Rauchentwicklungsrate (SPR) verwendet. Seitliche Flammenausbreitung und brennendes Abtropfen/Abfallen werden durch visuelle Beobachtungen festgestellt.“<sup>88</sup>*

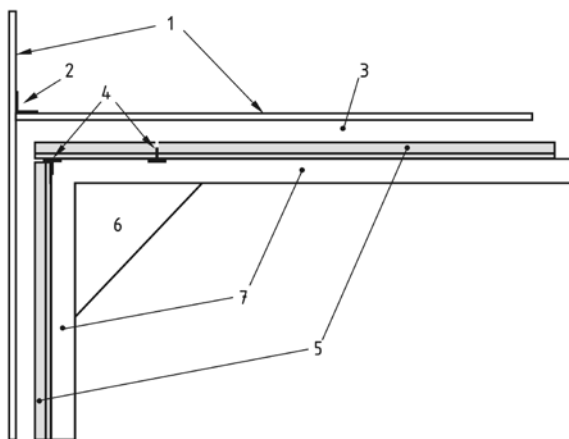


Abbildung 48  
Schematischer Aufbau des SBI-Tests nach DIN EN 13823. Rückseitige Abschlussplatte 1 / L-Profil 2 / Luftspalt 3 / Fugen 4 / Probenflügel 5 / Hauptbrenner 6 / U-Profil 7

Der potentielle Beitrag eines Bauproduktes zu einem Brand hängt neben den materialspezifischen Eigenschaften, wie dem spezifischen Brennwert oder der Oberflächenbeschaffenheit, auch von der konkreten thermischen Beanspruchung und insbesondere auch von der Einbausituation innerhalb eines konstruktiven Gefüges ab. Daher müssen Bauprodukte so geprüft werden, wie sie später auch verbaut werden. Sind unterschiedliche Einbausituationen eines Bauproduktes möglich, muss für jede einzelne in einem separaten Testverfahren die Tauglichkeit ermittelt werden.

Mit dem SBI-Test kann also nicht nur das Brandverhalten von Baustoffen, sondern auch das Verhalten komplexer Bauprodukte wie z.B. von Fassadensystemen ermittelt werden. Dies bedeutet,

<sup>87</sup> vgl. DIN 13501-1; Tabellen 1, 2 und 3

<sup>88</sup> DIN 13823, Seite 18

dass das System mit all seinen Konstruktionsparametern – Bekleidungsmaterial, Unterkonstruktion und ggf. auch Dämmstoffen – einem Test unterzogen wird.

Bewertet werden die seitliche Flammenausbreitung (LFS - lateral flame spread), das andauernde Brennen mit Flamme auf der Oberfläche des Probekörpers<sup>89</sup> und brennendes Abtropfen oder Abfallen von Teilen des Probekörpers<sup>90</sup>. Rechnerisch werden aus aufgezeichneten Messwerten der Brandentwicklungsindex FIGRA (fire growth rate) und die Rauchentwicklungsrate SMOGRA (smoke growth rate) ermittelt. Je nach Brandverhaltensklasse dürfen diese Indices festgelegte Werte nicht überschreiten.

Für die Klassifikation "B", mit der die "Schwerentflammbarkeit" beschrieben wird liegen diese Werte bei:

|                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| LFS                      | < Rand des Probekörpers |
| FIGRA <sub>0,2/0,4</sub> | ≤ 120 W/s               |
| THR600s                  | ≤ 7,5 MJ <sup>91</sup>  |

Die Rauchentwicklung kann nach DIN EN 13501-1 durch eine zusätzliche Klassifikation bewertet werden<sup>92</sup>. Für die Klassifikation "s1" gelten folgende Grenzwerte: SMOGRA ≤ 30 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> und TSP600s ≤ 50 m<sup>2</sup>. Hier sind ebenfalls die Anforderungen an die zusätzliche Klassifikation "d0" hinsichtlich des brennenden Abtropfens und/oder Abfallens definiert<sup>93</sup>: Die Klassifikation "d0" gilt als erfüllt, wenn bei der Prüfung nach EN 13823 kein brennendes Abtropfen oder Abfallen innerhalb von 600 Sekunden auftritt.

Mit unbehandeltem Fichtenholz<sup>94</sup> werden folgende Werte erreicht<sup>95</sup>:

|                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| LFS                      | nicht angegeben;                   |
| FIGRA <sub>0,2/0,4</sub> | = 440 W/s                          |
| THR600s                  | = 15,7 MJ                          |
| SMOGRA                   | = 3 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> |
| TSP 600s                 | = 47 m <sup>2</sup>                |

Diese Werte führen zu der Klassifikation "D" mit der zusätzlichen Klassifikation "s1" und "d0". Damit gilt unbehandeltes Fichtenholz als "normalentflammbar". Beim Vergleich dieser Werte wird deutlich, welche Verbesserungen erforderlich sind, um durch die Behandlung der Oberfläche die angestrebte "Schwerentflammbarkeit" zu erreichen.

<sup>89</sup> vgl. DIN 13501-1, 3.1.29 Bewertet wird das „Auftreten einer Flamme auf oder über der Oberfläche eines Probekörpers über eine Dauer, die eine festgelegte Dauer überschreitet“

<sup>90</sup> vgl. DIN 13501-1: 3.1.32 Hier wird das brennende Abtropfen beschrieben:

„Material, das sich während einer Brandprüfung von der Probe löst und für eine Mindestdauer, die im Prüfverfahren angegeben ist, weiterbrennt.“

<sup>91</sup> vgl. DIN 12501, 3.1.37 - 3.1.40

<sup>92</sup> vgl. DIN 13501-1 Abschnitt 11.9 Zusätzliche Klassifizierungen s1, s2, s3 für die Rauchentwicklung

<sup>93</sup> vgl. DIN 13501-1 Abschnitt 11.10 Zusätzliche Klassifizierungen d0, d1, d2 für das brennende Abtropfen und/oder Abfallen

<sup>94</sup> vgl. DIN EN 13823; Tabelle B.1 - Im SBI-Rundversuch geprüfte Materialien: In der Norm sind als Vergleich Messwerte gemittelt aus jeweils drei Versuchen von 13 unterschiedlichen Laboren für unterschiedliche Materialien aufgeführt. Unter Code M12 werden die Werte für Fichtenholz (Bauholz) angegeben

<sup>95</sup> vgl. auch DIN EN 14081-1; Tabelle C.1 in Anhang C: Hier wird unbehandelten Laub- und Nadelhölzern die Brandverhaltensklasse "D-s2" zugeordnet

Neben dem “B2” Test nach DIN 4102-1 ist der SBI-Test das wichtigste Kriterium bei der Beurteilung, inwieweit ein Baustoff die Klassifizierung “*schwerentflammbar*” erhalten kann. Im Kontext des Forschungsprojektes PyroForCE stellt dieser Test somit die entscheidende Hürde dar, um nachzuweisen, dass der “*brennbare*” Baustoff Holz durch die Oberflächenpyrolyse als “*schwerentflammbar*” eingestuft werden kann und somit als Fassadenmaterial bis einschließlich Gebäudeklasse 5 verwendet werden darf.

Für die Klassifizierung eines Bauproduktes ist es erforderlich, drei identische Probekörper mit SBI-Test zu prüfen. Eine Klassifizierung pyrolysierter Fassadenbekleidungen wäre für den ursprünglichen Industriepartner Opitz Holzbau GmbH von wirtschaftlich großer Bedeutung gewesen, um diese als Fassadenmaterial für mehrgeschossige Gebäude in Holztafelbauweise verwenden zu können. Insofern war bei der Konzeption des Projektes festgelegt worden, insgesamt 5 SBI-Tests durchzuführen: Zwei sollten als Vortest die grundsätzliche Machbarkeit nachweisen, die verbleibenden drei Tests hätten der Klassifizierung eines bestimmten Systems gedient. Durch den Wechsel des Industriepartners ist diese Klassifizierung nicht mehr erforderlich. Somit können alle fünf Tests zur Untersuchung eines breiten Spektrums unterschiedlicher Parameter herangezogen werden. Eine erste Versuchsreihe aus zwei Einzeltests dient weiterhin der grundsätzlichen Untersuchung der durch Oberflächenpyrolyse zu erreichenden Verbesserung des Feuerwiderstands.

### 5.5.1 SBI-Test 1 und 2 – Festlegung der Parameter

Die Auswahl der Holzarten und der Beschichtungsmethoden für die beiden ersten Tests erfolgte als ein Kreuzvergleich aus den B2-Tests, den Ergebnissen der Bewitterung und dem Abriebtest. Letztlich spiegeln diese Testverfahren wieder, welche Menge an Wasserglas in das System hatte eingebracht werden können. Es zeigte sich eine proportionale Übereinstimmung zwischen der aufgetragenen Menge an Wasserglas und der Widerstandsfähigkeit in den einzelnen Testverfahren. Neben diesen Kriterien dienen die beiden ersten SBI-Test jedoch insbesondere auch dazu, unterschiedliche Holzarten beziehungsweise Fassadenkonstruktionen zu testen, um nach deren Auswertung die weiteren Tests konzipieren zu können. Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgt immer vor dem Hintergrund, Verbesserungen in einer Größenordnung zu erreichen, dass die Klassifikation “*schwerentflammbar*” möglich wird.

## 5.5.2 Probekörper 1 - Vertikale Leisten-Deckel-Schalung

Fichte, pyrolysiert, mit Wasserglas imprägniert

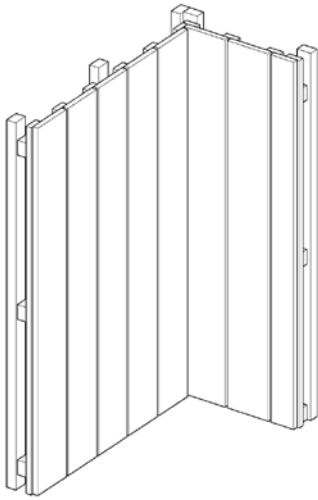


Abbildung 49  
Zeichnung Probekörper für SBI-Test 1:  
Vertikale Leisten-Deckel-Schalung

Der erste getestete Probekörper ist der Ausschnitt einer Fassadenbekleidung aus Fichtenbrettern, welche zunächst pyrolysiert und dann mit Wasserglas im Unterdruckverfahren mit Natrium-Wasserglas imprägniert wurden. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 192-194.)



Abbildung 50 und 51

Probekörper für SBI-Test 1 vor und nach dem Test

Bei Fichtenholz konnte eine deutlich größere Menge an Wasserglas eingebracht werden, als bei den im Vergleich getesteten Holzarten Lärche und Eiche.

Mit dem 60%igen Natrium-Wasserglas kam ein Mittel zur Anwendung, welches traditionell als Flammenschutzmittel in der Bauindustrie eingesetzt wurde. Die Tauchimprägnierung ermöglichte es,

einen deutlich höheren Anteil an Wasserglas in die Pyrolyseschicht einzubringen als bei der Auftragsmethode mit dem Pinsel.

Als Fassadentyp wurde eine *Leisten-Deckel-Schalung* gewählt. Diese geschlossene Fassadenbekleidung zeigt eine sehr homogene Oberfläche mit einem geringen Anteil an Kanten im Verhältnis zur gesamten Oberfläche. Alle Bretter wurden vor der Pyrolyse auf eine Stärke von 23 mm gehobelt, die Leisten in der unteren Fassadenebene haben eine Breite von 60 mm, die Deckel in der oberen Fassadenebene eine Breite von 150 mm. Die Fugenbreite zwischen den Deckbrettern beträgt ca. 10 mm.

Die Pyrolyseschicht wurde auf allen Außenseiten und den Schmalflächen der Bekleidung angebracht. Ihre Dicke auf der Oberfläche der Fassadenbretter beträgt etwa einen Millimeter. Die innenliegenden Seiten der einzelnen Bretter sind unbehandelt, also weder pyrolysiert noch imprägniert.

Die Unterkonstruktion der Fassadenbretter wird von je einer Grund- und einer Traglattungsebene aus unbehandelter Fichte mit einem Querschnitt von 60 x 80 mm gebildet. Durch die kreuzweise Überlagerung der beiden Ebenen der Unterkonstruktion entsteht hinter der Bekleidung eine durchgängige Luftschicht, wie sie für die Prüfung hinterlüfteter Fassaden im SBI-Test vorgeschrieben ist. Die Konstruktionshölzer sind untereinander mit Schrauben verbunden und die Fassadenbretter wiederum mit Schrauben an der Unterkonstruktion befestigt. Die jeweilige Längen der Schrauben richten sich nach den Anforderungen des Brandschutzes gemäß Eurocode 5 und entsprechen damit den Regeln der Technik.

### 5.5.2.1 Durchführung

Die Durchführung des Tests entspricht den Vorgaben für den SBI-Tests nach DIN EN 13823 *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Nach einer Vorlaufzeit für das Justieren der Anlage, erfolgt die Beflammung des Probekörpers über den vorgegebenen Zeitraum von 20 Minuten. Beurteilt werden die Wärmefreisetzung, die Rauchentwicklung, die seitliche Flammenausbreitung und brennendes Abtropfen.<sup>96</sup>

Den kritischsten Punkt des Probekörpers bildet das untere Drittel der durch die beiden Flügel gebildeten Ecke. Hier wird der Probekörper durch die Beflammung des Brenners am stärksten beansprucht. Der Probekörper wurde gemäß Richtlinien des Zimmererhandwerks als Leisten-Deckel-Bekleidung ohne einen zusätzlichen konstruktiven Brandschutz in den Ecken ausgebildet. So hat insbesondere die konstruktionsbedingte Eckfuge ein Durchschlagen der Flammen begünstigt. Dadurch gerieten die Rückseiten der Bretter und Teile der Unterkonstruktion in Brand und verursachten so einen Beitrag zum Brandgeschehen. Obwohl Teile des Probekörpers beim Test nahezu vollständig verbrannt wurden, konnte der Test bis zu seinem regulären Ende durchgeführt werden. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 195, 196-203 und 230-250.)

---

<sup>96</sup> vgl. DIN EN 13823, Abschnitt 7f.



Abbildung 52 bis 55  
SBI-Test 1: Testverlauf: Minute 0 (Start), Minute 7, Minute 14, Minute 21 (Ende)

### 5.5.2.2 Auswertung

Aus der automatischen Aufzeichnung der gemessenen Parameter ergeben sich folgende Bewertungen:

|                        |                                        |                                                                                                                 |
|------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FIGRA <sub>02/04</sub> | = 53,5 W/s                             | < 120 W/s (erforderl. für Euroklasse "B")                                                                       |
| LFS                    | < Probenaußenkante                     | = erfüllt                                                                                                       |
| THR 600s               | = 5,28 MJ                              | < 7.5 MJ (erforderl. für Euroklasse "B")                                                                        |
| SMOGRA                 | = 1.438 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> | < 30 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> (erforderl. für Klassifizierung "s1"<br>hinsichtlich. der Rauchentwicklung) |
| TSP 600s               | = 24.588 m <sup>2</sup>                | < 50 m <sup>2</sup> (erforderl. für Klassifizierung "s1"<br>hinsichtlich. der Rauchentwicklung)                 |

Damit erfüllt der Probekörper 1 die Kriterien für die Einordnung in die Brandschutzklasse "B" nach DIN EN 13501-1 beziehungsweise "B1" nach DIN 4102-1. Da kein brennendes Abtropfen aufgetreten ist und aufgrund der gemessenen Werte der Rauchentwicklung kann dieser Test der Kategorie "B" mit den Zusatzqualifikationen "s1", "d0" zugeordnet werden.

Das getestete Bauprodukt *pyrolysierte Fichte, mit Natriumwasserglas imprägniert* gilt in der Anwendung als Leisten-Deckel-Schalung als "*schwerentflammbar*" und dürfte somit für Fassaden bis einschließlich Gebäudeklasse 5 verwendet werden.<sup>97</sup>

<sup>97</sup> Auf der Grundlage dieses einen Tests kann noch keine Klassifizierung des beschriebenen Fassadensystems erfolgen. Hierfür ist eine Serie von drei gleichen Probekörpern erforderlich. Eine Klassifizierung ist nach dem Wechsel des Industriepartners wie oben beschrieben allerdings nicht mehr Bestandteil des Forschungsprojektes und wird nicht weiter verfolgt.



Abbildung 56 und 57

SBI-Test 1: Probekörper nach dem Test: Durch die Beanspruchung des Brenners haben die Flammen an der unteren Ecke der Vorderseite die Fassadenbretter vollständig verbrannt. Hier sind die Flammen durchgeschlagen und haben die Rückseite der Fassade und Lattungsebenen in Brand gesetzt. An der Vorderseite sind mit den weißlichen Bereichen die Stellen deutlich zu erkennen, an denen das Wasserglas durch die Beflammung gesintert wurde.

### 5.5.3 Probekörper 2 - Horizontale Stülpchalung

Lärche, pyrolysiert, mit Wasserglas imprägniert

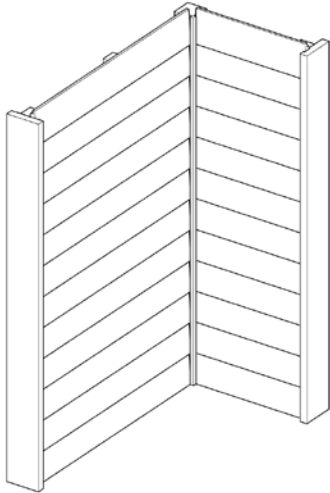


Abbildung 58  
Zeichnung Probekörper für SBI-Test 2:  
Horizontale Stülpchalung

Der zweite Probekörper ist der Ausschnitt einer Holzfassade aus Fassadenbrettern aus Lärche, welche zunächst pyrolysiert und dann mit Wasserglas im Unterdruckverfahren mit 60%igem Natrium-Wasserglas imprägniert wurde. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 204-206.)



Abbildung 59 und 60  
Probekörper für SBI-Test 2 vor und nach dem Test. Abbildung 60 zeigt deutlich das Nachbrennen der Konstruktion nach Abbruch des Tests.

Der Fassadentyp ist eine horizontale Stülpchalung. Alle Bretter der Bekleidung sind profiliert. Sie haben eine Nut an der einen und eine Feder an der anderen Schmalseite. Das keilförmige Profil hat eine Breite von 125 mm und eine Stärke von 20 mm an der Seite der Feder beziehungsweise 30 mm an der Seite der Nut. Auf der Rückseite der Bretter sind in Längsrichtung jeweils zwei Entlastungsnuten eingefräst. Bedingt durch die Profilierung entsteht eine völlig geschlossene, an der Außenseite leicht geschuppte Bekleidung mit den für Stülpchalungen charakteristischen horizontalen Kanten.

Der Eckstoß wird durch mit einer zusätzlichen vertikalen Leiste ausgeführt, um die durch die Schuppung der Fassadenbretter bedingte Fuge zu überdecken. Die Seiten dieser Eckleiste sind dabei mit einer Nut versehen, um die Schnittkanten der Fassadenbretter zu überdecken.

Die Pyrolyseschicht wurde auf allen Außenseiten und den Schmalflächen (Nut und Feder) angebracht und mit Wasserglas imprägniert. Die innenliegenden Brettseiten wurden weder pyrolysiert noch imprägniert. Die Dicke der Pyrolyseschicht auf der Oberfläche der Fassadenbretter beträgt etwa einen Millimeter.

Die Unterkonstruktion der Fassadenbretter wird von je einer Grund- und einer Traglattungsebene aus unbehandelter Fichte mit einem Querschnitt von 40 x 60 mm gebildet. Durch die kreuzweise Überlagerung der beiden Ebenen der Unterkonstruktion entsteht hinter der Bekleidung eine durchgängige Luftschicht. Die Konstruktionshölzer sind untereinander mit Schrauben befestigt und die Fassadenbretter wurden ebenfalls mit Schrauben an der Unterkonstruktion befestigt. Die jeweilige Länge der Schrauben entsprechen den Anforderungen aus den Brandschutzbestimmungen und den Regeln der Technik.

### 5.5.3.1 Durchführung und Auswertung



Abbildung 61 und 64

SBI-Test 2: Testverlauf: Minute 0 (Start), Minute 7, Minute 14, Minute 18 (Abbruch des Tests): Hier ist deutlich zu sehen, dass auch große Teile der Vordeseite zum Zeitpunkt des Testabbruchs im Vollbrand standen.

Bereits nach wenigen Minuten begannen die überstehenden horizontalen Kanten der Stülpchalung, welche einer direkten Beflammung durch den Brenner ausgesetzt waren, zu brennen. Ein weiterer Schwachpunkt der Konstruktion zeigte sich in der Ausbildung der Eckfuge. Das Profilholz, mit dem die Schnittflächen der Bretter vor dem Entzünden geschützt werden sollten, fing selbst Feuer. Damit waren auch die Schnittflächen einer direkten Beflammung ausgesetzt. Die starke Beanspruchung, insbesondere im Bereich der Ecke, führte dazu, dass die Flammen die Bekleidungsebene hier vollständig in Brand setzten und schließlich durch die entstandene offene Fuge in die Ebene der Hinterlüftung durchschlugen. In der Folge gerieten nach etwa 1200 Sekunden (vgl. Tabelle 7) die nicht pyrolysierten und nicht mit Wasserglas imprägnierten Rückseiten der Fassadenbretter sowie die Unterkonstruktion in Brand. Durch diese zusätzliche Brandlast stieg die Temperatur im Abgasstrom derartig an, dass der Versuch nach ca. 1400 Sekunden (vgl. Tabelle 7) vorzeitig abgebrochen werden musste. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 207-211 und 251-269.)

Eine Klassifizierung ist somit nicht möglich. Für den getesteten Probekörper *“Lärche, pyrolysiert, mit Natrium-Wasserglas imprägniert”* als horizontale Stülpchalung, können die Kriterien für eine Klassifizierung nach DIN 13501 “B” “schwerentflammbar” NICHT erreicht werden.

Die konstruktionsbedingten, horizontal verlaufenden Kanten bieten eine große Angriffsfläche für die Beflammung und haben damit einen wesentlichen Einfluss auf das negative Testergebnis. Gleichzeitig haben die ausgewählten Profilbretter durch die Spundung (Nuten und Federn) nur noch geringe Rest-Querschnitte an den Kanten. Diese Kanten waren bereits bei der Pyrolyse stark beansprucht worden und wurden im durch die Beflammung während des SBI-Tests schnell vollständig verbrannt. Durch die so entstandenen offenen Fugen konnte die Beflammung leicht die Konstruktion durchschlagen und die Rückseiten in Brand setzen.

Das Material Lärche leistet mit einem relativ hohen Brennwert von 1581 kWh/rm<sup>98</sup> (bei 10% Restfeuchte) einen großen Beitrag zum Brandgeschehen, was den starken Anstieg der Temperaturen im Abgasstrom erklärt. Ein weiterer Schwachpunkt liegt darin, dass konstruktionsbedingt zwei Lattungsebenen notwendig sind, die ebenfalls einen Beitrag zum Brandgeschehen liefern. Der abschließenden Auswertung vorausgreifend wird an diesem Test deutlich, dass neben der Wahl des Materials und der Art Oberflächenertüchtigung, insbesondere auch die Kompaktheit des Systems einen erheblichen Einfluss auf den Testverlauf und damit auf die Möglichkeit einer Klassifikation hat.

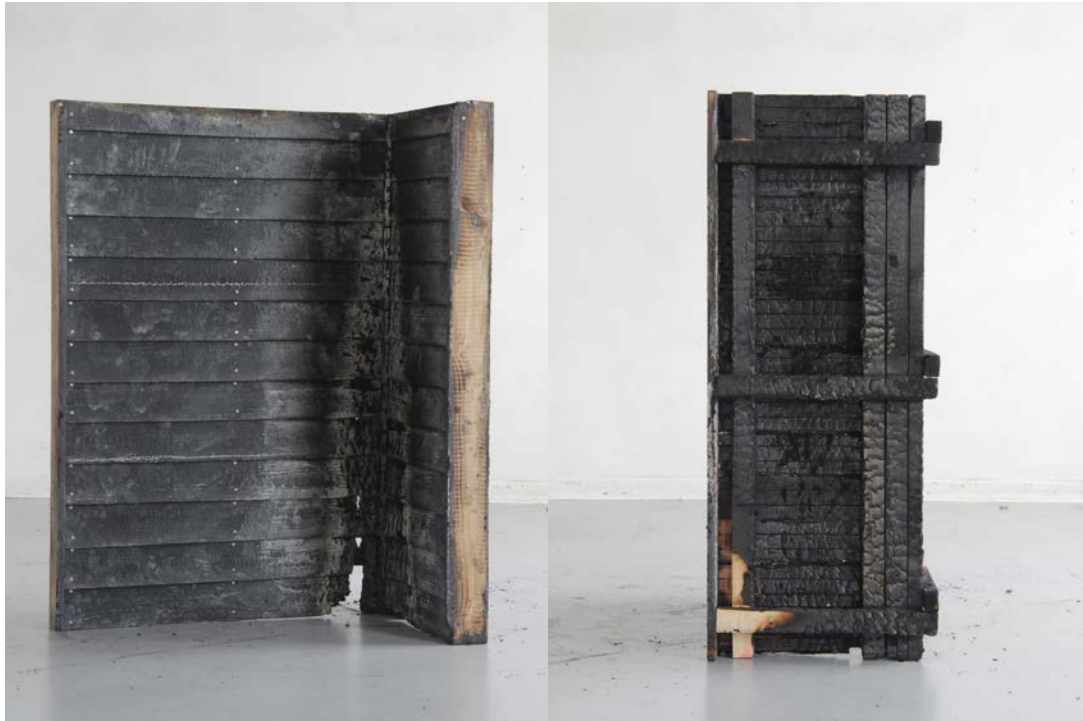


Abbildung 65 und 66

SBI-Test 2: Probekörper nach dem Test: Durch die Beanspruchung des Brenners haben die Flammen an der unteren Ecke der Vorderseite die Fassadenbretter vollständig verbrannt. Hier sind die Flammen durchgeschlagen und haben die Rückseite der Fassade und Lattungsebenen in Brand gesetzt. Da dieses Durchschlagen der Flammen bei dem zweiten Test zu einem viel früheren Zeitpunkt passierte, konnte sich der Brand auf der Rückseite deutlich stärker ausbreiten.

---

<sup>98</sup> Quelle: [www.energie-experten.org](http://www.energie-experten.org)



#### 5.5.4 SBI Test 2.0 – Weitere Entwicklung: Probekörper 3 bis 5

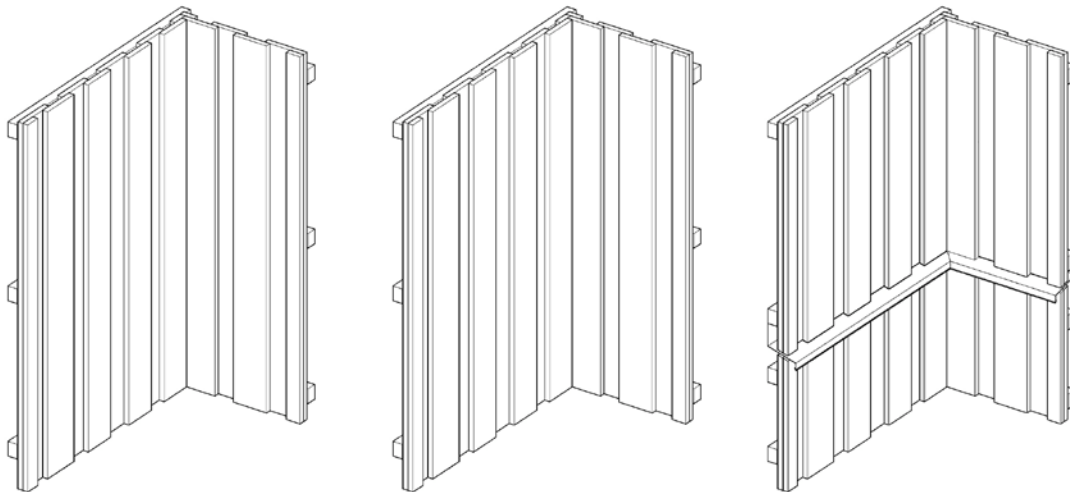


Abbildung 67a/b und 68

Zeichnung Probekörper: Boden-Deckel-Schalung für SBI-Tests 3 (Fichte) und 4 (Eiche);  
Boden-Deckel-Schalung mit horizontaler Fuge für SBI-Tests 5

Bei den beiden ersten SBI-Test hatte sich gezeigt, dass neben der Holzart und der Pyrolyseschicht auch die Art der Beschichtung und das gewählte Fassadensystem einen Einfluss auf die Erhöhung des Feuerwiderstands haben. Mit dem SBI-Test 1 aus pyrolysiert und mit Wasserglas imprägnierter Fichte als Leisten-Deckel-Schalung wurde bereits ein Fassadensystem getestet, welches die Anforderungen an eine Klassifizierung erfüllt. Für eine tatsächliche Klassifizierung ist es allerdings erforderlich, einen Test an drei identischen Probekörpern zu wiederholen. Aufgrund des Wechsels des Kooperationspartners ist eine Klassifizierung nicht mehr Ziel des Forschungsprojekts. Die eigentlich hierfür eingeplanten SBI-Tests können jetzt für Vergleichsuntersuchungen genutzt werden.

Es soll insbesondere herausgefunden werden, welchen Einfluss die Pyrolyseschicht selbst auf die Erhöhung des Brandschutzes bei unterschiedlichen Holzarten hat, beziehungsweise welcher Anteil auf das aufgetragene Wasserglas zurückzuführen ist. Um die Vergleichbarkeit der Proben untereinander zu ermöglichen, aber auch, um ein weiteres gängiges Fassadensystem zu testen, wurden alle Probefassaden der zweiten Testreihe als Boden-Deckel-Schalung mit sägefallenden Breiten ausgeführt. Ein Vorteil dieser Schalung liegt darin, dass für die gesamte Fassade nur Bretter eines Typs benötigt werden. Ebenso kann bei geeigneter Wahl der Brettquerschnitte die erforderliche durchgängige Hinterlüftung in einer Stärke von mindestens 20 mm bereits in der unteren Ebene der Bekleidung erreicht werden, ohne dass hierfür eine eigene zusätzliche Lattungsebene erforderlich wäre. Im Vergleich mit der im ersten SBI-Test gewählten Leisten-Deckel-Schalung, ist bei der Boden-Deckel-Schalung eine erhöhte Beanspruchung der Schmalseiten zu erwarten. Um hier einen gleichmäßigeren Übergang zwischen Schmalseite und Oberfläche zu erreichen, wurden die Kanten bereits vor der Pyrolyse mit einer 6 mm großen Rundung versehen.

Für die weiteren Tests wurden drei weitere Probekörper jeweils als Boden-Deckel-Schalung getestet:

Eiche, pyrolysiert

Fichte, pyrolysiert

Fichte, pyrolysiert, mit Wasserglas beschichtet und mit horizontaler Fuge

### 5.5.5 SBI-Test 3 - Boden-Deckel-Schalung

Fichte, pyrolysiert

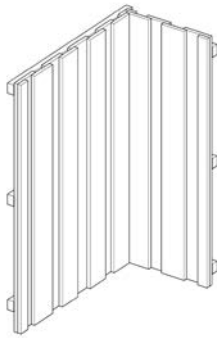


Abbildung 69  
Zeichnung Probekörper für SBI-Test 3:  
Boden-Deckel-Schalung

Der Probekörper ist aus 23 mm starken, gehobelten Fichtenbrettern gefertigt, deren Oberflächen einseitig pyrolysiert wurden. Ein Auftrag von Wasserglas erfolgte nicht. Die Breite der Fassadenbretter beträgt zwischen 110 mm und 180 mm. Daraus wurde eine sägefallende Boden-Deckel-Schalung entsprechend der Fachregeln des Zimmererhandwerks gefertigt. Die Überdeckung der Fassadenbretter beträgt mindestens 20 mm. Eine durchgängige Fuge an der vertikalen Innenecke wurde durch eine versetzte Montage vermieden, um ein direktes Durchschlagen der Flammen beim SBI-Test zu verhindern. Die Unterkonstruktion bildet eine Traglattungsebene aus unbehandelten Fichtenholz-Latten mit den Maßen 40 x 60 mm.



Abbildung 70 und 71

Probekörper für SBI-Test 3 vor dem Test: Die vertikale Luftschicht zwischen den Brettern der Bodenebene ermöglicht die Hinterlüftung. Daher kann die Konstruktion mit nur einer Lattungsebene gebildet werden.

Dieser Test soll im Vergleich mit dem Test aus der ersten Serie, bei denen die pyrolysierten Oberflächen zusätzlich mit Wasserglas imprägniert waren zeigen, welcher Anteil des

Feuerwiderstands alleine auf die pyrolysierte Oberfläche zurückzuführen ist und ob damit bereits die Kriterien für die Klassifikation „*schwerentflammbar*“ erreicht werden können. Idealerweise zeigt sich, dass die aufgebrachte Pyrolyseschicht bereits die notwendige Erhöhung des Feuerwiderstands bewirkt. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 212-214.)

#### 5.5.5.1 Durchführung und Auswertung

Die durch die direkte Beflammung besonders beanspruchten Bereiche im unteren Drittel der Probenecke fingen bereits nach kurzer Zeit Feuer. Den geringsten Widerstand zeigten hier die Kanten der Fassadenbretter, bevor dann auch deren Außenflächen selbst in Brand gerieten. Nach etwa drei Minuten war der Beitrag der Fassadenbretter zum Brandgeschehen bereits so groß, dass sich die Flammen im Bereich der Probenecke bis zum oberen Ende des Probekörpers ausgebreitet hatten. Im weiteren Verlauf des Tests kam es zudem zu einer geringfügigen seitliche Ausbreitung des Feuers. Betroffen waren hier die ersten drei Fassadenbretter, also ein Bereich von etwa 40 cm ausgehend von der Ecke. Bis zum Ende des Test verbrannte der Probekörper in diesem Bereich nahezu vollständig, die Fassadenbretter blieben aber als strukturelle Kohleschicht erhalten. Nach etwa 12 Minuten brannten auch Teile der Proben-Rückseite und der Lattungsebene, was einen zusätzlichen Beitrag zum Brandgeschehen bewirkte. Dennoch konnte der Test bis zu seinem regulären Ende durchgeführt werden, allerdings war ein Löschen der Rückseite erforderlich. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 215-217 und 270-290.)



Abbildung 72 und 73

SBI-Test 3: Boden-Deckel-Schalung aus Fichtenbrettern nach dem Test: Durch die hohe Beanspruchung des Brenners, insbesondere in der Ecke, haben die Flammen hier die Konstruktion durchschlagen. An der rückwärtigen Ansicht ist deutlich zu sehen, dass dadurch die Rückseite der Fassadenbretter und Teile der Lattungen in Brand geraten sind. Durch eine Verstärkung in den Ecken sollte es möglich sein, ein Durchschlagen der Flammen zu verhindern.

Die automatische Aufzeichnung der gemessenen Parameter führte zu folgenden Bewertungen:

|            |                                        |                                                                                                              |
|------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FIGRA02/04 | = 109 W/s                              | < 120 W/s (erforderl. für Euroklasse "B")                                                                    |
| LFS        | < Probenaußenkante                     | = erfüllt                                                                                                    |
| THR 600s   | = 11,8 MJ                              | > 7.5 MJ (erforderl. für Euroklasse "B")                                                                     |
|            |                                        | < 15 MJ (erforderl. für Euroklasse "C")                                                                      |
| SMOGRA     | = 2.395 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> | < 30 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> (erforderl. für Klassifizierung "s1" hinsichtlich. der Rauchentwicklung) |
| TSP 600s   | = 29.508 m <sup>2</sup>                | < 50 m <sup>2</sup> (erforderl. für Klassifizierung "s1" hinsichtlich. der Rauchentwicklung)                 |

Aus den Messergebnissen kann aufgrund des THR 600s Wertes von über 7,5 MJ nur eine Zuordnung in die Euroklasse "C" nach DIN 13501-1 erfolgen. Damit gilt dieses Bauprodukt ebenfalls als *"schwerentflammbar"*. Da kein brennendes Abtropfen und auch die Rauchentwicklung gering ausfiel, sind auch die Zusatzqualifikationen "s1", "d0" erreicht. Da die Probe jedoch nach Testende gelöscht werden musste, steht dieses Ergebnis unter Vorbehalt.

Das getestete Setup stellt eine deutliche Verbesserung des Brandschutzes dar. Inwieweit nur durch die Oberflächenpyrolyse eine Klassifikation als *"schwerentflammbares"* Bauprodukt möglich ist, kann nur in einer Serie klassifizierender Tests nachgewiesen werden. Mit dem Test konnte allerdings gezeigt werden, dass die Pyrolyseschicht einen wesentlichen Beitrag zum Brandgeschehen leistet. Dies zeigt insbesondere der Vergleich mit unbehandelten Fichtenhölzern, welche nur die Zuordnung zur Klasse "D" erhalten und damit als *"normalentflammbar"* gelten. Der geringe Brennwert der getesteten Fichte in Verbindung mit einer nur einschichtigen Konstruktionsebene scheint zu begünstigen, dass der Beitrag des Probekörpers zum Brandgeschehen insgesamt gering war. Damit hat der getestete Probekörper zwar die zur Klassifikation erforderlichen Kennwerte erreicht, eine tatsächliche Klassifikation zu erhalten scheint jedoch aufgrund des Nachbrennens kaum möglich zu sein.



Abbildung 74 bis 77

SBI-Test 5: Testverlauf: Minute 1, Minute 7, Minute 14, Minute 21 (Nachbrennen)

### 5.5.6 SBI-Test 4 - Boden-Deckel-Schalung

Eiche, pyrolysiert

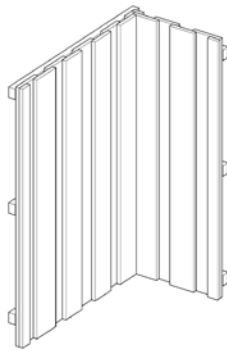


Abbildung 78  
Zeichnung Probekörper für SBI-Test 4:  
Boden-Deckel-Schalung

Der Probekörper ist aus 23 mm starken gehobelten Eichenbrettern gefertigt. Die Breite der Fassadenbretter beträgt zwischen 110 mm und 170 mm. Die Oberfläche der Bretter wurde in einem Durchgang pyrolysiert und weist eine ca. 1 mm starke Pyrolyseschicht auf. Eine Beschichtung mit Wasserglas erfolgte nicht. Die sägefallende Boden-Deckel-Schalung wurde entsprechend der Fachregeln des Zimmererhandwerks gefertigt. Die Überdeckung der Fassadenbretter beträgt mindestens 20 mm. Im Bereich der vertikalen Innenecke soll die doppelte Überfaltung das Durchschlagen der Flammen verhindern. Die Unterkonstruktion besteht aus einer Traglattungsebene aus unbehandelten Fichtenholz-Latten mit den Maßen 40 x 60 mm.



Abbildung 79 und 80

SBI-Test 4: Boden-Deckel-Schalung aus Eichenbrettern vor dem Test: Die einseitig pyrolysierten Fassadenbretter überdecken sich jeweils um mindestens 20 mm. Im Bereich der Ecke sind die Fassadenbretter so angeordnet, dass sie sich doppelt überlagern.

Mit diesem Test soll gezeigt werden, dass mit Eichenholz als Material, welches im Verhältnis zu Fichte bereits einen höheren Feuerwiderstand mit sich bringt und der Oberflächenpyrolyse als Verfahren der Verbesserung dieser Oberfläche ohne eine weitere Imprägnierung mit Wasserglas

bereits die notwendige Erhöhung des Feuerwiderstands erreicht werden kann. Mit diesem SBI-Test sollten die Vermutungen aus den positiven Ergebnissen der Brennkasten-Tests des Vorgängerprojektes PyroForCE 1.0 bestätigt werden. Hier hatte sich die pyrolysierte Eiche als sehr resistent gezeigt. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 218-220.)



Abbildung 81 und 82

SBI-Test 2: Probekörper nach dem Test: Durch die Beanspruchung des Brenners haben die Flammen an der unteren Ecke die Fassadenbretter vollständig verbrannt. Hier sind die Flammen durchgeschlagen und haben die Rückseite der Fassade und die Lattungsebenen in Brand gesetzt. Da dieses Durchschlagen der Flammen bei dem zweiten Test zu einem viel früheren Zeitpunkt passierte, konnte sich der Brand auf der Rückseite deutlich stärker ausbreiten.

#### 5.5.6.1 Durchführung und Auswertung

Bereits drei Minuten nach Einschaltung des Hauptbrenners fangen die unmittelbar der Beflammung ausgesetzten Kanten des Probekörpers an zu brennen. Nach weiteren drei Minuten schlagen die Flammen in diesem Bereich auch auf den Flächen der Deckbretter. Die hohen Temperaturen im Abgasstrom zu dieser frühen Phase des Tests sind auf den erhöhten Brennwert des Materials Eiche zurückzuführen. Die gemessene Temperatur bleibt zunächst konstant bei etwa 80 °C, bis sie nach etwa 15 Minuten stark ansteigt. Zu diesem Zeitpunkt haben die Flammen die Oberfläche durchschlagen und die Rückseite des Probekörpers in Brand gesetzt. Der hierdurch verursachte extreme Anstieg der Abgastemperaturen führte letztlich dazu, dass der Test vor Ablauf der regulären Prüfzeit abgebrochen werden musste. Der Probekörper musste anschließend von beiden Seiten gelöscht werden. Aussagen über eine Klassifizierung sind damit nicht möglich.



Abbildung 83 bis 86

SBI-Test 4: Testverlauf: Minute 2, Minute 4, Minute 14, Minute 19 (Abbruch des Tests)

Entgegen der ursprünglichen Vermutung kann die Pyrolyseschicht auf der Oberfläche eine Entzündung nur unwesentlich verzögern und auch das Material Eiche selbst zeigt sich weniger resistent gegen die Beflammung als zunächst angenommen. Dahingegen birgt der hohe Brennwert von Eiche eine erhebliche zusätzliche Brandlast. Ohne eine weitere Ertüchtigung, beispielsweise durch den Auftrag von Wasserglas, scheint es kaum möglich, eine Klassifizierung zu erhalten. Inwieweit durch einen solchen Auftrag eine Verbesserung des Feuerwiderstands erreicht werden kann, müssen weitere SBI-Test ergeben. Die positiven Ergebnisse der B2-Tests, bei denen mit Wasserglas imprägnierte Probekörper aus Eiche der Beflammung einer kleinen Flamme ausgesetzt waren, geben nur einen Anhaltspunkt, lassen jedoch keine Rückschlüsse auf die zu erwartenden Ergebnisse eines SBI-Tests zu. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 221-223 und 291-310.)

### 5.5.7 SBI-Test 5 - Boden-Deckel-Schalung

Fichte, pyrolysiert, mit Natrium-Wasserglas imprägniert, mit horizontaler Fuge

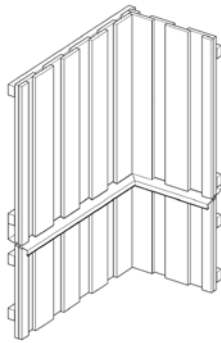


Abbildung 87  
Zeichnung Probekörper für SBI-Test 5:  
Boden-Deckel-Schalung mit horizontaler Fuge



Abbildung 88 und 89

SBI-Test 5: Boden-Deckel-Schalung aus Fichtenbrettern mit horizontaler Fuge vor dem Test: Durch das horizontal verlaufende verzinkte Blechprofil soll eine Brandsperre im Bereich der Schalung und der Konstruktionsebene gebildet werden. Für den SBI-Test werden die beiden Segmente durch große Blechwinkel miteinander verbunden, bevor der Probekörper vor der fest installierten Rückwand der Testanlage eingebaut wird. Damit ist dann keine vertikale Luftzirkulation mehr möglich.

Mit dem Test soll ein gängiges Fassadensystem in einer konkreten Einbausituation getestet werden, um die Ergebnisse später auf weitere Bekleidungsarten übertragen zu können. Das in DIN EN 13823 beschriebene Prüfverfahren des SBI-Tests dient dem Nachweis des Feuerwiderstands von Bauprodukten in einer spezifischen Einbausituation.

*„Bauprodukte, die Fugen aufweisen, sind mit einer horizontalen Fuge in einer Höhe von 500 mm über der Probenunterkante am breiten Probenflügel zu prüfen. Bauprodukte, die mit einer vertikalen Fuge zu prüfen sind, müssen mit einer vertikalen Fuge am breiten Probenflügel im Abstand von 200 mm von der Ecke aus, gemessen im eingebauten Zustand, geprüft werden.“<sup>99</sup>*

Da mit dem Test der Nachweis für die Zulassung eines Bauprodukts und insbesondere dessen Verwendung bis einschließlich Gebäudeklasse 5 erreicht werden soll, bei einer derartigen mehrgeschossigen Einbausituation aber zwangsläufig horizontal verlaufende Fugen auftreten werden, müssen auch die Probekörper mit diesen konstruktionsbedingten horizontalen Fugen getestet werden.

Für den Probekörper mit horizontaler Fuge wurden ebenfalls 23 mm starke gehobelte Fichtenbretter in sägefällenden Breiten von 110 mm bis 180 mm Breite verwendet. Die Oberfläche der Bretter wurde in einem Durchgang pyrolysiert und weist eine ca. 1 mm starke Pyrolyseschicht auf. Dann wurden die einzelnen Bretter im Vakuum mit Natrium-Wasserglas imprägniert. Die Überdeckung der Fassadenbretter beträgt auch hier mindestens 20 mm. Eine durchgängige Fuge an der vertikalen Innenecke wurde durch eine versetzte Montage vermieden. Die Unterkonstruktion besteht aus einer Traglattungsebene aus unbehandelten Fichtenholz-Latten mit den Maßen 40 x 60 mm.

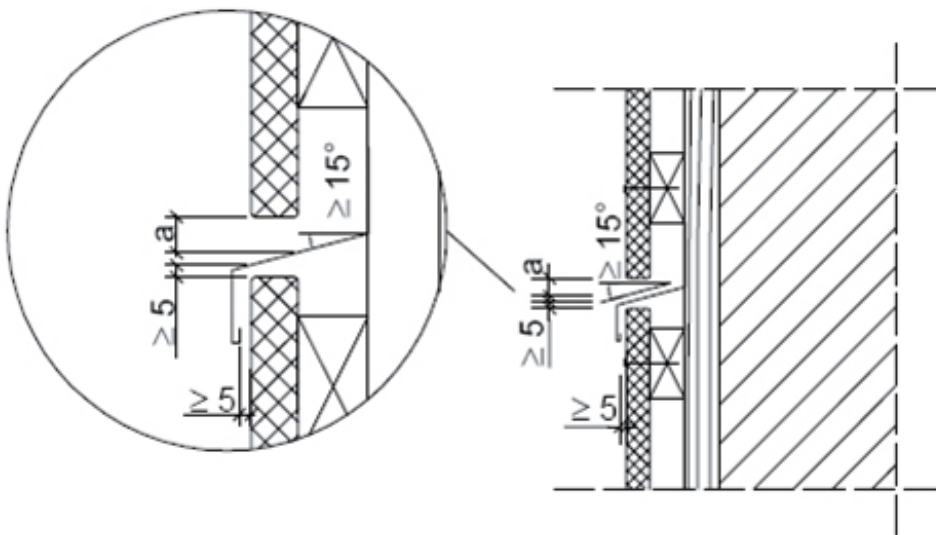


Abbildung 90

Ausbildung einer horizontalen Brandsperre mit einem Z-Profil (Maße in mm)

Bildquelle: Fachregeln des Zimmererhandwerks

Gemäß den Vorgaben der DIN wurde die Fassadenebene in 50 cm Höhe durch eine horizontale Fuge unterbrochen. Diese wurde als Blechschürze ausgeführt. Schürzen haben folgende Wirkungsweisen: Sie unterbrechen die vertikale Luftzirkulation in der Hinterlüftung und damit auch die Brandausbreitung in der Konstruktionsebene. Gleichzeitig sollen die Flammen von der Außenwandbekleidung abgeleitet werden. Sie können aus Stahlblechen, mineralisch gebundenen Holzwerkstoffen oder Holz bestehen. Hier kommt Stahlblech zur Anwendung. Es steht nach vorne 20 mm über die Fassadenebene vor und bildet gleichzeitig auch in der Lattungsebene eine durchgängige horizontale Abschottung, um zu verhindern, dass sich ein Brand hier ungehindert nach oben ausbreiten kann. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 224-229.)

<sup>99</sup> vgl. DIN 13823 Abschnitt 5.5.2 e

#### 5.5.7.1 Durchführung und Auswertung



Abbildung 91 und 92

SBI-Test 5: Probekörper nach dem Test: Insbesondere im Bereich der horizontalen Fuge haben die Flammen die Fassadenebene durchschlagen und große Teile der Rückseite und der Konstruktionsebene oberhalb der Fuge in Brand gesetzt.

Die Flammen des Hauptbrenners sind so stark, dass sie mit Beginn des Tests die horizontale Brandsperre überspringen. Es wird sofort deutlich, dass diese deutlich weiter auskragen müsste, um einen Überschlag zu verhindern. Gleichzeitig weicht die Flamme an der Unterseite des Blechs in einer Breite von etwa 40 cm seitlich aus. Hier kommt es zu einer erhöhten Beflammung der Schnittflächen. Die Flammen schlagen zudem oberhalb des Blechs zurück in die offene Fuge und damit auf die Rückseite der Fassade – ein Entzünden der Konstruktion oberhalb der horizontalen Sperre ist so zu erwarten.

Nach drei Minuten schlagen erste kleine Flammen aus der Fuge unterhalb der Sperre, nach einer weiteren Minute auch oberhalb davon. Währenddessen ist an den unteren Fassadenbrettern durch eine weißliche Verfärbung deutlich das sintern des Wasserglases zu erkennen. Das starke Austreten von Qualm an den äußeren Rändern der Probekörper nach etwa sechs Minuten, ist ein sicheres Indiz dafür, dass die Rückseite bereits in größerem Umfang in Brand geraten ist. Zu diesem Zeitpunkt ist ebenfalls ein starker Temperaturanstieg zu verzeichnen, der im weiteren Testverlauf kontinuierlich zunimmt. Der Brand auf der Rückseite zeigt sich nach etwa 13 Minuten deutlich durch Flammen die vom oberen Ende des Probekörpers zurück in den Testraum schlagen.

Die Temperatur im Abgasstrom hat zu diesem Zeitpunkt einen Wert von 140 °C überschritten und die ersten Bretter sind durch die beidseitige Beanspruchung bereits soweit verbrannt, dass sie aufreißen. Nach 17 Minuten wird der Test aufgrund der weiterhin ansteigenden Temperaturen abgebrochen. Die Konstruktion steht im Vollbrand und muss von beiden Seiten gelöscht werden.

Den wesentlichen Beitrag zum Brandgeschehen hat bei diesem Versuch der Fassadenteil oberhalb der horizontalen Fuge beigetragen. Hier sind große Teile insbesondere der Rückseite verbrannt (vgl. Abbildung 92). Dahingegen hat der untere Teil der Konstruktion der Beflammung gut standgehalten.

An dieser Stelle zeigt sich deutlich, dass mit der Kombination aus pyrolysierte Fichte und dem Auftrag von Wasserglas auch bei einer Boden-Deckel-Schalung ein deutlich erhöhter Feuerwiderstand erzielt werden kann. (Vgl. auch Bildanhang, Abbildungen 227-229 und 311-328.)

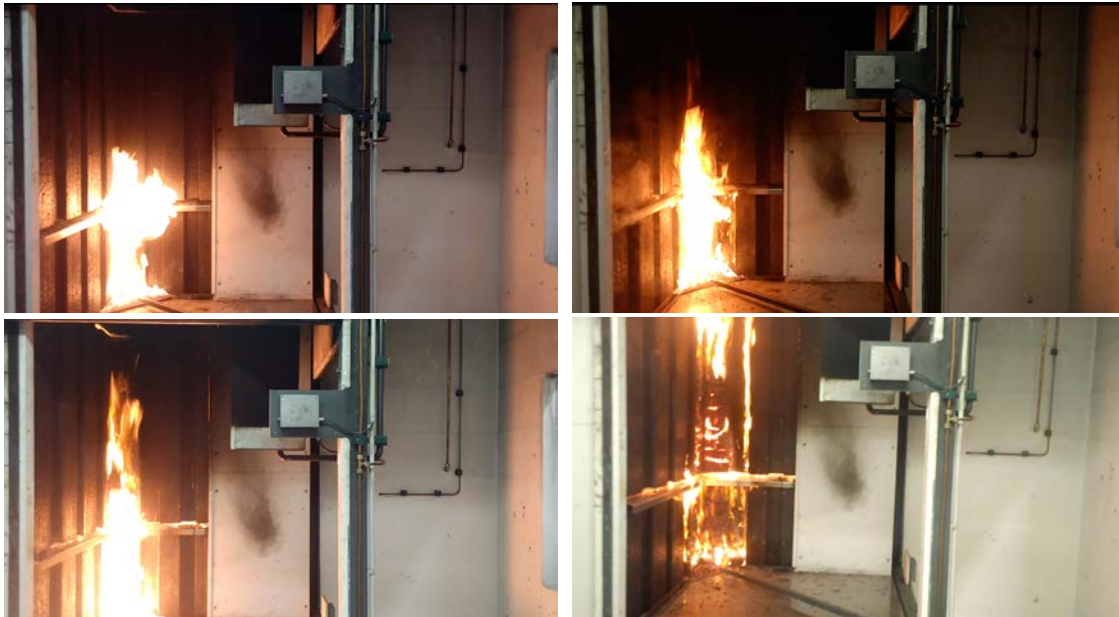


Abbildung 93 bis 96

SBI-Test 5: Testverlauf: Minute 1, Minute 6, Minute 13, Minute 17 (Abbruch des Tests).

Um das Fassadensystem mit horizontaler Fuge so zu verbessern, dass eine Klassifikation erreicht werden kann, muss einerseits verhindert werden, dass das Feuer die horizontale Fuge überspringen kann, andererseits muss durch weitere Maßnahmen das Entzünden der Rückseiten verhindert werden. Verbesserungen können hier einen deutlich vergrößerten Überstand aber auch eine Pyrolyse und Imprägnierung der Rückseite der Bretter erreicht werden. Eine Unterkonstruktion aus unbrennbaren Materialien wie beispielsweise Blechprofilen kann die Brandlast ebenfalls deutlich reduzieren. Diese Maßnahmen sollten in einem Folgeprojekt verifiziert werden.

## 5.5.8 Zusammenfassung und Auswertung der SBI-Tests und Ausblick

Mit den SBI-Tests konnten die Verbesserungen des Feuerwiderstands, die durch die pyrolysierten beziehungsweise beschichteten Oberflächen erreicht wurden, deutlich aufgezeigt werden (vgl. Tabelle 6). Es lassen sich darüber hinaus weitere Erkenntnisse zum Material und der Konstruktion gewinnen:

Im Vergleich unbehandelter Fichte (Rundversuche der DIN)<sup>100</sup> mit dem Probekörper aus pyrolysierte Fichte (SBI-Test 3), konnte bereits eine Verbesserung von der Klasse "D" und damit der Kategorie "normalentflammbar" zu "C" und damit der Kategorie "schwerentflammbar" erreicht werden. Diese steht allerdings unter dem Vorbehalt der Wiederholung an weiteren Probekörpern.

Die deutlichste Verbesserung zeigte sich bei dem Probekörper aus Fichte, dessen pyrolysierte Oberfläche zusätzlich mit Wasserglas imprägniert wurde (SBI-Test 1). Mit dieser Oberflächenbehandlung lässt sich die Zuordnung zur Klasse "B" problemlos erreichen.

Damit sind auch die im Forschungsprojekt gesetzten Ziele erreicht: Das getestete Bauprodukt "pyrolysierte Fichte, mit Natriumwasserglas imprägniert" gilt in der Anwendung als Leisten-Deckel-Schalung als "schwerentflammbar" und dürfte somit für Fassaden bis einschließlich Gebäudeklasse 5 verwendet werden.

| SBI-Test |                                                                                     | Material | Pyrolyseschicht | Wasserglas-Imprägnierung | Klassifikation  | vorzeitiger Abbruch |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------|--------------------------|-----------------|---------------------|
| 0        | -                                                                                   | Fichte   | -               | -                        | "D", "s1", "d0" | -                   |
| 1        |  | Fichte   | ca. 1 mm        | ja                       | "B", "s1", "d0" | -                   |
| 2        |  | Lärche   | ca. 1 mm        | ja                       | /               | ja                  |
| 3        |  | Fichte   | ca. 1 mm        | -                        | "C", "s1", "d0" | -                   |
| 4        |  | Eiche    | ca. 1 mm        | -                        | -               | ja                  |
| 5        |  | Lärche   | ca. 1 mm        | ja                       | -               | ja                  |

Tabelle 6: Übersicht der Ergebnisse des SBI-Tests und der erreichten Klassifikationen

Den Ausschlag für die Zuordnungen der Probekörper zu den unterschiedlichen Klassen bildet der jeweilige Beitrag zum Brandgeschehen. Das wesentliche Kriterium stellen hierbei die Temperaturverläufe im Abgasstrom dar, welche bei dem Test automatisch aufgezeichnet werden.

<sup>100</sup> vgl. DIN EN 13823; Tabelle B.1 – Im SBI-Rundversuch geprüfte Materialien: In der Norm sind als Vergleich Messwerte für unterschiedliche Materialien als Mittelwert der Prüfergebnisse von 13 unterschiedlichen Laboren aufgeführt. Unter Code M12 werden die Werte für Fichtenholz (Bauholz) angegeben.

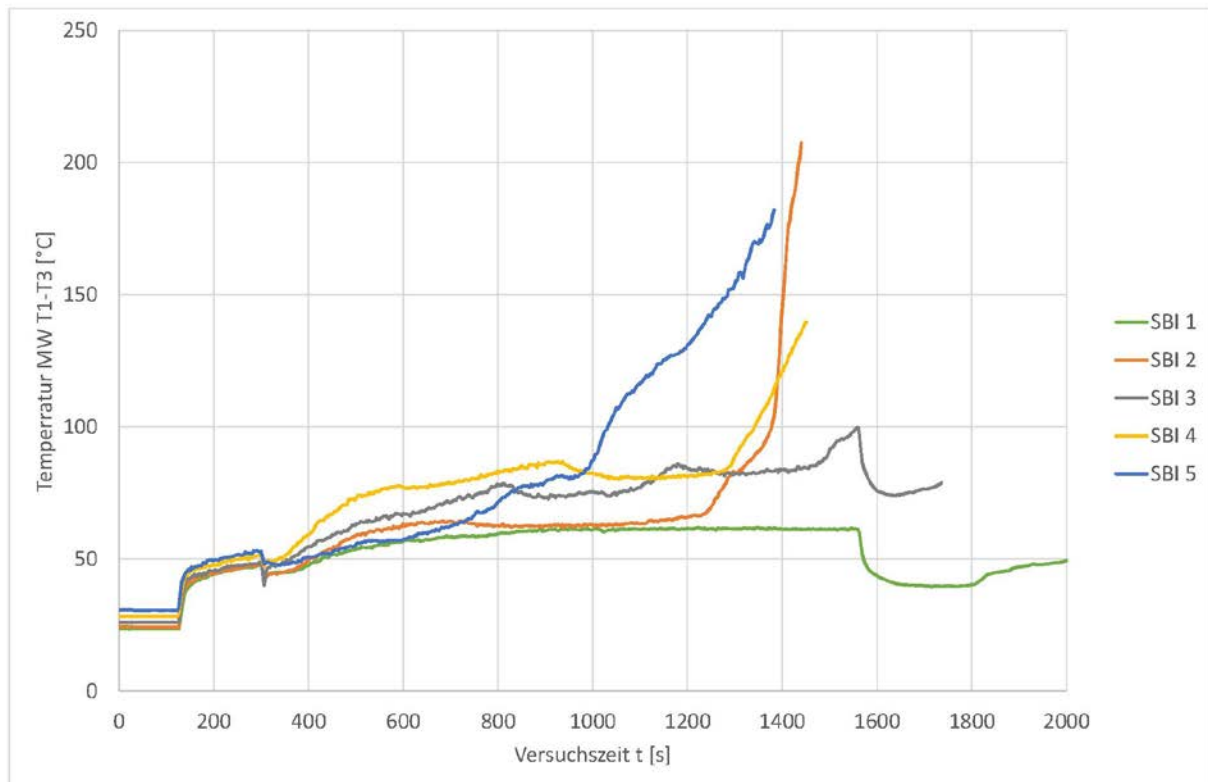


Tabelle 7: Vergleichende Übersicht des Temperaturverlaufs während der SBI-Tests als Mittelwert von zwei Messsensoren im Abgasstrom. Quelle: Prüfbericht BAM

Beim Vergleich der einzelnen Temperaturkurven wird deutlich, wie sich der spezifische Brennwert der unterschiedlichen Holzarten auswirkt. Selbst wenn nur geringe Teile der Oberflächen von Holzarten mit einem höheren Brennwert in Brand geraten, ist der Beitrag zum Brandgeschehen derart hoch, dass die Tests aufgrund der hohen Abgastemperaturen abgebrochen werden mussten (vgl. SBI-Test 2 und 4).

Das aufgetragene Wasserglas hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Erhöhung des Feuerwiderstands. Da bei den Testreihen zur Imprägnierung für jede Holzart eine unterschiedliche Aufnahmekapazität an Wasserglas aufgezeigt werden konnte (vgl. Tabelle 3) und die Erhöhung des Feuerwiderstands in direktem Zusammenhang zur tatsächlich aufgetragenen Menge an Wasserglas steht, wird es erforderlich sein, für jede Holzart separate Testreihen mit unterschiedlich starken Pyrolyseschichten und Wasserglasbeschichtungen durchzuführen. Es zeichnet sich aber ab, dass eine Klassifikation ohne den zusätzlichen Auftrag von Wasserglas nicht zu erreichen sein wird.

Die SBI-Tests haben zudem gezeigt, dass sowohl die unterschiedlichen Bekleidungsarten als auch die Art der Unterkonstruktion (Anzahl der Lattungsebenen) einen weiteren Einfluss auf die Brandentwicklung haben. Aufgrund des kritischen Einflusses der Kanten horizontaler Fassadensysteme (Stülpchalungen), scheint eine Verbesserung des Feuerwiderstands hier kaum in einem solchen Maße möglich zu sein, dass eine „Schwerentflammbarkeit“ erreicht werden kann. Eine weitere Testreihe, bei der eine Stülpchalungen aus nicht-profilierten, pyrolysierten und mit Wasserglas behandelten Fichtenbrettern geprüft werden, könnte hier weitere Erkenntnisse liefern.

Der SBI-Test, bei dem eine Fassade mit horizontaler Fuge getestet wurde, macht deutlich, dass das Eindringen von Flammen in die Luftschicht in jedem Fall verhindert werden muss. Damit können im

Umkehrschluss offene Bekleidungssysteme – sowohl bei horizontaler wie vertikaler Ausrichtung – von vornherein ausgeschlossen werden.

Der Einsatz von Bauprodukten mit pyrolysierten Oberflächen kann nur in einer Kombination aus der jeweiligen Holzart, der gewählten Beschichtung und einem entsprechenden Fassadensystem aus Bekleidung und Unterkonstruktion zur gewünschten Erhöhung des Feuerwiderstands führen. Die SBI-Tests haben gezeigt, dass sich kompakte Bekleidungen mit einem geringen Anteil an Kanten, mit schmalen Fugen und einer hohen Überdeckung der beiden Brettebenen gut eignen (siehe SBI-Test 1). Weitere Verbesserungen können durch die beidseitige Pyrolyse der Bretter und durch den Einsatz nicht-brennbarer Unterkonstruktionen beispielsweise aus Blech erreicht werden.

Der Prüfbericht BAM mit weiteren Messkurven findet sich im Anhang.

## 5.6 Langzeitbewitterung – Freibewitterung nach DIN 2810



Abbildung 97 und 98

Visualisierung von Fassadenvarianten für die Pyrolyseanlage. Leisten-Deckel Schalung mit breiten Brettern (links), horizontale Stülpchalung (rechts).

Fassaden mit pyrolysierten Oberflächen können nur dann wegen ihrer verbesserten Brandschutzeigenschaften eingesetzt werden, wenn die den Feuerwiderstand bedingende Pyrolyseschicht dauerhaft erhalten werden kann. Mit den Bewitterungstests in der Bewitterungskammer war versucht worden, eine andauernde Beanspruchung zu simulieren. Mit den Fassaden am Pyrolysecontainer soll jetzt die Dauerhaftigkeit der unterschiedlichen Oberflächen unter Realbedingungen getestet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Bewitterung im Labormaßstab und den unterschiedlichen Tests zur Stabilisierung der Oberflächen ist ein Setup für Musterfassaden entstanden, die der natürlichen Bewitterung über einen längeren Zeitraum ausgesetzt werden. Ziel ist, den Einfluss von UV-Strahlung, Niederschlag und Wind zu testen und unterschiedliche Bekleidungsarten hinsichtlich ihrer Resistenz untereinander zu vergleichen<sup>101</sup>. Dabei ist es auch wichtig, dass nicht nur die Oberfläche des Materials, sondern die Einbausituation anhand unterschiedlicher Fassadensysteme getestet wird. Es werden horizontale und vertikale Fassadenaufbauten untersucht.

Der Test dient insbesondere auch dazu herauszufinden, wie bestimmte Detaillösungen (Außenecken, Fensteranschlüsse, Bodenanschlüsse etc.) mit den vorab pyrolysierten Fassadenbrettern konkret ausgeführt werden können und welche Unterschiede sich beim Aufbau im Vergleich mit herkömmlichen Fassadenaufbauten ergeben, bei denen die finale Oberflächenbehandlung erst nach Fertigstellung vorgenommen wird. Insbesondere während des Abbauprozesses können Erkenntnisse gewonnen werden, die unabdingbar sind für die Prüfung der Evidenz der unterschiedlichen vorgeschlagenen Methoden der Oberflächenertüchtigung.

<sup>101</sup> vgl. Gengnagel/Pfriem, Abschlussbericht PyroForCE 1.0

## 5.6.1 Versuchsaufbau

Der Versuch wird an der Pyrolyseanlage auf dem Campus der HNEE in Eberswalde<sup>102</sup> durchgeführt. Der Container ermöglicht die allseitige Montage der Testfassaden und somit eine Ausrichtung in alle Himmelsrichtungen. Da der Container konstruktionsbedingt nur an bestimmten Stellen für die Befestigung einer Fassade geeignet ist, wurden zunächst C-Montageschienen der Firma Würth<sup>103</sup> angebracht, welche die Grundlage der weiteren Fassadenkonstruktion bilden und die es gleichzeitig ermöglichen, einzelne, fertig montierte Fassadenelemente gegeneinander auszutauschen. Damit können immer wieder andere Fassadentypen getestet werden oder einzelne Fassadenelemente lassen sich versetzen und damit unterschiedlichen Bewitterungssituationen auszusetzen. Abweichend von der DIN EN ISO 2810 *Beschichtungsstoffe – Freibewitterung von Beschichtungen – Bewitterung und Bewertung* werden alle Flächen vertikal angebracht. Im Falle von Fassaden entspricht dies ohnehin der regulären Einbausituation. Alle zur Dokumentation erforderlichen Wetterdaten können von der Wetterstation des Campus in Eberswalde bezogen werden.

## 5.6.2 Fassadentypen und Holzarten

Es werden folgende Fassadentypen, Holzarten und Oberflächenbeschichtungen getestet:

|     |                  |                        |                                      |
|-----|------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1.  | Fichte           | Boden-Leisten Schalung | Natrium-Wasserglas, tauchimprägniert |
| 2.  | Fichte           | Boden-Leisten Schalung | Epoxidharz                           |
| 3.  | Fichte           | Boden-Leisten Schalung | unbehandelt                          |
| 4.  | Fichte           | Stülpchalung           | Natrium-Wasserglas,                  |
|     | tauchimprägniert |                        |                                      |
| 5.  | Fichte           | Stülpchalung           | Epoxidharz                           |
| 6.  | Fichte           | Stülpchalung           | unbehandelt                          |
| 7.  | Lärche           | Boden-Leisten Schalung | Natrium-Wasserglas,                  |
|     | tauchimprägniert |                        |                                      |
| 8.  | Lärche           | Boden-Leisten Schalung | Epoxidharz                           |
| 9.  | Lärche           | Boden-Leisten Schalung | unbehandelt                          |
| 10. | Lärche           | Stülpchalung           | Natrium-Wasserglas,                  |
|     | tauchimprägniert |                        |                                      |
| 11. | Lärche           | Stülpchalung           | Epoxidharz                           |
| 12. | Lärche           | Stülpchalung           | unbehandelt                          |

Für die Imprägnierung der Probekörper wird Natriumwasserglas verwendet, da es bei den Voruntersuchungen die besten Ergebnisse gezeigt hatte. Da sich Beschichtungen mit Epoxidharz als sehr witterungsbeständig erwiesen haben, wurden derart oberflächenstabilisierte Probefassaden als Vergleich mit hinzugenommen. Fassadenelemente mit pyrolysierten Oberflächen, aber ohne weitere Beschichtungen, dienen ebenfalls als Vergleich, um auch hier den natürlichen Verwitterungsprozess dokumentieren zu können, beziehungsweise um zu zeigen, wie sich die Kohleschicht mit der Zeit abnutzt.

Auf eine vergleichende Untersuchung mit Zementschlämmen wurde verzichtet, da sich diese bereits in den Voruntersuchungen als untauglich erwiesen hatte.

<sup>102</sup> geographische Lage: 52°49'25.9"N 13°48'27.5"E

<sup>103</sup> C-Montageschiene MNTGSHN-C-26/18-A4-ST1,25 mit Hammerkopfbefestigung A4-PRFL26/28-M8X50

### 5.6.3 Vorbereitung und Montage



Abbildung 99 und 100

Musterfassaden am Pyrolysecontainer: Planung und Ausführung

Als Ausgangsmaterial für die Fassadenelemente der Langzeitbewitterung diente ungehobelte Brettware. Die einzelnen Fassadenbretter wurden vorab auf die richtigen Abmessungen gebracht, um bei der Montage keine weitere Beschädigung der Oberfläche zu verursachen und erst dann in der Pyrolyseanlage pyrolysiert. Hierfür wurde zunächst eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 m/min gewählt und der Brenner mit einem Gasgemisch von 14 Liter Propangas/min und 130 Liter Druckluft/min betrieben. Aufgrund der hohen Außentemperaturen zum Zeitpunkt dieser Pyrolyse, konnte die Vorschubgeschwindigkeit auf 0,25 m/min gesteigert werden. Die Imprägnierung mit Wasserglas erfolgte dann unter Vakuum im Vakuumsack. Bei den vergleichenden Versuchen mit Epoxidharz, wurde das Harz mit einer kurzfasrigen Malerrolle aufgetragen. Der Auftrag erfolgte bei einem Teil der Fassadenbretter vor der Montage, bei einem anderen erst an der fertiggestellten Fassade.



Abbildung 101 bis 103

Die C-Schiene dient der Befestigung der Traglatten. Es können horizontal und vertikal verlaufende Latten befestigt werden.

Damit die Außenhaut des Containers durch das Anbringen der Fassadenelemente nicht beschädigt wird, wurden zunächst eine C-Schienen mit Nieten an der bestehenden Blechfassade montiert. Diese Schienen übernehmen die Funktion einer Traglattung und bilden so die Arbeitsebene für den weiteren Fassadenaufbau. Hierauf wird in einem zweiten Schritt eine weitere Unterkonstruktion aus 40 x 60 mm starken Dachlatten aus Fichte montiert. Die C-Schienen erlauben es, diese Traglatten sowohl horizontal als auch vertikal darauf zu befestigen. Die eigentliche Verbindung von Lattung und C-Schiene erfolgt mit T-Schrauben. Dabei werden die Latten lediglich mit Hilfe einer Unterlegscheibe gegen die Schiene geklemmt.

Diese Unterkonstruktion dient jetzt dem Aufbau der einzelnen Fassadenelemente. Der Aufbau erfolgt in einzelnen 50 cm breiten und 250 cm hohen Segmenten vor Ort nach den Fachregeln des Zimmererhandwerks. Nach der vollständigen Montage lassen sich die einzelnen Segmente samt ihrer Traglattung durch das Lösen der T-Schrauben als Ganzes abnehmen. Damit können die fertigen Elemente leicht ausgetauscht, beziehungsweise gewechselt werden.



Abbildung 104  
Fassadensystem: C-Schiene, Lattung, Bekleidung (hier: Stülp-schalung)





Abbildung 105 bis 108  
Fassaden am Pyrolysecontainer zu unterschiedlichen Zeiten der Fertigstellung

## 5.6.4 Erste Beobachtungen aus dem Aufbau

### Montage der pyrolysierten Fassadenelemente:

Die Montage der pyrolysierten Fassadenbretter verlangt ein sehr vorsichtiges Arbeiten, um die empfindliche Kohleschicht nicht zu zerstören. Ein Abfärben ist jedoch kaum zu vermeiden. Bereits der Transport muss mit größter Sorgfalt erfolgen und idealerweise werden die einzelnen Bretter hierfür so gestapelt, dass die pyrolysierten Seiten jeweils aufeinander liegen. Bei der Montage kommt es zwangsläufig zu örtlichen Beschädigung der pyrolysierten Oberfläche, welche sich aber nachträglich mit den entwickelten Handgeräten ausbessern ließen. Bei der Befestigung der Bretter mit Schrauben konnte auf das Vorbohren verzichtet werden, da die Schraubenköpfe leicht in die weiche Pyrolyseschicht eindringen, ohne diese zu spalten.

### Montage der pyrolysierten und beschichteten Fassadenelemente

Der Transport der mit Wasserglas imprägnierten Fassadenhölzer ist unproblematisch und es besteht keinerlei Gefahr des Abfärbens der Oberfläche. Allerdings zeigte sich insbesondere bei der Keilschalung aus Lärche das Problem, dass überschüssiges Wasserglas in den Nuten die Montage erschwerte. Beim Zusammenfügen wurden die Kanten teilweise örtlich beschädigt, und kleinere Fragmente der Oberfläche abgesprengt. Im Fall der gespundeten Fassadentypen werden diese Beschädigungen aber durch die darüberliegenden Schichten wieder verdeckt. Um Abplatzungen der spröden Oberfläche bei der Befestigung der Fassadenbretter mit der Unterkonstruktion zu verhindern, wurden alle Löcher vorgebohrt. Dies bedeutet einen erheblichen Mehraufwand bei der Montage.

Einen kritischen Punkt bildeten alle Stellen, an denen die vorgefertigten Bretter während der Montage noch angepasst werden mussten. Die Beschichtung mit Wasserglas macht es unmöglich, neue Schnittstellen nachträglich zu pyrolysieren, ohne dass das Wasserglas aus benachbarten Bereichen sintert. Für diese Anwendungen sind auch die entwickelten Handgeräte untauglich.

Damit sind montagebedingte Korrekturen unbedingt zu vermeiden. Inwieweit nachträgliche Schnitte durch Vorplanung auch bei komplexen Fassaden vermieden werden können, ist fraglich. Möglicherweise ist es genau wegen der späteren nicht abschätzbaren Montageabläufe nicht möglich, die Pyrolyseschicht vorab aufzubringen und es müssen Verfahren für ein nachträgliches Aufbringen der Wassergläser gefunden werden.

## 5.6.5 Erste Beobachtungen aus der Langzeitbewitterung

Bei den mit Wasserglas imprägnierten Probekörpern zeigte sich bereits nach wenigen Tagen Veränderungen der Oberflächen. Beschichtete Hölzer, die zunächst bei normalem Klima in Innenräumen gelagert wurden, zeigten bereits nach wenigen Tagen oberflächlich feine, weißliche Schleier, der allerdings mit Wasser entfernt werden konnten. Bei diesem Schleier handelt es sich vermutlich um Kieselgel, als Reagenz des alkalischen Wasserglases mit den Holzsäuren. Dieser Schleier war stärker bei den Probekörpern, die mit Natriumwasserglas behandelten worden waren.

Die Fassadenbretter, die unter freiem Himmel als Musterfassade am Pyrolysecontainer montiert wurden, zeigten ein völlig anderes Verhalten während der Bewitterung, als die Probekörper während den Vortests in der Bewitterungskammer. Im Gegensatz zu den Bewitterungstest im Labor, kam es bei der Freibewitterung der mit Wasserglas beschichteten Fassadenbrettern binnen Tagen zunächst zu einer leichten Vergrauung der Oberfläche. Nach längerer intensiver Sonneneinstrahlung, trübten sich die Oberflächen dann vollständig weißlich ein. Dieses Phänomen zeigt sich bei allen Holzarten und Fassadentypen, die mit Natriumwasserglas tauchimprägniert wurden.

Eine Ursache für diese Eintrübung der Oberfläche liegt darin, dass es bei dem Wasserglas, welches an der Oberfläche einen dünnen Film gebildet hatte, zu Spannungsrissen kommt. Wahrscheinlich tritt dieses Phänomen erst bei der Freibewitterung auf, da die schwarzen Oberflächen der pyrolysierten Hölzer durch die direkte Sonneneinstrahlung deutlich stärker erhitzt werden, als durch die UV-Strahlung der Bewitterungskammer. Während die Probekörper in der Bewitterungsanlage einer voreingestellten Temperatur von 60 °C ausgesetzt waren, erreichen die Oberflächentemperaturen an den vertikalen Fassaden der Freibewitterung über 80 °C. Die durch dieser hohen Temperaturdifferenzen hervorgerufenen Dehnungen führen zu Spannungen in der extrem spröden Wasserglasschicht, welche letztlich in mikroskopisch kleinen Segmenten aufreißt. Diese feinen Risse bewirken die Eintrübung der Oberfläche und lassen sie weißlich erscheinen.

Die Veränderungen dieser mit Wasserglas beschichteten Pyrolyseschichten schreiten dauerhaft voran. Die Oberfläche beginnt an einzelnen Stellen aufzureißen und sich abzulösen. Letztlich kommt es in Teilbereichen zu einer vollständigen Ablösung der Pyrolyseschicht (siehe Abbildung 111). Die Stärke der Abplatzungen entspricht der Dicke der gesamten Pyrolyseschicht und erstreckt sich damit bis in die Zone, in denen das native Holz während des Pyrolyseprozesses karamellisiert, aber noch nicht vollständig pyrolysiert wurde. Diese Zone verbleibt auf den Fassadenbrettern.

Die Ursache für dieses vollständige Ablösen der Pyrolyseschicht bei den tauchimprägnierten Probekörpern scheint in dem stark unterschiedlichen Quell- und Schwindmaß der imprägnierten Pyrolyseschicht einerseits und des darunterliegenden nativen Holzes andererseits zu liegen. Während sich das native Holz bei Zu- beziehungsweise Abnahme der Holzfeuchtigkeit deutlich dehnt, beziehungsweise zusammenzieht, ist die mit Wasserglas durchtränkte Pyrolyseschicht nahezu starr. Die Spannungen an den Grenzschicht führen schließlich dazu, dass die Verbindung in diesen Bereichen aufreißt und sich die Oberflächen ablösen. Die abgelösten Schichten besitzen selbst keinerlei Resistenz mehr gegen mechanische Belastungen und lassen sich leicht zwischen den Fingern zu feinem Pulver zerreiben.

Neben diesen auf unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften basierenden Effekten, spielen wahrscheinlich auch chemische Prozesse eine Rolle, bei der Zersetzung der imprägnierten Pyrolyseschichten. So scheinen die Holzsäuren das Verkieseln der Wassergläser stark zu beschleunigen, was letztlich zur Erhöhten Bildung von Kieselgel an der Oberfläche führt. Die einzelnen Holzarten mit ihren jeweils spezifischen PH-Werten zeigten hier deutliche Unterschiede. An

dieser Stelle müsste der genaue Zusammenhang durch weitere Versuche belegt werden. Diese übersteigen allerdings den im Forschungsprojekt PyroForCE gesetzten Rahmen.



Abbildung 109 bis 112

Zerstörung der mit Wasserglas imprägnierten Pyrolyseschicht: Abb. 81: Vergleich von beschichteten (links) und unbeschichteten Fassadenelementen; Abb. 82 bis 84: Zerstörung der Oberfläche in unterschiedlichen Stadien bis zur vollständigen Ablösung der Oberfläche (rechts unten).

Die als Vergleich montierten Fassaden mit nur pyrolysierten Oberflächen zeigten in den ersten Wochen des Bewitterungstests keine signifikanten Veränderungen. Hier hatte auch die intensive Sonneneinstrahlung keinerlei Auswirkungen auf die Fassaden. Da der bisherige Beobachtungszeitraum in den Sommer fiel, waren die Fassaden bislang kaum Regenereignissen ausgesetzt. Begünstigend kommt hinzu, dass die nur eingeschossigen Fassadenelemente durch einen im Verhältnis relativ großen Dachüberstand geschützt sind. Die weiteren Veränderungen der Fassadenoberflächen werden fortlaufend beobachtet, um auch dokumentieren zu können, welchen Einfluss beispielsweise Frost auf die Pyrolyseschicht hat. Aus den Erkenntnissen lassen sich dann auch Rückschlüsse ziehen, wie eine Bewitterung pyrolysierter Oberflächen besser im Labormaßstab simuliert werden kann.

## 5.6.6 Verbesserungen und Ausblick

Eines der Probleme bei den bisherigen Ansätzen zur Imprägnierung bestand darin, dass die geschlossene Wasserglasschicht an der Oberfläche reißt und diese mikroskopischen Risse zu einer Eintrübung der Oberfläche führen. Um dieses Einreißen zu vermeiden, wird zunächst das Imprägnierverfahren angepasst: Überschüssiges Wasserglas, welches nicht in die Pyrolyseschicht eingedrungen ist, wird unmittelbar nach dem Imprägnieren mit einem Pinsel entfernt.

Um ein möglichst tiefes Eindringen des Wasserglases zu ermöglichen, werden für die weiteren Untersuchungen auch die Imprägnierlösungen verändert: Zunächst wird getestet, inwieweit mit verdünnten und temperierten Lösungen das Wasserglas bei gleichbleibender Auftragsmenge tiefer in die Kohleschicht eingebracht werden kann. In einem nächsten Schritt sollen Mischungen aus Natrium- und Kaliumwasserglas getestet werden. Dieses sogenannte "Fixierungswasserglas" wurde schon durch von Fuchs beschrieben<sup>104</sup> – gerade auch im Zusammenhang mit dem Ziel, das "Ausblühen" von Kieselgel und damit das Entstehen eines Schleiers auf der Oberfläche zu verhindern. Idealerweise gelingt es, mit "Fixierungswasserglas" als Imprägniermittel einen dauerhaften Schutz der Pyrolyseschicht zu gewährleisten.

Ein weiterer Nachteil der bisher gewählten Methode, die pyrolysierten Fassadenbretter vor der Montage zu imprägnieren, besteht in dem erheblichen Planungsaufwand, da jedes einzelne Brett bereits vor der Pyrolyse auf das richtige Maß gebracht werden muss. Die war trotz sorgfältiger Vorarbeit bereits für die Erstellung der Musterfassaden nicht gelungen. Eine Übertragung dieses Prozesses in einen regulären Bauablauf scheint kaum möglich. Das (semi-)stationäre Imprägnierverfahren einerseits und die erforderlichen Trocknungszeiten erschweren den Bauablauf darüber hinaus erheblich.

Der gravierendste Schwachpunkt für eine technische Anwendung der gewählten Methode besteht allerdings darin, dass nach dem Auftrag von Wasserglas keinerlei Ausbesserungen der Pyrolyseschicht mehr möglich sind, ohne diese Wasserglasschicht (lokal) wieder zu zerstören. Nicht zuletzt bei der Montage der Musterfassaden für die Freibewitterung hatte sich gezeigt, dass die für ein derartiges Bauverfahren erforderliche vollständige Vorkonfektionierung der einzelnen Bauelemente der Baupraxis zuwiderläuft. Der Fokus weiterer Untersuchungen muss also darauf gelegt werden, Verfahren zu entwickeln, bei denen die Imprägnierung erst nach der Montage aufgebracht werden kann. In diesem Kontext müssen auch mehrstufige Verfahren, mit denen der Untergrund der Fassadenbretter auf den Auftrag von Wasserglas vorbereitet wird, untersucht werden, um die Vorteile der bisher angewendeten Unterdruck-Imprägnierung zu substituieren. Alleine aus diesen Problemstellungen ergeben sich neue Forschungsfragen, die den bisherigen Projektrahmen erweitern.

---

<sup>104</sup> vgl. von Fuchs 1857, Seite 10f. „Fixirungs-Wasserglas und Darstellung desselben.“

„Lange Zeit war ich der Meinung, dass das gewöhnliche mit Kieselerde vollkommen gesättigte Wasserglas das beste und zu allen Zwecken das brauchbarste sey [...] bis ich das Fehlerhafte dabei erkannte [...] Nachdem ich dieses eingesehen hatte, wurde dem Uebel, [...] bald abgeholfen, indem ich auf den Gedanken kam, dass das Wasserglas zu diesem Zwecke nicht vollkommen mit Kieselerde gesättigt seyn darf. Wenige Versuche bestätigten diese Vernuthung und bestimmten mich nach genauer Erwägung aller Umstände dahin, dem gewöhnlichen und mit Kieselerde vollkommen gesättigten Wasserglas eine Portion Natrumkieselfeuchtigkeit beizugeben; was sich auch ganz zweckdienlich erwies. Dieses Gemisch will ich Fixirungs-Wasserglas nennen. [...] Das vorher trübe oder opalisirende Wasserglas wird dadurch vollkommen wasserklar Und etwas dünnflüssiger. Beim Gebrauche dieses Gemisches beschränkt man sich nicht auf die Stereochromie allein, sondern es kann auch zu manchen anderen Zwecken mit Vortheil benützt werden.“



## 6. Schlussbetrachtung und weiterführende Forschungsfragen

Das Ziel des Forschungsprojektes PyroForCE 2.0 lag in der Entwicklung und Untersuchung von Fassadenelementen für den urbanen Kontext auf der Basis von nativem Holz. Unbehandelte Bauhölzer gelten nach europäischer Klassifikation für Bauprodukte als *“normalentflammbar”* und dürfen somit nur als Fassadenmaterial für Gebäude geringer Bauhöhe<sup>105</sup> verwendet werden. Darüber hinaus ist es erforderlich, den Feuerwiderstand durch das Auftragen von Brandschutzmitteln zu erhöhen. Die hierfür eingesetzten Brandschutzmittel auf petrochemischer Basis sind ökologisch bedenklich, erfordern einen hohen Energieeinsatz und verhindern, dass die Materialien nach Ablauf der Lebensdauer in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können.

Mit der Oberflächenpyrolyse wird eine nachhaltige Methode entwickelt, den Feuerwiderstand nativer Hölzer nur durch das Aufbringen einer Kohleschicht soweit zu verbessern, dass sie als *“schwerentflammbar”* gelten. Damit erfüllen sie die normativen Kriterien für eine Verwendung als Fassadenmaterial im urbanen Kontext. Ein derartiges Bauprodukt kann mit einem geringen Energieeinsatz hergestellt werden und lässt sich durch Kompostierung oder rückstandsfreie thermische Verwertung vollständig in den Stoffkreislauf zurückführen. Die Auswahl der drei untersuchten heimischen Holzarten Fichte, Lärche und Eiche erfolgte ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit.

In dem Vorläuferprojekt PyroForCE 1.0 hatte die grundsätzliche Machbarkeit der Oberflächenpyrolyse aufgezeigt werden können und es wurden weitere Fragestellungen aufgeworfen. Der Fokus von PyroForCE 2.0 lag insbesondere auf drei Schwerpunkten:

1. Entwicklung von Verfahren zur maschinellen Herstellung definierter Pyrolyseschichten auf unterschiedlichen Naturholzoberflächen als Vorstufe industrieller Herstellungsprozesse.
2. Klassifizierung des Bauproduktes “Holz mit pyrolysierte Oberfläche” im Rahmen des Systems europäischer Normierungen und Ermittlung der quantitativen Verbesserung des Feuerwiderstands durch das Verfahren der Oberflächenpyrolyse.
3. Entwicklung und Erprobung von Möglichkeiten der Stabilisierung der pyrolysierten Oberflächen gegen Witterungseinflüsse und mechanischen Beanspruchungen.

---

<sup>105</sup> Bis einschließlich Gebäudeklasse 3 nach Bauordnung der Länder. vgl. auch Abschnitt 2.4

## 6.1 Pyrolysemethode und Pyrolyseanlage

Mit der für das Forschungsprojekt entwickelten Pyrolyseanlage konnten alle für das Projekt notwendigen Probekörper und Muster zuverlässig hergestellt werden. Den wichtigsten Unterschied zu der Versuchsanlage, welche für das Vorgängerprojekt genutzt worden war, bildet die geänderte Wärmequelle. Mit den ursprünglich verwendeten Infrarotstrahlern hatte keine ausreichend starke Pyrolyseschicht erzeugt werden können und die Vorschubgeschwindigkeiten waren zu gering. Durch den Einbau eines Flachbrenners zur Direktbeflammung der Fassadenhölzer konnten die Vorschubgeschwindigkeiten deutlich erhöht werden. Aufgrund der sehr kurzen intensiven Beflammung der Probekörper erlöschen die Flammen jetzt unmittelbar nach der Beflammung und ein nachgeschaltetes Erstickern der Flammen durch eine Inertgas-Einrichtung ist damit nicht notwendig.

Da die Fassadenbretter so nur über einen sehr kurzen Zeitraum der Beflammung ausgesetzt sind, treten während des einseitigen Pyrolyseprozesses kaum Schwindverformungen auf. Damit müssen auch keine weiteren Methoden des Gegenzugs entwickelt werden. Der Betrieb der Brenner mit einem Luft-Gas-Gemisch ermöglicht einerseits einen höheren Energieeintrag und führt andererseits zu einer besseren Energieausbeute des eingesetzten Brenngases Propan. Die vorgeschaltete Gasmischanlage ermöglicht eine genaue Steuerung und Berechnung der zur Pyrolyse eingesetzten Gas- und Energiemengen.

Ein weitere Vorteil des Einsatzes eines Flachbrenners liegt in der gleichzeitigen Pyrolyse von Seitenflächen und Schmalflächen. Während der Beflammung der Seitenflächen (Oberseiten der Bretter) wird durch das seitliche Vorbeistreichen der Flammen an den seitlichen Schmalflächen ebenfalls eine stabile und gleichmäßige Pyrolyseschicht generiert. Damit erübrigt sich die Entwicklung mehrstufiger Verfahren.

Der Prototyp bewährte sich in einer mehrmonatigen Testphase bei der Pyrolyse unterschiedlicher Schnitthölzer. Insbesondere die präzise Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit in Verbindung mit der kontrollierten Zufuhr des Gasgemischs, bildete die Grundlage der Wiederholbarkeit unterschiedlicher Pyrolyse-Experimente und deren wissenschaftlicher Auswertung.

Mit der Anlage konnte ein Herstellungsmethode entwickelt werden, welche leicht auf den Maßstab einer industriellen Produktion skaliert werden kann. Der modulare Aufbau der Anlage ermöglicht es, breitere Brenner einzubauen, mit denen parallel mehrere Bretter pyrolysiert werden können, was einer Vervielfachung der Geschwindigkeit gleichkommt. Die rechnergestützte Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit kann in einer weiteren Ausbaustufe mit einer automatisierten optischen Erkennung der Fassadenbretter kombiniert werden, um beispielsweise im Bereich von verwachsenen Ästen die Geschwindigkeit anzupassen. Als weitere Ergänzungen können mit der Einbindung von Umgebungsparametern, wie Temperatur und Luftdruck, die Vorschubgeschwindigkeiten und das Brenngasgemisch verändert werden, um ein gleichmäßiges Ergebnis bei der Pyrolyse der unterschiedlichen Holzarten zu erhalten.

Für die Pyrolyse montagebedingter Schnittflächen wurden unterschiedliche Handgeräte auf der Basis von Bunsenbrennern entwickelt. Das Verfahren einer nachträglichen Pyrolyse von Schnittflächen, beziehungsweise die Ausbesserung beschädigter Bereiche der pyrolysierten Oberflächen, lassen sich jedoch ausschließlich vor dem Auftrag von Wasserglas durchführen, da dieses andernfalls durch den Energieeintrag der Brenner sofort sintert. Nicht zuletzt aus diesem Grund ist es sinnvoll, zukünftig Verfahren zu entwickeln, bei denen Auftrag von Wasserglas auf die pyrolysierten Fassadenbretter erst nach deren Montage erfolgt.

## 6.2 Stabilisierung der pyrolysierten Oberfläche

In den Voruntersuchungen hatte sich bereits gezeigt, dass die pyrolysierten Holzoberflächen nicht stabil genug sind, um dauerhaft einer Bewitterung oder mechanischem Abrieb standzuhalten. Sofern durch Oberflächenpyrolyse der Feuerwiderstand von Fassadensystemen nachhaltig verbessert werden soll, bedarf es folglich einer zusätzlichen Stabilisierung dieser Oberfläche, um den so gewonnenen Brandschutz auch dauerhaft zu erhalten. In Frage kamen hier insbesondere mineralische Beschichtungen, die keinen eigenen Beitrag zum Brandgeschehen leisten. Neben der Erhöhung der Abriebfestigkeit und der Resistenz gegen Bewitterung spielt demnach die Feuerbeständigkeit eine entscheidende Rolle bei der Auswahl und Prüfung der einzelnen Beschichtungen. Ebenso musste untersucht werden, mit welchen Methoden sich diese Beschichtungen möglichst tief in die Pyrolyseschicht einbringen lassen.

Mit Wasserglas als Imprägnierungsmittel für die Pyrolyseschicht konnte eine Beschichtungsmethode aufgezeigt werden, die traditionell bereits in Verbindung mit nativen Hölzern als Flammschutzmittel verwendet wurde. Die Testverfahren haben gezeigt, dass eine Übertragung dieser Methode auf pyrolysierte Oberflächen prinzipiell möglich ist. Mit Wasserglas wurde so ein Mittel zur Stabilisierung gefunden, welches gleichzeitig einen eigenen Beitrag zur Erhöhung des Feuerwiderstands liefert.

Die erste Auswertung der Langzeitbewitterung zeigt jedoch klar, dass in Bezug auf die Imprägniermethode und der Zusammensetzung des Wasserglases weitere Untersuchungsreihen durchgeführt werden müssen, um eine dauerhafte Stabilisierung der pyrolysierten Oberflächen zu ermöglichen.

### 6.2.1 Voruntersuchungen zur Oberflächenstabilisierung

In Voruntersuchungen wurden neben den später näher betrachteten Wassergläsern auch Zementschlämmen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit, die pyrolysierten Oberflächen zu stabilisieren, getestet. Aufgrund der hohen Partikelgröße der einzelnen Bestandteile der Schlämmen aber auch wegen der hydrophoben Eigenschaften der Pyrolyseschicht konnte es nicht gelingen, einen festen Verband beider Stoffe herzustellen. Mit Epoxidharzen gelingt dies zwar gut - hier wurde die gesamte Pyrolyseschicht durchdrungen und vollständig ausgehärtet - allerdings dienten diese Testreihen nur als Vergleich, um Veränderungen der Oberflächeneigenschaften darstellen zu können. Nachhaltig im Sinne des Forschungsprojektes sind Epoxidharze nicht. Zudem erhöhen sie die Brandlast erheblich. Letztlich wurde daher der Fokus auf die Untersuchung von Beschichtungsvarianten auf der Basis Wassergläsern gelegt.

Mit dem Gitterschnitt-Test und dem Taber-Test wurden gängige Prüfverfahren aus der Möbelindustrie angewandt, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Stabilisierungsmittel und Methoden erfassen zu können. Die Tests liefern Anhaltspunkte zu den Unterschieden der einzelnen Auftragsverfahren, waren letztlich aber untauglich für eine quantitative Bewertung, da die Pyrolyseschichten auch nach dem Auftrag der Stabilisierungsmittel zu weich blieben und damit während der Tests fast immer vollständig zerstört wurden<sup>106</sup>. Für eine genauere Analyse müssten entweder andere, weniger invasive Testmethoden herangezogen, oder eigene Prüfreihen entwickelt werden.

---

<sup>106</sup> Eine Ausnahme bildeten die Beschichtungen mit Epoxidharz. Diese verfestigten die Pyrolyseschichten vollständig und zeigten gute Ergebnisse bei den Taber-Test wie den Gitterschnitt-Tests (vgl. auch Abschnitt 5.2 und 5.3).

## 6.2.2 Imprägnieren mit Wasserglas

Mit Wasserglas konnte ein Material gefunden werden, um die pyrolysierten Oberflächen zu stabilisieren und welches selbst einen weiteren Beitrag zur Erhöhung des Feuerwiderstands mit sich bringt. Es lässt sich leicht aufbringen, ist kostengünstig, biologisch abbaubar und damit nachhaltig.

Mit zwei unterschiedlichen Auftragsverfahren - durch Pinselauftrag und durch Imprägnierung im Unterdruckverfahren - konnten Methoden aufgezeigt werden, die gesamte Pyrolyseschicht zu durchdringen und sie damit gegen Abrieb und Bewitterung zu stabilisieren. Bei beiden Verfahren werden die Hölzer zunächst pyrolysiert, bevor der Auftrag der Wasserglaslösungen erfolgt. Diese so vorbehandelten Fassadenbretter bilden das Ausgangsmaterial für den Bau der Fassaden. Für die Fassadenausschnitte der Brandtest konnte das Verfahren ebenso angewandt werden, wie für die Musterfassaden der Langzeitbewitterung. Allerdings war der Planungsaufwand für diese vergleichsweise kleinen Fassadenausschnitte bereits erheblich. Alle Fassadenbretter mussten vor der Pyrolyse auf die später erforderlichen Maße zugeschnitten werden, da bereits mit Wasserglas imprägnierte Flächen nicht nachträglich pyrolysiert werden können und nicht-pyrolysierte Schnittkanten unbedingt vermieden werden müssen.

Insbesondere die Methode der Imprägnierung im Unterdruckverfahren zeigte sich als sehr aufwändig, da im Vakuumsack immer nur wenige Bretter parallel imprägniert werden konnten und das Verfahren so mit langen Wartezeiten verbunden war. Hier könnte ein industrialisierter Prozess auf der Basis großer Autoklaven eine deutliche Verbesserung bringen.

Mit der Methode des Pinselauftrags konnte aufgezeigt werden, dass mit einem vergleichsweise einfachen Verfahren das Wasserglas tief genug in die Pyrolyseschicht eingebracht werden kann. Diese Methode eignet sich auch für den Auftrag an bereits montierten Fassaden. Dies ermöglicht einen veränderten Montagevorgang des Fassadensystems. Die einzelnen Bretter können vorab pyrolysiert werden. Die Montage der Fassaden aus diesen „Halbzeugen“ kann jetzt analog zum Aufbau traditioneller Fassaden aus unbehandelten Hölzern erfolgen. Neue Schnittkanten können mit den im Forschungsprojekt entwickelten Geräten zur Kantenbeflammung nachträglich wieder pyrolysiert werden. Der Auftrag des Wasserglases erfolgt dann erst an der fertiggestellten Fassade. Diese Methode erlaubt zudem mehrstufige Beschichtungsmethoden, bei denen der pyrolysierte Untergrund auf den Auftrag des Wasserglases vorbereitet wird. Reparaturen und Erneuerungen innerhalb festgelegter Wartungszeiträume lassen sich ebenfalls leicht durchführen.

## 6.3 Zusammenfassung der SBI-Tests und der getesteten Fassadentypen

Mit dem Fassadensystem aus pyrolysierten und mit Natrium-Wasserglas imprägnierten Fichtenholzbrettern als (vertikale) Leisten-Deckel-Schalung (SBI-Test Nr.1) konnten alle zur Klassifizierung notwendigen Anforderungen erfüllt werden. Hierfür sind mehrere Aspekte verantwortlich: Fichtenholz hat mit 1211 kWh/rm einen vergleichsweise niedrigen Brennwert und leistet somit selbst nur einen geringen Beitrag zum Brandgeschehen. Hier zeigt der Vergleich mit der getesteten Lärche (1581 kWh/rm) und Eiche (1920 kWh/rm) deutlich, dass die Wahl der Holzart einen großen Einfluss auf das Brandgeschehen und damit die Messwerte der SBI-Tests hat.<sup>107</sup>

Neben den unterschiedlichen Brennwerten haben die Pyrolyseschichten der einzelnen Holzarten ein unterschiedliches Absorptionsvermögen. Bei Fichtenhölzern konnte im Vergleich mit Eiche und Lärche die größte Menge an Wasserglas aufgebracht werden (vgl. Tabelle 3). Da das Wasserglas selbst einen Beitrag<sup>108</sup> zur Erhöhung des Feuerwiderstands leistet, verstärken sich die Effekte bei den Probekörpern aus Fichte.

Die Konstruktion hat ebenfalls einen Einfluss auf das Brandverhalten: Das Fassadensystem der Leisten-Deckel-Schalung hat eine vergleichsweise geringe Oberfläche und einen geringen Anteil an Kanten. Zudem bieten die schmalen Fugen zwischen den Deckbrettern kaum Angriffsflächen für die Beflammung. Aus den Ergebnissen der Probekörper mit einer horizontalen Fuge (vgl. SBI-Tests Nr. 5) wird darüber hinaus deutlich, dass bei der Konstruktion darauf geachtet werden muss, dass alle Flächen die einer Beflammung ausgesetzt sein könnten, eine pyrolysierte und imprägnierte Oberfläche aufweisen müssen. Im Bereich vertikaler Ecken (Innenecke / Aussenecke von Fassaden) müssen abhängig vom Fassadensystem zusätzliche konstruktive Maßnahmen ergriffen werden, um offene Fugen abzudecken und damit das Durchschlagen der Flammen und einer möglichen Entzündung der Unterkonstruktion vorzubeugen. In Übereinstimmung mit den jeweiligen Fassadensystemen müssen hier Sonderlösungen, die sich von den sonst üblichen Richtlinien unterscheiden, entwickelt und getestet werden.

Neben der Holzart und der Stärke der Pyrolyseschicht spielen also die Art der Imprägnierung und insbesondere das Fassadensystem eine Rolle, um eine Klassifikation als "schwerentflammbares" Bauprodukt erhalten zu können. Der Bau von Fassadensystemen muss sehr sorgfältig geplant und gewissenhaft ausgeführt werden, um den notwendigen Feuerwiderstand überall gewährleisten zu können.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich weitere Fassadensysteme ableiten. Für deren Nachweis bedarf es aber jeweils separater Prüfungen, um zu verifizieren, inwieweit sich mit der Kombination der einzelnen Parameter die zur Klassifikation erforderlichen Kriterien erfüllen lassen.

## 6.4 Langzeitbewitterung - Erkenntnisse zur Montage

---

<sup>107</sup> Alle Angaben zu den Brennwerten sind entnommen aus: [www.energie-experten.org](http://www.energie-experten.org)  
vgl. auch SBI-Tests Nr. 2 und 3

<sup>108</sup> vgl. SBI-Tests Nr. 1 und 4: Im Vergleich der nur pyrolysierten Fichtenhölzer mit den zusätzlich auch imprägnierten, zeigt sich eine deutliche Verbesserung.

Bereits beim Aufbau der Fassaden für die Langzeitwitterung konnten wichtige Erkenntnisse für spätere Bauprozess gewonnen werden. Insgesamt zeigte sich, dass der Montageprozess für diese kleine Bauaufgabe gemäß der Richtlinien des Zimmererhandwerks erfolgen konnte. Gängige Befestigungsmittel wie Schrauben und Nägel konnten eingesetzt werden, ohne die pyrolysierten Oberflächen zu beschädigen. Die Entwicklung spezifischer Befestigungslösungen kann also entfallen. Allerdings führte insbesondere der hohe Grad an Vorplanung, der bereits für die Erstellung dieser geometrisch eher einfachen Probekörper notwendig war, zu einem deutlich erhöhten Aufwand. Um die Pyrolyseschicht nicht zu beschädigen mussten Lagerung und Transport der Fassadenbretter mit großer Sorgfalt erfolgen. Dies war insbesondere bei den nur pyrolysierten Oberflächen sehr zeitaufwändig. In diesem Zusammenhang sind semistationäre Pyrolyseverfahren von Vorteil, da so Transportwege minimiert werden können. Nur auf Basis derartiger Anlagen sind Aufbauprozesse denkbar, bei denen die unbehandelten Hölzer zunächst an ihrem späteren Montageort angepasst und entsprechend zugeschnitten werden, bevor sie dann pyrolysiert und schließlich montiert werden. Eine Zwischenlagerung kann so auf Kosten eines komplizierteren Bauablaufs vermieden werden.

Die Erstellung der Probefassaden mit Wasserglasimprägnierungen erfordert einen noch höheren Planungsaufwand, da nachträgliche Schnitte in jedem Fall vermieden werden müssen. Für einfache Fassadensysteme oder bei der Vorfertigung von Wandpaneelen beispielsweise beim Holzrahmenbau<sup>109</sup> kann es vorteilhaft sein, mit bereits imprägnierten Hölzern zu arbeiten. Bei komplexeren Fassaden scheidet diese Methode definitiv aus. Hier müssen zwingend Methoden der Oberflächenfixierung gefunden werden, bei denen das Wasserglas erst auf die fertiggestellte Fassade aufgetragen wird.

## 6.4.1 Langzeitwitterung - erste Erkenntnisse

Veränderungen der pyrolysierten Fassadenmodule:

Die Fassadenmodule, deren pyrolysierte Oberflächen nicht mit Wasserglas imprägniert wurden, zeigten in den ersten Wochen des Tests keine sichtbaren Veränderungen. Mehrere Gründe spielen hier eine Rolle: Einerseits fiel der bisherige Beobachtungszeitraum in den Sommer mit wenigen Niederschlagsereignissen, andererseits sind die eingeschossigen Module durch einen im Verhältnis zu ihrer Höhe relativ großen Dachüberstand gut gegen Witterungseinflüsse geschützt. Dennoch sind gerade bei diesen Probekörpern in den Herbst- und Wintermonaten deutlichere Veränderungen zu erwarten.

Veränderungen der mit Wasserglas beschichteten Fassadenmodule:

Bereits unmittelbar nach der Montage hat sich die Wasserglasschicht an der Oberfläche der Fassadenbretter stark zersetzt. Auslöser war die extreme Sonneneinstrahlung und daraus resultierende Temperaturen von weit über 80 °C auf der Oberfläche. Damit wurde die Wasserglasschicht spröde und hat in den folgenden Wochen dazu geführt, dass sich immer größere Teile der Pyrolyseschicht abgelöst haben und schließlich abgefallen sind. Neben den hohen Temperaturen auf der Fassadenoberfläche ist wahrscheinlich auch eine Reaktion der holzeigenen Säuren mit dem aufgetragenen Wasserglas ursächlich für die Zerstörung der Oberfläche. Dafür spricht, dass dieser Effekt bei Eiche, welches im Vergleich mit den anderen Holzarten den niedrigsten PH-Wert hat, am stärksten auftrat. Hier versprechen Variationen beim Auftrag des Wasserglases aber auch Vorbehandlungen der Fassadenbretter, um den PH-Wert vor dem Auftrag der Wassergläser anzupassen, Verbesserungen. Erste Vorversuche wurden hier als mögliche Vorbereitungen eines Folgeantrages bereits durchgeführt.

---

<sup>109</sup> Mit der Auswahl der Firma Holzbau Opitz war zu Projektbeginn bewusst ein Industriepartner ausgewählt worden, der sich auf den Bau von Häusern in Holzrahmenbauweise spezialisiert hat. Dies implizierte auch die Möglichkeit, die einzelnen Fassadenbretter für die Verwendung seriell vorgefertigter Wandsystemen zu konfektionieren.

Die weiteren Veränderungen der einzelnen Probefassaden werden von Seiten der HNEE über die kommenden Monate dokumentiert und Bestandteil einer weiteren Veröffentlichung sein. An dieser Stelle können auch erste Erkenntnisse zu den Lebenszyklen der einzelnen Beschichtungsvarianten gewonnen werden und daraus Richtlinien für Wartungsintervalle abgeleitet werden.

## 6.5 Forschungsfrage - Forschungsergebnis

Mit dem Forschungsprojekt sollte erkundet werden, inwiefern alleine durch die Pyrolyse der Holzoberfläche der Brandschutz von Fassadenhölzern soweit gesteigert werden kann, dass ein so verändertes Bauprodukt die Klassifikation *“schwerentflammbar”* erhalten kann.

Für Fichtenhölzern konnte gezeigt werden, dass sich alleine nur durch Oberflächenpyrolyse der Feuerwiderstand von Fassadenbrettern bereits soweit verbessern lässt, dass diese die Klassifikation *“C”* *“schwerentflammbar”* gemäß der europäischen Klassifizierung nach DIN 13501-1 erfüllen. Die Verwendung als Fassadenmaterial erfordert jedoch eine Stabilisierung der Oberfläche. Hier galt es, neben einem geeigneten Material auch Methoden des Auftrags zu erproben.

Mit dem Auftrag von Wasserglas auf die pyrolysierten Holzoberflächen wird ein Verfahren aufgezeigt, die Pyrolyseschicht zu stabilisieren und welches gleichzeitig den Feuerwiderstand weiter erhöht. Die so behandelten Fassadenbretter aus Fichtenholz erfüllen die Anforderungen der Klassifikation *“B”* gemäß DIN 13501-1, gelten somit als *“schwerentflammbar”* was eine Verwendung als Fassadenmaterial bis einschließlich Gebäudeklasse 5 ermöglicht. Insofern werden die Ziele des Forschungsprojektes erfüllt. Die Pyrolyse stellt eine nachhaltige Möglichkeit der Erhöhung des Feuerwiderstands von Hölzern dar.

Die Forschungsarbeit beschreibt neben den Methoden der Erstellung der Pyrolyseschicht auch die zur Zulassung erforderlichen Verfahren. Mit den abschließenden SBI-Tests werden die Tauglichkeit der gewählten Methode unter Beweis gestellt und Möglichkeiten für eine Übertragung auf andere Fassadensysteme und damit einer breit gestreuten Anwendung aufgezeigt.

Abweichend von den Voruntersuchungen zur Dauerhaftigkeit der mit Wasserglas stabilisierten Oberfläche zeigen erste Ergebnisse aus der Langzeitwitterung, dass die gewählten Imprägniermethoden nicht dauerhaft sind. Zwar spielt dies für den klassifizierenden SBI-Test zunächst keine Rolle, ist jedoch ein unabdingbares Kriterium für den späteren Einsatz als Fassadenmaterial. An dieser Stelle müssen in weiterführenden Untersuchungen anderer Imprägniermethoden und Zusammensetzungen von Wasserglas dauerhaftere Verfahren gefunden werden.

## 6.6 Weiterführende Forschungsfragen

Aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Test können eine Reihe weiterer Forschungsfragen abgeleitet werden:

Die Klassifizierung von Bauprodukten erfolgt über die beschriebenen SBI-Tests. In dieser Klassifizierung wird ein möglicher Alterungsprozess der Bauprodukte nicht berücksichtigt. Gerade hinsichtlich der witterungsbedingten Veränderung der Oberflächen der pyrolysierten Hölzer und der damit zwangsläufig einhergehenden Verminderung des Feuerwiderstands, müssen hier Methoden gefunden werden, den Alterungsprozess des Materials beschleunigt herbeizuführen, bevor das Bauprodukt getestet wird. Damit geht gleichzeitig die Notwendigkeit einher, Beurteilungskriterien und Messverfahren für den Zustand des Feuerwiderstands an Bestandsfassaden zu ermitteln, Lösungen für die Pflege, Instandhaltung beziehungsweise Instandsetzung zu erproben und diese Wartungsintervallen zuzuordnen. Reparaturlösungen müssen entwickelt werden, mit denen der erhöhte Feuerwiderstand dauerhaft erhalten werden kann. Hier sind insbesondere Verfahren zu erproben, bei denen der Auftrag von Wasserglas nach der Montage erfolgt, wodurch nachträgliche Reparaturanstriche überhaupt erst ermöglicht werden.

Die ersten Ergebnisse der Langzeitbewitterung hatten gezeigt, dass das unverdünnt aufgetragene Natrium-Wasserglas nicht stabil ist und nach kurzer Zeit an der Oberfläche zu Kieselgur umgewandelt wird. Der Grund hierfür liegt unter Anderem an den Holzsäuren, die diesen Prozess begünstigen. Geänderte Zusammensetzungen des aufgetragenen Wasserglases könnten hier eine Verbesserung bringen. Erste Ansätze hierfür sind mit dem "Fixierungswasserglas", einer Mischung aus wenigen Teilen Natriumwasserglas mit einem hohen Anteil an Kaliumwasserglas, bereits bei von Fuchs<sup>110</sup> beschrieben. Ein weiteres Forschungsziel eines Folgeprojekts sollte darin bestehen, mehrstufige Auftragsverfahren zu entwickeln, in denen zunächst der Säuregehalt der Hölzer angepasst wird, bevor entsprechende Wasserglas-Mischungen aufgebracht werden. Hier konnten an ersten Tastversuchen bereits wegweisende Beobachtungen gemacht werden. Für die weitere Forschung sollte versucht werden, Hersteller der Wassergläser beziehungsweise Wasserglas-Farben als Industriepartner zu gewinnen.

Als Alternative zu den notwendigerweise sehr spröden Wassergläsern könnten in weiteren Forschungsansätzen vergleichende Versuche auf zuckerbasierten Materialien erfolgen.

Der Fokus künftiger Forschungen muss darin bestehen, die Dauerhaftigkeit der Oberflächenertüchtigung zu gewährleisten, da nur mit dieser der Brandschutz gewährleistet ist. Eine weitere Forschungsfrage muss folglich darin liegen, für die pyrolysierten Bauprodukte Verfahren einer beschleunigten Bewitterung zu entwickeln, die den tatsächlichen Alterungsprozess besser abbilden. Insbesondere im Vergleich der simulierten Bewitterung in der Bewitterungskammer mit dem Test zur Langzeitbewitterung unter freiem Himmel hatte sich gezeigt, dass eine Ableitung der Messergebnisse nicht oder nur in sehr geringem Umfang möglich ist.

Auch das Themenfeld der Pyrolyseanlage eröffnet weitere Forschungsansätze:

---

<sup>110</sup> vgl. von Fuchs 1857 Seite 10f "Fixirungs-Wasserglas und Darstellung desselben."

"Lange Zeit war ich der Meinung, dass das gewöhnliche mit Kieselerde vollkommen gesättigte Wasserglas das beste und zu allen Zwecken das brauchbarste sey; allein [...] es sich bei der letzten Operation, dem Fixiren der Farben nämlich, sehr nachtheilig gezeigt [...] was eben darin besteht, dass dieses Wasserglas wegen seiner schnell eintretenden theilweisen Zersetzung die Bilder gewöhnlich unrein und fleckig macht [...]. Nachdem ich dieses eingesehen hatte, wurde dem Uebel [...] bald abgeholfen, indem ich auf den Gedanken kam, dass das Wasserglas zu diesem Zwecke nicht vollkommen mit Kieselerde gesättigt seyn darf. Wenige Versuche bestätigten diese Vermuthung und bestimmten mich nach genauer Erwägung aller Umstände dahin, dem gewöhnlichen und mit Kieselerde vollkommen gesättigten Wasserglas eine Portion Natrumkieselweiche beizugeben, was sich auch ganz zweckdienlich erwies. Dieses Gemisch will ich Fixirungs-Wasserglas nennen."

Neben der bereits beschriebenen automatisierten Asterkennung der Pyrolyseanlage könnten in einer weiteren Ausbaustufe auch Umgebungsparameter wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur mit berücksichtigt werden, da diese einen nicht unerheblichen Einfluss auf die erzeugte Pyrolyseschicht haben. In Verbindung mit einer ebenfalls noch zu ermittelnden Methode zur automatischen Messung der Schichtdicken, können auch hier wichtige Parameter als Grundlage für eine spätere industrielle Produktion erforscht werden. Mit der Entwicklung zerstörungsfreier Verfahren zur Ermittlung der Dicke von Pyrolyseschichten, beziehungsweise der aufgetragenen Imprägnierungen, kann ein weiterer Arbeitsschritt identifiziert werden, der insbesondere bei der langfristigen Überwachung bestehender Fassadensysteme notwendig ist.

Weitere Untersuchungen sollten sich mit dem Thema der beidseitigen Pyrolyse beschäftigen, insbesondere auch um eine Redundanz bei der Strategie des Brandschutzes zu erhalten und Fehler im Aufbau ausgleichen zu können. Hierfür müssen nicht zuletzt spezielle Detaillösungen für die Befestigung gefunden und erprobt werden, da diese deutlich von den Richtlinien des Eurocode 5 bzw. denen des Zimmererhandwerks abweichen. Möglicherweise sind hier auch neue Zulassungsverfahren erforderlich. Ähnliches gilt für Varianten mit unbrennbaren Grundkonstruktionen. Mit diesen kann die Brandlast deutlich reduziert werden, auch sie erfordern aber eigene Befestigungssysteme und Genehmigungsverfahren, welche zunächst evaluiert werden müssen.

Sofern für Hölzer mit pyrolysierte Oberfläche der Nachweis der *“Schwerentflammbarkeit”* erreicht werden kann, taucht unmittelbar die Frage auf, inwieweit diese Hölzer auch als Fassadenmaterial für Sonderbauten zum Einsatz kommen können, für die nach den geltenden Vorgaben der Bauordnungen die Klassifikation *“A”*, *“nicht brennbar”* erforderlich ist. Den Hintergrund dieser Fragestellung bildet die Möglichkeit, dass ein Fassadensystem aus *“schwerentflammbaren”* Bauprodukten in Verbindung mit einer Sprinkleranlage in der Ebene der Hinterlüftung in einer Einzelfallprüfung hierfür zugelassen werden kann.

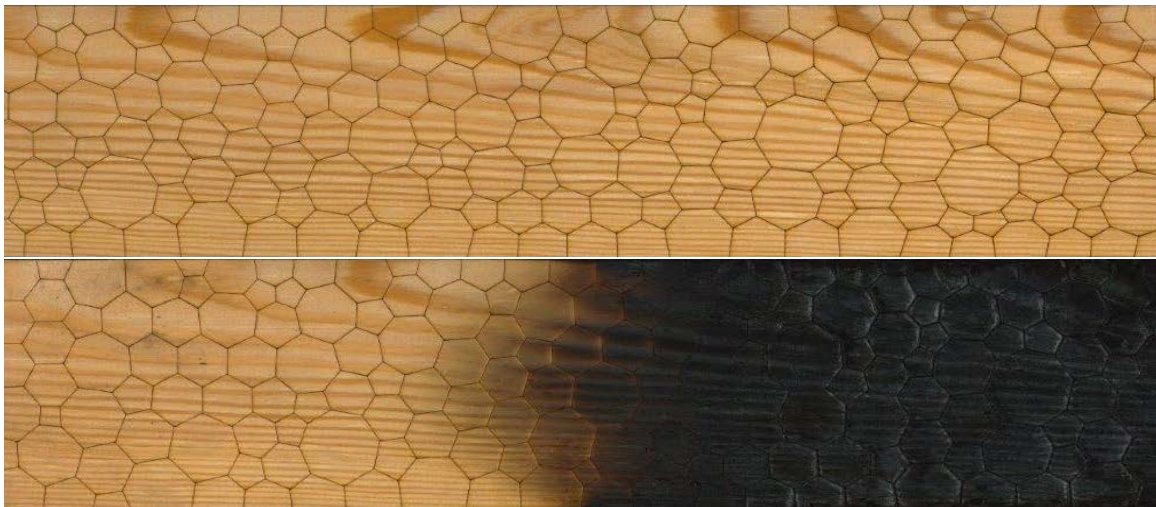
Neben den aufgezeigten Ergebnissen konnten im Laufe des Forschungsprojektes weitere innovative Ansätze aufgezeigt werden, auf der Basis von Holz nachhaltige Fassadensysteme zu entwickeln.

## 6.7 Wirtschaftliche Verwertung

Aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes ergeben sich unterschiedliche Aspekte der wirtschaftlichen Verwertung:

Mit der Pyrolyseanlage ist bereits jetzt ein System entwickelt, welches unmittelbar in einen Produktionsprozess eingebunden werden kann, beziehungsweise dessen Funktionsprinzip sich leicht für einen industrialisierten Pyrolyseprozess skalieren lässt. Der modulare Aufbau der Anlage ermöglicht es durch den Einbau eines breiteren Brenners neben der gleichzeitigen Pyrolyse mehrerer Fassadenbretter nebeneinander, auch breitere Holzwerkstoffe zu pyrolysieren. Damit lässt sich die Palette pyrolytisch veränderter Bauprodukte deutlich erweitern.

Neben den veränderten Brandeigenschaften, liegt bei diesen Bauprodukten insbesondere in deren signifikanter Oberfläche ein hohes gestalterisches und somit wirtschaftliches Potential. Durch Vorbehandlung beispielsweise mit Laser und einer anschließenden Pyrolyse lassen sich zudem weitere Veränderungen der Oberfläche erzeugen (Abbildung 113 und 114). Hier sind Anwendungen als "Design-Oberfläche" insbesondere auch für Innenräume denkbar. Wasserglas kann auch hier zur Stabilisierung der Oberfläche genutzt werden, um den Abrieb von Kohlenstaub dauerhaft zu verhindern.



Abbildungen 113 und 114: Das Rissbild der Holzoberfläche nach der Pyrolyse kann durch das vorige Aufbringen von Texturen (Einritzungen) beispielsweise mittels Lasern bestimmt werden. So lassen sich beispielsweise signifikante Rissbilder teurerer Holzarten imitieren, oder ganz eigene Oberflächen gestalten.

Mit den SBI-Test ist der entscheidende Schritt für die Klassifizierung eines Fassadensystems gemacht. Dieser bildet in Zusammenhang mit der Analyse der Forschungen die Basis für die Klassifizierung weiterer Fassadensysteme und damit die grundlegende Bedingung für die Anwendbarkeit dieses neuen Bauproduktes.

Neben deren Einsatz beispielsweise als nachhaltige Fassade bei der thermischen Gebäudesanierung im innerstädtischen Raum sind Anwendungen in Verbindung mit vorgefertigten Holzrahmenbauelementen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau denkbar.

In einem weiteren Schritt kann versucht werden, die pyrolytisch veränderten Hölzer als "schwerentflammbar" Bauprodukt auch in die Bauregelliste einzubinden. Damit wird eine allgemeine Verwendung möglich, ohne dass jede spezifische Einbausituation erneut durch eine Serie aufwändiger SBI-Tests zertifiziert werden muss.



## 7. Anhang

### 7.1 Normen und Vorschriften - Auszug

DIN 4102-1

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen

Teil 1 : Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen Mai 1998

DIN EN 14081-1 *Holzbauwerke –*

*Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt –*

Teil 1: Allgemeine Anforderungen;

Deutsche Fassung EN 14081-1:2016

DIN EN 13501-1

*Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem*

*Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten;*

Deutsche Fassung EN 13501-1:2018

DIN EN 13823 (SBI-Test)

Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten –

Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden

Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen;

Deutsche Fassung EN 13823:2010+A1:2014

DIN EN ISO 11925-2 (B2-Test)

Prüfungen zum Brandverhalten –Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung –

Teil 2: Einzelflammentest (ISO 11925-2:2010);

Deutsche Fassung EN ISO 11925-2:2010

DIN 18516-1:2010-06

Außenwandbekleidungen, hinterlüftet –

Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze

DIN ISO 9352 (Taber-Test)

Kunststoffe – Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren (ISO 9352:2012)

DIN EN ISO 2409:2013-06 (Gitterschnitt-Test)

Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2013); Deutsche Fassung EN ISO 2409:2013

(ggf.: Einstufung der Ergebnisse der Kreuzschnittprüfung nach DIN EN ISO 16276-2)

DIN EN ISO 2810:2004-10 (Freibewitterung)

Beschichtungsstoffe - Freibewitterung von Beschichtungen - Bewitterung und Bewertung (ISO 2810:2004); Deutsche Fassung EN ISO 2810:2004

DIN EN 13238 (Konditionierung)

Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten;  
Deutsche Fassung EN 13238:2010

Bauholz für tragende Zwecke: Laubholz Bauschnittholz, Kanthölzer, Bohlen, Bretter(Einteilung nach DIN 4074-5) -

und

Bauholz für tragende Zwecke: Nadelholz Bauschnittholz einschl. keilgezinktes Vollholz nach DIN EN 15497 Kanthölzer -Bohlen -Bretter -Latten (Einteilung nach DIN 4047-1  
Brandschutz nach DIN EN 14081-1

Deutsches Institut für Bautechnik: Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB); Ausgabe 2017/1

Deutsches Institut für Bautechnik: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C; Ausgabe 2015/2

OIB-Richtlinie 2.1 Brandschutz bei Betriebsbauten OIB-330.2-012/15 März 2015

## 7.2 Literatur - Auszug

Alberti, Humanist, Schriftsteller, Mathematiker, Diplomat, Kunsthistoriker, . . . Theuer, Max. (1991). *Zehn Bücher über die Baukunst* (Unveränd. reprographischer Nachdr. der 1. Aufl., Wien u.a. 1912 ed., Bibliothek klassischer Texte).

Baus, Dr., Kunstgeschichte, Architektin, Autorin, Redakteurin, . . . Siegele, Klaus. (2008). *Holzfassaden : Konstruktion, Gestaltung, Beispiele* (6. Aufl. ed., Db - das Buch).

Brandstätter, M., Holzforschung Austria, Verein, Wien, & Österreich. (2004). *Holzfassaden : Rohstoff, Material, Oberfläche, Befestigung, Detail, System* (3. Aufl. ed.).

Creuzburg, H. (1864). *Praktische Anleitung zum Gebrauche des Wasserglases : Mit besonderer Rücksicht auf Künste und Gewerbe ; nebst Angabe der neuesten Verbesserungen in der Stereochromie*.

Fachregeln des Zimmererhandwerks / 01. Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen; 2006, 1. Aufl., Ausg.: August 2006, Änderung 2 vom 22.06.2011.

Fuchs von, Chemiker, Mineraloge, & Arzt. (1857). *Bereitung, Eigenschaften und Nutzenanwendung des Wasserglases mit Einschluss der Stereochromie* (Abhandlungen der Naturwissenschaftlich-Technischen Commission bei der Königl. Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München BV009574133 1,1).

Goosmann, C. (1985). *Ein Jahrhundert Wasserglas von Henkel* (Schriften des Werksarchivs der Henkel KgaA Düsseldorf BV001900978 17).

*Holzbau. 1, Grundlagen DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5* (4., neu bearb. Aufl. ed.). (2009).

Kraetzer, Andés, & Andés, Louis Edgar. (1887). *Wasserglas und Infusorienerde, deren Natur und Bedeutung für Industrie, Technik und die Gewerbe* (Chemisch-technische Bibliothek BV001902554 143).

Lange, & Chemiker. (1916). *Chemisch-technische Vorschriften : E. Nachschlage- u. Literaturwerk, insbes. für chem. Fabriken u. verwandte techn. Betriebe, enthaltend Vorschr. aus allen Gebieten d. chem. Technologie mit umfassenden Literaturnachweisen*.

Lange, & Chemiker. (1927). *Chemische Technologie und ihre chemischen Grundlagen in leichtfasslicher Form*.

RICHTLINIEN DES ÖSTERREICHISCHEN INSTITUTS FÜR BAUTECHNIK  
OIB-Richtlinie 2.1; Brandschutz bei Betriebsbauten; OIB-.-Ausgabe März 2015  
Österreichisches Institut für Bautechnik OIB-330.2-012/15

Scheer, Bauingenieur, Hochschullehrer, Prof. Dr., Ingenieur, 1980, . . . -2010. (2009). *Holz-Brandschutz-Handbuch* (3. Aufl. ed.).

Schneider, H. (1990). *Einige chemische und strukturelle Untersuchungen zum Wasserglas-CO<sub>2</sub>-Verfahren*.

Schober, Schober, Klaus Peter, Holzforschung Austria, Verein, Wien, & Österreich. (2010). *Fassaden aus Holz* (1. Aufl. ed., ProHolz Information).

Trillich, H. (1929). Die Wasserglas-Anstrich- und Mal-Verfahren (BV008438147 Schriften zum Deutschen Farbenbuch / 3 1).

Vitruvius, Ingenieur, Architekt, Philandrier, Ryff, Gerbelius, . . . Fensterbusch, Curt. (1964). *Vitruvii de architectura : Libri decem = Zehn Bücher über Architektur*.

---

## 7.3 Berichte HNEE

Ingenieurtechnisches Projekt, "Epoxidharz in Verbindung mit karbonisiertem Vollholz", Weidner, Ebert, Seliger, HNEE

Ingenieurtechnisches Projekt, "Erprobung von Beschichtungsverfahren zur Stabilisierung von pyrolysierten Holzoberflächen gegenüber beschleunigter maschineller Bewitterung", Henning Meier, HNEE

Semesterabschlussarbeit

"Oberflächenbeschichtung mit Calciumcarbonat Kristallen ( $\text{CaCO}_3$ ) durch Bakterien (Biom mineralisierung) von nativen und pyrolysierten Holzoberflächen", Lisa Bansamir, HNEE

## 7.4 Internetseiten - Auswahl

Deutsches Institut für Bautechnik: <https://www.dibt.de>

Baunetz\_Wissen\_: <https://www.baunetzwissen.de>

pro:HOLZ: <http://www.proholz.at/>

Holzforschung Austria: <http://www.holzforschung.at/>

dataholz.eu: <https://www.dataholz.eu/>

<https://www.energie-experten.org/>



## 8. Mitarbeiter und Projektpartner

UdK:

Prof. Dr. Christoph Gengnagel; Jan Friedrich M.Sc.; Torben Jacobsen †  
Marius Mühleisen; Moritz Funck; Gregory Quinn; Julius Frodermann; Daria Skorokhod

HNEE:

Prof. Dr. Alexander Pfriem; Tom Brodhagen M.Sc.; Lucas Lütje; Sara Berents; Daniel Cordes; Fabienne Lucht

Studienarbeit "Beschichtung pyrolysierter Holzoberflächen mit Epoxidharz";  
Sven Seliger, Marc Weidner, Emmely Ebert, HNEE

Semesterabschlussarbeit "Oberflächenbeschichtung mit Calciumcarbonat Kristallen ( $\text{CaCO}_3$ ) durch Bakterien (Biomineralisierung) von nativen und pyrolysierten Holzoberflächen", Lisa Bansamir, HNEE

Ingenieurtechnisches Projekt "Erprobung von Beschichtungsverfahren zur Stabilisierung von pyrolysierten Holzoberflächen gegenüber beschleunigter maschineller Bewitterung"; Henning Meier, HNEE

Projektpartner:





## 9. Bildanhang und Berichte - Auswahl

### 9.1 B2-Test: Testergebnisse und Mikroskopie

### 9.2 Taber-Test: Abrieb der Oberfläche

### 9.3 Bewitterungstests

#### 9.3.1 Veränderung der Oberfläche bei Eiche

#### 9.3.2 Veränderung der Oberfläche bei Fichte

#### 9.3.3 Veränderung der Oberfläche bei Lärche

### 9.4 SBI-Tests

#### 9.4.1 SBI-Test 1: Leisten-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, imprägniert

#### 9.4.2 SBI-Test 2: Stülpchalung, Lärche, pyrolysiert, imprägniert

#### 9.4.3 SBI-Test 3: Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert

#### 9.4.4 SBI-Test 4: Boden-Deckel-Schalung, Eiche, pyrolysiert

#### 9.4.5 SBI-Test 5: Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, imprägniert

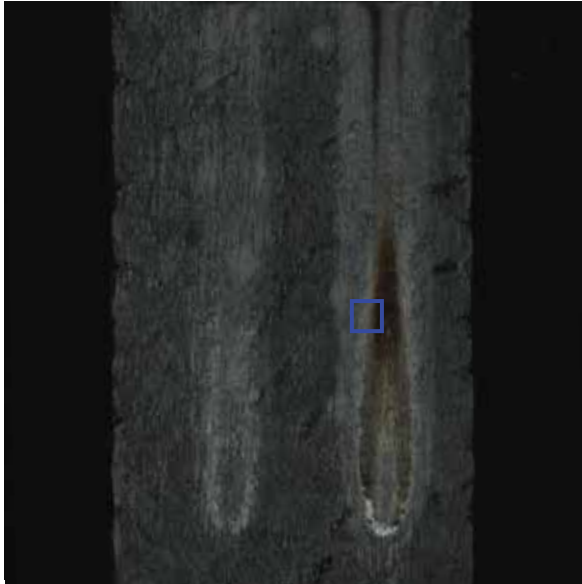
#### 9.4.6 Filmstills der SBI-Tests

### 9.5 Prüfbericht der BAM - Auszug



## 9.1 B2-Test: Testergebnis und Mikroskopie

### Eiche



Eiche Wasserglas Pinsel imprägniert  
(EI 005 WG PI)



Eiche Wasserglas Pinsel imprägniert x126  
(EI 002 WG PI x126)

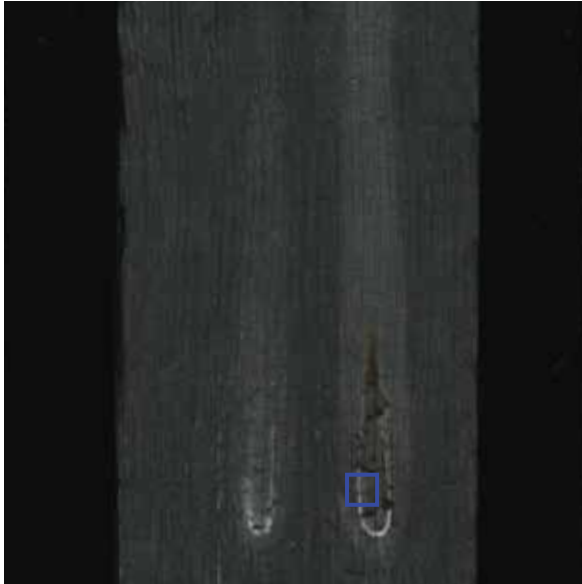


Eiche Wasserglas Tauch imprägniert  
(EI 010 WG TI)



Eiche Wasserglas Tauch imprägniert x126  
(EI 007 WG TI x126)

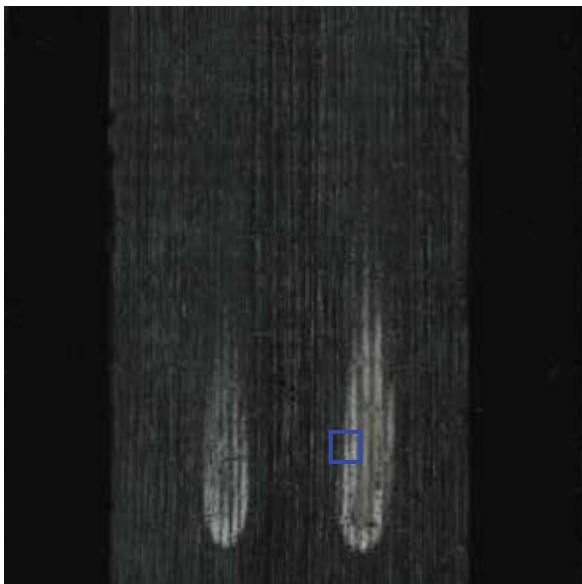
## Fichte



Fichte Wasserglas Pinsel imprägniert  
(FI 005 WG PI)



Fichte Wasserglas Pinsel imprägniert x126  
(FI 002 WG PI x126)

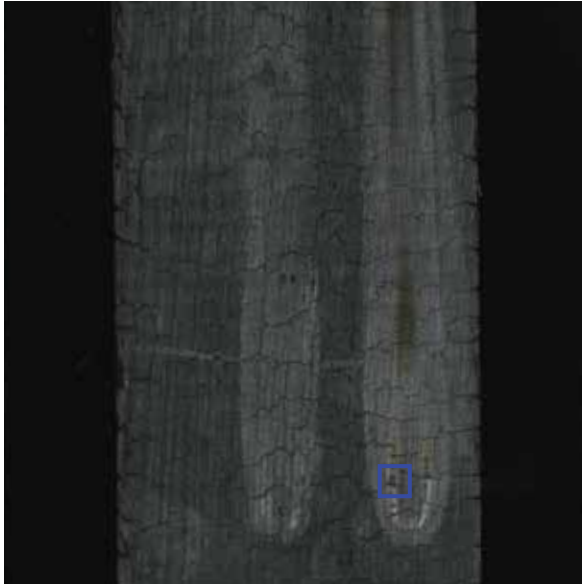


Fichte Wasserglas Tauch imprägniert  
(FI 010 WG TI)



Fichte Wasserglas Tauch imprägniert x126  
(FI 007 WG TI x126)

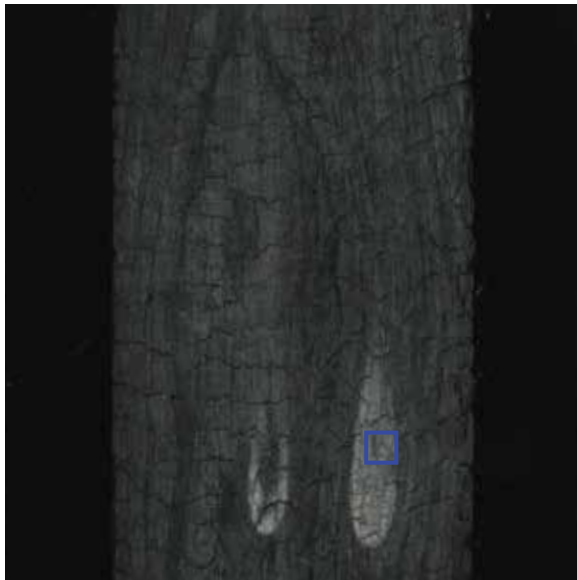
## Lärche



Lärche Wasserglas Pinsel imprägniert  
(LA 005 WG PI)



Lärche Wasserglas Pinsel imprägniert x126  
(LA 002 WG PI x126)



Lärche Wasserglas Tauch imprägniert  
(LA 010 WG TI)



Lärche Wasserglas Tauch imprägniert x126  
(LA 007 WG TI x126)



## 9.2 Taber-Test: Abrieb der Oberfläche

### Eiche

Eiche Wasserglas pinselimprägniert (Probekörper: EI-005)

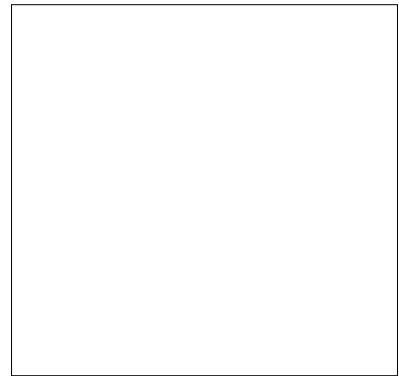


0 U



100 U

Schicht vollständig abgerieben  
Ø Massenänderung: -0,86 g



Eiche Wasserglas tauchimprägniert (Probekörper: EI-008)



0 U



100 U



300 U

Ø Massenänderung: -0,39 g

## Fichte

### Fichte Wasserglas pinselimprägniert (Probekörper: FI-005)

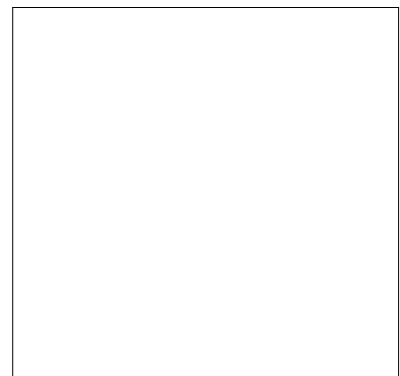


0 U



100 U

bei 150 U: Schicht vollständig abgerieben  
Ø Massenänderung: -0,94 g



300 U

### Fichte Wasserglas tauchimprägniert (Probekörper: FI-008)



0 U



100 U



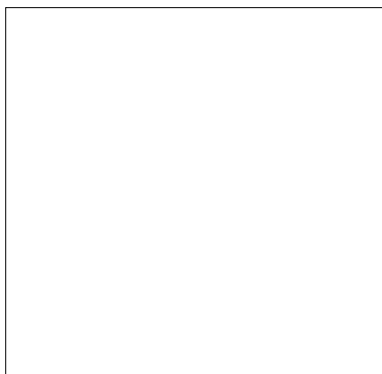
300 U

Ø Massenänderung: -0,12 g

U = Umdrehungen

## Lärche

### Lärche Wasserglas pinselimprägniert (Probekörper: LA-005)

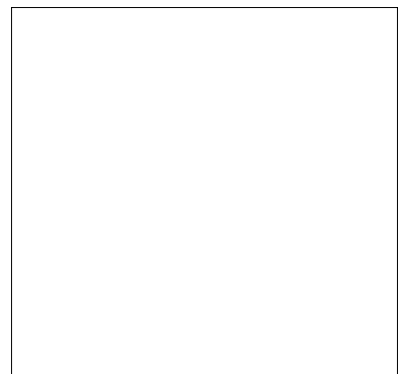


0 U



100 U

Schicht vollständig abgerieben  
Ø Massenänderung: -0,95 g



300 U

### Lärche Wasserglas tauchimprägniert (Probekörper: LA-010)



0 U



100 U



300 U

Ø Massenänderung: -0,78 g



## 9.3 Bewitterungstests

### 9.3.1 Veränderung der Oberfläche bei Eiche

Eiche nativ (Probekörper: EI-024)



Tag 0



Tag 4



Tag 9

Eiche Wasserglas pinselimprägniert (Probekörper: EI-001)



Tag 0



Tag 4



Tag 9

Eiche Wasserglas tauchimprägniert (Probekörper: EI-006)



Tag 0



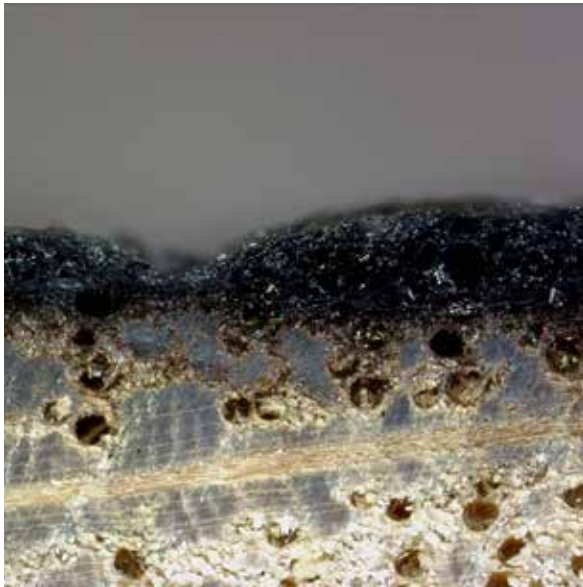
Tag 4



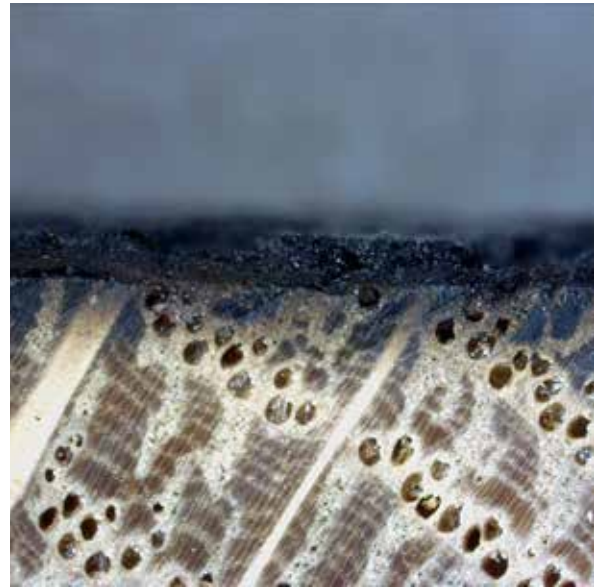
Tag 9

## Mikroskopie-Aufnahmen Bewitterungstest

### Eiche Wasserglas pinselimprägniert



Schnitt: vorher  
(EI 005 WG PI x150 vor der Bewitterung)



Schnitt: nachher  
(EI 001 WG PI x150)



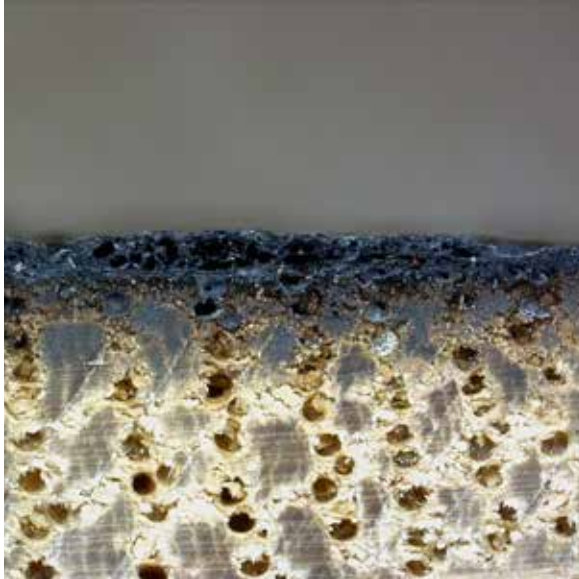
Aufsicht: vorher  
(EI 005 WG PI x240 vor der Bewitterung)



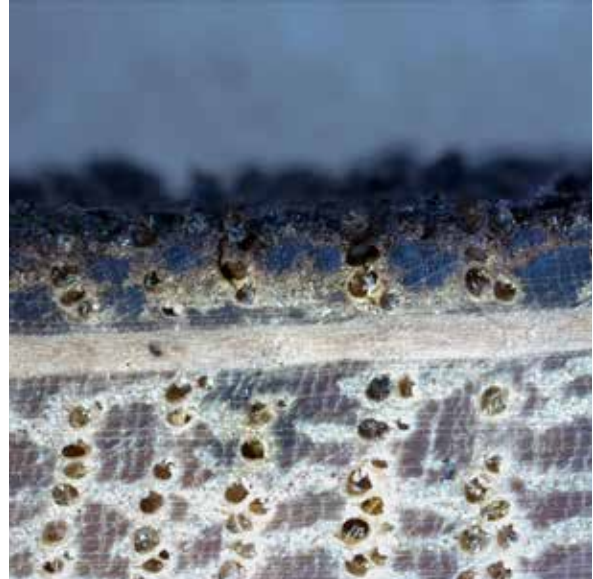
Aufsicht: nachher  
(EI 001 WG PI x150 oben)

## Mikroskopie-Aufnahmen Bewitterungstest

Eiche Wasserglas tauchimprägniert



Schnitt: vorher  
(EI 010 WG TI vor der Bewitterung x150)



Schnitt: nachher  
(EI 007 WG TI x150)



Aufsicht: vorher



Aufsicht: nachher



### 9.3.2 Veränderung der Oberfläche bei Fichte

Fichte nativ (Probekörper: FI-023)



Tag 0



Tag 4



Tag 9

Fichte Wasserglas pinsel imprägniert (Probekörper: FI-001)



Tag 0

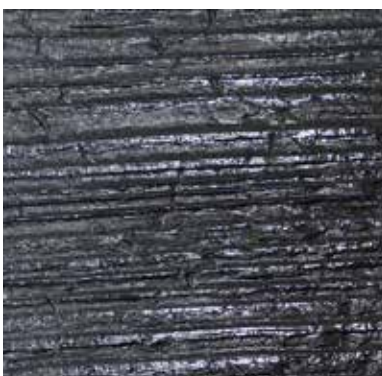


Tag 4



Tag 9

Fichte Wasserglas tauch imprägniert (Probekörper: FI-007)



Tag 0



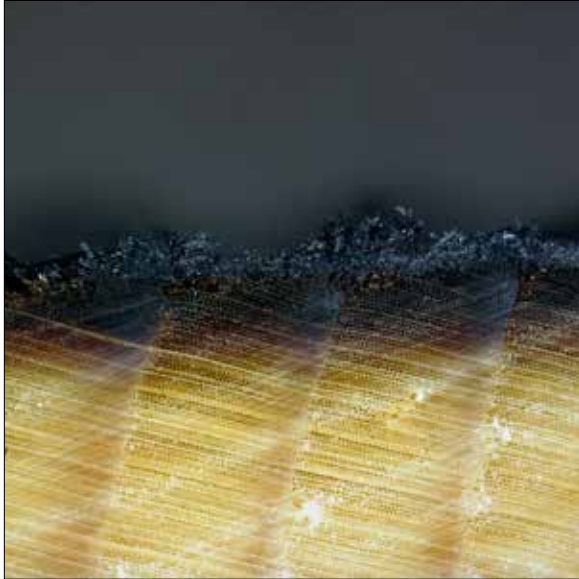
Tag 4



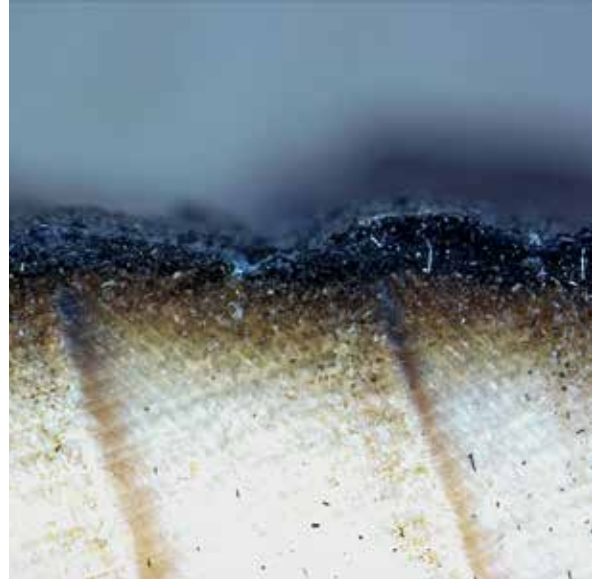
Tag 9

## Mikroskopie-Aufnahmen Bewitterungstest

### Fichte Wasserglas pinselimprägniert



Schnitt: vorher  
(FI 001 WG PI vorher x150)



Schnitt: nachher  
(FI 001 WG PI x150)



Aufsicht: vorher  
(kFI 001 WG PI vorher x150 Aufsicht)



Aufsicht: nachher  
(FI 002 WG PI x150 nachher Aufsicht)

## Mikroskopie-Aufnahmen Bewitterungstest

### Fichte Wasserglas tauchimprägniert



Schnitt: vorher  
(FI 007 WG TI x150 vorher)



Schnitt: nachher  
(FI 008 WG TI x150)



Aufsicht: vorher  
(FI 007 WG TI x150 Aufsicht vorher)



Aufsicht: nachher  
(FI 008 WG TI x150 Aufsicht nachher)



### 9.3.3 Veränderung der Oberfläche bei Lärche

Lärche nativ (Probekörper: LA-024)



Tag 0



Tag 4



Tag 9

Lärche Wasserglas pinsel imprägniert (Probekörper: LA-001)



Tag 0



Tag 4



Tag 9

Lärche Wasserglas tauch imprägniert (Probekörper: LA-006)



Tag 0



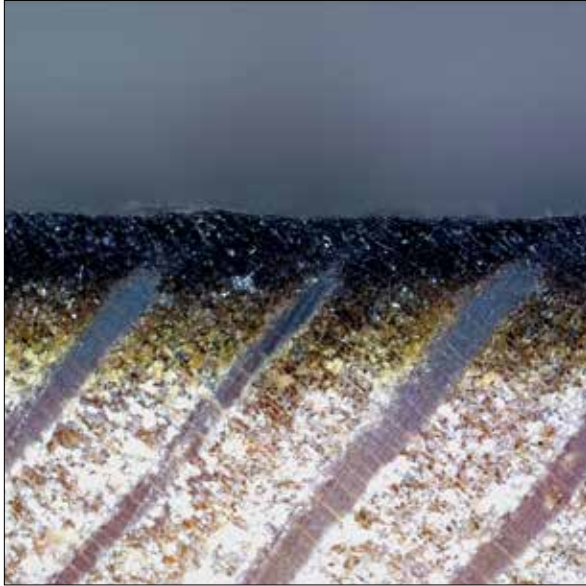
Tag 4



Tag 9

## Mikroskopie-Aufnahmen Bewitterungstest

Lärche Wasserglas pinselimprägniert



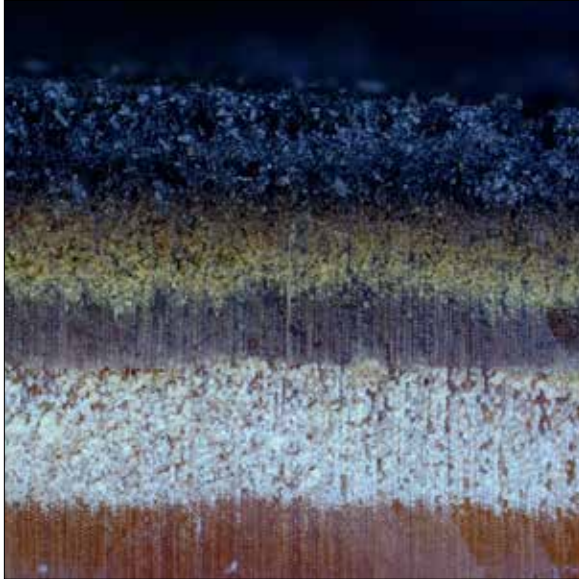
Schnitt: vorher  
(LA 005 WG PI x150 vor der Bewitterung)



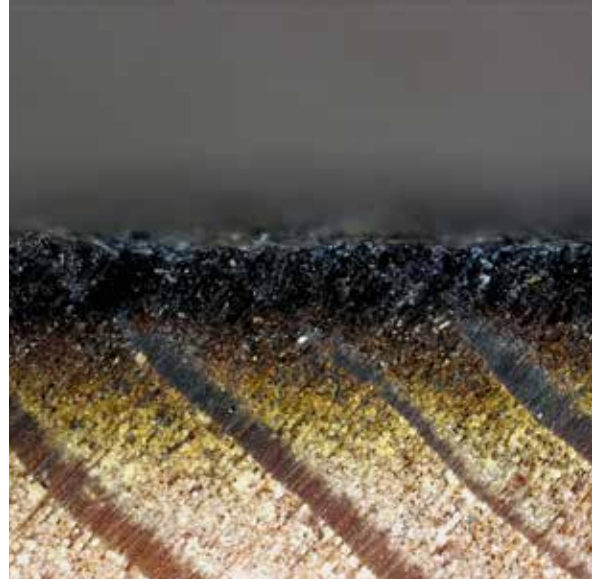
Aufsicht: vorher  
(LA 005 WG PI x240 vor der Bewitterung  
oben)

## Mikroskopie-Aufnahmen Bewitterungstest

### Lärche Wasserglas tauchimprägniert



Schnitt: vorher  
(LA 008 WG TI x150 vorher)



Schnitt: nachher  
(LA 007 WG TI x150)



Aufsicht: vorher  
(LA 008 WG TI x150 vorher Aufsicht)



Aufsicht: nachher  
(LA 002 WG TI x150 Aufsicht nachhher)

## 9.4 SBI-Tests

#### 9.4.1 SBI-Test 1:

Leisten-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, imprägniert

Vor dem Test

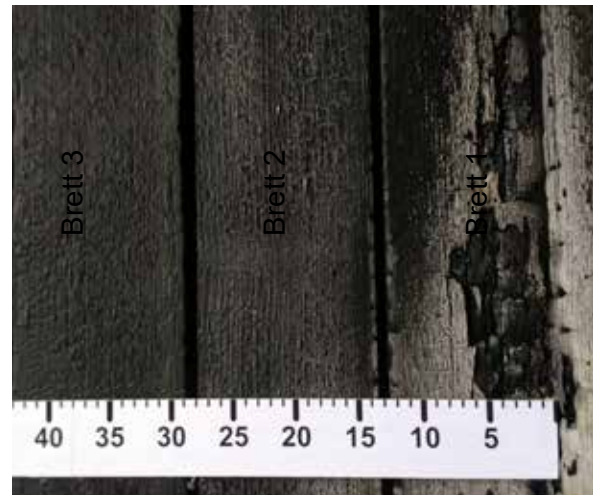


Nach dem Test

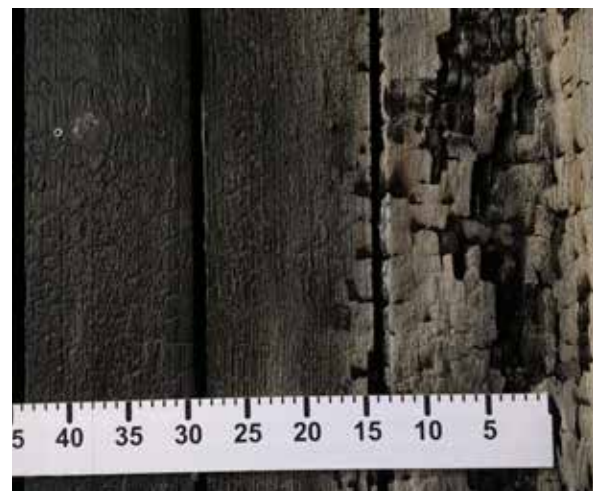


Abbildung 192-195

# SBI-Test 1: Seitliche Brandausbreitung



+ 100 cm



+ 50 cm



± 0,00 cm

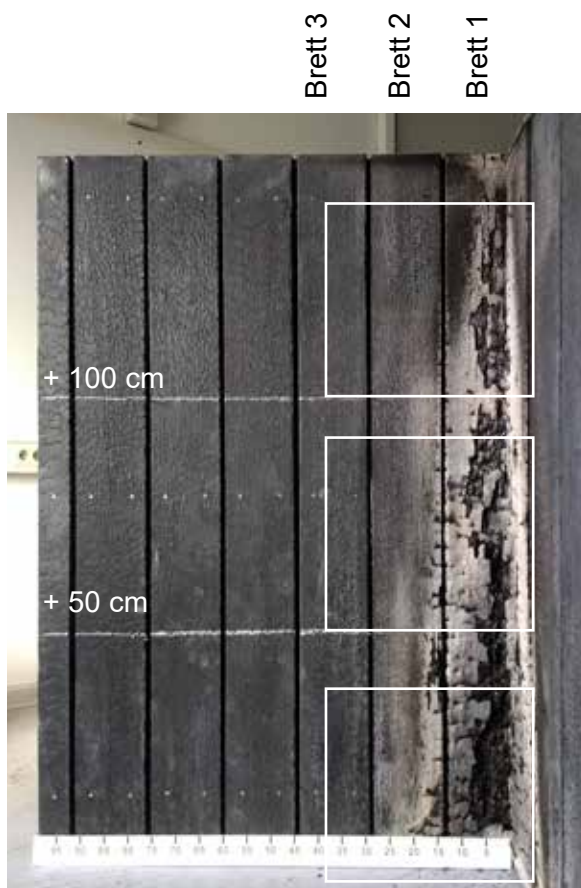


Abbildung 196-199

## SBI-Test 1: Abbrand der Oberfläche



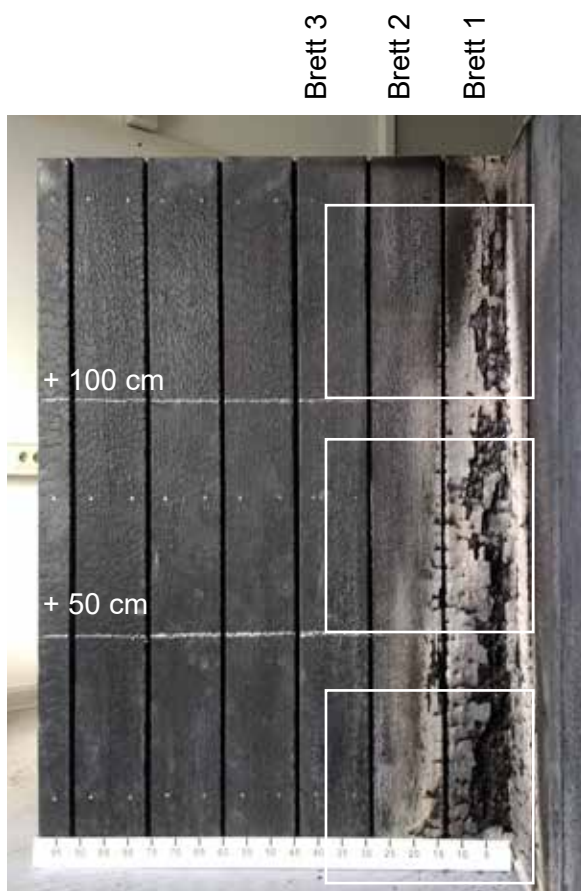
Brett 3: + 45 cm; + 95 cm; + 145 cm



Brett 2: + 45 cm; + 95 cm; + 145 cm



Brett 1: + 45 cm; + 95 cm; + 145 cm



### 9.4.2 SBI-Test 2:

Stülpchalung, Lärche, pyrolysiert, imprägniert

Vor dem Test



Nach dem Test



Abbildung 204-207

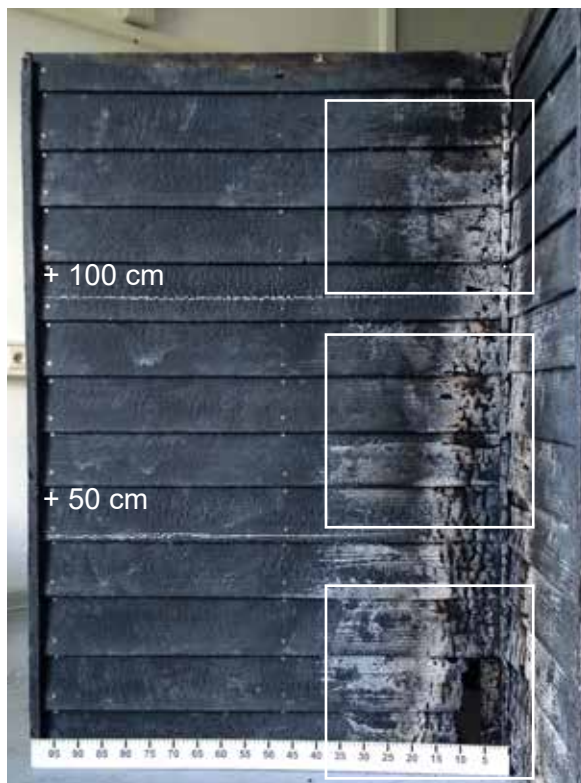
## SBI-Test 2: Seitliche Brandausbreitung



+ 100 cm



+ 50 cm



± 0,00 cm

Abbildung 208-211



### 9.4.3 SBI-Test 3: Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert

Vor dem SBI-Test



Nach dem SBI-Test



#### 9.4.4 SBI-Test 4: Boden-Deckel-Schalung, Eiche, pyrolysiert

Vor dem SBI-Test



Nach dem SBI-Test



#### 9.4.5 SBI-Test 5:

Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, imprägniert

Vor dem SBI-Test



Nach dem SBI-Test





## SBI-Test 1: Minuten-Protokoll

Abbildung 230-250



## SBI-Test 2: Minuten-Protokoll

Abbildung 251-269



## SBI-Test 3: Minuten-Protokoll

Abbildung 270-290



## SBI-Test 4: Minuten-Protokoll

Abbildung 291-310



## SBI-Test 5: Minuten-Protokoll

Abbildung 311-328







Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

# PRÜFUNG DES BRANDVERHALTENS VON BAUSTOFFEN NACH DIN EN 13823:2015

12200 Berlin  
T: +49 30 8104-0  
F: +49 30 8104-7 2222

|                                                   |                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aktenzeichen</b>                               | 7.5/19019596                                                                                                  |
| <b>Ausfertigung</b>                               | 1 von 3                                                                                                       |
| <b>Auftraggeber</b>                               | Universität der Künste (UdK)<br>Hardenbergstraße 33<br>10623 Berlin<br>Institut für Architektur und Städtebau |
| <b>Auftrag vom</b>                                | 03.04.2019                                                                                                    |
| <b>Zeichen</b>                                    | Forschungsprojekt PyroForCE                                                                                   |
| <b>Eingegangen am</b>                             | 23.04.2019                                                                                                    |
| <b>Prüfgegenstand /<br/>Untersuchungsmaterial</b> | 5 Vorversuche an pyrolysiertem Holz                                                                           |
| <b>Eingegangen am</b>                             | lfd. Nr. 1 und 2 am 27.05.2019<br>lfd. Nr. 3 - 5 am 23.07.2019                                                |
| <b>Prüfzeitraum</b>                               | s. o.                                                                                                         |
| <b>Prüfort</b>                                    | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),<br>Unter den Eichen 87, 12205 Berlin                  |
| <b>Prüfung gemäß</b>                              | DIN EN 13823                                                                                                  |

PRÜFBERICHT

Dieser Prüfbericht besteht aus Seite 1 bis 3 und den Anlagen 1 bis 32.

Dieser Prüfbericht darf nur in vollem Wortlaut und ohne Zusätze veröffentlicht werden. Für veränderte Wiedergabe und für Auszüge ist vorher die widerrufliche, schriftliche Einwilligung der BAM einzuholen. Der Inhalt des Prüfberichts bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Gegenstände/Materialien.

2015-05 / 2015-09-17

Sicherheit in Technik und Chemie

Sämtliche Probekörper wurden beim Auftraggeber konditioniert, und am jeweiligen Tag der Anlieferung geprüft. Die Prüfungen wurden im Beisein von Hr. Friedrich (UdK) und Hr. Brodhagen (HNEE) durchgeführt. Die Probekörper wurden vom Auftraggeber wie folgt beschrieben:

- 1.) Vertikale Leisten-Deckel-Schalung; Fichte, pyrolysiert, mit Wasserglas imprägniert
- 2.) Horizontale Stülpschalung; Lärche, pyrolysiert, mit Wasserglas imprägniert
- 3.) Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert (ohne Auftrag von Wasserglas)
- 4.) Boden-Deckel-Schalung, Eiche, pyrolysiert (ohne Auftrag von Wasserglas)
- 5.) Boden-Deckel-Schalung, Fichte, pyrolysiert, mit Wasserglas imprägniert, mit horizontaler Fuge

## Prüfergebnisse

Die Anlagen mit den Protokollen/Prüfergebnissen sind entsprechend der o. a. Nummerierung mit udk\_1 bis udk\_5 bezeichnet. Die Versuche 1 und 3 haben die volle Beanspruchungsdauer erreicht, die Versuche 2, 4 und 5 nicht. Die Protokolle der abgebrochenen Versuche sind entsprechend gekennzeichnet, und haben nur informativen Wert. Der Versuchsabbruch erfolgte jeweils wegen starkem Temperaturanstieg, auch aufgrund von rückseitigem Durchbrennen. Hierzu auch das vgl. Diagramm aller Probekörper, mittlere Versuchstemperatur über der Zeit.

Kriterien, Messwerte und Anforderungen nach DIN EN 13501- 1 für die Versuche mit voller Beanspruchungsdauer

| Kriterium              | Messwert Probe 1 | Messwert Probe 3 | Anforderung Euroklasse B | Anforderung Euroklasse C |
|------------------------|------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| FIGRA <sub>02/04</sub> | 53,5             | 109              | ≤ 120 W/s                | ≤ 250 W/s                |
| LFS                    | erfüllt          | erfüllt          | < Probenaußenkante       | < Probenaußenkante       |
| THR <sub>600s</sub>    | 5,28             | 11,8             | ≤ 7,5 MJ                 | ≤ 15 MJ                  |

FIGRA = FireGrowthRate

LFS = LateralFlameSpread

THR = TotalHeatRelease

## Messunsicherheit

Bei n=1 (Aufbau und Materialien der Vorversuche nicht miteinander vergleichbar) sind keine Angaben zur Messunsicherheit möglich.

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**

12200 Berlin

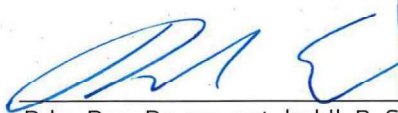
2019-08-22

Abteilung 7 Bauwerkssicherheit

Fachbereich 7.5 Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen

im Auftrag

im Auftrag

  
Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. B. Scharfel \*18\* Fachbereichsleiter

  
  
R. Mühlwinkel Prüfleiter

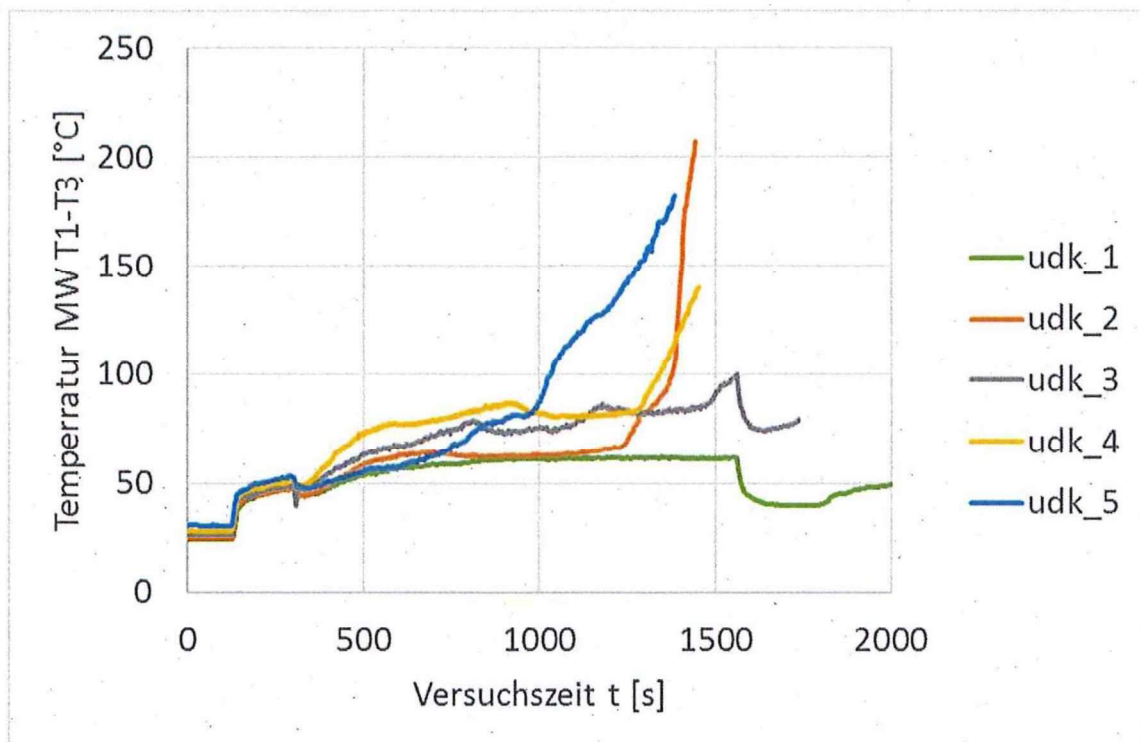
Die BAM, Abteilung 7 ist ein durch die DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.  
Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde (D-PL-11075-01-00) aufgeführten Prüfverfahren.



Nicht akkreditierte Prüfverfahren und deren Ergebnisse sind mit \* gekennzeichnet.

Verteiler: 1. Ausfertigung: Auftraggeber  
2. und 3. Ausfertigung: BAM

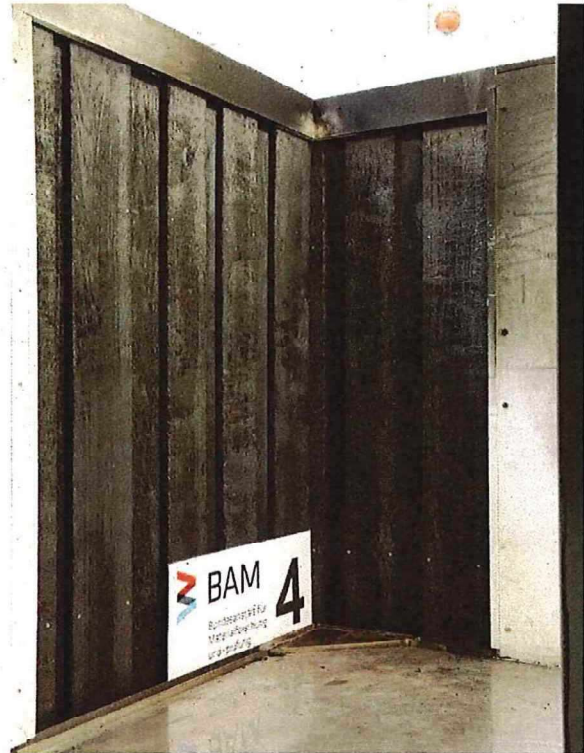
Anlagen 1. Temperaturverlauf  
2. Fotos der 5 Probekörper  
3. Protokolle/Ergebnisse



Temperaturverlauf im allgemeinen Meßabschnitt, der zum vorzeitigen Versuchsabbruch bei den Probekörpern 2, 4 und 5 geführt hat.



Fotos Probekörper 1 und 2 vor dem Versuch



Fotos Probekörper 3 – 5 vor dem Versuch

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Prüfbericht

udk\_1

Diese Prüfung wurde in Übereinstimmung mit EN 13823 durchgeführt

Abweichungen von der Prüfmethode

Name und Adresse des Prüflabors

BAM  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin

Name und Adresse des Auftraggebers

UdK Berlin  
Hr. Friedrich; Hr. Brodhagen (HNEE)

Name und Adresse des Herstellers/Lieferanten

Datum des Probeneingangs

27.05.2019

Identifikation des Bauproduktes

udk\_1

Beschreibung der Probennahme

nicht amtlich

allgemeine Beschreibung des geprüften Produktes

pyrolysiertes Holz

Beschreibung der Trägerplatte

keine

Konditionierung

Massekonstanz; beim Auftraggeber

Datum der Prüfung

27.05.2019

Beobachtungen während der Prüfung

Entzündung: ja  
Nachbrennen: ja

Die Prüfergebnisse beziehen sich auf das Brandverhalten eines Bauproduktes unter den besonderen Bedingungen der Prüfung. Sie stellen nicht das einzige Kriterium zur Bewertung des potentiellen Brandrisikos in der praktischen Anwendung dar.

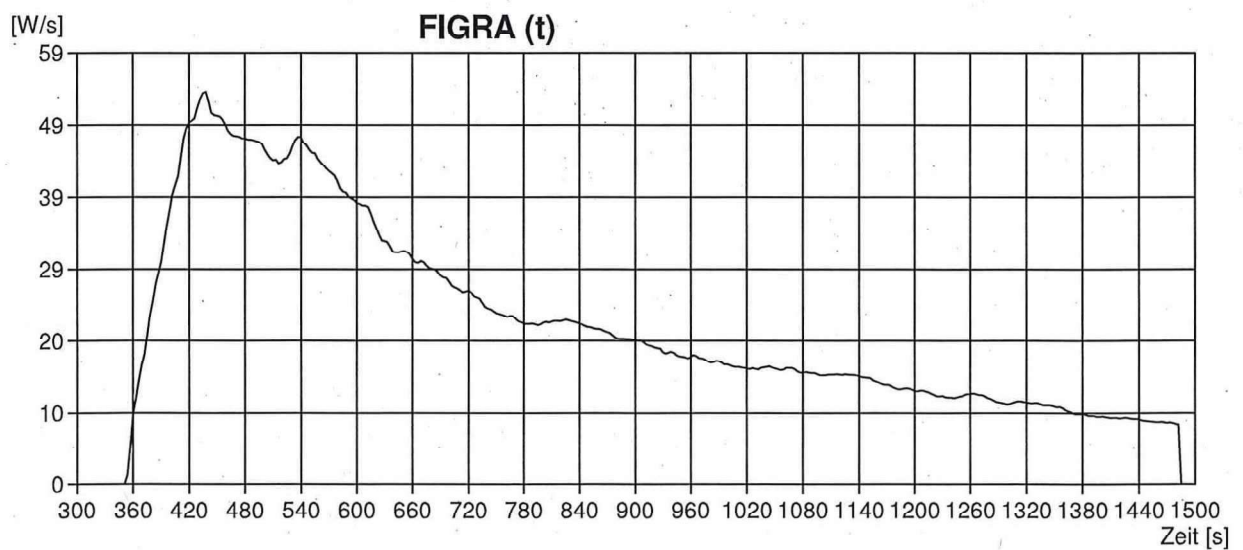
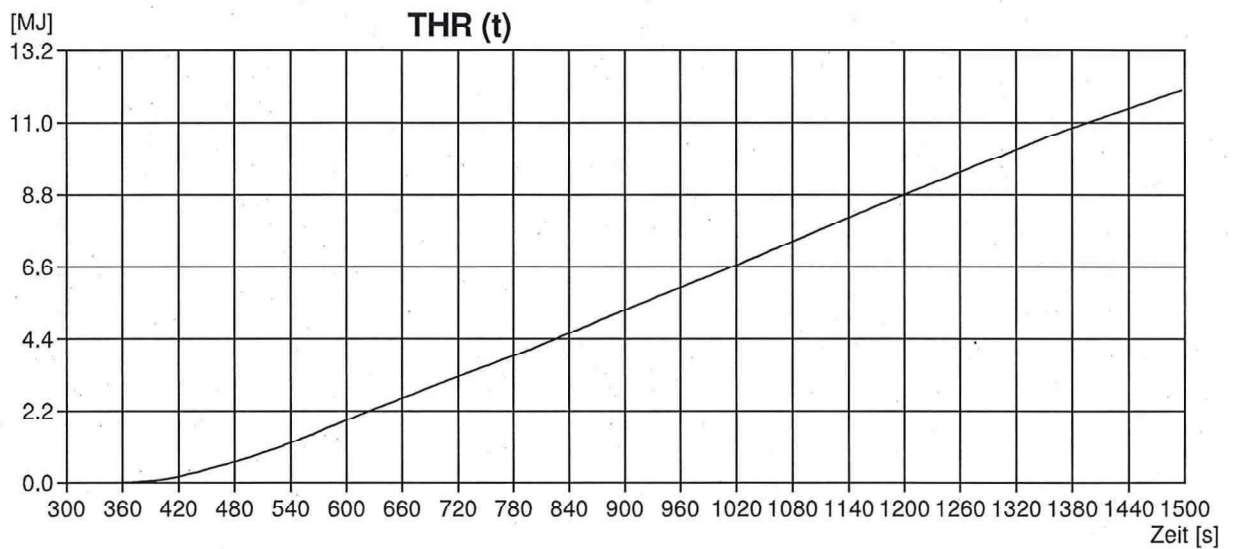
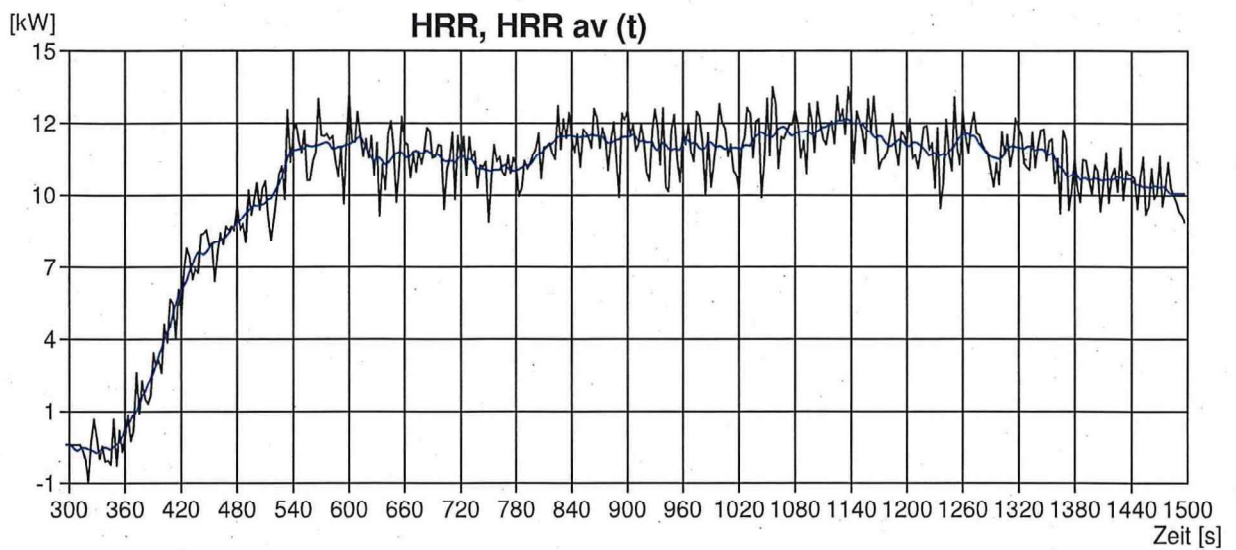
# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Protokoll

udk\_1

|                                                       |                    |
|-------------------------------------------------------|--------------------|
| Versuch                                               |                    |
| Verwendete Norm                                       | DIN EN 13823       |
| Versuchsdatum                                         | 27.05.19           |
| Volle Versuchsdauer/erfüllt (J/N)                     |                    |
| Produkt                                               |                    |
| Produktbezeichnung                                    | pyrolysiertes Holz |
| Probennummer                                          |                    |
| Trägerplatte                                          |                    |
| Befestigung                                           |                    |
| Fugen                                                 |                    |
| Konditionierung                                       |                    |
| (konstante Masse/feste Dauer)                         | beim Auftraggeber  |
| Zeitintervall                                         |                    |
| Gewicht 1 in g                                        |                    |
| Gewicht 2 in g                                        |                    |
| Labor                                                 |                    |
| Laborbezeichnung                                      | BAM 7,5            |
| Prüfer                                                | Müh                |
| Dateiname                                             | udk_1              |
| Berichts-Nummer                                       | 19019596           |
| Angaben zum Versuchsgerät                             |                    |
| Strömungsprofil-Faktor $k_t$                          | 0.86               |
| Meßsonden-Konstante $k_p$                             | 1.08               |
| Rohrdurchmesser in m                                  | 0.315              |
| O <sub>2</sub> Verzugszeit gemäß Kalibrierung in s    | 18                 |
| CO <sub>2</sub> Verzugszeit gemäß Kalibrierung in s   | 15                 |
| Umgebungsbedingungen vor dem Versuch                  |                    |
| Luftdruck in Pa                                       | 99924              |
| relative Luftfeuchte in %                             | 45.3               |
| visuelle Beobachtungen                                |                    |
| LFSedge (J/N)                                         | N                  |
| FDPf=<10s (J/N)                                       | N                  |
| FDPF>10s (J/N)                                        | N                  |
| Bedingungen am Ende des Versuchs                      |                    |
| Lichttransmission                                     | 0.999              |
| xO <sub>2</sub> in %                                  | 20.995             |
| xCO <sub>2</sub> in %                                 | 0.045              |
| Aufgezeichnete Ereignisse                             |                    |
| Oberflächen-Flash (J/N)                               | N                  |
| Abfallen von Teilen der Probe (J/N)                   | N                  |
| Rauch strömt nicht in die Abzugshaube (J/N)           | N                  |
| Gegenseitige Fixierung der Abschlußpl. versagt (J/N)  | N                  |
| Beding. rechtf. einen vorz. Stopp des Versuches (J/N) | N                  |
| Tendenz zur Verformung / Zusammenbruch (J/N)          | N                  |
| Andere zusätzliche Ereignisse                         | keine              |
| Vorzeitige Beendigung des Versuchs                    |                    |
| Zeitpunkt des Abschaltens der Gaszufuhr in s          |                    |
| Übermäßige RHR (J/N)                                  |                    |
| Übermäßige Temperatur (J/N)                           |                    |
| Brenner start beeinträchtigt/verstopft (J/N)          |                    |
| Versagen des Versuchsgerätes (J/N)                    |                    |

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Diagramm HRR/THR/FIGRA

udk\_1



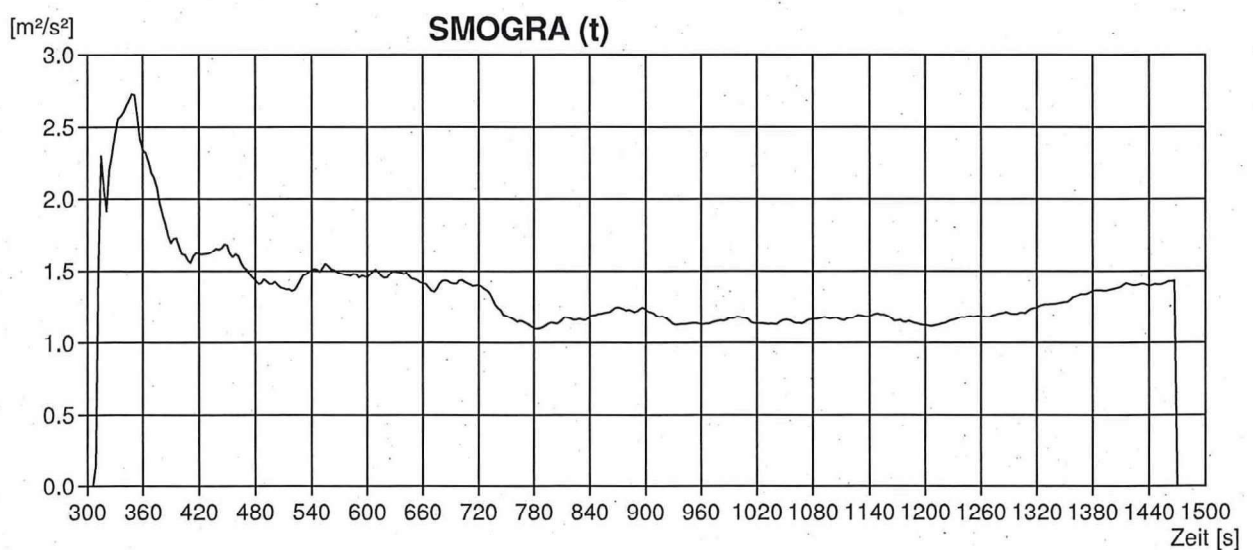
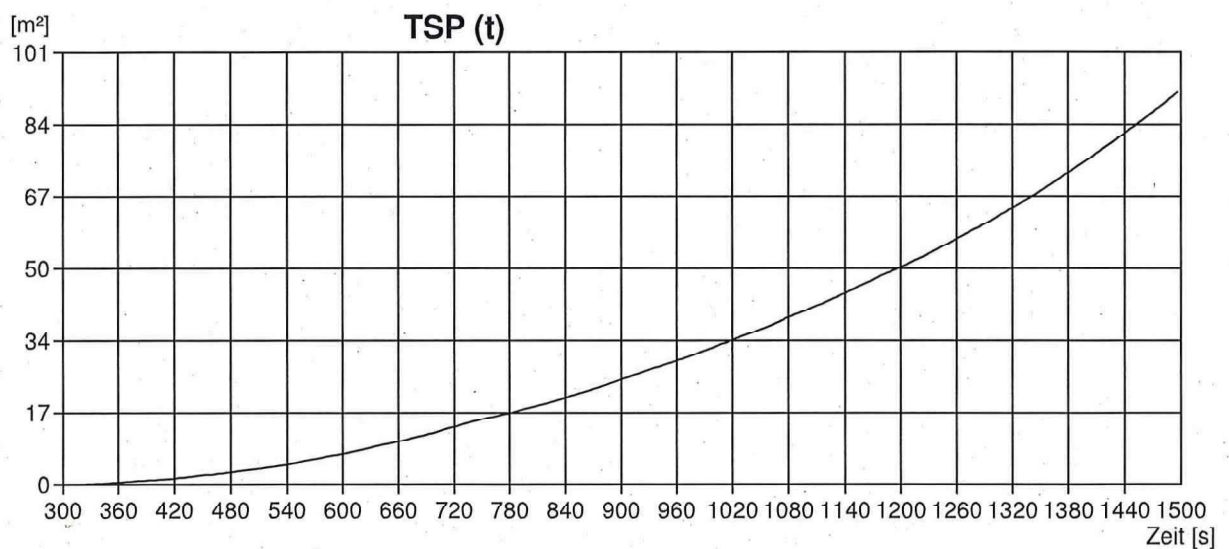
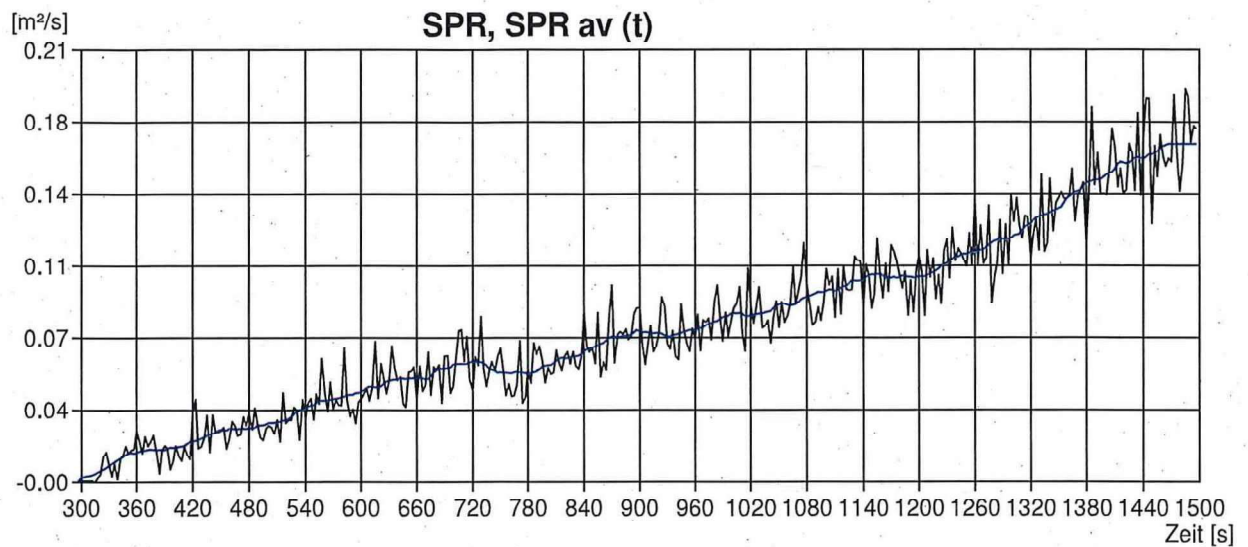
**FIGRA\_02 [W/s] = 53.5**

**FIGRA\_04 [W/s] = 50.3**

**THR 600s [MJ] = 5.28**

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Diagramm SPR/TSP/SMOGRA

udk\_1



**SMOGRA  $[m^2/s^2]$  = 1.44**

**TSP 600s  $[m^2]$  = 24.6**

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Checkliste - Ergebnisse

udk\_1

## Software

Version Logger2015

Build 23.11.2017, 10:28:33.16

## Parameter / Kalibrierwerte

Umgebungsdruck = 99924 Pa

Umgebungsfeuchte = 45.3 %

kt = 0.863

kp = 1.080

Rohrdurchmesser = 0.315 m

Verzugszeit O2 = 18 s

Verzugszeit CO2 = 15 s

## Startbedingungen

8.2.2 Umgebungstemperatur zum Start = 23 °C ok

8.2.2 Abzugtemperaturen zum Start = 24 °C ok

Konzentration O2 zum Start = 20.99 %

## Auswertung Test

A.2.1.a O2 um 18 s verschieben

A.2.1.a CO2 um 15 s verschieben

A.3.2 Mittelwert Tms von 3 Temperaturen bestimmt

A.2.1.b  $t_{0\_T}$  = 303

A.2.1.c  $t_{0\_O2}$  = 294

A.2.1.d  $t_{0\_CO2}$  = 294

A.2.1.e Synchronisierung O2 um -6 s

A.2.1.e Synchronisierung CO2 um -6 s

A.2.2 Verschiebung  $T_{duct}$ ,  $dp$ , Licht um 3 s

A.3.1 benutzte Thermoelemente (3) ok

A.3.2 Drift O2 = 0.001 % (<0.02%)

A.3.2 Drift CO2 = -0.001 % (<0.02%)

A.3.3 Grundlinie Licht = 1.002

A.3.3 Drift Licht = -0.003 (<0.02)

**A.4 Beflammungsdauer = 1194 s (>1245)**

A.4 Propangasmassenstrom ok

A.5.1 Berechnung der Wärmefreisetzung

A.5.1.1.a Volumenstrom im Abzug ok

A.5.1.1.b Sauerstoffverbrauchsfaktor

A.5.1.1.b  $x_{O2}$  = 20.994 %

A.5.1.1.b  $x_{CO2}$  = 0.04624 %

A.5.1.1.c Tms = 296.9 K

A.5.1.1.c  $x_{a\_O2}$  = 20.714 %

A.5.1.1.d HRR total

A.6.1 Berechnung der Rauchentwicklungsrate SPR

A.6.1.1 SPR total berechnen

A.5.1.2 HRR Brenner\_avg = 31.87 kW (30.7 +/- 2.0)

A.5.1.2 HRR Brenner\_std = 0.58 kW (<1)

A.5.1.3 HRR der Probe berechnen

A.5.1.4 HRR 30 s berechnen

A.5.2 Berechnung von THR(t) und THR\_600s

A.5.2 THR 600s = 5.284 MJ

A.5.3 Berechnung von FIGRA\_O2 und FIGRA\_O4

A.5.3 FIGRA\_O2 = 53.465 W/s

A.5.3 FIGRA\_O4 = 50.279 W/s

A.6.1.2 SPR Brenner\_avg = 0.0249 m<sup>2</sup>/s (< 0.1)

A.6.1.2 SPR Brenner\_std = 0.0029 m<sup>2</sup>/s (< 0.01)

A.6.1.3 SPR Probe berechnen

A.6.1.3 SPR 60s berechnen

A.6.2 Berechnung von TSP(t) und TSP\_600s

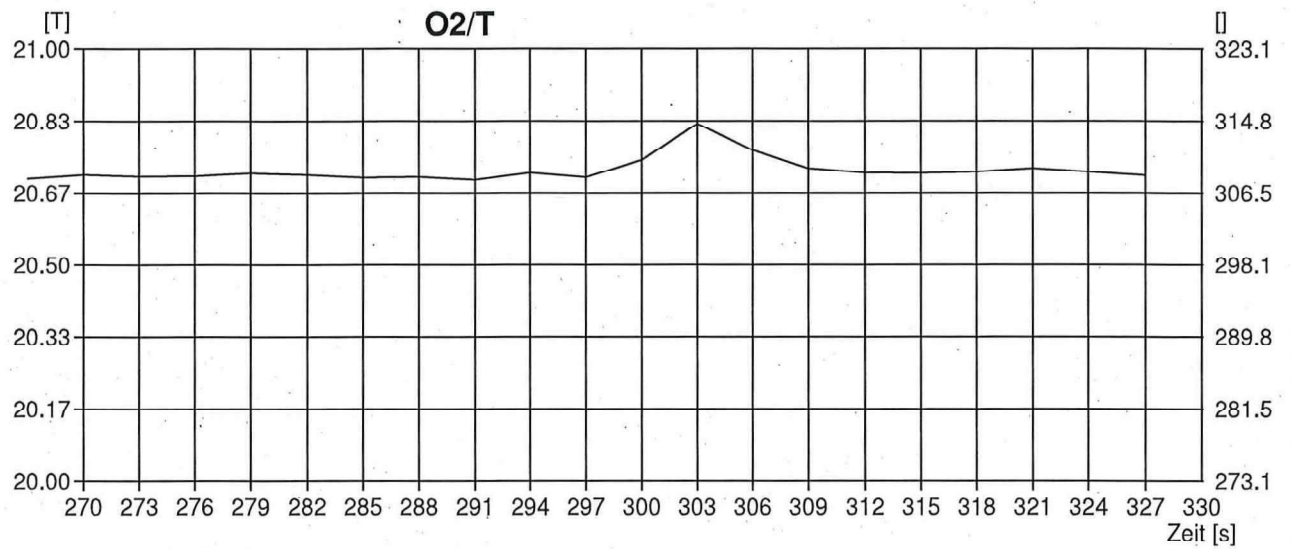
A.6.2 TSP 600s = 24.588 m<sup>2</sup>

A.6.3 Berechnung von SMOGRA"

A.6.3 SMOGRA = 1.438 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Grafik Sauerstoff / Temperatur

udk\_1



# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Prüfbericht

udk\_3

Diese Prüfung wurde in Übereinstimmung mit EN 13823 durchgeführt

Abweichungen von der Prüfmethode

Name und Adresse des Prüflabors

BAM  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin

Name und Adresse des Auftraggebers

UdK Berlin  
Hr. Friedrich; Hr. Brodhagen (HNEE)

Name und Adresse des Herstellers/Lieferanten

Datum des Probeneingangs

23.07.2019

Identifikation des Bauproduktes

udk\_3

Beschreibung der Probennahme

nicht amtlich

allgemeine Beschreibung des geprüften Produktes

pyrolysiertes Holz

Beschreibung der Trägerplatte

keine

Konditionierung

Massekonstanz; beim Auftraggeber

Datum der Prüfung

23.07.2019

Beobachtungen während der Prüfung

Entzündung: ja  
Nachbrennen: ja

Die Prüfergebnisse beziehen sich auf das Brandverhalten eines Bauproduktes unter den besonderen Bedingungen der Prüfung. Sie stellen nicht das einzige Kriterium zur Bewertung des potentiellen Brandrisikos in der praktischen Anwendung dar.

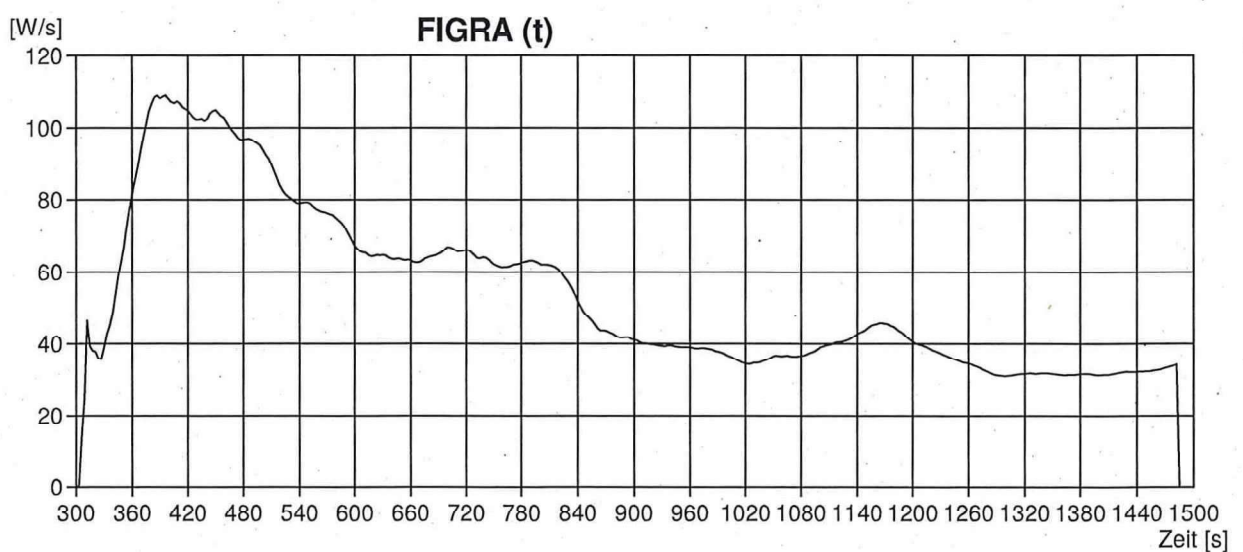
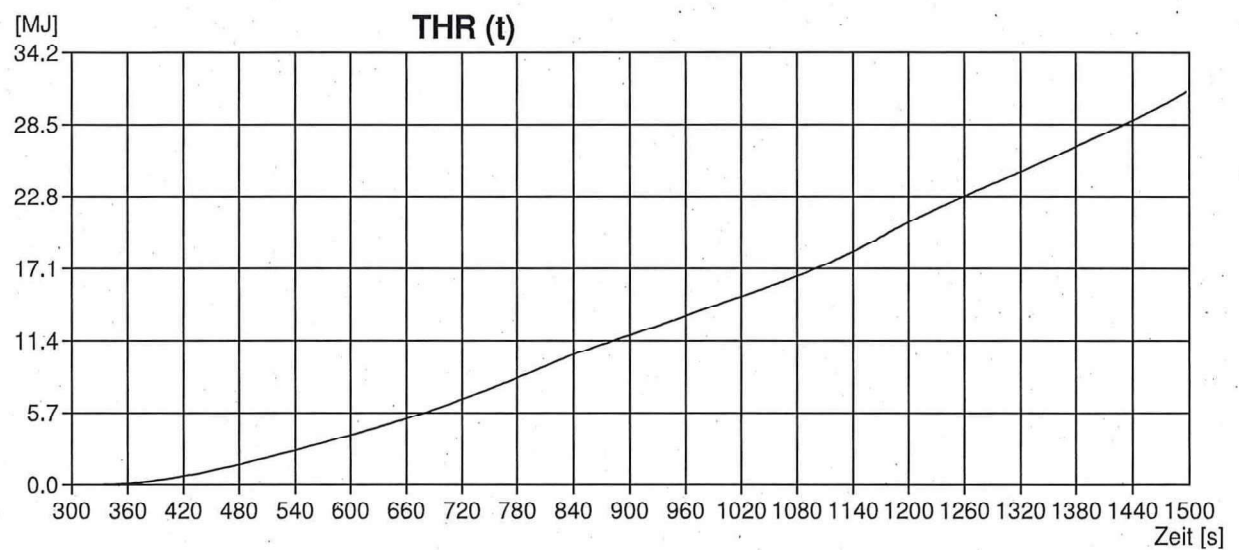
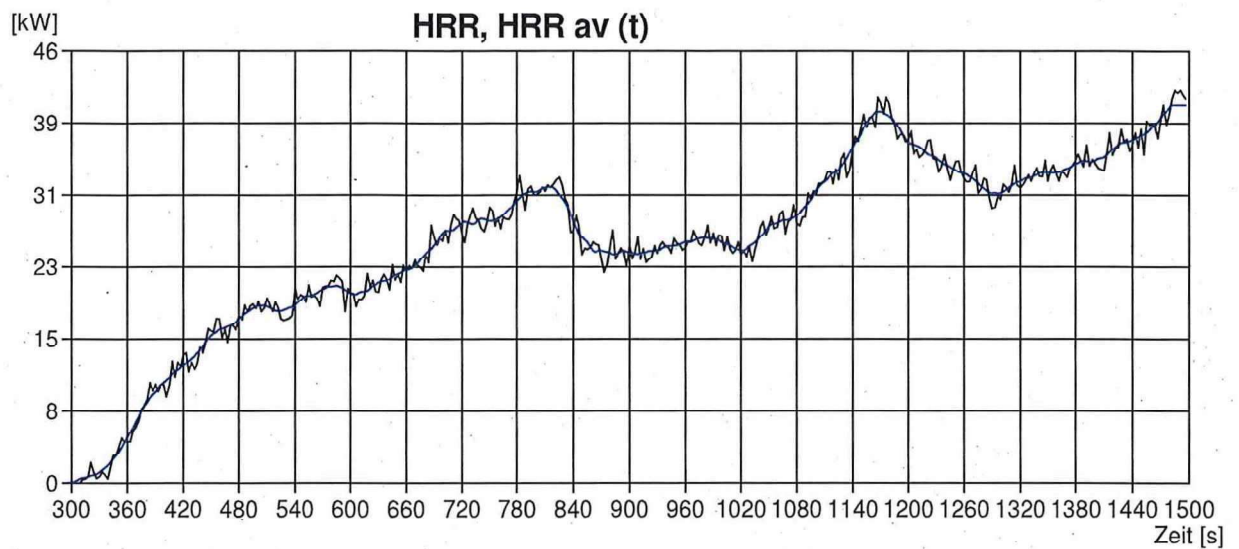
# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Protokoll

udk\_3

|                                                       |                    |
|-------------------------------------------------------|--------------------|
| Versuch                                               |                    |
| Verwendete Norm                                       | DIN EN 13823       |
| Versuchsdatum                                         |                    |
| Volle Versuchsdauer/erfüllt (J/N)                     |                    |
| Produkt                                               |                    |
| Produktbezeichnung                                    | pyrolysiertes Holz |
| Probennummer                                          |                    |
| Trägerplatte                                          |                    |
| Befestigung                                           |                    |
| Fugen                                                 |                    |
| Konditionierung                                       |                    |
| (konstante Masse/feste Dauer)                         | beim Auftraggeber  |
| Zeitintervall                                         |                    |
| Gewicht 1 in g                                        |                    |
| Gewicht 2 in g                                        |                    |
| Labor                                                 |                    |
| Laborbezeichnung                                      | BAM 7.5            |
| Prüfer                                                | Müh                |
| Dateiname                                             | udk_3              |
| Berichts-Nummer                                       | 19019596           |
| Angaben zum Versuchsgerät                             |                    |
| Strömungsprofil-Faktor kt                             | 0.86               |
| Meßsonden-Konstante kp                                | 1.08               |
| Rohrdurchmesser in m                                  | 0.315              |
| O2 Verzugszeit gemäß Kalibrierung in s                | 18                 |
| CO2 Verzugszeit gemäß Kalibrierung in s               | 15                 |
| Umgebungsbedingungen vor dem Versuch                  |                    |
| Luftdruck in Pa                                       | 101442             |
| relative Luftfeuchte in %                             | 56.5               |
| visuelle Beobachtungen                                |                    |
| LFSedge (J/N)                                         | N                  |
| FDPf<=10s (J/N)                                       |                    |
| FDPF>10s (J/N)                                        |                    |
| Bedingungen am Ende des Versuchs                      |                    |
| Lichttransmission                                     | 1.007              |
| xO2 in %                                              | 20.953             |
| xCO2 in %                                             | 0.042              |
| Aufgezeichnete Ereignisse                             |                    |
| Oberflächen-Flash (J/N)                               | N                  |
| Abfallen von Teilen der Probe (J/N)                   | N                  |
| Rauch strömt nicht in die Abzugshaube (J/N)           | N                  |
| Gegenseitige Fixierung der Abschlußpl. versagt (J/N)  | N                  |
| Beding. rechtf. einen vorz. Stopp des Versuches (J/N) | N                  |
| Tendenz zur Verformung / Zusammenbruch (J/N)          | N                  |
| Andero zusätzliche Ereignisse                         | keine              |
| Vorzeitige Beendigung des Versuchs                    |                    |
| Zeitpunkt des Abschaltens der Gaszufuhr in s          |                    |
| Übermäßige RHR (J/N)                                  |                    |
| Übermäßige Temperatur (J/N)                           |                    |
| Brenner start beeinträchtigt/verstopft (J/N)          |                    |
| Versagen des Versuchsgerätes (J/N)                    |                    |

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Diagramm HRR/THR/FIGRA

udk\_3



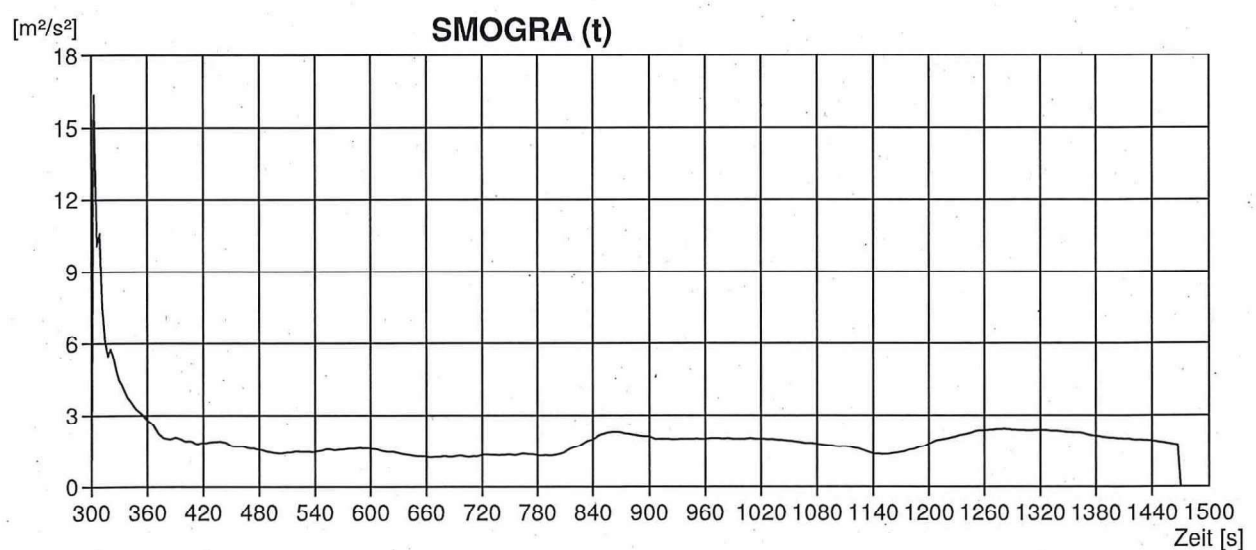
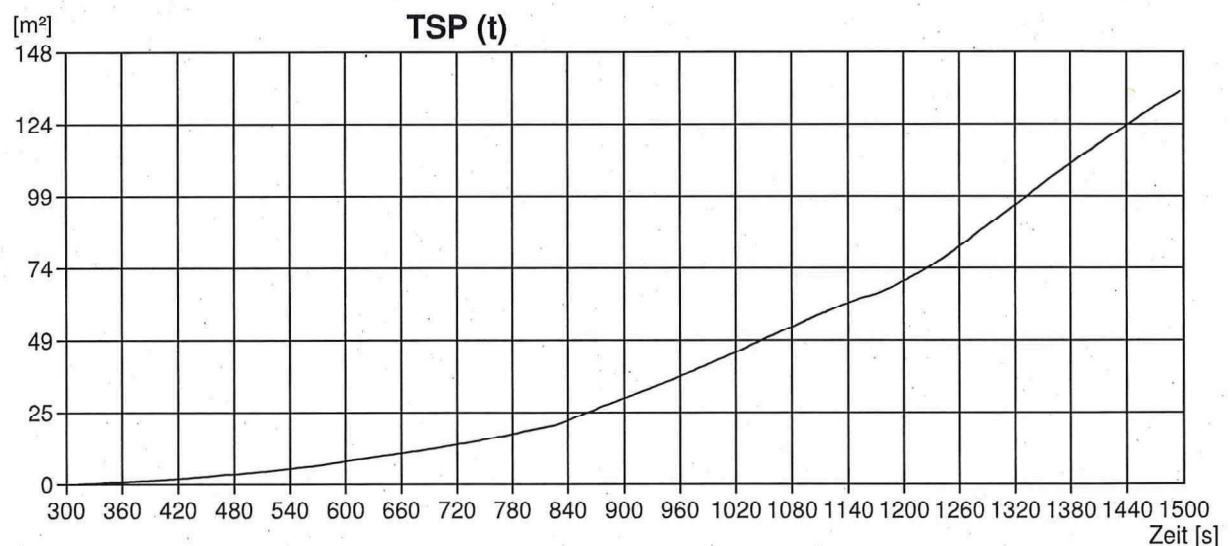
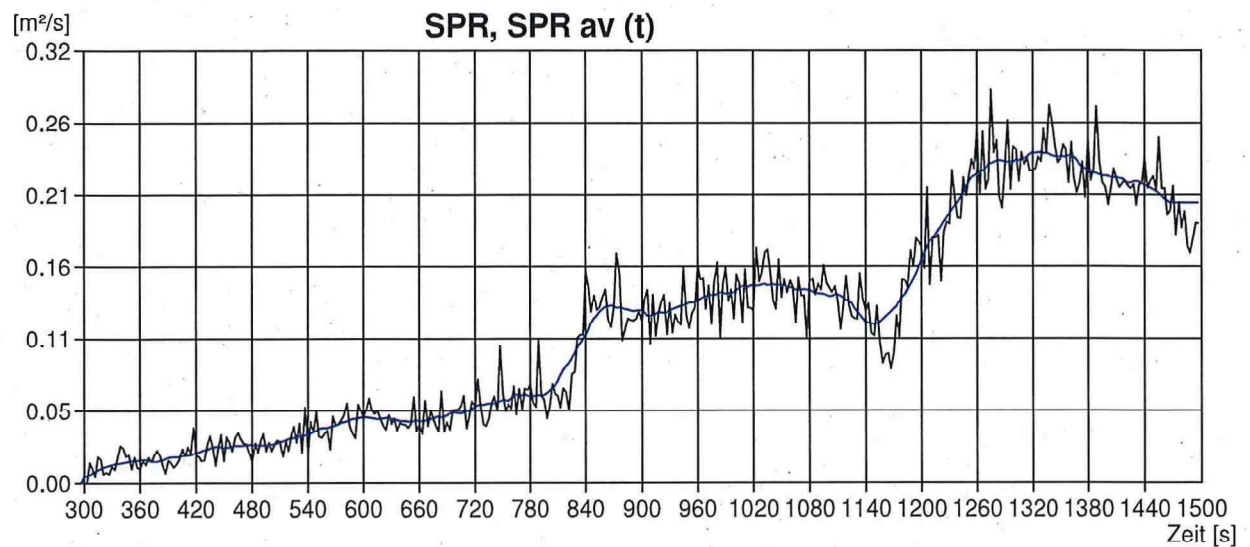
**FIGRA\_02 [W/s] = 109**

**FIGRA\_04 [W/s] = 109**

**THR 600s [MJ] = 11.8**

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Diagramm SPR/TSP/SMOGRA

udk\_3



**SMOGRA [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] = 2.40**

**TSP 600s [m<sup>2</sup>] = 29.5**

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Checkliste - Ergebnisse

udk\_3

## Software

Version Logger2015

Build 23.11.2017, 10:28:33.16

## Parameter / Kalibrierwerte

Umgebungsdruck = 101442 Pa

Umgebungsfeuchte = 56.5 %

kt = 0.863

kp = 1.080

Rohrdurchmesser = 0.315 m

Verzugszeit O2 = 18 s

Verzugszeit CO2 = 15 s

## Startbedingungen

8.2.2 Umgebungstemperatur zum Start = 26 °C ok

8.2.2 Abzugtemperaturen zum Start = 26 °C ok

Konzentration O2 zum Start = 20.95 %

## Auswertung Test

A.2.1.a O2 um 18 s verschieben

A.2.1.a CO2 um 15 s verschieben

A.3.2 Mittelwert Tms von 3 Temperaturen bestimmt

A.2.1.b t0\_T = 303

A.2.1.c t0\_O2 = 294

A.2.1.d t0\_CO2 = 294

A.2.1.e Synchronisierung O2 um -6 s

A.2.1.e Synchronisierung CO2 um -6 s

A.2.2 Verschiebung Tduct, dp, Licht um 3 s

A.3.1 benutzte Thermoelemente (3) ok

A.3.2 Drift O2 = 0.006 % (<0.02%) ok

A.3.2 Drift CO2 = -0.005 % (<0.02%)

A.3.3 Grundlinie Licht = 1.008

A.3.3 Drift Licht = -0.001 (<0.02)

**A.4 Beflammungsdauer = 1194 s (>1245)**

A.4 Propangasmassenstrom ok

A.5.1 Berechnung der Wärmefreisetzung

**A.5.1.1.a Volumenstrom im Abzug zu gross**

A.5.1.1.b Sauerstoffverbrauchsfaktor

A.5.1.1.b x\_O2 = 20.947 %

A.5.1.1.b x\_CO2 = 0.04619 %

A.5.1.1.c Tms = 299.2 K

A.5.1.1.c xa\_O2 = 20.552 %

A.5.1.1.d HRR total

A.6.1 Berechnung der Rauchentwicklungsrate SPR

A.6.1.1 SPR total berechnen

A.5.1.2 HRR Brenner\_avg = 32.21 kW (30.7 +/- 2.0)

A.5.1.2 HRR Brenner\_std = 0.62 kW (<1)

A.5.1.3 HRR der Probe berechnen

A.5.1.4 HRR 30 s berechnen

A.5.2 Berechnung von THR(t) und THR\_600s

A.5.2 THR 600s = 11.824 MJ

A.5.3 Berechnung von FIGRA\_O2 und FIGRA\_O4

A.5.3 FIGRA\_O2 = 109.314 W/s

A.5.3 FIGRA\_O4 = 109.314 W/s

A.6.1.2 SPR Brenner\_avg = 0.0278 m²/s (< 0.1)

A.6.1.2 SPR Brenner\_std = 0.0055 m²/s (< 0.01)

A.6.1.3 SPR Probe berechnen

A.6.1.3 SPR 60s berechnen

A.6.2 Berechnung von TSP(t) und TSP\_600s

A.6.2 TSP 600s = 29.508 m²

A.6.3 Berechnung von SMOGRA"

A.6.3 SMOGRA = 2.395 m²/s²

# SBI Test nach DIN / EN 13823 - Grafik Sauerstoff / Temperatur

udk\_3

