

URBAN STRAW – Brandschutztechnische Konditionierung von Einblas-Stroh zur Gebäudedämmung der urbanen Gebäudeklassen 4 und 5

P. Schubert, A. Korjenic,
H. Fischer, I. Kirchengast, F. Hahn

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

21/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

URBAN STRAW – Brandschutztechnische Konditionierung von Einblas-Stroh zur Gebäudedämmung der urbanen Gebäudeklassen 4 und 5

Dipl.-Ing. Peter Schubert
capital [A] architects ZT-GmbH

Sebastian Stenzel BSc
DPM-Holzdesign GmbH

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic,
Dipl.-Ing. Henriette Fischer BSc,
Dipl.-Ing. Ines Kirchengast BSc, Fabian Hahn BSc
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen
Technische Universität Wien

Wien, Dezember 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	9
3.1.	Stand der Technik und des Wissens.....	9
3.1.1.	Strohballenbau	9
3.1.2.	Stroheinblasdämmung ISO-Stroh	9
4	Projekthalt	11
4.1.	Hintergrundinformationen und Grundlagen	11
4.1.1.	Brandschutz-Normen und rechtliche Regelungen	11
4.1.2.	Recherche ähnlicher Studien.....	13
4.2.	Methodik und Vorgangsweise der Brandtests.....	14
4.2.1.	Selektive Vorversuche	14
4.2.2.	Laborversuche mit Beflammung im Schlyterprüfstand (ONÖRM A 3800-1).....	19
4.2.3.	Laborversuche mit Hitzestrahlung im Cone-Kalorimeter (ISO 5660-1).....	25
4.2.4.	Orientierende SBI-Tests (EN 13823).....	34
4.3.	Stresstest Einblasversuche mit konstruktiven Brandschutzlösungen	40
4.3.1.	Herstellung der Probewandelemente	40
4.3.2.	Durchführung der Einblasversuche	42
4.4.	Bauphysikalische Materialuntersuchungen.....	44
4.4.1.	Wärmeleitfähigkeit.....	44
4.4.2.	pH-Wert Messungen.....	45
4.4.3.	Schimmelpilzresistenz	47
4.4.4.	Wasserdampfdiffusion	50
4.4.5.	Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen.....	51
4.4.6.	Langzeitverhalten des behandelten Einblasstrohs.....	56
4.5.	Flammschutzmitteluntersuchung Ecoaphos MK46 (in Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben)	57
4.5.1.	IR Spektroskopie	58
4.5.2.	NMR Spektroskopie	59
4.5.3.	GC-Massenspektroskopie.....	60
4.5.4.	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	60
4.5.5.	Themogravimetriemessung.....	61
5	Ergebnisse	62
6	Schlussfolgerungen	65
7	Ausblick und Empfehlungen	66

8 Verzeichnisse.....68

1 Kurzfassung

Stroh ist einer der ältesten Baustoffe überhaupt und wurde in der Geschichte vielfältig angewendet: sei es seit der Frühzeit als Dacheindeckung, und zur Bewehrung von Lehmbauelementen (Schöbel, 2006), als Strohplatten für Fassaden (Rogier, 1930) oder seit Ende des 19. Jahrhunderts beim Strohballenbau (Hammett & Hammett, 1998), welcher seit Ende des 20. Jahrhunderts eine Wiederbelebung im Zuge der Ökologisierung des Bausektors erfährt. Die besonderen ökologischen Vorteile des Materials liegen in seiner geringen Herstellungsenergie (Bau EPD GmbH, 2019), der einfachen Entsorgung durch Kompostierung und der guten CO₂-Bilanz, da die Getreidepflanzen im Wachstum mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre absorbieren, als die Verarbeitung des Strohs zu Dämmstoff an Emissionen verursacht. Einem aktuellen Artikel der Onlineausgabe der Zeitschrift GEO (Cartsens, 2022) zufolge erfährt diese energiearme Bauweise vor allem in Deutschland eine Renaissance. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (nawaRos) haben in Europa noch einen niedrigen Marktanteil von ca. 4-5%, allerdings mit steigender Tendenz. Laut einer Studie der TH Braunschweig und des Fraunhofer Instituts „*Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen*“ (Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI, et al., 2021) liegt ein Grund für den niedrigen Marktanteil in den baurechtlichen Anforderungen, die die Verwendung brennbarer Baustoffe beschränken. Schwer entflammbare Baustoffe haben einen deutlich größeren Anwendungsbereich, zum Beispiel als Wärmedämmsysteme von Fassaden der Gebäudeklassen 4 und 5, wie sie im urbanen Raum oftmals vorherrschen. Die aus den Pariser Klimaabkommen resultierenden Ziele zur Dekarbonisierung des Bausektors erfordern jedoch den vermehrten Einsatz von nawaRo Bau- und Dämmstoffen, auch bei mehrgeschossigen Gebäuden urbaner Ballungsgebiete - sowohl im Neubau, als auch bei der Aufstockung und der Sanierung.

Die Motivation und Vision des Projektes „Urban Straw“ ist es, Strohdämmung als einen gängigen, marktüblichen Dämmstoff auch für mehrgeschossige urbane Bauvorhaben zu etablieren und die Anwendbarkeit des Materials durch die Verwendung bei größeren Bauvorhaben signifikant zu steigern. Vor allem im mehrgeschossigen Holzbau, dem eine hohe Zukunftsfähigkeit aufgrund seiner ökologischen Qualitäten zugeschrieben wird (Mitteldeutscher Rundfunk, Anstalt des Öffentlichen Rechts, 2022), ist Stroh ein optimales Dämmmaterial und eine ideale Materialergänzung. Es werden sowohl brandschutztechnische Behandlungen mit ökologisch und humantoxisch unbedenklichen chemischen Additiven materialverwandter Baustoffe, als auch einfache konstruktive Brandschutzlösungen mit ökologisch hochwertigen Materialien, auf deren Anwendbarkeit bei Strohhacksel-Einblasdämmungen untersucht. Die ökologischen Vorzüge des Strohs sollen hierbei nicht beeinträchtigt werden und das Dämmmaterial soll jedenfalls weiterhin am Ende des Lebenszyklusses kompostierbar bleiben. Zur chemischen Ausrüstung des Stroh-Substrats werden die Verfahren des Mischkonditionierens mit unterschiedlichen Mischern sowie des Kesseldruck-imprägnierens im Laborautoklav angewendet. Im Vergleich dazu werden bauliche Lösungen mit einer konstruktiven Brandabschirmung des unbehandelten Strohs durch eine neuartige Fassadenbahn mit sehr hohem Brandschutz sowie durch herkömmliche Holzwoleleichtbauplatten untersucht, da diese Form der Dämmstoffverarbeitung ohnehin eine fassadenseitige Gefachabdeckung benötigt. Durch Brandtest-Serien verschiedener Herangehensweisen mit Beflammung und mit Hitzestrahlung wird versucht eine möglichst optimale, praxistaugliche Materialkombination zu selektieren.

Als Ergebnis wird festgestellt, dass bei Brandeinwirkung die konstruktive Abschirmung des Strohs mit Holzwoleleichtbauplatten, entwickelt bereits 1908 in Wien von Robert Scherer (Kakol & Krzosek, 2014), der chemischen Ausrüstung des Strohs überlegen ist. Es stellt sich hierbei heraus, dass die Brandklasse und die Materialstärke der Platten nur unwesentliche Faktoren sind. Zudem bleibt bei dieser Anwendung das Stroh völlig unbehandelt und es ist keine Adaption des Verfahrens der Produktionsanlage notwendig. Diese konstruktive Lösung scheint auch leicht auf andere nawaRo-Einblasdämmstoffe übertragbar zu sein, bspw. auf Flocken aus Recycling-Baumwolle oder Flachs.

2 Abstract

Straw is one of the oldest building materials and has been used in a variety of ways throughout history: be it since early times as roofing material and to reinforce earth building elements (Schöbel, 2006), as straw panels for facades (Rogier, 1930) or since the end of the 19th century in straw bale construction (Hammett & Hammett, 1998), which is regaining popularity since the end of the 20th century in the course of the greening of the construction sector. The special ecological advantages of the material lie in the fact that it requires little manufacturing energy (Bau EPD GmbH, 2019), is easy to dispose of through composting and has a good CO₂ balance, since the grain plants absorb more carbon from the atmosphere during growth than the processing of the straw into insulating material cause emissions. According to a current article in the online edition of the magazine GEO (Cartsens, 2022), this low-energy construction method is currently experiencing a renaissance in Germany. Building insulation made from regrowing renewable raw materials still have a low market share of around 4-5% in Europe, but the trend is rising. According to a study by the TH Braunschweig and the Fraunhofer Institute *"More than just insulation - additional benefits of insulating materials made from renewable raw materials"* (Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI, et al., 2021), one reason for this lies in the building authority requirements that restrict the use of combustible building materials. Flame-retardant building materials have a much wider range of applications, for example as thermal insulation systems for facades in the higher building classes 4 and 5, which are prevalent in urban areas. However, the goals resulting from the Paris climate agreement for the decarbonization of the construction sector require the increased use of regrowing raw building and insulating materials, also in multi-storey buildings in urban areas - both in new construction and in the case of additions and renovation.

The motivation and vision of the "Urban Straw" project is to establish straw insulation as a common, commercially available insulating material for multi-storey urban construction projects and to hereby significantly increase the applicability of the material by using it in larger construction projects. Especially in multi-storey timber constructions, which are said to have a high future viability due to its ecological qualities, straw is an optimal insulating material and an ideal material supplement (Mitteldeutscher Rundfunk, Anstalt des Öffentlichen Rechts, 2022). Both fire protection treatments with ecologically and human-toxically harmless chemical additives of material-related building materials as well as simple constructive fire protection solutions with ecologically high-quality materials are examined for their applicability with blow-in straw insulation. The ecological advantages of the straw should hereby not be impaired and the insulating material should in any case remain compostable at the end of its life cycle. In order to chemically treat the straw substrate the methods of mix-conditioning with different mixers and pressure impregnation in a laboratory autoclave are applied. Since blow-in insulating material requires a compartment cover on the facade anyway, structural solutions with a constructive shielding of the untreated straw by a new type of facade membrane with a very high level of fire protection and by traditional wood wool boards are being investigated in comparison. The selection of the best possible, practical material combination is achieved through several fire test series of different approaches with flaming and heat radiation.

The result shows that the constructive shielding of the straw against the fire with wood wool panels, which were originally developed by Robert Scherer in Vienna in 1908 (Kakol & Krzosek, 2014), is superior to the chemical treatment. It turns out that the fire rating and the material thickness of the panels are only insignificant factors. Above all the straw remains completely untreated with this application and no adaptation of the production plant is necessary. This constructive solution also appears to be easily transferrable to other regrowing blow-in insulation materials, such as flakes made from recycled cotton or flax.

3 Ausgangslage

3.1. Stand der Technik und des Wissens

Die folgenden Ausführungen dokumentieren die Erkenntnisse zum Bauen mit Stroh in Bezug auf die Brennbarkeit des Materials. Hierbei werden ausschließlich die Eigenschaften und Klassifikationen der harmonisierten Europäischen Norm EN 13501 Teil 1 (4.1.1) angeführt. Die Erkenntnisse zur Brandwiderstandsdauer bestimmter Strohbaukonstruktionen gemäß der EN 13501 Teil 2 werden nicht berücksichtigt, da sie dem Projekthalt und den Zielen des Projekts nicht entsprechen.

3.1.1. Strohballebau

Nationale und internationale Studien (Wimmer, et al., 36/2011) (Danielewicz, 2008) zum Strohballebau weisen nach, dass Getreidestrohballe nicht leicht entzündbar sind. Mit der Zertifizierung ETA 017/247 des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBT) vom 21. Juni 2017 wird belegt, dass Weizenstroh-Kleinballe die Euroklasse E gemäß EN 13501-1 (4.1.1) erfüllen. Das Material kann daher als zulässiger Baustoff verwendet werden, ist aber im Rohzustand nur als Fassadendämmstoff für die Gebäudeklasse 1 nach der für Österreich geltenden *OIB Richtlinie 2 Brandschutz* (4.1.1) uneingeschränkt anwendbar. Die deutsche Studie *Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballebauweise* (Danielewicz, 2008) zeigt, dass bereits eine beidseitige 8 mm Lehmputzschicht auf Strohballe eine Verbesserung des Gesamtsystems hin zur Euroklasse B gemäß EN 13501-1 (4.1.1) bewirkt, wie im Klassifizierungsbericht 3305/558/07a der Materialprüfanstalt Braunschweig dokumentiert wird. In Frankreich wurde mit der Klassifikation N°-19/RC-09 des Institut Technologique (FCBA) vom 21. Februar 2019 (Gaujard, 2020) nachgewiesen, dass auch mit einer Kalkputzschicht von 20 mm auf Strohballe dieselbe Euroklasse B erzielt wird, was den Anforderungen der *OIB Richtlinie 2 Brandschutz* (4.1.1) als Fassadendämmsystem für die Gebäudeklassen 4 und 5 entspricht.

3.1.2. Stroheinblasdämmung ISO-Stroh

Die beim klassischen Strohballebau verwendeten Kleinballe sind kaum mehr in der Landwirtschaft gebräuchlich und werden aufgrund der höheren Schlagkraft des Maschineneinsatzes inzwischen durch die größer dimensionierten Quaderballe und Rundballe abgelöst. Einer Verarbeitung zu Strohhäckseln stehen diese Großballeformate jedoch nicht im Weg, weshalb die Strohhäcksel-Einblasdämmung ISO-Stroh aus gehäckseltem Weizenstroh als zukunftsfähige Weiterentwicklung des Strobaus angesehen werden kann. Laut deren europäischer Zertifizierung ETA-17/0559 erfüllt ISO-Stroh bei einer Einblasdichte von 105 Kg/m³ dieselbe Brand-Euroklasse E wie Kleinballe mit derselben Materialdichte. Das maschinelle Einbringen mit Einblasmaschinen reduziert zwar die Möglichkeiten zum Selbstbau privater Bauherren, stellt jedoch für den gewerblichen Anwender eine erhebliche Arbeitserleichterung dar. Einblasdämmung erfordert die bauliche Herstellung geschlossener Gefache, welche in Folge mit dem Dämmstoff ausgeblasen werden. Das direkte Verputzen des Strohs, wie beim Strohballebau, ist daher bei der Stroheinblasdämmung aufgrund der Abdeckung nicht möglich, weshalb die Brandschutzlösungen der Strohballe mit Lehm- und Kalkputzen nicht einfach übertragbar sind.

Im Vorfeld dieses Forschungsprojektes wurde mit den Partnern DPM Holzdesign GmbH als Hersteller von ISO-Stroh und capital [A] architects ZT-GmbH eine experimentelle Wandkonstruktion mit einer fassadenseitigen Gefachabdeckung aus einer diffusionsoffenen, nicht brennbaren zementgebundenen Leichtbeton-Bauplatte als Putzträger entwickelt. Hierbei stellte sich heraus, dass die verwendete Leichtbeton-Bauplatte dem Einblasdruck des Dämmstoffs allein nicht standhalten

konnte und durch eine zusätzliche MDF-Platte verstärkt werden musste, was die Wirtschaftlichkeit der Konstruktion in Frage stellte und deshalb bisher zu keiner Anwendung führte.

4 Projektinhalt

4.1. Hintergrundinformationen und Grundlagen

4.1.1. Brandschutz-Normen und rechtliche Regelungen

Die folgenden Normen und baurechtlichen Bestimmungen zum Brandschutz von Baustoffen definieren den wesentlichen Rahmen und die Zielsetzung des Projektes.

EN 13501-1

Das Klassifizierungssystem der Normenreihe EN 13501 *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten* gilt als Bewertungsmaßstab für das Brandverhalten von Baustoffen auf europäischer Ebene und wurde Anfang 2010 veröffentlicht. Es legt europaweit einheitliche Anforderungen für den Brandschutz fest, in Österreich wird die Norm mit dem Wortlaut ÖNORM EN 13501 betitelt. Die Norm EN 13501 besteht aus fünf Teilen; für das Forschungsprojekt ist der Teil 1 (in Folge zitiert als EN 13501-1) maßgeblich, der die Baustoffklassen (Euroklassen) A bis F definiert:

- **A:** kein Beitrag zum Brand (**A1, A2**)
- **B:** sehr begrenzter Beitrag zum Brand
- **C:** begrenzter Beitrag zum Brand
- **D:** hinnehmbarer Beitrag zum Brand
- **E:** hinnehmbares Brandverhalten
- **F:** keine Leistung festgestellt

Weitere Unterteilungen betreffen die Brandnebenerscheinungen der Rauchentwicklung (s = smoke) sowie des brennenden Abtropfens/Abfallens (d = droplets) von Baustoffen:

- **s1:** geringe Rauchentwicklung
- **s2:** mittlere Rauchentwicklung
- **s3:** hohe Rauchentwicklung bzw. Rauchentwicklung nicht geprüft
- **d0:** kein brennendes Abtropfen/Abfallen innerhalb von 600 Sekunden
- **d1:** kein brennendes Abtropfen/Abfallen mit einer Nachbrennzeit länger als 10 Sekunden innerhalb von 600 Sekunden
- **d2:** keine Leistung festgestellt

EN 13823

Im Rahmen der Harmonisierung der europäischen Normen für Bauprodukte werden allmählich die nationalen Prüfverfahren für das Brandverhalten von Baustoffen abgelöst. Im Mittelpunkt der Klassifizierung nach EN 13501-1 steht der sogenannte SBI-Test (*Single Burning Item* - Test eines einzelnen brennenden Gegenstands), welcher den Beginn eines Brands simuliert, um das Brandverhalten von Bauprodukten zu beurteilen. Die Durchführung des SBI-Tests wird in der Norm EN 13823 definiert. Zu den Parametern gehören die Flammenausbreitung (LFS – *longitudinal flame spread*), die Energiefreisetzung (THR – *total heat release*), die Rauchentwicklung (SMOGRA – *smoke growth rate*), die Geschwindigkeit der Brandausbreitung (FIGRA – *fire growth rate*) und ob ein Produkt brennend abtropft. Der Test stellt eine realistische Brandsituation nach, wie sie beispielsweise durch einen brennenden Papierkorb in einer Ecke des Raumes entstehen kann. Die Testdauer beträgt 20 Minuten, ein Nachglimmen der Baustoffe wird dabei nicht berücksichtigt.

EN 16733

Diese europäische Norm legt ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Neigung eines Bauprodukts zum kontinuierlichen Schwelen fest und gilt für alle Bauprodukte, die nach EN 13501-1 klassifiziert werden. Dieses Schwel- und Glimmverhalten hat jedoch keinen Einfluss auf die Klassifizierung nach EN 13501-1 und ist daher in Österreich bis dato vernachlässigbar. Das in dieser europäischen Norm dargestellte Prüfverfahren ist angelehnt an den Schlyterprüfstand der in Österreich nicht mehr gültigen ÖNORM B 3800 Teil 1 zur Schwerentflammbarkeit von Baustoffen.

ÖNORM B 3800 (alt)

Mit 1. Jänner 2004 wurden nationale Brandschutznormen durch europäische Dokumente ersetzt. Somit gilt statt der Vornorm ÖNORM B 3800-1 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen* nun die ÖNORM EN 13501-1. Der in der Norm beschriebene Schlytertest für die Prüfung der Schwerbrennbarkeit, welcher auch in der ÖNORM A 3800 Anwendung findet, gilt jedoch weiterhin als einfaches und probates Mittel zur Untersuchung des Brandverhaltes von Materialien durch Beflammung. Es wird hierbei im Wesentlichen die Abbrandhöhe des Prüfguts ermittelt.

ISO 5660-1

Bei der Prüfung des Brandverhaltens der für Baustoffe nicht verbindlichen Norm ISO 5660-1 wird ein Cone-Kalorimeter verwendet, um die Wärmefreisetzungsrate und dynamische Rauchentwicklung einer Materialprobe einzuschätzen. Die Prüfeinrichtung dient der Untersuchung der Reaktion von Baustoffen auf Hitzeeinwirkung durch Bestrahlung und erlaubt die genaue Bestimmung des Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate (HRR). Es können somit Hinweise auf den Beitrag eines Materials zur Brandentwicklung und -ausbreitung festgestellt werden und die Entwicklung eines Feuers in einem sehr frühen Stadium beobachtet werden.

OIB Richtlinie 2 Brandschutz (OIB-Richtlinie 2 Brandschutz, 2019)

Die OIB-Richtlinie 2 „Brandschutz“ und die dazugehörigen erläuternden Bemerkungen regeln die wesentlichen Mindestanforderungen an den Brandschutz von Gebäuden in Österreich. Sie vereinheitlichen die Brandschutzstandards für alle österreichischen Bundesländer und normieren die technischen Vorkehrungen, um eine Feuer- und Rauchausbreitung innerhalb eines Bauwerkes hintanzuhalten. Die Richtlinie definiert auch die Gebäudeklassen (in Folge zitiert als GK), deren Einteilung sich nach der Art, der Höhe und der Fläche des Gebäudes richtet. Es gilt grundsätzlich, dass je höher die GK ist, desto höher sind die Anforderungen an den Brandschutz. Die im urbanen Raum vorherrschenden Gebäudeklassen weisen demnach ein Fluchtniveau von maximal 11 m und bis zu 4 oberirdische Vollgeschosse bei der GK 4 und ein maximales Fluchtniveau von 22 m bei der GK 5 auf. Die GK 5 ist hierbei in die Kategorien „≤ 6 oberirdische Geschoße“ und „> 6 oberirdische Geschoße“ unterteilt. Die in der OIB Richtlinie 2 dargestellte Tabelle 1a (*Abbildung 4-1*) regelt grundsätzlich die Verwendung von Dämmstoffen bei Fassaden im Punkt 1.2.2 und bei Dächern im Punkt 4.2. nach den Euroklassen der EN 13501-1. Demnach müssen diese Dämmstoffe in der GK 4 und der GK 5 die Mindestanforderung der Euroklasse B erfüllen. Bei Fassadensystemen besteht mit Punkt 1.2.1 die Sonderregelung, dass alternativ das Gesamtsystem die Klassifikation B aufweisen kann, auch wenn der Dämmstoff selbst diese Anforderung nicht erfüllt; das Gesamtsystem wird hierbei als eine Art Verbundwerkstoff angesehen. Eine entsprechende Regelung für Dachdämmungen besteht jedoch nicht. Zudem gilt, dass Baustoffe der Euroklasse F grundsätzlich nicht für Gebäude anwendbar sind.

Tabelle 1a: Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten

Gebäudeklassen (GK)	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5		
					≤ 6 oberirdische Geschoße	> 6 oberirdische Geschoße	
1 Fassaden							
1.1	Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme	E	D	D	C-d1	C-d1	C-d1
1.2	Fassadensysteme, vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete						
1.2.1	Gesamtsystem <i>oder</i>	E	D-d1	D-d1	B-d1 ⁽¹⁾	B-d1 ⁽¹⁾	B-d1
1.2.2	Einzelkomponenten						
	- Außenschicht	E	D	D	A2-d1 ⁽²⁾	A2-d1 ⁽²⁾	A2-d1 ⁽³⁾
	- Unterkonstruktion stabförmig / punktförmig	E / E	D / D	D / A2	D / A2	D / A2	C / A2
	- Dämmschicht bzw. Wärmedämmung	E	D	D	B ⁽²⁾	B ⁽²⁾	B ⁽³⁾
//							
4 Dächer mit einer Neigung ≤ 60°							
4.1	Dacheindeckung bzw. Bedachung ⁽⁷⁾	B _{ROOF} (t1)	B _{ROOF} (t1)	B _{ROOF} (t1)	B _{ROOF} (t1)	B _{ROOF} (t1) ⁽⁸⁾	B _{ROOF} (t1) ⁽⁸⁾
4.2	Dämmschicht bzw. Wärmedämmung in der Dachkonstruktion	E	E	E	B ⁽⁹⁾	B ⁽¹⁰⁾	B ⁽¹⁰⁾

Abbildung 4-1: Auszug aus der OIB Richtlinie 2 Brandschutz, 2019;

Quelle: Österreichisches Institut für Bautechnik

4.1.2. Recherche ähnlicher Studien

Die folgenden wissenschaftlichen Studien wurden im Vorfeld der Versuche recherchiert. In deren Anlehnung entstanden die Entwicklung einer Methodik und die Auswahl der Prüfmethode beim Projekt.

Stroh kompakt (Adensam, 2004)

Es wurden Versuche zum Sprühauftrag von Kali-Wasserglas (Kaliumsilikat) und Soda (Natriumcarbonat) als Brandschutzadditive des Weizenstrohs als Schwad auf dem Feld unternommen. Der Materialverbund aus Stroh und Kaliwasserglas wurde einem Kleinbrennertest unterzogen, welcher lediglich Werte entsprechend der Euroklasse E ergab.

Ökodämm (Mundigler, Sykacek, & Schübl, 2014)

Bei dem Projekt wurden Flammenschutzmittel der niedrigen Wassergefährdungsklasse 1 zur Herstellung von Flachs-Dämmmatten verwendet. Es wurden unter anderem folgende ökologisch unbedenklichen Flammenschutzmittel als Substitute des üblicherweise verwendeten Borsalzes untersucht:

- Wasserglas BauMit (Kaliumsilikat)
- Novaflam APP (liq. Ammonium-Polyphosphat)
- Novaflam FR1 (Stickstoff-Phosphor-Verbindung)
- Flammentin MSG (Phosphor-Stickstoff-Verbindung)

Die Flammenschutzmittel wurden im Zuge des Produktionsprozesses als Flüssigkeit eingesprüht. Bei Brandtests im Schlyterprüfstand analog zur ÖNORM A 3800-1, welcher auch im Projekt „Urban Straw“ Anwendung findet, wurde nachgewiesen, dass Phosphor-Stickstoff-Verbindungen gegenüber Wasserglas als Flammenschutzmittel für Flachs überlegen sind. Bei den Versuchen wurde darüber hinaus festgestellt, dass eine Dosierung der Flammenschutzmittel von 4 M% zu gering ist und eine Dosierung von mindestens 8 M% für einen wirkungsvollen Brandschutz notwendig ist.

Verbundvorhaben: Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (Fraunhofer-Institut für Bauphysik, et al., 2008)

Teilvorhaben 3b: Brandtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene

Eine ausführliche Versuchsreihe im Cone-Kalorimeter nach ISO 5660-1 bei einer Hitzebestrahlungsstärke von 40KW/m² mit Holzspänen sowie Molke, Kochsalz, Gips, Lehmputz, Borsalz, Alkalisilikat (Natrium-Wasserglas) und Ammoniumphosphat als Flammschutzadditive zeigte, dass Gips, Lehmputz, Soda und Molke nur eine sehr geringe Brandschutzwirkung aufweisen. Ammoniumphosphat war weitaus effektiver und erreicht Werte ähnlich den Borsalzen. Kochsalz erzielte ebenfalls gute Resultate, wurde jedoch aufgrund seines hydrophilen Verhaltens Feuchtigkeit anzuziehen für einen bauseitigen Einsatz ausgeschlossen. Die Versuche zeigten, dass eine Dosierung von ca. 10 M% der Additive ausreichend ist, bei 15 M% stellte sich keine wesentliche Verbesserung ein.

Innovativer Einsatz von ein- und mehrjährigen Pflanzen als Dämmmaterial (Barbu, Krenn, Nagl , & Schnabel , 2020)

Zur Herstellung von biogenen Plattendämmstoffen aus Mais-, Weizenstroh- und Miscanthushäckseln wurden Bindemittel mit den Flammschutzadditiven Harnstoff, Tannin und Wasserglas verwendet. Bei Beflammungsversuchen erwies sich Tannin als effizientestes Flammschutzmittel. Der verwendete Pflugscharmischer stellte sich nicht als ideales Werkzeug heraus, weshalb beim Projekt „Urban Straw“ alternative Mischer verwendet wurden. Die Studie untersucht darüber hinaus intensiv die bauphysikalischen Auswirkungen der Additivzugabe auf das jeweilige Substrat.

4.2. Methodik und Vorgangsweise der Brandtests

Die Versuchsreihen der Brandtest soll Aufschluss über das Brandverhalten der unterschiedlichen Materialkombinationen der Strohhacksel geben. Es gilt mit möglichst einfachen Mitteln, welche eine reale Brandeinwirkung simulieren, herauszufinden, welche Materialien eine reale Praxisanwendung erfahren können. Um den hohen Aufwand normgerechter SBI-Tests zu vermeiden, werden zuerst technisch niederschwellige Versuchsreihen aufeinander folgend durchgeführt. Im Selektionsprozess werden die günstigsten Materialkombinationen ermittelt und der nächstaufwendigeren Untersuchung zugeführt. Die beiden effizientesten und in wirtschaftlicher Hinsicht aussichtsreichsten Materialkombinationen werden abschließend zur Überprüfung einem orientierenden SBI-Test zugeführt.

4.2.1. Selektive Vorversuche

Bei Vorversuchen werden die im Zuge der Recherche ermittelten Flammschutzmittel materialverwandter Dämmstoffe auf Ihre Wirksamkeit in Verbindung mit Strohhackseln bei Beflammung untersucht. Die ausgewählten chemischen Mittel (*Tabelle 1*) weisen keine Inhaltstoffe auf, die in der EU-Chemikalienverordnung REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* - Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien) (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)) gelistet sind und gelten daher als humantoxisch und ökologisch unbedenklich. Als Kriterium der biologischen Abbaubarkeit der Inhaltsstoffe gilt deren Einstufung entsprechend der deutschen Wassergefährdungsklasse 1. Es wird dabei zwischen drei Wassergefährdungsklassen unterschieden: WGK 1: schwach wassergefährdend, WGK 2: deutlich wassergefährdend, WGK 3: stark

wassergefährdend. Eine weitere Orientierung bei der Auswahl der Mittel liefert der *Kriterienkatalog 08012 „Brandschutzbeschichtungen“* der Arbeitsgruppe 08 der ÖkoKauf Wien (Magistratsabteilung 34, Wiener Gesundheitsverbund, Wiener Wohnen, 2020).

Tabelle 1: Flammenschutzmittel für Vorversuche

Flammenschutzmittel	Bekannte Inhaltstoffe
Kaliwasserglas 28/30°	Kaliumsilikat
Ecoaphos MK46	Verschiedene saure organische und anorganische Salze *
Novaflam FR1	Lösung aus organischer Phosphor-Stickstoff-Verbindung *
Flammentin MSG	Lösung aus Phosphor-Stickstoff-Verbindung *
Antifire AI-WB	Organische und anorganische Stickstoffverbindungen sowie Salze, Acrylharzdispersion als Haftvermittler *
Eigenmischung (nach historischem Vorbild **)	ca. 3% Kalialaun, 10% Salmiak (Ammoniumchlorid), 20% Kaliumcarbonat (Pottasche), 66% destilliertes Wasser

* *Herstellerangaben*

** *Kaiserliche Verordnung Josef II vom 28. September 1781 (Josef II, 1781)*

Mischkonditionierung im Eirich-Mischer (Coating)

Im Eirich-Intensivmischer der TU Wien werden erste Chargen der Strohhäcksel durch Beimischung der flüssigen Flammenschutzmittel mit einer Akku-betriebenen Agrar-Spritzpumpe ausgerüstet (*Abbildung 4-2*). Die Besonderheit des Eirich-Mischers mit gegenläufigen Mischwerkzeugen und einer drehenden, schräg stehenden Mischtrommel (*Abbildung 4-3*) erweist sich als sehr geeignet aufgrund des materialschonenden Mischvorgangs, der die Struktur der Strohhäcksel nicht beschädigt. Es wird eine einheitliche Konzentration von 9 M% der flüssigen Additive im Verhältnis zum Strohs substrat bei einer Mischdauer von 1,5 - 2,5 Minuten eingebracht. Die Einstellung des Mischwerkzeugs Wirbler beträgt 113 U/min, der Mischertrommel 16 U/min. Der Versuch Indigo-Pigmente als Farbmittel zur Feststellung der Verteilung der Additive einzusetzen ist allerdings nicht erfolgreich, es wird keinerlei Verfärbung der Häcksel wahrgenommen.



Abbildung 4-2: Einsprühen der Flammschutzmittel (links) und fertiger Materialverbund (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects

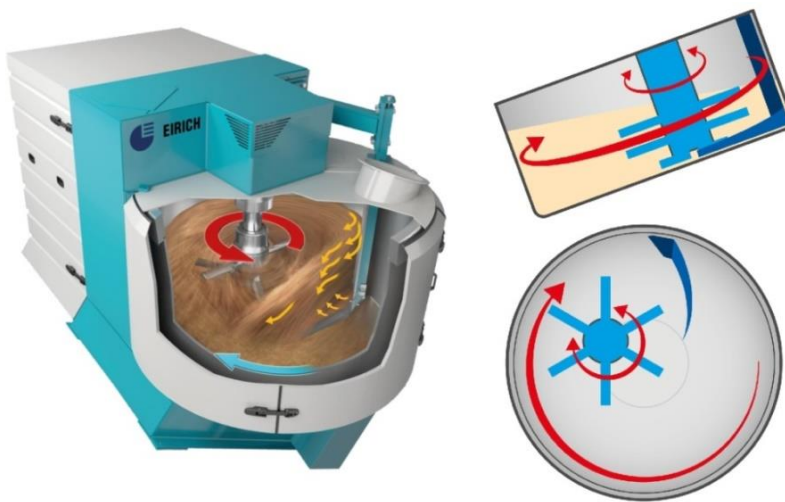


Abbildung 4-3: Wirkungsweise des Eirich-Mischers mit Wirbler und drehendem Mischbehälter;
Quelle: Maschinenfabrik Gustav Eirich, BFT International

Brandversuche im Haushaltsmaßstab

Erste niederschwellige Versuche im Haushaltsmaßstab zum Vergleich der Endzündbarkeit und Brennbarkeit unbehandelter Strohhäcksel der mit Flammschutzmittel behandelten Proben werden mit einem Lötlötbrenner und mit einer Keramikschale und 20 Sekunden Beflammung im Außenbereich der Konsortialführung durchgeführt. Es ist lediglich eine optische Beurteilung des Brandverlaufs und des Ausmaßes der Verbrennungen möglich, welche keine nennenswerten Unterschiede aufweisen (Abbildung 4-4). Es kommt durchgehend zur Verkohlung des Prüfguts durch Glutbrand, eine direkte Flammenbildung beim Stroh ist jedoch bemerkenswerter Weise bei keiner Probe erkennbar. Bei allen Proben ist ein Nachglimmen des Strohs nach Entfernung des Brenners zu beobachten, sie werden

daher mit Wasser gelöscht. Bei der Verwendung der Fassadenbahnen wird die Schale mit dem Stroh in die Folie eingehüllt und mit Edelstahl draht fixiert. Beim Vergleich der Fassadenbahnen zeigt sich die höhere Wirksamkeit der Fassadenbahn Stamisol safe one der Euroklasse A2 gegenüber einer Fassadenbahn der Euroklasse B desselben Herstellers. Während die Fassadenbahn bereits kurz nach Zündung des Brenners verbrennt, hält die Bahn der Klasse A2 der 20-sekündigen Beflammung ohne Beschädigung stand, eine Verkohlung des Strohs unterhalb der Folie wird dabei aber nicht verhindert. Bei einem weiteren Versuch versagt diese Bahn nach 2 Minuten Beflammung, eine Rauch- und Flambbildung ist hier am Rand der Schale gegen Ende des Versuchs zu beobachten (Abbildung 4-5).



Abbildung 4-4: Brandversuch mit Lötlampe und Keramikschale (Fassadenbahn Euroklasse B);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects



Abbildung 4-5: Versagen und Flambbildung bei der Fassadenbahn A2 Stamisol Safe one;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects

Vorversuche im Labormaßstab (ÖNORM A 3800- 1)

Um vergleichbare Werte zu erzielen, werden Brandversuche im Schysterprüfstand in Anlehnung an die ÖNORM A 3800-1 hinsichtlich der Brennbarkeitsklasse „schwerbrennbar“ beim Drittleiter TGM durchgeführt. Es wird ein Gitterkorb mit 9 mm Maschenweite (quadratisch), Drahtdicke 0,8 mm der Größe 300 mm x 800 mm mit 40 mm Tiefe mit dem Prüfgut befüllt, leicht komprimiert und darauf geachtet, dass immer eine ähnlich beflammbare Masse zur Verfügung steht. Hinter dem Gitterkorb und als Vorderplatte wird im Prüfstand eine 10 mm dicke Faserplatte verwendet. Als Vergleichswerte werden die Höhe des Abbrands sowie die verbrannte Masse durch Abwiegen vor und nach der normgemäßen Beflammungszeit von 15 Minuten ermittelt (Abbildung 4-6).



Abbildung 4-6: Abwiegen der Prüfmuster (links), Durchführung Beflammung (mitte) und Ermittlung der Abbrandhöhe (rechts);

Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM

Bereits bei den ersten Brandversuchen wird beobachtet, dass die Proben nach Entfernen des Brenners nicht selbstständig verlöschen, sondern anhaltend nachglimmen. Daher wird nach durchgeführter Beflammung eine stabförmige Thermosonde in das vermutete Hitzezentrum 15 cm oberhalb der Bodenplatte der Muster gesteckt (Abbildung 4-7).

In der 15-minütigen Nachglimmphase werden durchgehend Temperaturanstiege von $< 90^{\circ}\text{C}$ zu Beginn der Messung auf $>180^{\circ}\text{C}$ gegen Ende festgestellt. Beim 1. Versuch mit dem Mittel MK46 wurde die Nachglimmphase auf 60 Minuten ausgedehnt und eine Endtemperatur von weiterhin 160°C ermittelt (der Versuch wurde zur besseren Vergleichbarkeit später wiederholt). Es wird somit deutlich, dass sämtliche Proben einen sich fortsetzenden und ausdehnenden Glimmbrand aufweisen.



Abbildung 4-7: Temperaturmessung in der Nachglimmphase;

Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM

Primär aufgrund des ermittelten Masseverlusts und sekundär aufgrund der gemessenen Abbrandhöhen auf den Vorder- und Rückseiten der Muster (Tabelle 2) werden einige Additive für weiterführende Versuche ausgeschlossen. Kaliwasserglas und die Eigenmischung nach historischem Vorbild erwiesen sich als kaum wirksam, die Mittel Antifire AI-WB, Novaflam MSG und Novaflam FR1

scheinen sich im Aufbau zu ähneln, weshalb nur das effizienteste Mittel Novaflam FR 1 aus dieser Gruppe gemeinsam mit dem effizientesten Mittel Ecoatech MK46 übernommen wird.

Tabelle 2: Ergebnisse der Brandtests aus Vorversuchen

Flammschutzmittel (Prüfdatum)	Masseverlust	Höhe Abbrand (Vorderseite)	Höhe Abbrand (Rückseite)
Stroh unbehandelt (21.10.2021)	24,43%	43cm	34cm
Kaliwasserglas (30.08.2021)	17,63%	35cm	30cm
Ecoaphos MK46 (10.12.2021)	6,15%	30cm	15cm
Novaflam FR1 (30.08.2021)	9,53%	36cm	10cm
Flammentin MSG (30.08.2021)	15,40%	38cm	10cm
Antifire AI-WB (30.08.2021)	9,96%	36cm	10cm
Eigenmischung (30.08.2021)	16,21%	40cm	10cm

4.2.2. Laborversuche mit Beflammung im Schlyterprüfstand (ONÖRM A 3800-1)

Auf Anraten der Drittleister FH-Salzburg, des TGM und des Lieferanten des Mittels Ecoatech MK46 werden weitere chemische Flammschutzmittel mit andersartigen Inhaltsstoffen hinzugezogen, welche ebenfalls als ökologisch hochwertig gelten und nicht bei REACH (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)) gelistet sind.

Mischkonditionierung im Küchenknetter

Die einzelnen Prüfmuster werden in einem 10l Profi-Küchenknetter mit 2 gegenläufigen Mischwerkzeugen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), welche das Prinzip des Eirich-Mischers nachahmen, hergestellt. Die Konzentration der eingesprühten flüssigen Mittel wird so gewählt, dass eine kritische Materialfeuchte des Strohs von 18% nicht überschritten wird (Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., 2019). Sie variiert deshalb je nach Beschaffenheit und Feststoffanteil der Additive zwischen 8 – 25 M%. Darüber hinaus wird auch die Wirkung der Fassadenbahn der Euroklasse A2 sowie einer handelsüblichen 15 mm starken Holzwolleleichtbauplatte (in Folge abgekürzt als HWL) der Euroklasse B untersucht, welche vor dem unbehandelten Strohhäckseln platziert werden (*Abbildung 4-10*). Da die hierzu verwendeten Proben nicht befeuchtet werden, entspricht die Materialfeuchte jener des unbehandelten Strohs.

Die Besonderheit der HWL-Platten liegt in Ihrem hohen Anteil naturbelassenen Holzwollefäden, die mit einer geringfügigen Beimengung von Zement als Bindemittel einen festen, schwer brennbaren und diffusionsoffenen Plattenwerkstoff ergeben. HWL-Platten weisen daher neben der geringen Herstellungsenergie eine gute Ökobilanz auf. Das Material gilt als der älteste industriell hergestellte Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen und wurde 1908 in Wien entwickelt.



Abbildung 4-8: Herstellung Prüfmuster im Küchenknetzer, Einsprühen Flammschutzmittel;
Quelle: eigene Aufnahmen capital [A] architects

Beflammungsversuche im adaptierten Schlyterprüfstand (ÖN A 3800-1)

Der Schlyterprüfstand aus den Vorversuchen wird mit 8 Thermosonden ausgestattet, welche die digitale Aufzeichnung der Temperaturverläufe während der 15-minütigen Beflammung und der ebenfalls 15-minütigen Nachglimmphase erfassen. Die Sondenanordnung am Prüfkorb folgt dabei dem üblichen Muster des verbrannten Prüfguts (Abbildung 4-9). Zusätzlich wird mit einer Wärmebildkamera die Temperaturentwicklung beim Test dokumentiert (9.1).

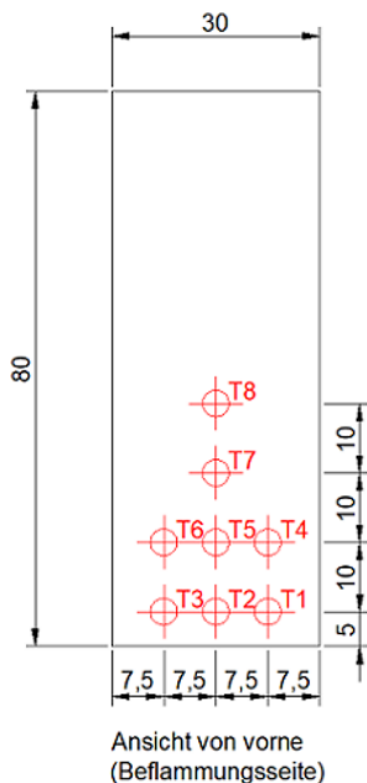


Abbildung 4-9: Anordnung der Thermosonden am Prüfkorb;
Quelle: Eigene Skizze und Aufnahmen capital [A] architects, TGM

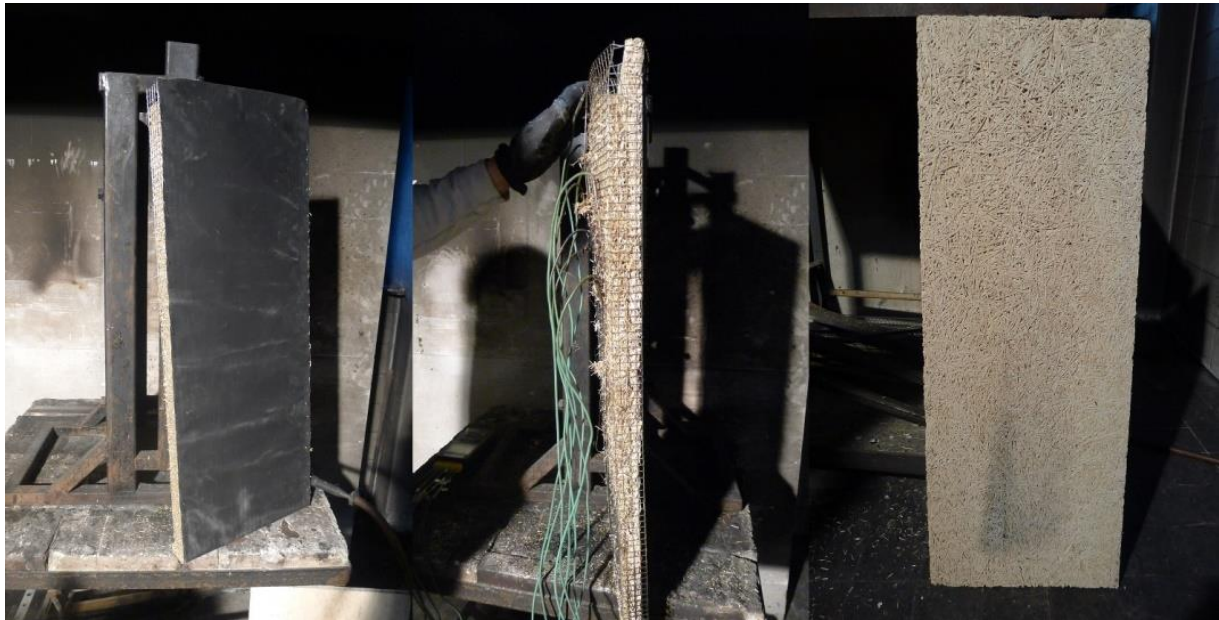


Abbildung 4-10: Prüfkorb mit Fassadenbahn Stamisol Safe one (links), mit 15mm HWL-Platte (mitte), unbeschädigte HWL-Platte nach Beflammung (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM

Die Zusammenstellung der verwendeten Prüfmuster (Tabelle 3) zeigt die unterschiedlichen Konzentrationen der Flammschutzmittel im Masseverhältnis zu den Strohhäckseln und die daraus resultierende Materialfeuchte des Materialverbunds.

Tabelle 3: Prüfmuster für Laborversuche mit Beflammung (ÖN A 3800-1)

Flammschutzmittel	Bekannte Inhaltstoffe	Konzentration	Materialfeuchte
APP	In destilliertem Wasser gelöstes Ammoniumpolyphosphat	12 M%	17,80%
Burnblock	Lösung aus Ammoniumphosphat, Zitronensäure und Natrium Benzoate *	8 M%	18,00%
Ecoaphos MK46	Verschiedene saure organischer und anorganischer Salze *	12 M%	18,00%
Ecoaphos AMU	Ammoniak-freie Lösung saurer organischer und anorganischer Verbindungen *	12 M% 14 M%	18,00%
Novaflam FR1	Lösung aus organischer Phosphor-Stickstoff-Verbindung *	10 M%	17,00%
Tannin	In destilliertem Wasser gelöstes Tannin aus Baumrinde **	10 M%	17,20%
Ecoaphos BG 1455	Blähgraphit-Dispersion mit Partikelgröße 180 µm *	25 M%	17,30%
Stamisol Safe one	Fassaden- und Unterdeckbahn, Euroklasse A2 *	-	10,30%
Fibrolith 15mm	HWL-Platte aus Holzwollefasern und Weißzement, Euroklasse B *	-	10,30%

- * Herstellerangaben
- ** Angabe FH Salzburg

Als Referenz werden auch unbehandelte Strohhäcksel einem weiteren Beflammungstest unterzogen. Die Ergebnisse des Prüfprotokolls (Tabelle 4) zeigen, dass sich die Materialfeuchte der Proben durch die einwöchige Konditionierung im Klimaraum vor Durchführung der Brandtests auf Werte zwischen 11,00% (Burnblock) - 14,40% (APP) reduziert, die unbehandelten Proben bleiben quasi gleich. Bei den Tests beweist sich wiederholt Ecoaphos MK46 als bestes chemisches Mittel. Auch die zuvor nicht untersuchte Blähgraphitdispersion BG 1455 erzielt bemerkenswerte Werte, insbesondere wird hierbei die niedrigste maximale Temperatur bei den chemisch behandelten Prüfmustern mit 491°C erzielt. Das Mittel Ecoatech AMU soll laut Hersteller ein guter Borsäure-Ersatz sein und weist ähnliche Inhaltsstoffe wie das Mittel MK46 auf. Die Fassadenbahn Stamisol Safe one bleibt unbeschädigt, liefert jedoch schlechtere Ergebnisse als das unbehandelte Stroh. Grund hierfür scheint ein Hitzestau hinter der Folie zu sein. Die HWL-Platte liefert einen derart guten Schutz, dass die Strohhäcksel gar nicht brennen können.

Die besonders hohe Wirksamkeit des Mittels Ecoaphos MK46 und der Blähgraphitdispersion BG1455 wird bei allen Vergleichswerten deutlich. Die konstruktiven Brandschutzmaßnahmen mit der Abschirmung der Strohhäcksel durch die Folie Fassadenbahn Stamisol Safe one und die HWL-Platte heben sich drastisch davon ab; die Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zum unbehandelten Material durch die Fassadenbahn und die enorm hohe Wirksamkeit der HWL-Platte, welche jede Verbrennung des Strohs verhindert, sind klar erkennbar.

Tabelle 4: Ergebnisse der Laborversuche mit Beflammung (ÖN A 3800-1)

Flammschutzmittel (Prüfdatum)	Material- feuchte (vor Test)	Masse- verlust	Höhe Abbrand (Vorders.)	Höhe Abbrand (Rücks.)	Ø - Temperatur	Max. Temperatur
Stroh unbehandelt (02.02.2022)	10,20%	38,80%	49cm	55cm	288°C	656°C
APP (08.03.2022)	14,40%	14,75%	39cm	40cm	266°C	670°C
Burnblock (04.02.2022)	11,00%	13,86%	35cm	43cm	251°C	704°C
Ecoaphos MK46 (04.02.2022)	13,20%	6,48%	28cm	24cm	158°C	559°C
Ecoaphos AMU (02.02.2022) *	14,10%	12,50%	32cm	40cm	206°C	558°C
(08.03.2022)	11,20%	13,73%	40cm	53cm	259°C	772°C
Novafiam FR1 (02.02.2022)	11,30%	13,96%	31cm	43cm	266°C	569°C
Tannin (04.02.2022)	14,30%	19,67%	43cm	49cm	276°C	714°C

Flammschutzmittel (Prüfdatum)	Material- feuchte (vor Test)	Masse- verlust	Höhe Abbrand (Vorders.)	Höhe Abbrand (Rücks.)	Ø - Temperatur	Max. Temperatur
Ecoaphos BG1455 (04.02.2022)	13,30%	8,38%	32cm	28cm	180°C	491°C
Stamisol Safe one (02.02.2022)	10,30%	50,51%	75cm	41cm	364°C	834°C
HWL 15mm (08.03.2022)	10,30%	0,00%	0cm	0cm	41°C	66°C

* Feuchteintrag beim Befüllen des Prüfkörb, Trocknung mit Heißgebläse

Die grafische Darstellung der Ergebnisse (Abbildung 4-11) illustriert die Unterschiede der wesentlichen Vergleichswerte. Grundsätzlich sind bei den chemisch behandelten Proben größere Unterschiede bei der Masse des verbrannten Materials, als bei den durch Brand zerstörten Höhen der Prüfmuster sowie der durchschnittlichen und maximalen Temperaturen während der Testphase erkennbar.

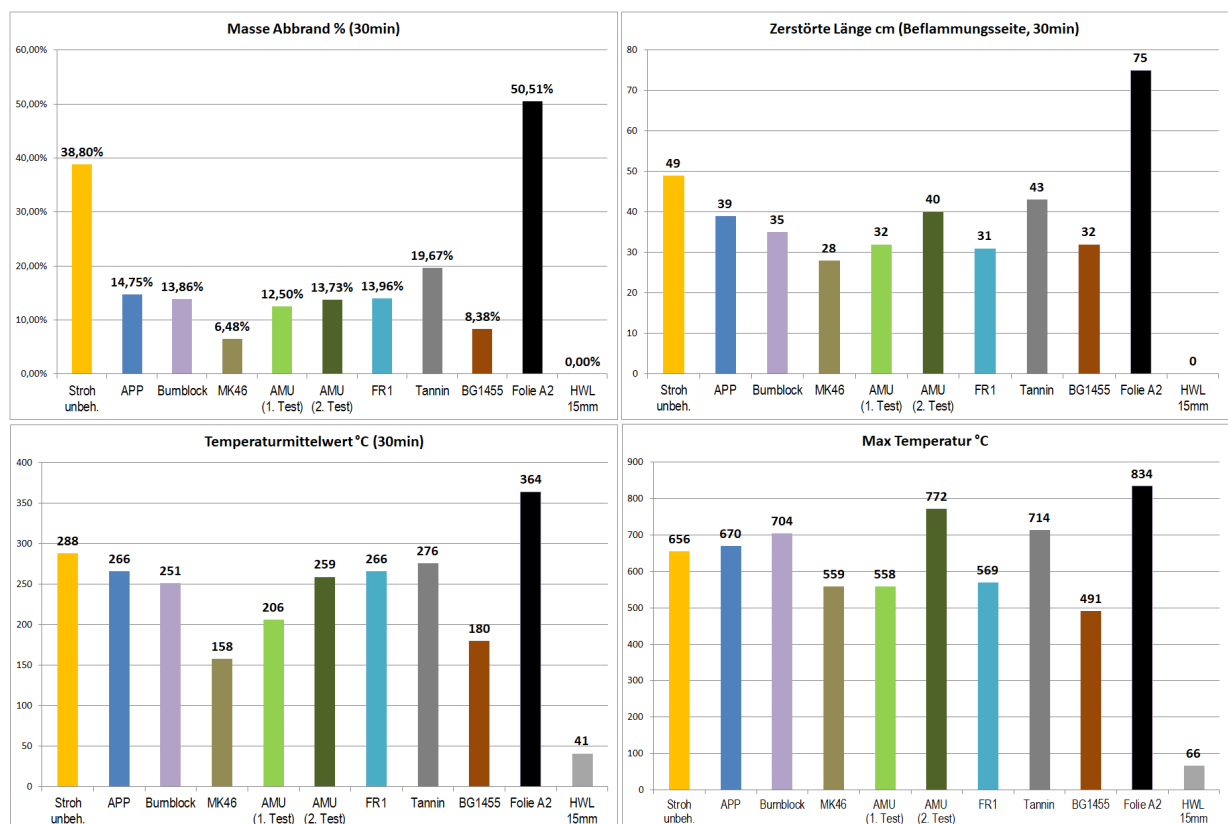


Abbildung 4-11: Grafische Darstellung der Testergebnisse (ÖN A 3800-1);
Quelle: Eigene Aufzeichnungen capital [A] architects, TGM

Die grafische Darstellung der Temperaturverläufe (Abbildung 4-12) zeigt die unterschiedlichen Wirkungsweisen der einzelnen Mittel auf. Das Erreichen der kritischen Temperatur von ca. 270°C,

bei welcher sich Stroh entzündet (Kampmeier, 2013), fällt sehr unterschiedlich aus. Während die Probe mit Tannin kaum eine Veränderung gegenüber unbehandeltem Stroh aufweist, zeigt sich eine erhebliche Zeitverzögerung bei dem sehr wirksamen Mittel MK46. Die Blähgrafitdispersion BG 1455 erzeugt nur eine geringfügige Zeitverzögerung, ein Temperaturanstieg über 500°C wird hier jedoch durchgehend wirksam verhindert. Gut erkennbar ist hierbei auch die Verschlechterung durch die Fassadenbahn; nicht nur werden höhere Temperaturen als beim unbehandelten Stroh erzielt, auch die Grenztemperatur von 270°C wird wesentlich früher erreicht. Die 15mm starke HWL-Platte verhindert hingegen effektiv einen Hitzeeintrag ins dahinter liegende Stroh, es erwärmt sich lediglich auf maximal 66°C.

Besonders bemerkenswert ist, dass bei allen Prüfmustern die jeweilige maximale Temperatur nicht während der 15-minütigen Beflammungszeit, sondern in der Nachglimmphase nach Entfernung des Brenners erzielt wird. Das Nachglimmen ist für die Verwendung eines Dämmstoffs in Österreich nicht ausschlaggebend, bei einer Verwendung in den namensgleichen Gebäudeklassen 4 und 5 in Deutschland kann dies jedoch problematisch sein. Laut einem Bericht des FeuerTrutz Magazins (Werning, Denkl, & Moarcas, 2012) zur DIN 4102-1 gilt jedoch: *„Selbst, wenn ein Baustoff in der Brandschachtprüfung länger nachglimmt, aber schließlich selbst verlöscht und nach Ende aller Verbrennungsphänomene die Klassifizierungskriterien für die Einstufung in die Klasse A2 oder B1 eingehalten sind, gilt sein Schwel- und Glimmverhalten als für nichtbrennbare bzw. schwerentflammbare Baustoffe unbedenklich und hinnehmbar.“* In der deutschen MVV TB (Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen) der Fassung 2020 (Muster-Verwaltungsvorschrift Technischen Baubestimmungen Ausgabe 2020, 2021) heisst es: *„Bei baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen, bei denen die Anforderungen nichtbrennbar oder schwerentflammbar gestellt werden, ist sicherzustellen, dass es nicht durch unbemerktes fortschreitendes Glimmen und/oder Schwelen zu einer Brandausbreitung kommen kann.“*

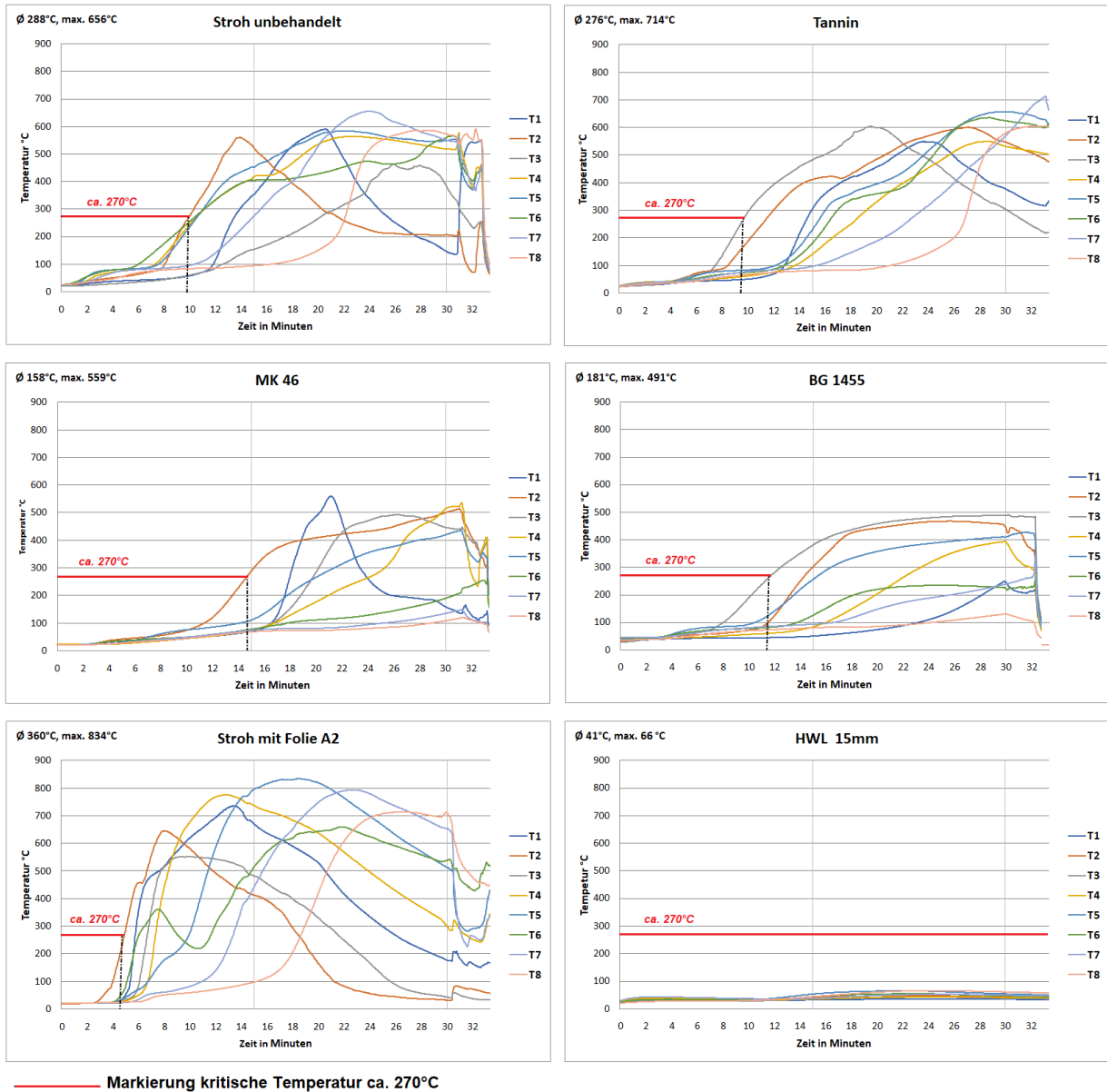


Abbildung 4-12: Darstellung einzelner Temperaturverläufe im Schlyterprüfstand (ÖN A 3800-1);
 Quelle: Eigene Aufzeichnungen capital [A] architects, TGM

Eine ausführliche Dokumentation der Versuchsreihen ist dem Bericht des TGM im Anhang 1 zu entnehmen.

4.2.3. Laborversuche mit Hitzestrahlung im Cone-Kalorimeter (ISO 5660-1)

Es ist bekannt, dass sich Materialien bei Beflammung anders verhalten, als bei reiner Hitzestrahlung ohne direkte Flammeneinwirkung. Der Test im Cone-Kalorimeter liefert diesbezüglich genaue Daten, welche auch auf ein entsprechendes Materialverhalten beim wesentlich aufwendigeren SBI-Test hinweisen. Bei den Versuchsreihen nach ISO 5660-1 sollen daher die effektivsten und wirtschaftlichsten Materialkombinationen festgestellt werden, welche in einem späteren SBI-Test geprüft werden.

In Skandinavien wurde die Software *Cone Tools* (Wickström & Goransson, 1987) (Van Hees, Hertzberg, & Hansen, 2002) entwickelt, welche eine Ableitung der Ergebnisse des Cone-Kalorimeters auf den SBI-Test ermöglicht, jedoch ist dieses Programm bei Materialkombinationen wenig präzise, weshalb es nicht zur Anwendung kommt.

Mischkonditionieren im Profi-Küchenkneteter und Kesseldruckimprägnierung im Labor-Autoklav

Im Küchenkneteter werden neue Prüfmuster mit fallweise höheren Dosierungen der effektivsten Flammschutzmittel erzeugt, um die Auswirkungen dieser Konzentrationssteigerung festzustellen. Der Drittleister FH Salzburg erstellt zusätzlich am Campus Kuchl Prüfmuster der Strohhäcksel im Kesseldruckverfahren (in Folge abgekürzt als KDI) welches üblicherweise für die Brandschutzimprägnierung von Holzwerkstoffen mit bestimmten Flammschutzmitteln verwendet wird. Durch das Verfahren im Labor-Autoklav (*Abbildung 4-13*) mit alternierendem Unter-/Überdruckimprägnieren (FH Salzburg, Salzburg Center for Smart Materials, 2020) werden die Additive tiefer ins Materialinnere des Strohs eingebracht; es entsteht somit eine wesentlich höhere Dosierung der Additive, welche zwar nicht genau bestimmbar ist, jedoch optisch durch die Verfärbung des Strohs erkennbar ist (*Abbildung 4-14*).



*Abbildung 4-13: Kesseldruckimprägnieren im Labor-Autoklav (FH Salzburg);
Quelle: FH Salzburg*



Abbildung 4-14: Verfärbte kesseldruckimprägnierte Muster;
Quelle: FH Salzburg

Zum Vergleich werden wieder unbehandelte Strohhäcksel als Referenzmuster getestet. Auch werden einige kesseldruckimprägnierte Muster nach vierwöchiger Lagerung sowie eine ein Jahr alte mischkonditionierte Probe mit 9 M% des Mittels MK46 untersucht, um ein etwaiges Nachlassen der Flammschutzwirkung festzustellen.

Darüber hinaus werden die konstruktiven Brandschutzmaßnahmen mit der Fassadenbahn Stamisol Safe one und mit unterschiedlicher HWL-Platten geprüft. Es wird dabei einerseits die zuvor verwendete 15mm starke Platte des Herstellers Fibrolith der Euroklasse B sowie eine 25mm starke HWL-Platte der Marke Heraklith der Euroklasse A2 in Kombination mit dem bisher effizientesten chemischen Mittel MK46 untersucht, wie in der folgenden Zusammenstellung der Proben zu sehen ist (Tabelle 5).

Tabelle 5: Prüfmuster für Laborversuche mit Hitzestrahlung (ISO 5660-1)

Flammschutzmittel	Konzentration	Materialfeuchte (nach Mischung)	Materialfeuchte (vor Test)	Veränderung
Burnblock	8 M%	18,00%	11,20%	- 6,80%
	KDI	n.N.	14,50%	n.N.
	KDI (4 Wochen)	n.N.	15,50%	n.N.
Ecoaphos MK46	12 M%	18,00%	13,70%	- 4,30%
	14 M%	20,20%	14,30%	- 5,90%
	9 M% (1 Jahr)	17,00%	11,40%	- 5,60%
	KDI	n.N.	28,50%	n.N.
	KDI (4 Wochen)	n.N.	28,70%	n.N.
Ecoaphos AMU	14 M%	17,70%	13,40%	- 4,30%
	16 M%	19,70%	15,00%	- 4,70%
	KDI	n.N.		
Novaflam FR1	10 M%	17,00%	11,30%	- 5,70%
Tannin	KDI	n.N.	14,40%	n.N.

Ecoaphos BG 1455	25 M% KDI	17,30% n.N.	13,30% 19,00%	- 4,00% n.N.
Stamisol Safe one	-	10,70%	10,30%	- 0,40%
Fibrolith 15mm (B)	-	10,50%	10,40	- 0,10%
Heraklith 25mm (A2) + Ecoaphos MK46	12 M%	17,30%	13,20%	- 4,10%

Versuche mit Hitzestrahlung 40 KW/m² im Cone-Kalorimeter (ISO 5660-1)

Die Prüfmuster werden im Proberahmen des Cone-Kalorimeters mit Hilfe eines Holzstempels mehrfach auf die Materialdichte von ca. 105-110 kg/m³ verdichtet, was der realen Einbaudichte beim Einblasvorgang der Strohhäckseldämmung entspricht; somit ergibt sich eine Probemasse von 52g bis 55g. Die Befüllung erfolgt im umgedrehten Zustand des Rahmens, der durch einen am Rand eingefrästen Holzklötz von unten gestützt wird (*Abbildung 4-15*), um eine möglichst ebene Materialoberfläche für den Test zu erzielen. Bei den Prüfmustern mit der Folie Stamisol Safe one und den HWL-Platten werden diese Materialien zuerst im Rahmen platziert und dieser dann mit Strohhäckseln aufgefüllt (*Abbildung 4-16*).



*Abbildung 4-15: Herstellung der Prüfmuster;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM*



*Abbildung 4-16: Prüfmuster mit Strohhäckseln (links), Folie Stamisol Safe one (mitte) und
HWL-Platte (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM*

Als relevante Kennwerte werden primär der Verlauf der Energie- bzw. Wärmefreisetzungsrate (HRR) in kW/m² und sekundär der Masseverlust in Gramm festgelegt. Dies allein schon deshalb, da die wesentlich schwereren HWL-Platten einen direkten Massevergleich nicht ermöglichen. Bereits bei der Beobachtung der Versuchsdurchführung ist die Leistung der Mittel gut zu erkennen: Jene Proben, die sich entzünden, weisen auf eine wesentlich schlechtere Brandschutzwirkung hin als jene,

die sich nicht entzünden (*Abbildung 4-17*). Eine Besonderheit ist beim Mittel BG 1455 zu erkennen: aufgrund der Ausdehnungseigenschaft des Blähgrafits werden die Messergebnisse beim Masseverlust korrumpiert.



*Abbildung 4-17: Probe mit Entzündung (Stroh unbehandelt, links), ohne Entzündung (AMU kesseldruckimprägniert, mitte) und Ausdehnung des Blähgrafits (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM*

Die grafische Darstellung sämtlicher Verläufe der Wärmefreisetzungsraten (*Abbildung 4-18*) ermöglicht einen übersichtlichen Wirkungsvergleich sämtlicher getesteter Proben während der Prüfdauer von 1.000 Sekunden. Ein hoher Ausschlag (Peak) der Wärmefreisetzungsrate am Beginn der Versuchsdurchführung entspricht dabei einer Entzündung der Probe im Cone-Kalorimeter. Die Probe mit unbehandeltem Stroh in Gelb weist hierbei naturgemäß den höchsten Peak auf. Es ist klar erkennbar, dass die kesseldruckimprägnierten Muster mit Ausnahme des Tannins sich nicht entzünden und daher keinen Peak beim Verlauf der Wärmefreisetzungsrate aufweisen. Sie sind daher sämtlichen mischkonditionierten Proben überlegen, welche sich durchwegs entzündet haben. Ungewöhnlich ist der Verlauf der HHR-Kurve bei der kesseldruckimprägnierten Probe mit Tannin (hellgrün); sie fällt am deutlichsten nach Erreichen des Peaks ab, steigt jedoch als Einzige ab der Mitte der Versuchsdauer wieder stärker an und verläuft dann höher als jene des unbehandelten Strohs. Die Proben mit den abschirmenden konstruktiven Maßnahmen durch die Folie Stamisol Safe one und die HWL-Platten weisen ähnlich günstige Verläufe wie die kesseldruckimprägnierten Muster auf. Den niedrigsten Verlauf zeigen die kesseldruckimprägnierten Proben der Mittel MK46 und AMU.

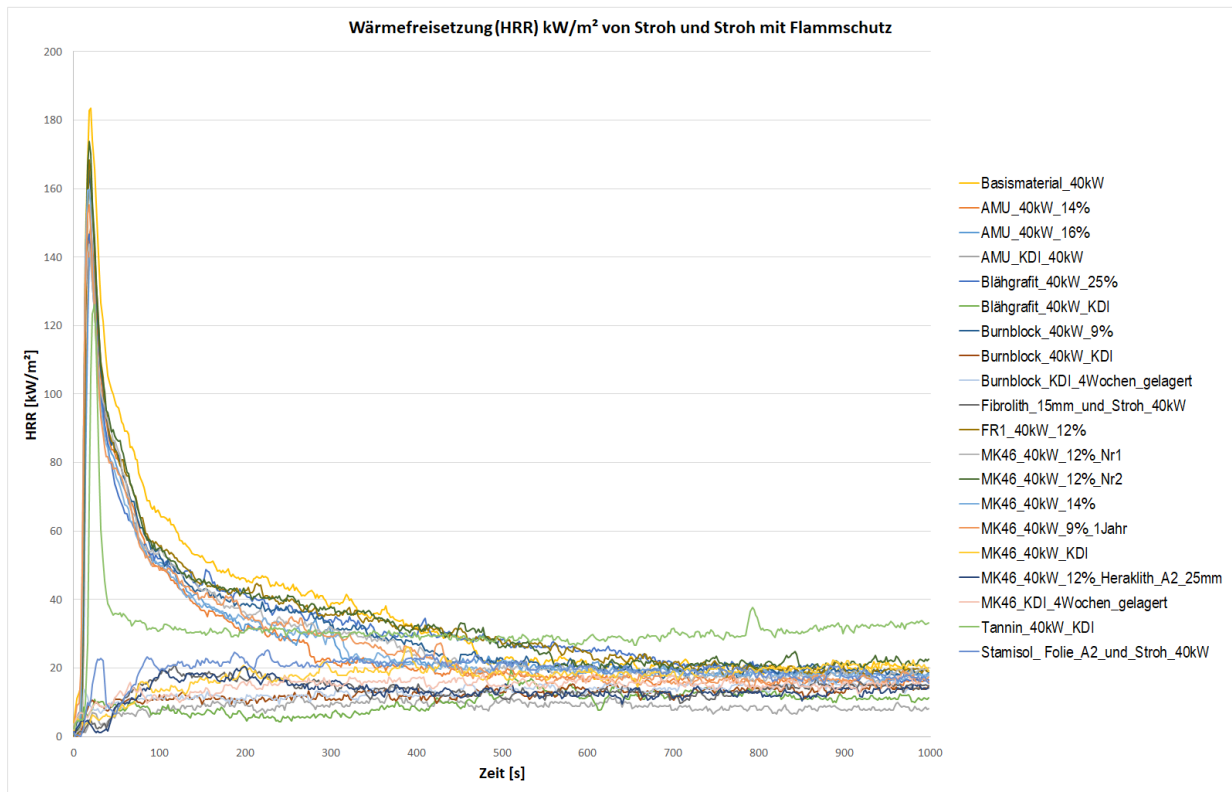


Abbildung 4-18: Darstellung der Wärmefreisetzungsraten im Cone-Kalorimeter (ISO 5660-1);
 Quellen 4-18 bis 4-23: Eigene Aufzeichnungen capital [A] architects, TGM

Zur besseren Vergleichbarkeit werden einzelne Materialkombinationen von Flammschutzmitteln und Stroh separat dargestellt, die Werte des unbehandelten Strohs als Basismaterial werden jeweils dazu als Referenz wieder in Gelb angezeigt. Die Darstellung der unterschiedlichen Proben des Mittels MK46 (Abbildung 4-19) lässt erkennen, dass eine höhere Dosierung des Mittels beim Mischkonditionieren kaum Auswirkungen hat. Man sieht ebenfalls deutlich, dass sich die Flammschutzwirkung weder bei der ein Jahr alten mischkonditionierten Probe noch bei der vierwöchig gelagerten kesseldruckimprägnierten Probe verändert.

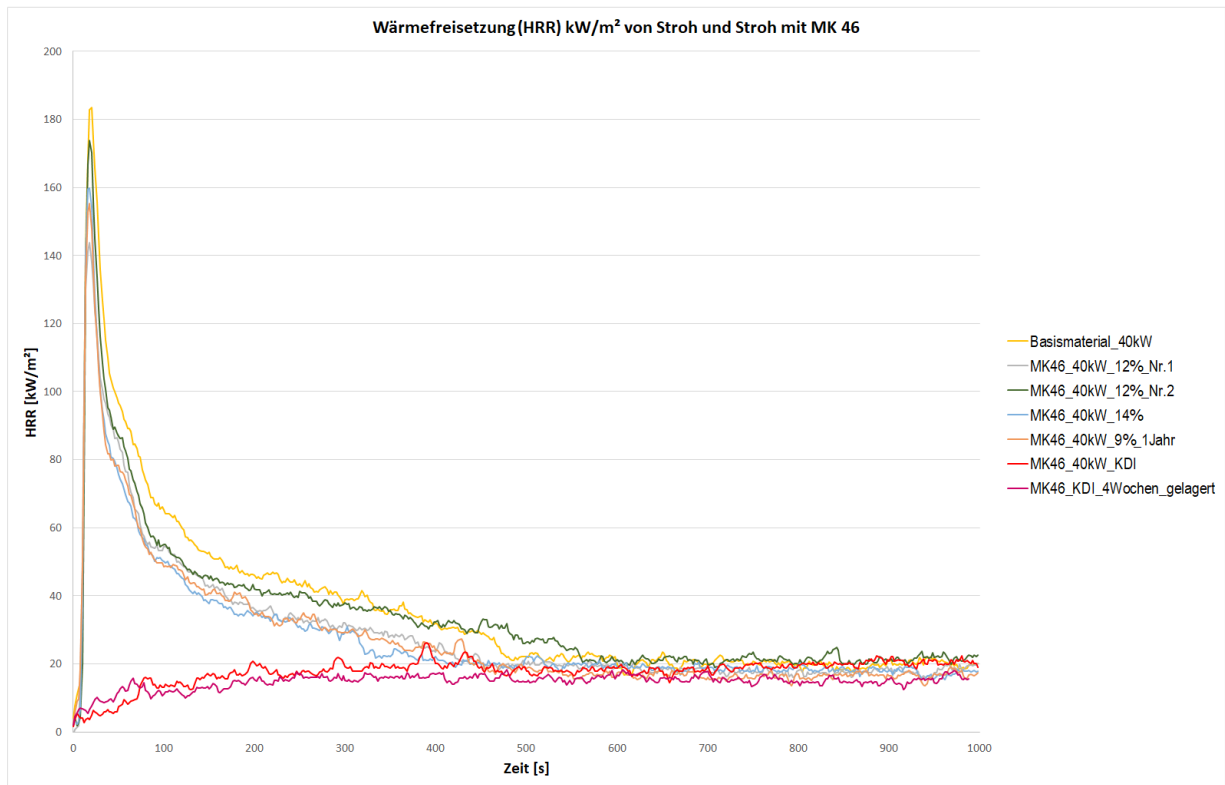


Abbildung 4-19: Vergleich der Muster mit MK46

Auch bei den Mitteln AMU (Abbildung 4-20), Blähgrafit BG 1455 (Abbildung 4-21) und Burnblock (Abbildung 4-22), welches üblicherweise zur Kesseldruckimprägnierung von Holz verwendet wird, ist eine deutliche Effizienzsteigerung durch das Kesseldruckverfahren ersichtlich.

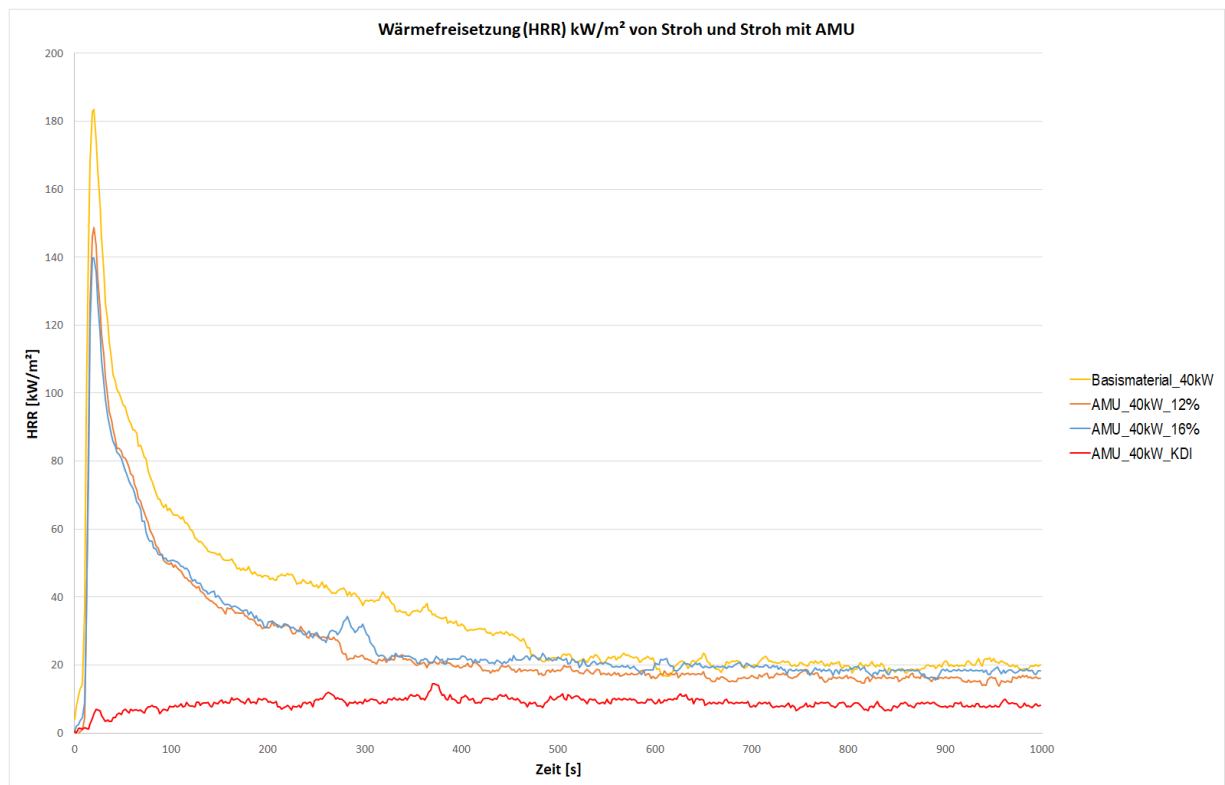


Abbildung 4-20: Vergleich der Muster mit AMU

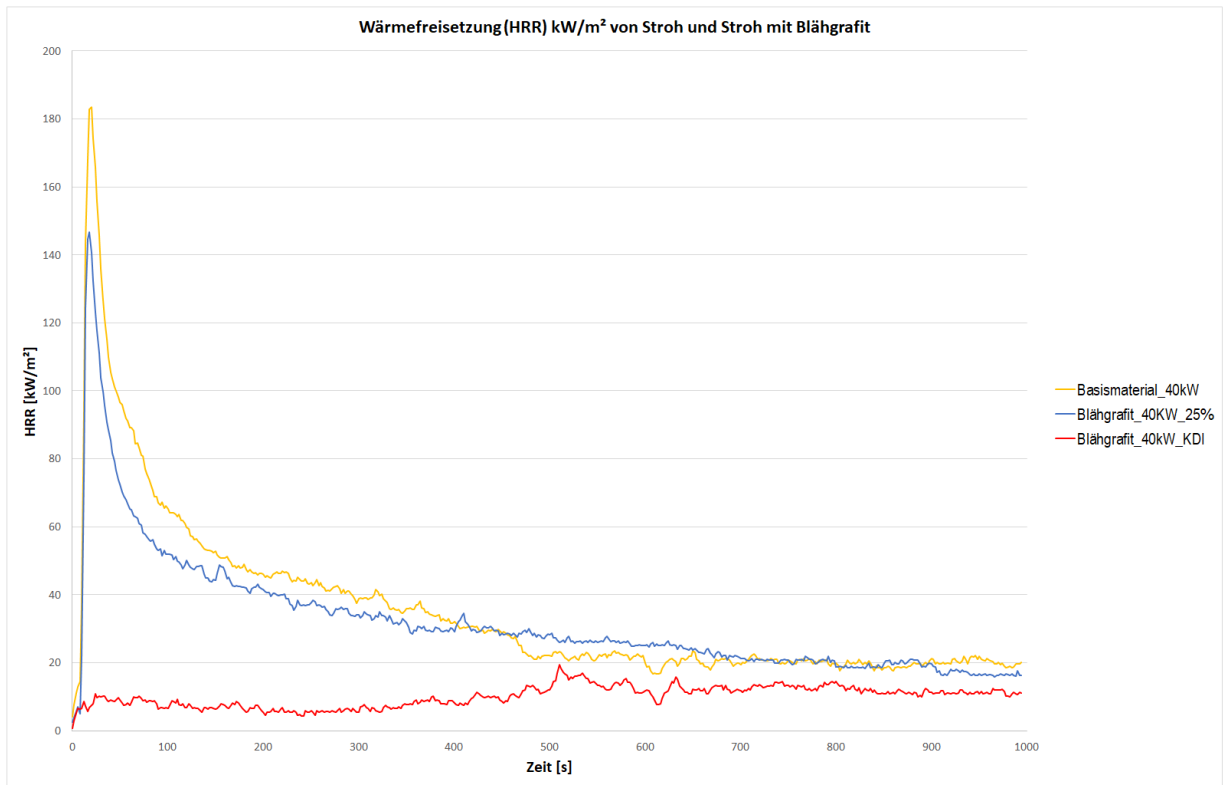


Abbildung 4-21: Vergleich der Muster mit Blähgrafit (BG 1455)

Die Verläufe der Wärmefreisetzungsraten der beiden kesseldruckimprägnierten Proben mit dem Mittel Burnblock sind gewissermaßen gleich und überlagern sich (Abbildung 4-22). Die Wirkung der Kesseldruckimprägnierung scheint also im vierwöchigen Zeitraum nicht nachzulassen und das Mittel bleibt am Substrat weiterhin anhaftend.

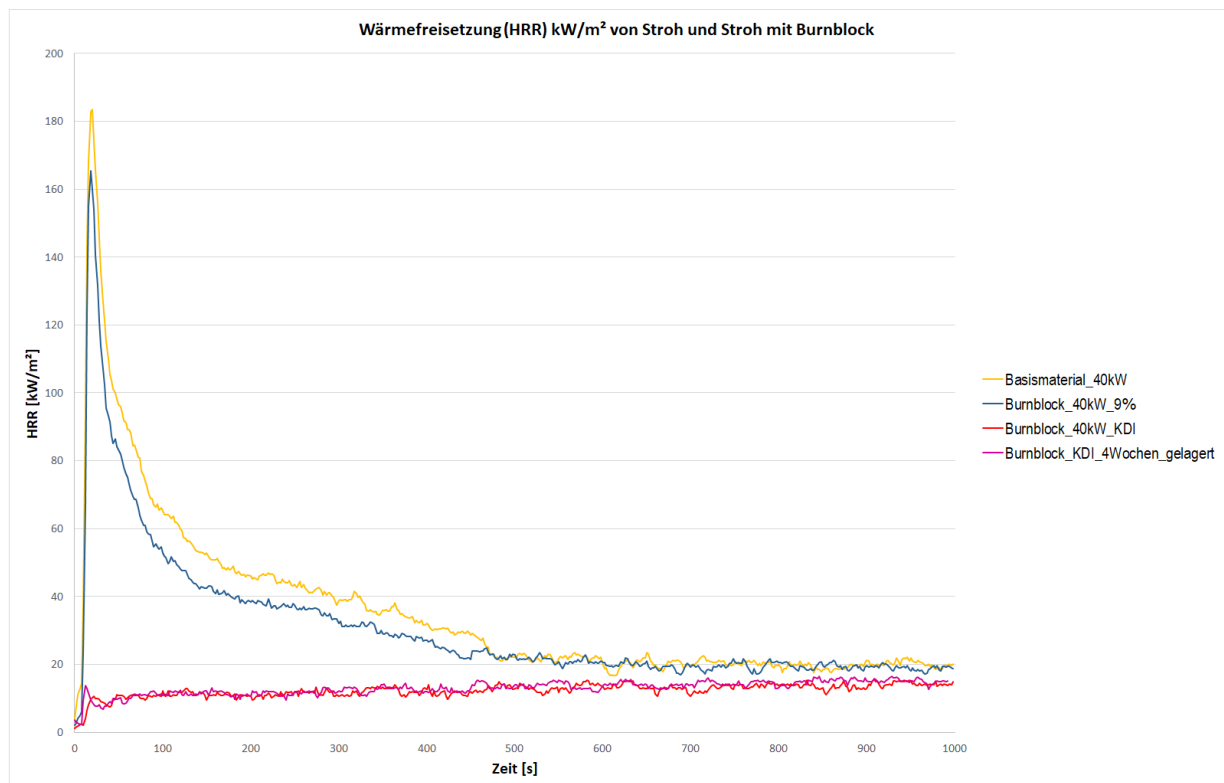


Abbildung 4-22: Vergleich der Muster mit Burnblock

Als besonders aufschlussreich erweist sich der Vergleich der durch die Folie Stamisol Safe one und die HWL-Platten abgeschirmten Proben (*Abbildung 4-23*). Man sieht, dass die HWL-Platten besser funktionieren als die Folie der Euroklasse A2. Zudem wird deutlich, dass es unwesentlich ist, ob die HWL-Platte eine Stärke von 15mm mit der Euroklasse B (Fibrolith) aufweist oder eine Stärke von 25mm mit der Euroklasse A2 (Heraklith BM) und, ob das dahinter liegende Stroh chemisch mit dem Mittel MK46 ausgerüstet wird – die Kurvenverläufe der beiden Proben sind quasi ident.

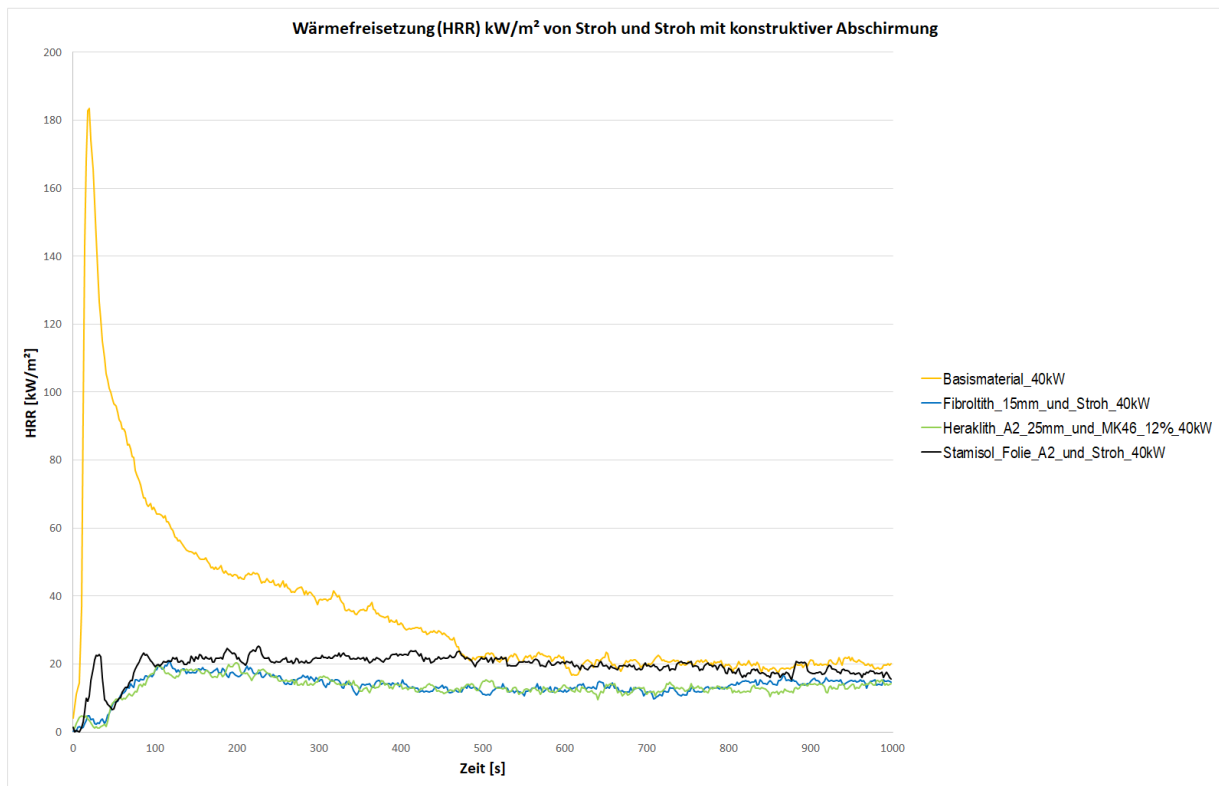


Abbildung 4-23: Proben mit Folie A2 Stamisol Safe one und HWL-Platten

Beim Öffnen der Proben nach Versuchsdurchführung ist zu sehen (*Abbildung 4-24*), dass jene Proben, die sich nicht entzündet haben, nur oberflächlich verbranntes Material aufweisen. Bei jenen Proben, die sich entzündet haben, verbrennt nahezu das gesamte Material im Proberahmen.



Abbildung 4-24: Proben MK46 mischkonditioniert 12 % (links), kesseldruckimprägniert (mitte) und mit HWL-Platte (rechts);

Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM

Eine ausführliche Dokumentation der Versuchsreihen ist dem Bericht des TGM im Anhang 2 zu entnehmen.

4.2.4. Orientierende SBI-Tests (EN 13823)

Bei einem SBI-Test wird eine bestimmte Kombination von Baustoffen getestet, beispielsweise wird eine bestimmte Art von Dämmung verwendet und eine zugehörige Art von Hilfsrahmen ausgewählt, dieser Aufbau entspricht der sogenannten Endanwendung. Als Ergebnis erhält das getestete Material (Kit) eine Klassifizierung (Euroklasse) basierend auf den verschiedenen Parametern, die während des Tests gemessen werden. Beim Prüfstand des SBI-Tests werden vornehmlich die Rauchentwicklung und, wie beim Cone-Kalorimeter auch, die Wärmefreisetzungsrate gemessen. Die ermittelten Prüfergebnisse sind nur für diesen spezifischen Konstruktionsaufbau gültig. Für die Testserie der orientierenden SBI-Tests werden die zwei wirksamsten Materialkombinationen ausgewählt, die auch aufgrund Ihrer Wirtschaftlichkeit am praxistauglichsten sind. Es gibt grundsätzlich noch kein bekanntes Verfahren zur Kesseldruckimprägnierung größerer Mengen von Häckselgut, außer dem vereinfachten Verfahren des Mischens unter Vakuum, welches jedoch mangels der notwendigen pneumatischen Apparatur nicht möglich ist. Es wird daher auf ein mischkonditioniertes Muster zurückgegriffen:

- mischkonditionierte Strohhäcksel mit 12 M% Ecoaphos MK46 im Holzständerrahmen
- unbehandelte Strohhäcksel mit 15mm HWL-Platten in Euroklasse B als Gefachabdeckung und 35mm HWL-Platten zu Gefachteilung (als Stegträger ausgebildet)

Die isometrische Darstellung zeigt den Aufbau der beiden Prüfkörper (Abbildung 4-25). Um das Herausfallen der losen Häcksel aus dem Prüfkörper mit dem mischkonditionierten Prüfgut zu verhindern, wurden außenseitig Stahlgitter montiert. Diese Verwendung von Stahlgittern wird auch in der Norm EN 15101-1 für *an der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Zellulosefüllstoff* vorgegeben, an welche sich mit Konstruktion des Prüfkörpers angelehnt wird. Beim Prüfkörper mit HWL-Platten werden die angeschraubten HWL-Gefachabdeckplatten im Bereich der Plattenfugen mit einem speziellen Kleber der Euroklasse B zusätzlich verklebt.

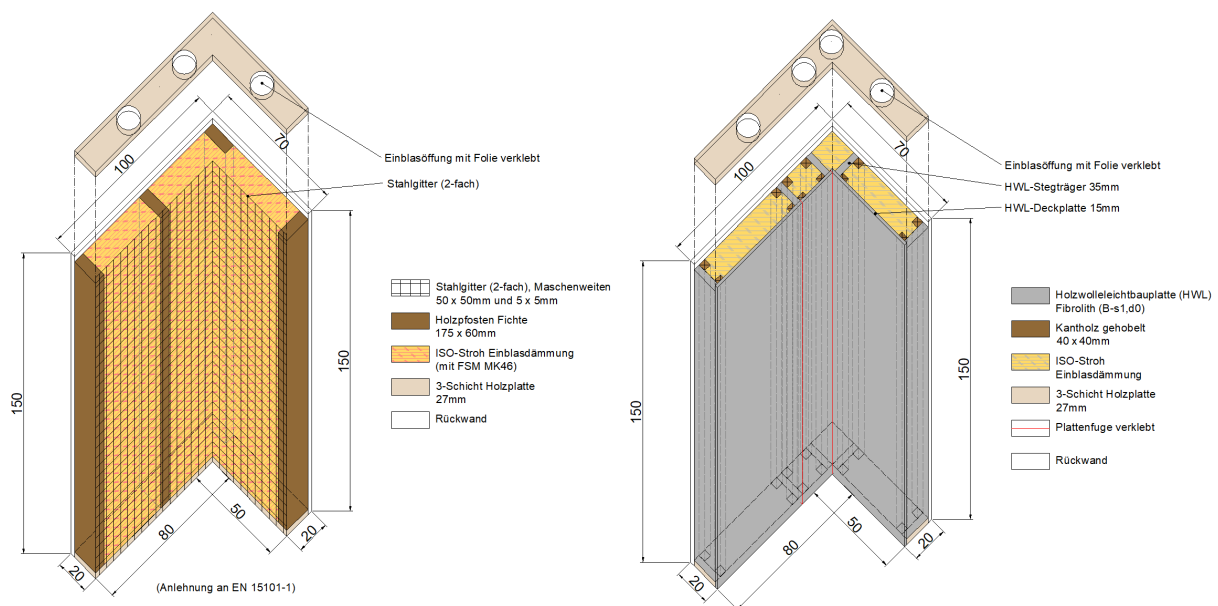


Abbildung 4-25: SBI-Prüfkörper mit mischkonditioniertem Prüfgut (links) und mit HWL-Platten (rechts);

Quelle: Eigene Skizzen capital [A] architects

Mischkonditionieren im Kniele Konusmischer (KKM)

Die Herstellung des mischkonditionierten Prüfguts erfolgt in der Werkshalle des Partners DPM Holzdesign in Kasten bei Böheimkirchen mit dem patentierten Kniele Konusmischer (KKM), der in der Variante des 100l-Labormischers vom Hersteller zur Verfügung gestellt wird (Abbildung 4-26). Die spezielle trichterförmige Bauform des Mixers ermöglicht eine restlose Entleerung des Mischguts in kürzerer Zeit als beim anfänglich verwendeten Eirich-Mischer, zudem ist das Gerät wesentlich kostengünstiger. Der KKM arbeitet ebenso mit gegenläufigen Mischwerkzeugen, nämlich einer sehr materialschonenden, konisch gestalteten archimedischen Schnecke mit darüber angebrachten Paddeln und mehreren umlaufenden Mischarmen mit Schaufeln (Abbildung 4-27). Der KKM wird, ebenso wie der Eirich-Mischer, üblicherweise zur Herstellung von Hochleistungsbetonen verwendet und erlaubt grundsätzlich auch das Mischen unter Vakuum.



Abbildung 4-26: Mischkonditionieren von Strohhäckseln mit dem KKM Labormischer;
Quelle: Kniele GmbH und eigene Aufnahmen DPM Holzdesign

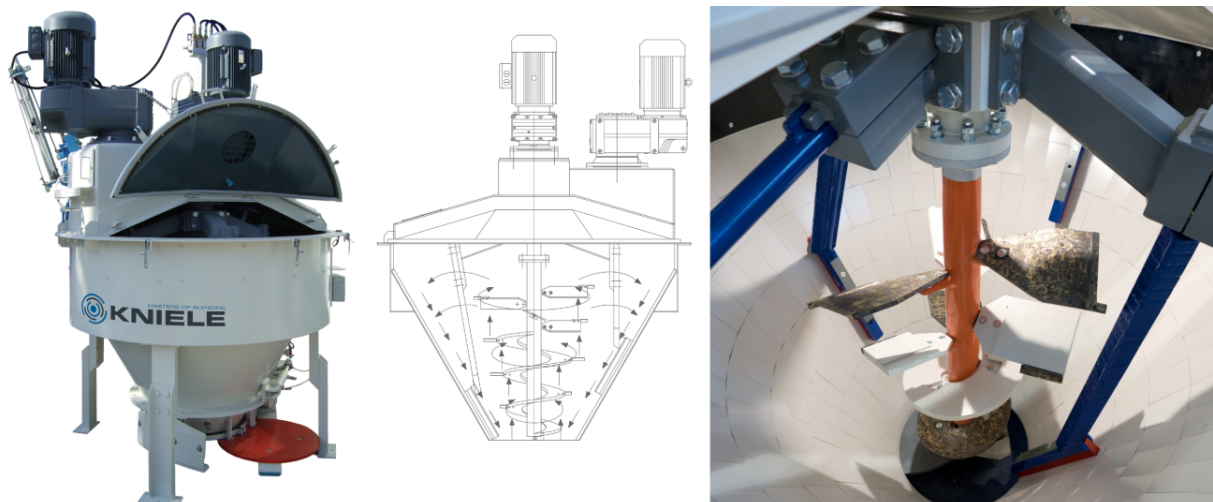


Abbildung 4-27: KKM mit zentraler Mischschnecke und gegenläufigen Mischarmen;
Quelle: Kniele GmbH

Durchführung der SBI-Tests

Ein SBI-Test (Single Burning Item) simuliert den Beginn eines Brands, um das Brandverhalten von Bauprodukten zu beurteilen. Als Ergebnis dieses Tests erhält das getestete Material eine Klassifizierung (Euroklasse) basierend auf den verschiedenen Parametern, die während des Tests gemessen werden. Zu diesen Parametern gehören die Flammenausbreitung, die Entzündbarkeit, die Menge an Hitze, Rauch und giftigen Gasen und ob ein Produkt schmilzt, abtropft oder verkohlt. Die Klassifizierung basiert auf einer bestimmten Anwendungssituation und einem bestimmten Anwendungsbereich.

Die SBI-Tests werden bei der MA39, Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien durchgeführt. Es erfolgt jeweils nur ein Orientierungstest je Muster. Hieraus lässt sich jedoch noch keine offizielle Klassifizierung zur Entsprechung der Euroklassen nach EN 13501-1 ableiten, da für eine offizielle Klassifizierung und einhergehende Zertifizierung jeweils drei Tests mit jeweils eigenen Prüfkörpern je Muster notwendig wären.

Beim Test mit dem mischkonditioniertem Prüfgut aus Strohhäckseln und 12% MK46 als chemisches Flammschutzmittel ist frühzeitig eine starke Verkohlung des Materials und Rauchbildung zu erkennen; es entsteht lediglich ein Glutbrand des Materials. Eine Brandausbreitung wird offensichtlich durch die Gefachsteher unterbunden, die Verbrennungen entstehen nur im zentralen Eckbereich des Prüfmusters, der den Flammen des Brenners direkt ausgesetzt ist. Eine Flammenbildung entsteht dabei nicht. Abseits des zentralen Bereichs ist an den Seiten des Prüfkörpers kein verbranntes Material erkennbar (*Abbildung 4-28*). Nach der Versuchsdurchführung wird ein starkes Nachglimmen des Materials festgestellt, weshalb das Prüfmuster dann mit einem Wasserstrahl intensiv gelöscht werden muss.



*Abbildung 4-28: Prüfkörper mit MK46 vor (links), während (mitte) und nach SBI-Test (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects*

Auffällig ist bei diesem Test, dass die vorgelagerten Stahlgitter im Bereich des Brenners gegen Ende der 20-minütigen Beflammung zu glühen beginnen (*Abbildung 4-29*).

Die am Bildschirm generierten Ergebnisse des SBI-Tests weisen Werte auf, welche im Falle einer Zertifizierung der Euroklasse C-s1, d0 entsprechen würden (*Abbildung 4-29*). Laut OIB Richtlinie 2 wäre das Material somit als Fassadendämmstoff ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen lediglich für die Gebäudeklasse 3 (GK 3) geeignet.

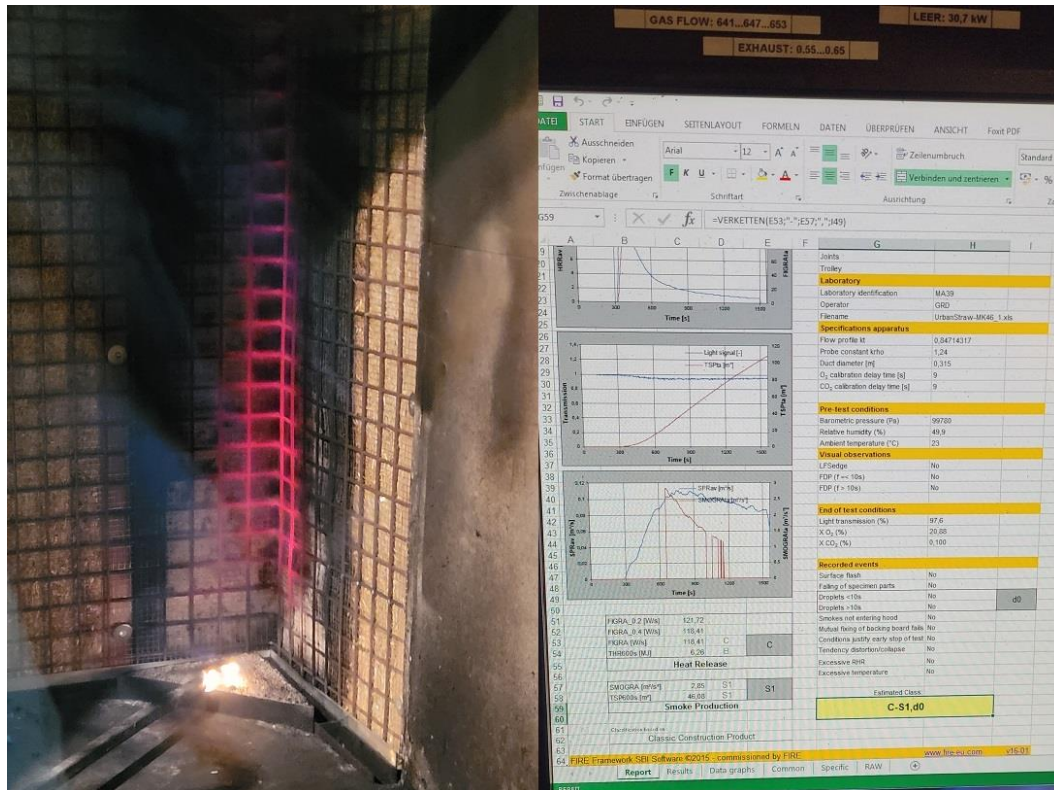


Abbildung 4-29: Glühende Stahlgitter und Ergebnis SBI-Test;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, MA39

Nach dem Entfernen der Stahlgitter sieht man deutlich das verkohlte Prüfputz im zentralen Bereich der Probe. Die Verbrennungen sind teilweise nur oberflächlich, im unteren Bereich des Prüfkörpers reichen sie jedoch bis zur Rückwand (Abbildung 4-30), welche stellenweise Verbrennungen aufweist.



Abbildung 4-30: Geöffneter Prüfkörper mit MK46, Abtragen des verbrannten Strohs;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

Beim Test mit den unbehandelten Strohäckseln und der Abschirmung durch HWL-Platten der Euroklasse B entsteht eine Verkohlung der außenseitigen Platten. Eine Rauchbildung ist nicht zu beobachten und es kommt auch bei diesem Test zu keiner Flambbildung beim Material. Die Verbrennungen entstehen auch bei diesem Test nur im zentralen Eckbereich des Prüfkörpers (Abbildung 4-31).



Abbildung 4-31: Prüfkörper mit HWL-Platten vor (rechts), während (mitte) und nach SBI-Test (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects

Die Inspektion des am stärksten beeinträchtigtsten Bereichs in der Ecke des Prüfkörpers zeigt, dass die 15mm HWL-Platten aufgrund der Verbrennungen hier sehr spröde geworden sind und die Materialverbindung kaum noch gegeben ist. Diese Beschädigung der HWL-Gefachabdeckung ist jedoch nur bis zur Mitte des Prüfkörpers vorhanden. Im oberen Bereich ist das Material auch verfärbt, es behält jedoch seine feste Plattenstruktur bei. Das verbrannte HWL-Material lässt sich leicht mit einem Spachtel ablösen, wobei das unverbrannte Stroh darunter sichtbar wird (Abbildung 4-32). Die am Bildschirm generierten Ergebnisse des SBI-Tests weisen Werte auf, welche eine Euroklasse B-s1, d0 entsprechen würden (Abbildung 4-32).

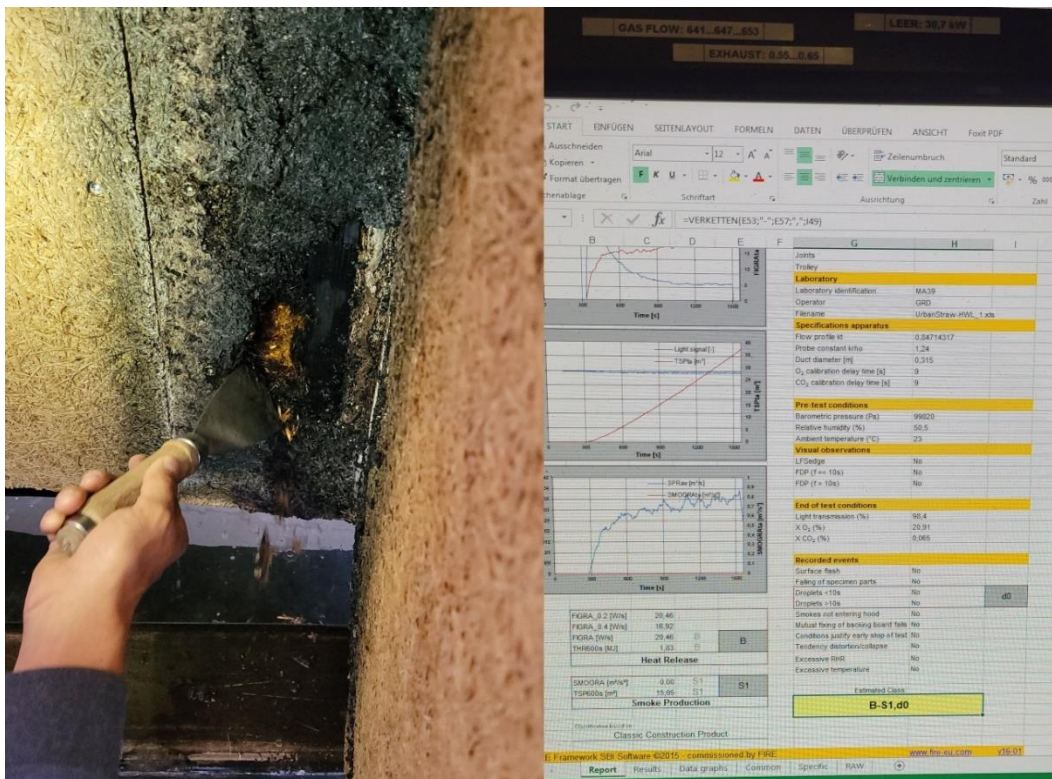


Abbildung 4-32: Entfernen der verbrannten HWL-Platte und Ergebnis SBI-Test;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, MA39

Beim Entfernen der HWL-Platten sieht man, dass das Stroh in den Randbereichen des Prüfkörpers völlig unbeschädigt ist. Lediglich im unteren Eckbereich, wo die größte Verbrennung der Platten entstanden ist, ist auch das Stroh oberflächlich maximal 1cm tief verkohlt. Auch die Steher aus 35 mm starken HWL-Platten weisen nur oberflächliche Verbrennungen an den Kanten auf (Abbildung 4-33).



Abbildung 4-33: Geöffneter Prüfkörper mit HWL-Platten, Untersuchung der Verbrennungen;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

Die ausgewerteten Daten der MA39 zu den beiden SBI-Tests zeigen eindeutig die Überlegenheit der HWL-Platten gegenüber dem chemisch mit MK46 ausgerüsteten Strohs auf (Abbildung 4-34). Die Werte der Brandausbreitung (FIGRA) und der Wärmefreisetzung (THR) der HWL-Platten entsprechen nur einem Bruchteil jener der Probe mit MK46, wobei eine Rauchentwicklung (SMOGRA) gar nicht vorhanden ist.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Wandsystem	FIGRA 0,2 [W/s]	FIGRA 0,4 [W/s]	THR 600s [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP 600s [m ²]
"MK46", Versuch 1	121,7	118,4	6,3	2,9	46,1
"HWL", Versuch 1	19,9	16,0	1,8	0,0	15,1

Beobachtungen während der Prüfung:

Produkt / Bezeichnung	Beobachtungen während der Prüfung
"MK46" Wandsystem	Verfärbung im Bereich der Beflammung unmittelbar nach Beginn der Beflammung
	kein Abtropfen / Abfallen innerhalb der ersten 600 Sekunden der Beflammungsdauer zu erkennen
	kein brennendes Abtropfen / Abfallen innerhalb der ersten 600 Sekunden der Beflammungsdauer zu erkennen

Produkt / Bezeichnung	Beobachtungen während der Prüfung
"HWL" Wandsystem	Verfärbung im Bereich der Beflammung unmittelbar nach Beginn der Beflammung
	kein Abtropfen / Abfallen innerhalb der ersten 600 Sekunden der Beflammungsdauer zu erkennen
	kein brennendes Abtropfen / Abfallen innerhalb der ersten 600 Sekunden der Beflammungsdauer zu erkennen

Abbildung 4-34: Ergebnisse aus den SBI-Tests;
Quelle: Bericht der MA39

4.3. Stresstest Einblasversuche mit konstruktiven Brandschutzlösungen

Um die Praxistauglichkeit der im Laborbrandtest untersuchten konstruktiven Brandschutzlösungen, bestehend aus der Fassadenbahn Stamisol Safe one und den HWL-Platten, festzustellen, werden Probewandelemente in der Werkshalle des Partners DPM Holzdesign hergestellt. Durch Ausblasen der Wandelemente mit Strohhäckseln soll festgestellt werden, ob sich die Materialien als Gefachabdeckung eignen. Die Wandelemente werden in der Höhe mit 200 cm und in der Breite mit 60 cm, entsprechend den Maßen der HWL-Platten, und in der Tiefe mit 30 cm dimensioniert. Es entstehen somit keine Fugen in den einzelnen Ebenen, die das Ergebnis hätten negativ beeinflussen können.

4.3.1. Herstellung der Probewandelemente

Es werden sowohl die äußeren Gefachabdeckungen als auch die Seitenteile, welche in der Praxis die Gefachteilung darstellen würden, im selben Material ausgeführt. Ziel ist hierbei, die Brandweiterleitung in benachbarte Gefache durch Glimmbrand des Dämmmaterials zu verhindern. Bei den Brandtests wurde festgestellt, dass sämtliche Prüfmuster nachglimmen, was beispielsweise eine Anwendung in Deutschland bei mehrgeschossigen Bauvorhaben verhindern würde. Es gilt dort weiterhin die nationale Brandschutznorm DIN 4102-1, da in den europäischen Prüf- und Klassifizierungsregeln das Glimmverhalten von Baustoffen nicht erfasst ist. Demnach dürfen Baustoffe die als schwerentflammbar eingestuft werden, nach einer Brandeinwirkung nicht selbstständig weiterbrennen, -glimmen und/oder schwelen.

Laut einem online publizierten Fachartikel des FeuerTrutz Magazins (Werning, Denkl, & Moarcas, 2012) lässt sich das Schutzziel, dass es nicht durch unbemerktes fortschreitendes Glimmen und/oder Schwelen zu einer Brandausbreitung kommen kann, durch (mindestens) zwei verschiedene Möglichkeiten erreichen:

- Mit konstruktiven Maßnahmen, z.B. durch Unterteilung in hinreichend kleine Bereiche, in denen unbemerktes fortschreitendes Schwelen auftreten kann, mittels bekanntermaßen nicht schwelgefährender Baustoffe, die eine Brandausbreitung in den nächsten (kleinen) Bereich verhindern.
- Es werden Produkte verwendet, die nachweislich kein fortschreitendes Schwelen zeigen.

Die Gefachunterteilung der Wandelemente mit den beiden Materialien der Euroklasse A2 kann demnach als probates Mittel angesehen werden, um eine Ausbreitung des Glimmbrandes auf Nachbargefache zu verhindern.

Die Gefachabdeckung und die Steher beim Wandelement mit den HWL-Platten werden mit Platten der Euroklasse A2 in der Stärke 25 mm ausgeführt. Die Steher werden zusätzlich mit Kanthölzern der Dimension 40 x 60 mm versehen, um eine größere Stabilität und eine bessere Auflagefläche sowie eine Einschraubunterlage für die Gefachabdeckplatten zu erzielen.

Als Rückwand und Deckel an den Ober- und Unterseiten dient jeweils eine 3-Schicht Platte aus Holz der Stärke 27mm (Abbildung 4-35). Beim Probewandelement mit der Folie Stamisol Safe one wird die Fassadenbahn zur Stabilisierung zwischen zwei Parallelträgern aus Kanthölzern mit V-förmige Nagelstegen aus verzinktem Stahlblech der Marke Wolf Easi-Joist eingefügt (Abbildung 4-36).



Abbildung 4-35: Herstellung des Wandelements mit HWL-Platten 25mm;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM



Abbildung 4-36: Herstellung des Wandelements mit Fassadenbahn Stamisol Safe one;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

4.3.2. Durchführung der Einblasversuche

Beide Wandelemente werden zu weiteren Versuchsdurchführungen auf eine Europalette montiert und auf der Rückseite, jeweils an derselben Stelle, mit einer Einblasöffnung (Durchmesser 120 mm) versehen, welche das Einbringen der Strohhäcksel mit einer handelsüblichen Einblasmaschine erlaubt (Abbildung 4-37).



Abbildung 4-37. Versuchsaufbau mit beiden Wandelementen und einer Einblasmaschine;
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

Beim Einblasen der Strohhäcksel in das Wandelement aus HWL-Platten zeigt sich keinerlei Verformung der Platten oder anderer Bauteile. Es kann daher sogar das Zusatzgebläse der Einblasmaschine aktiviert werden, um einen noch höheren Einblasdruck zu erzeugen. Dabei wird deutlich, dass sich die Offenporigkeit der HWL-Platten positiv auf den Vorgang auswirkt; es ist an der Außenseite eine deutliche Staubeentwicklung aus Strohpartikeln erkennbar und auch ein Luftzug ist an der Plattenoberfläche wahrnehmbar. Dies bedeutet, dass der im Inneren des Elements aufgebaute Überdruck teilweise durch die Platten entweichen kann und somit eine Beschädigung der HWL-Platten oder ein Aufweiten der Bauteilfugen vermieden wird - das Wandelement kann somit in kürzester Zeit lückenlos mit Dämmstoff ausgefüllt werden (Abbildung 4-38).



Abbildung 4-38: Staubeentwicklung beim Einblasen (links), intakte Bauteilfugen (mitte) und befülltes Wandelement (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

Der Versuch wurde daraufhin mit einer dünneren nur 15mm starken, helleren Platte der Euroklasse B als Gefachabdeckplatte wiederholt; auch hierbei verlief das Einblasen problemlos ohne Beschädigung oder Verformung des Plattenmaterials und das Element konnte vollständig befüllt werden, wie beim Abnehmen der Rückwand zu sehen ist (*Abbildung 4-39*).



Abbildung 4-39: 2. Versuch mit HWL-Platte 15mm (links) und rückseitiges Öffnen des Wandelements nach Versuchsdurchführung (rechts);

Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

Beim Befüllen des Wandelements, ausgestattet mit der Fassadenbahn Stamisol Safe one, bläht sich der rote Drucksack des Einblasstutzens bereits frühzeitig stark auf und die Gefachabdeckbahn entwickelt eine starke Bauchung. Es wird somit deutlich, dass die Fassadenbahn kaum luftdurchlässig ist und bereits nach sehr kurzer Zeit ein starker Überdruck im Wandelement, trotz einfachem Gebläse aufbaut. Kurz nach Versuchsbeginn reißt die Folie mit einem lauten Knall aus der Befestigung. Auf den Fotos (*Abbildung 4-40*) wird erkenntlich, dass weniger als ein Viertel des Wandelements mit Stroh befüllt werden konnte. Bei einer Versuchswiederholung riss die Bahn erneut beim selben Füllstand des Elements aus. Das Folienmaterial scheint also eindeutig zu luftdicht und zu dehnbar für eine derartige Anwendung mit Einblasdämmstoff zu sein.



Abbildung 4-40: Bauchung der Fassadenbahn (links), Ausreißen aus der Befestigung (mitte), kaum befülltes Wandelement (rechts);

Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM

4.4. Bauphysikalische Materialuntersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Urban Straw“ wurden am Institut für ökologische Bautechnologien der TU-Wien verschiedene Versuche durchgeführt, um die bauphysikalischen Eigenschaften des im Zuge des Projektes mit Flammschutzmittel behandelten Einblasstrohs zu untersuchen. Es wurde die Wärmeleitfähigkeit mithilfe von Nadelsondenmessungen, die Schimmelpilzresistenz in Anlehnung an die ÖNORM B 6010, der pH-Wert mittels Indikatorstreifen sowie die Wasserdampfdiffusion nach DIN EN 12086:2013 bzw. DIN EN ISO 12572 ermittelt. Zudem wurden in Kooperation mit dem Naturhistorischen Museum Wien, Bilder mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) aufgenommen, um das Anhaften der Flammschutzmittel an den Strohhäckseln zu bewerten.

4.4.1. Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit der Strohproben wurde mithilfe einer Lambda-Nadelsonde gemessen. Für die Wärmeleitfähigkeitsmessung wurde das Stroh jeweils in 10cm x 10cm x 10cm Schalungen gegeben und auf die vorgeschriebene Einblasdichte des verwendeten ISO-Strohs von 105 kg/m³ komprimiert (Abbildung 4-41).



Abbildung 4-41: Versuchskörper Zur Wärmeleitfähigkeit;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien

Insgesamt wurden fünf Messungen pro Flammschutzmittel sowie des unbehandelten Referenzstrohs durchgeführt und daraus der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. In *Tabelle 6* sind die jeweiligen berechneten Werte der Wärmeleitfähigkeiten des unterschiedlich behandelten Einblasstrohs zu sehen. Bei den Wärmeleitfähigkeitversuchen hat sich kein mit Flammschutzmittel behandeltes Stroh als signifikant mehr oder weniger wärmeleitfähig als unbehandeltes Stroh herausgestellt. Der größte gemessene Wärmeleitfähigkeitsunterschied besteht zwischen dem behandelten Einblasstroh mit Ecoaphos Mk46 und Ecoaphos AMU, wobei der Unterschied der beiden Varianten nur 2,57% beträgt. Somit lässt sich kein signifikanter Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit durch die Zugabe von Flammschutzmitteln messen.

Tabelle 6: Wärmeleitfähigkeit des unterschiedlich behandelten Einblasstrohs

Flammschutzmittel	Mittelwert (W/m*K)	Standardabweichung
Stroh unbehandelt	0,0472	0,001166
Ecoaphos MK46	0,0466	0,00049
BGM 1455	0,047	0,000632
Ecoaphos AMU	0,0478	0,00098

4.4.2. pH-Wert Messungen

Um den Einfluss des Flammschutzmittels auf den pH-Wert des Einblasstrohs zu untersuchen, wurden jeweils 6g des behandelten Strohs mit 60g destilliertem Wasser in einem Behälter vermengt und mittels eines haushaltsüblichen Stabmixers zu einer homogenen Masse verarbeitet. Es wurde zudem wieder eine Probe mit unbehandeltem Stroh als Referenz hergestellt. In *Abbildung 4-42* sind die fertigen Proben zu sehen.



Abbildung 4-42: Fertige Proben zur pH-Wert Messung;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien

Die Nummerierung der Proben ist der *Tabelle 7* zu entnehmen.

Tabelle 7: Probennummerierung der pH-Wert Messung

Probennummer	Flammschutzmittel
1	Ecoaphos AMU
2	BGM 1455
3	Ecoaphos MK46
4	Unbehandeltes Stroh

Die pH-Werte wurden mittels Indikatorstreifen ermittelt. In *Abbildung 4-43* sind die Ergebnisse der pH-Wert Messungen ersichtlich.



Abbildung 4-43: Indikatorstreifenergebnisse der pH-Wertmessung des behandelten Einblasstrohs; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien

Alle Tests ergeben einen pH-Wert von ca. 6. Keine der behandelten Einblasstrohproben hat somit einen pH-Wert, der von der unbehandelten Probe signifikant abweicht. Somit ist kein signifikanter Einfluss der Flammschutzmittel auf den pH-Wert des Einblasstrohs zu verzeichnen.

4.4.3. Schimmelpilzresistenz

Um die Schimmelresistenz des behandelten Baustrohs zu untersuchen, wurden die Versuche in Anlehnung an die ÖNORM B 6010 durchgeführt. Die mit verschiedenen Flammschutzmitteln behandelten Proben sowie die Referenzprobe (unbehandeltes Stroh) wurden in ein durchlässiges Teesieb gefüllt und dann in einen Exsikkator, welcher mit ausreichend Wasser gefüllt wurde, um eine stetig hohe Luftfeuchtigkeit zu garantieren, gestellt.

Tabelle 8: Probennummerierung Schimmelpilzresistenzversuche

Probennummer	Flammschutzmittel
1	Unbehandeltes Stroh
2	Ecoaphos MK46
3	BGM 1455
4	Ecoaphos AMU



Abbildung 4-44: Proben zu Versuchsbeginn;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien

Der geschlossene Exsikkator mit den Proben wurde für 36 Tage bei 22 ± 1 °C in einem Klimaraum gelagert. Die Proben wurden auf Basis der vergleichenden Bewertungsmethode in Anlehnung an die Norm EN ISO 846 (Tabelle 9) aus der Studie „Verbundvorhaben: Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen; Teilvorhaben 2: Entwicklung einer Methode zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen“ (Fraunhofer-Institut für Bauphysik, et al., 2008) nach 36 Tagen bewertet. Dabei ist die unbehandelte Strohprobe (1) die Referenzprobe.

Tabelle 9: Bewertungsschema nach EN ISO 846

Wachstumsintensität	Bewertung
0	Kein Wachstum bei mikroskopischer Betrachtung erkennbar.
1a	Kein Wachstum mit bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar. Bis zu 25 % der Prüfoberfläche bewachsen.
1b	Kein Wachstum mit bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar. Bis zu 50 % der Prüfoberfläche bewachsen.
1c	Kein Wachstum mit bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar. Mehr als 50 % der Prüfoberfläche bewachsen.
2	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 25 % der Prüfoberfläche bewachsen.
3	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 50 % der Prüfoberfläche bewachsen.
4	Beträchtliches Wachstum, mehr als 50 % der Prüfoberfläche bewachsen.
5	Starkes Wachstum, ganze Prüfoberfläche bewachsen.



Abbildung 4-45: Proben nach 36 Tagen Versuchszeit;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien



Abbildung 4-46: Proben nach 36 Tagen Versuchszeit, Seitenansicht;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien

Es zeigt sich, dass nach den 36 Tagen Versuchszeit alle Proben ein beträchtliches bis starkes Wachstum aufzeigen. Bei den Proben 2 und 4 ist ein besonders dicht bewachsenes Mycel zu erkennen, dass sich jeweils über die gesamte Probenoberfläche und auch an den Seiten der Proben ausbreitet. Das Mycelwachstum bei den Proben 1 und 3 ist im Vergleich zu den vorhin genannten Proben als weniger dicht zu beschreiben.

Das Mycel bildet sich unterschiedlich schnell, jedoch sind alle Proben auf der Prüfoberfläche vollständig mit Schimmelpilz befallen. Somit ist jede Variante mit der Wachstumsintensität 5 zu bewerten und man kommt zu dem in *Tabelle 10* dargestellten Ergebnis.

Tabelle 10: Ergebnis der Schimmelpilzversuche

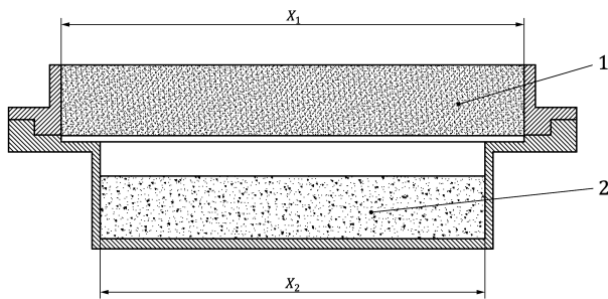
Flammschutzmittel	Wachstumsintensität
Unbehandeltes Stroh	5
Ecoatech MK46	5
BGM 1455	5
Ecoaphos AMU	5

Es lässt sich also keine fungizide Wirkung durch den Einsatz von Flammschutzmitteln erzielen. Das unbehandelte Stroh ist zwar am geringsten vom Mycel bedeckt, bedarf es jedoch weiterer Versuche, um eine klare schimmelpilzfördernde Wirkung durch Flammschutzmittel festzustellen.

4.4.4. Wasserdampfdiffusion

Zur Untersuchung der Wasserdampfdiffusions-Eigenschaften des behandelten Einblasstrohs wurden Versuche in Anlehnung an die Normen DIN EN 12086:2013 bzw. DIN EN ISO 12572 durchgeführt. Für die Versuche wurden für jedes Flammenschutzmittel und für das unbehandelte Stroh als Referenzprobe je drei Probekörper angefertigt und untersucht. Die Probekörper hatten Abmessungen konform der Norm für die Prüfung von losen Schüttungen. Das zu prüfende Stroh wurde in dem Versuchsaufbau auf die für ISO-Stroh vorgegebene Einblasdichte von 105 kg/m^3 komprimiert. Als Trockenmittel wurden Silicagel-Kugeln genutzt.

In *Abbildung 4-47* ist der schematische Aufbau eines Prüfkörpers nach DIN EN ISO 12572 zu sehen, in *Abbildung 4-48* sind die von der TU-Wien hergestellten Versuchskörper zu sehen.



*Abbildung 4-47: Schematischer Prüfkörper nach DIN ISO 12572;
Quelle: DIN ISO 12572*



*Abbildung 4-48: Von der TU-Wien hergestellter Versuchskörper nach DIN EN ISO 12572;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien*

Die Versuche wurden in einem Klimaraum mit einer Umgebungstemperatur von $21,8^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 51% durchgeführt. Es wurde die Wasserdampf-Diffusionszahl (μ) der jeweiligen Probe ermittelt und aus den gewonnenen Ergebnissen ein Mittelwert der jeweiligen Variante mit den verschiedenen Flammenschutzmitteln berechnet. In *Tabelle 11* sind die Mittelwerte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen (μ) der jeweiligen Flammenschutzmittel-Variante aufgezeigt.

Tabelle 11: Ergebnisse Wasserdampfdiffusionsversuche

Flammschutzmittel	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl
Unbehandeltes Stroh	3,0792
Ecoaphos MK46	3,0016
BGM 1455	3,0127
Ecoaphos AMU	3,0419

In dem Produktblatt von ISO-Stroh ist $\mu=2,8$ angegeben. Der Referenzprobeversuch mit dem unbehandelten Stroh hat in den Versuchen der TU-Wien ein Ergebnis von $\mu=3,0792$ ergeben, was bauphysikalisch gesehen keinen einflussstarken Unterschied darstellt.

Dennoch besteht der größte Unterschied, beziffert mit 2%, zwischen dem unbehandelten und dem mit Ecoaphos MK46 behandeltem Stroh. Es ist kein signifikanter Einfluss des Flammschutzmittels auf die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl festzustellen.

4.4.5. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen

Das Anhaften des Flammschutzmittels an die Strohhäcksel stellt einen kritischen Punkt bezüglich der Garantie eines dauerhaften Brandschutzes dar. Um dieses Anhaften zu kontrollieren bzw. zu untersuchen, ob sich das Flammenschutzmittel auf dem Stroh gänzlich oder nur punktuell festgesetzt hat, wurde ein Elektronenrastermikroskop herangezogen.

Nachstehend werden die hochauflösenden Aufnahmen der jeweiligen mit Flammschutzmittel behandelten Strohproben gezeigt. Dabei gibt die Nummerierung im jeweiligen Bild das Flammschutzmittel wieder. Die Codierung ist aus der *Tabelle 12* zu entnehmen.

Tabelle 12: Codierung REM Bilder

Probennummer	Flammschutzmittel
1	AMU
2	MK46
3	Blähgraphit
4	Unbehandelt

Das unbehandelte Stroh (*Abbildung 4-52*) scheint einen erhöhten Anteil an Verunreinigungen bzw. Unebenheiten auf der Oberfläche aufzuweisen, wobei die Oberflächen der mit Flammschutzmitteln AMU (*Abbildung 4-49*) und MK46 (*Abbildung 4-50*) behandelten Strohproben glatter ausfallen. Diese Glättung der Oberfläche könnte folglich durch die mechanische Beanspruchungen bzw. das Verwaschen der Oberfläche während des Mischprozesses mit dem Flammschutzmittel entstanden sein. Die Aufnahmen zeigen auch deutlich das Blähgraphit (*Abbildung 4-51*) als schwarze Punkte auf der Strohoberfläche.

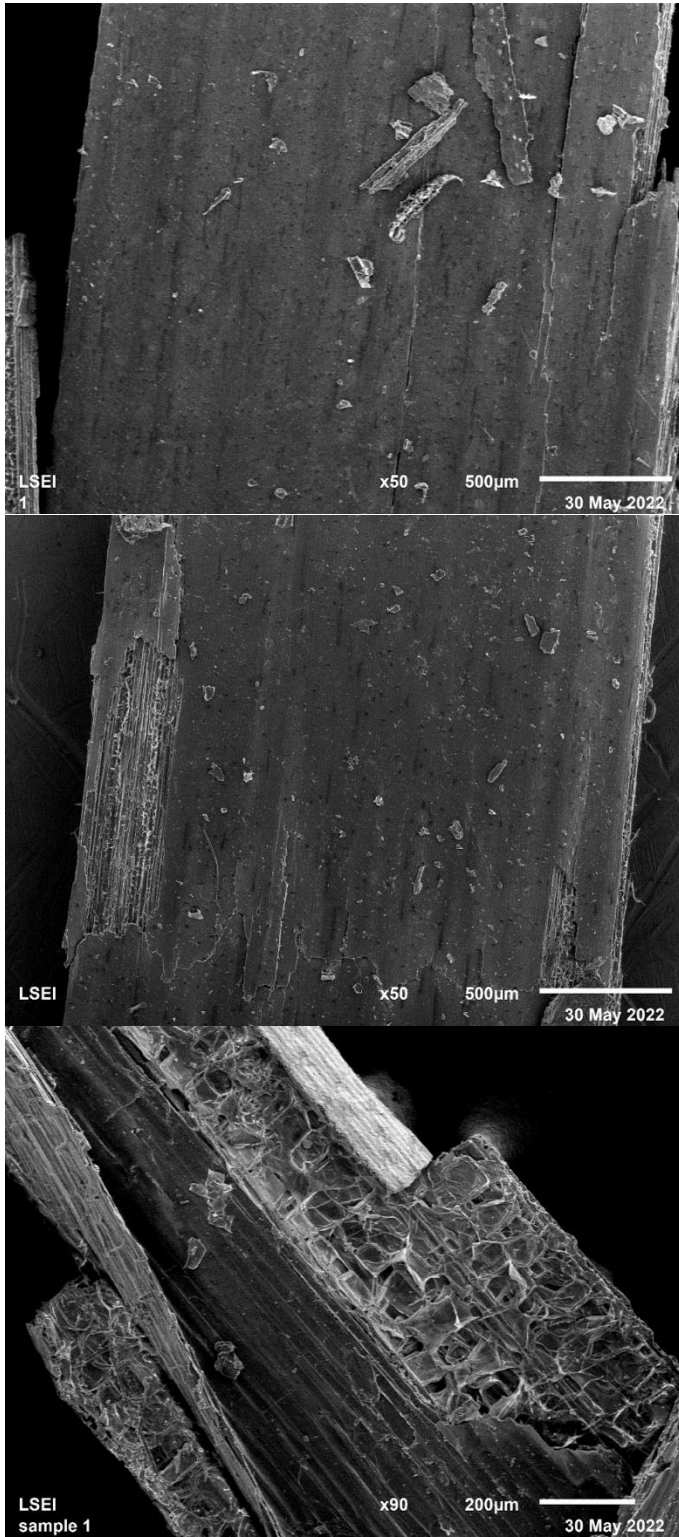


Abbildung 4-49: REM Bilder AMU;
Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien

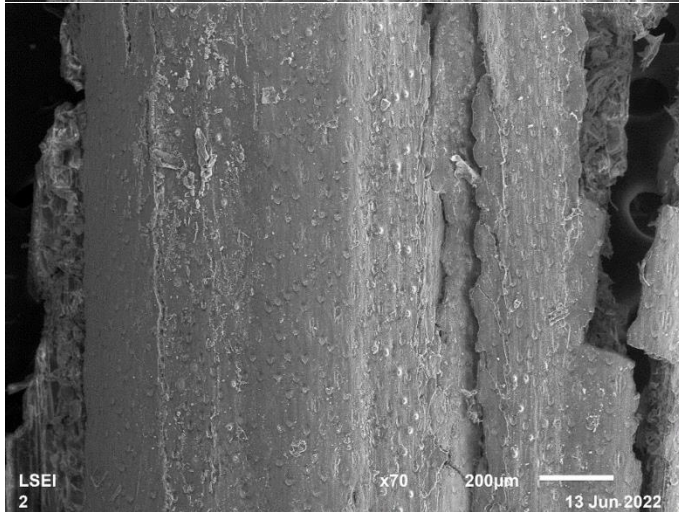
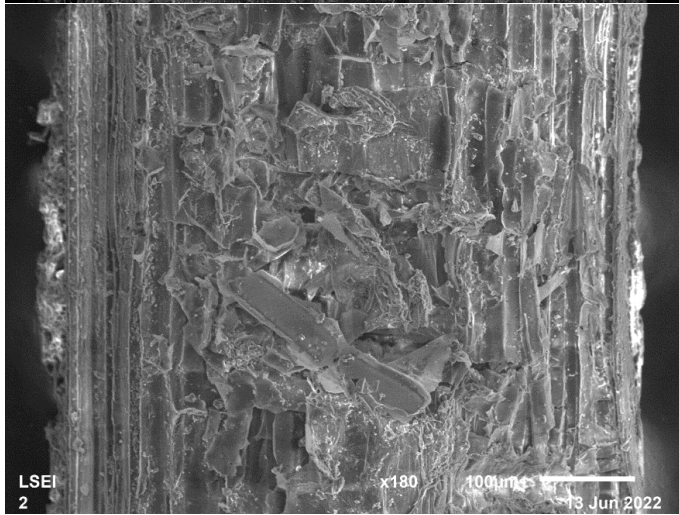
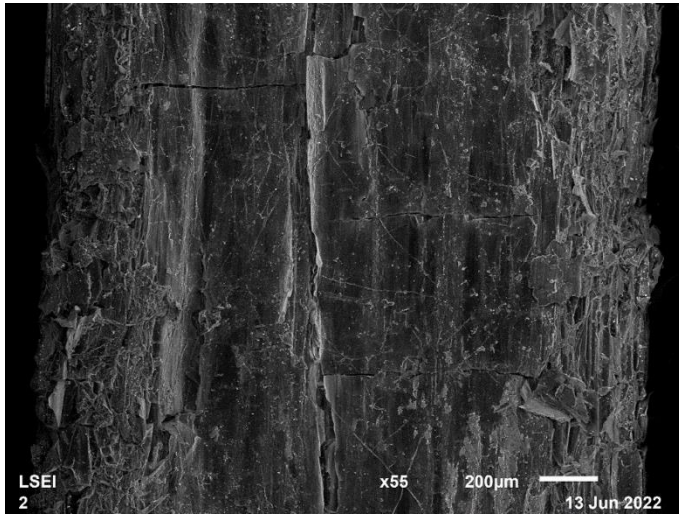


Abbildung 4-50: REM Bilder MK46;
Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien

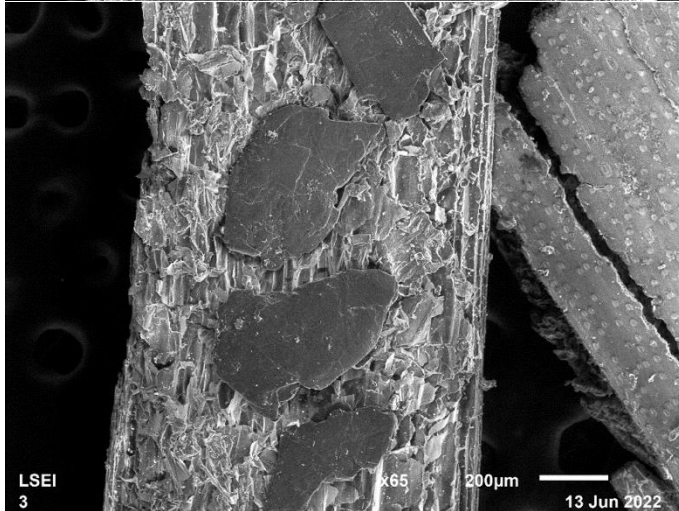
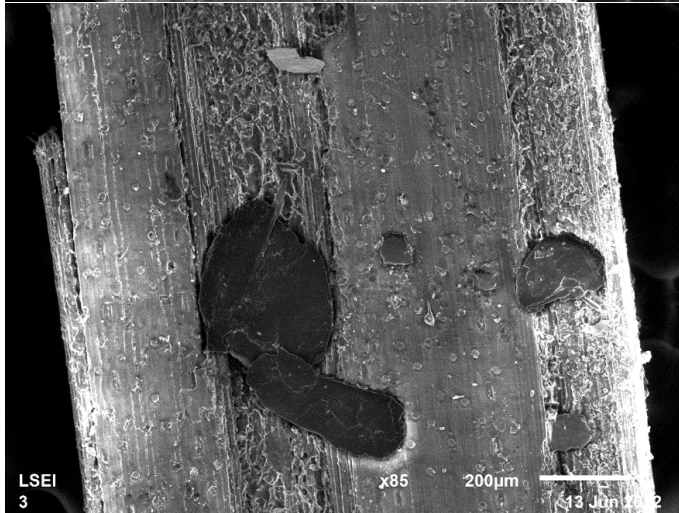
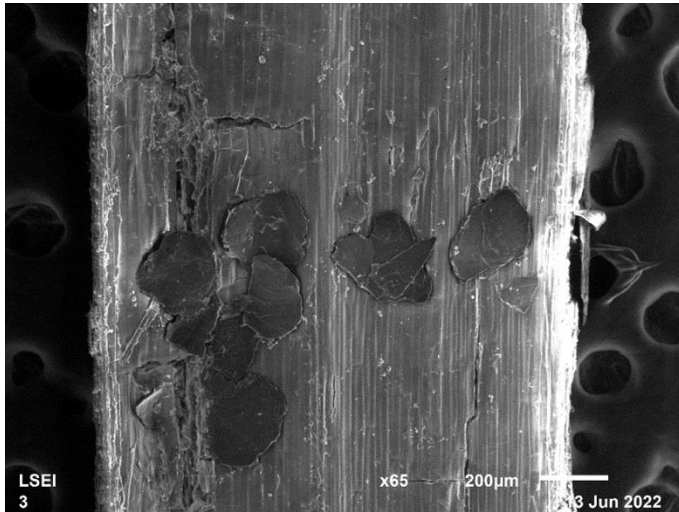


Abbildung 4-51: REM Bilder Blähgraphit BG 1455;
Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien

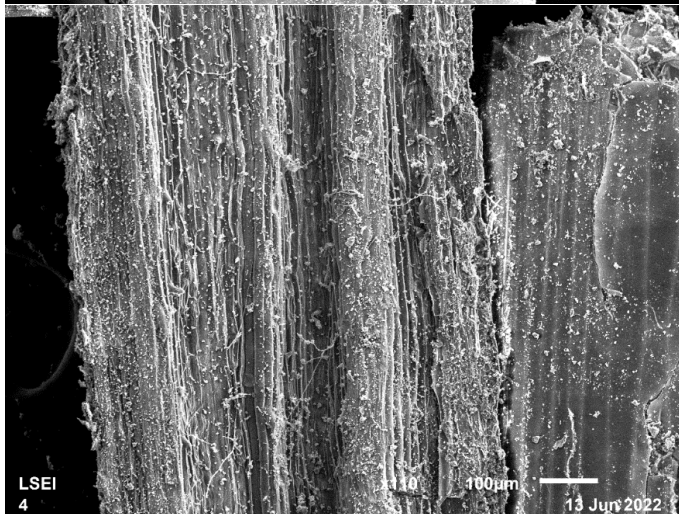
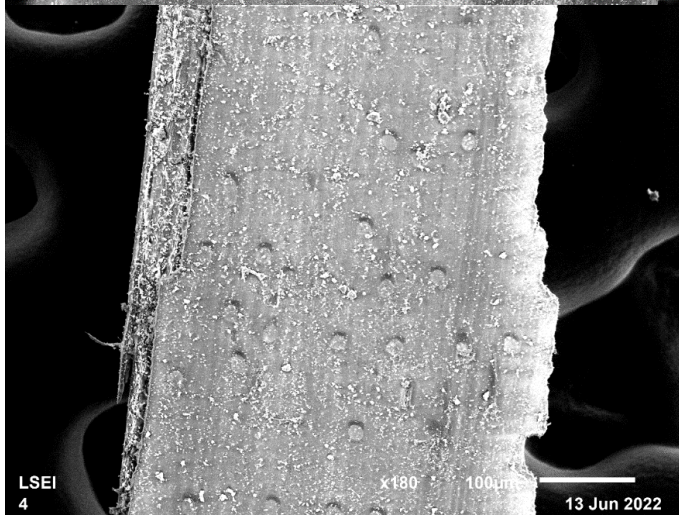
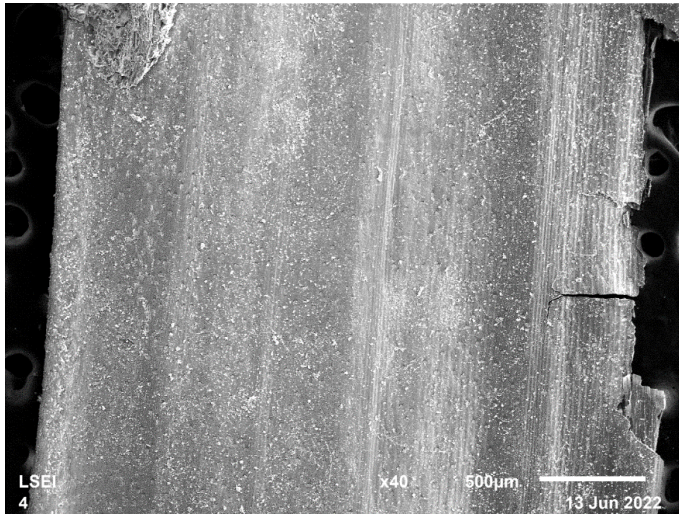


Abbildung 4-52: REM Bilder unbehandeltes Stroh;
Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien

4.4.6. Langzeitverhalten des behandelten Einblasstrohs

Da sich das hygrothermische Langzeitverhalten des mit Flammenschutzmittel behandeltem Stroh nicht bzw. nur schwer vorhersagen lässt und die erhöhte Konzentration von Salzen im Einblasstroh durch die Flammenschutzmittel zu hygrothermischen Problemen im Bauwerk führen kann, müssen weitere Untersuchungen angestellt werden. Daher wurde am Freiluftprüfstand der TU-Wien ein Außenwandmodul in Holzriegelbauweise vorbereitet, das mit dem mit MK46 behandeltem Einblasstroh als Dämmmaterial befüllt und eingebaut wurde. In *Abbildung 4-53* ist der Wandaufbau mit schon eingebauten Feuchte- & Wärmesensoren an einer der inneren Grenzschichten zu sehen jedoch noch ohne Einblasstroh.



*Abbildung 4-53: Wandaufbau mit Feuchte- & Temperatursensoren;
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien*

Das verbaute Wandmodul besteht aus drei Fächern, die jeweils mit dem behandelten Einblasstroh gefüllt werden. Um das Langzeitverhalten zu messen, werden je Fach im Wandmodul zwei Feuchte- und Temperatursensoren an den Grenzschichten innerhalb des Bauteils angebracht, zwei Temperatursensoren an der inneren sowie äußeren Oberfläche des Bauteils und noch eine Wärmestromfolie auf der inneren Oberfläche des Bauteils. In *Abbildung 4-54* ist der Messtechnikaufbau dargestellt.

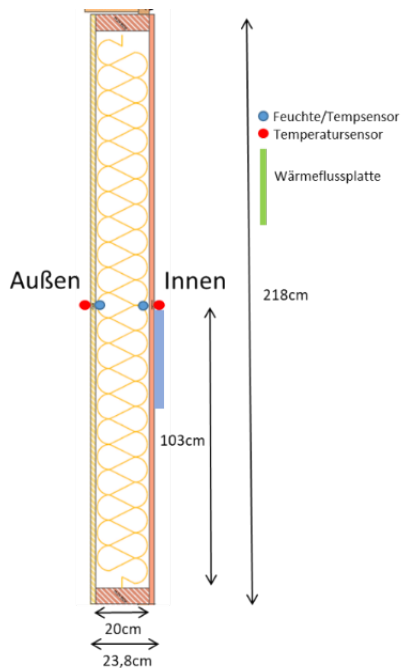


Abbildung 4-54: Messtechnikaufbau;
Quelle: Skizze TU Wien

Weiter wurde, um den hygrothermischen Effekt der Ausrichtung des Einblasens des behandelten Einblasstrohs zu untersuchen, ein Fach liegend eingeblasen und die zwei restlichen Fächer, wie handelsüblich, stehend eingeblasen. In *Abbildung 4-55* ist der Wandaufbau in verschiedenen Stufen der Fertigstellung zu sehen.



Abbildung 4-55: Noch offenes Bauteil kurz vor dem liegenden Einblasen (links),
Stroh wird stehend eingeblasen (mittig), fertiger Wandaufbau (rechts);
Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien

4.5. Flammschutzmitteluntersuchung Ecoaphos MK46 (in Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben)

In Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben als Drittleister wurde das Flammschutzmittel Ecoaphos MK46 weiter auf seine Bestandteile untersucht. Als Untersuchungsmethoden wurden jeweils eine IR Spektroskopie, NMR Spektroskopie, GC-Massenspektroskopie, Röntgenfluoreszenzanalyse und Thermogravimetriemessung durchgeführt.

4.5.1. IR Spektroskopie

Die Probe wurde mittels Infrarotspektroskopie (Messbereich: 4000 – 600 cm⁻¹, Scans: 16) mit der ATR-Technik charakterisiert. Dazu wurde auf der Oberfläche eines Calciumfluoridkristalls (nicht IR-aktiv) ein Tropfen des Materials aufgebracht und danach getrocknet. Auf der Oberfläche wurde mittels des ATR-Kristalls die Messung durchgeführt. Der Peak auf der *Abbildung 4-56* bei ca. 2400 cm⁻¹ ist dem CO₂ aus der Luft zuzuordnen und nicht relevant.

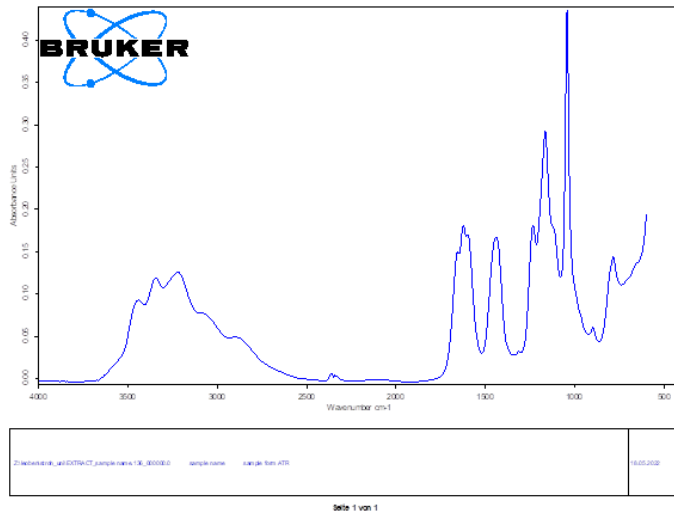


Abbildung 4-56: IR-Spektrum der Probe;
Quelle: Montanuniversität Leoben

Bei der Abfrage mittels Datenbank werden mehrere anorganische Komponenten gefunden, wobei nur die beiden wahrscheinlichsten in der *Abbildung 4-57* gezeigt werden.

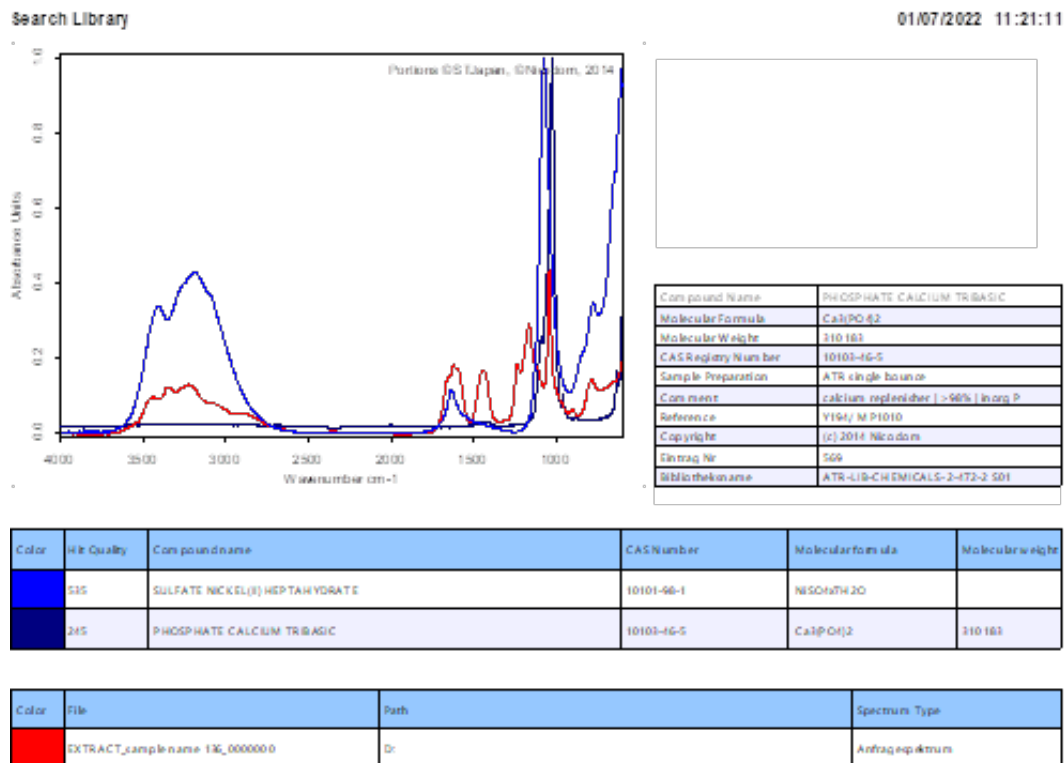
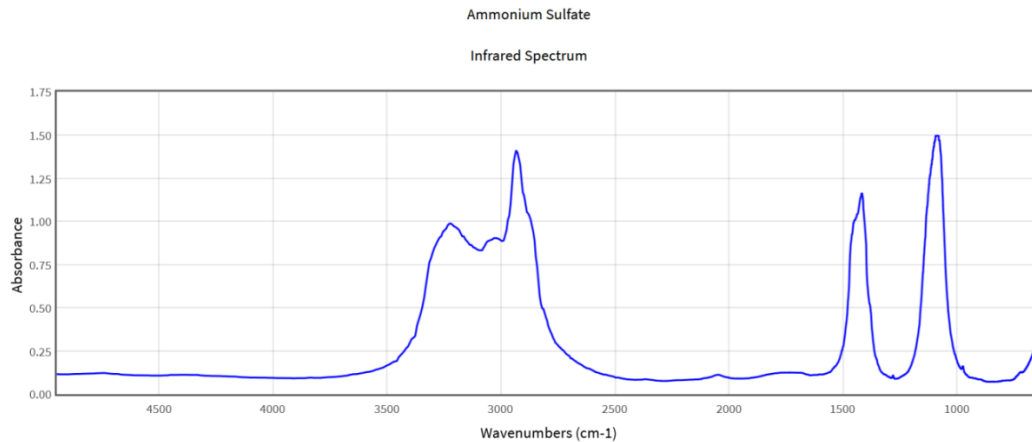


Abbildung 4-57: Vergleich des IR-Spektrums der Probe mit einer Datenbank;
Quelle: Montanuniversität Leoben

Man erkennt, dass es sich um anorganische Salze wie Nickelsulfat mit Kristallwasser und um Calciumphosphat handelt, wobei natürlich nur die Komponenten zugeordnet werden können, die in der Datenbank enthalten sind. Außerdem muss angemerkt werden, dass die Zuordnungswahrscheinlichkeit gering ist, was mit einer Mischung bzw. den nicht genau identifizierten Komponenten zusammenhängt. Da einige Peaks in der Probe vorhanden sind, die nicht mit den Ergebnissen aus der Datenbank erklärt werden konnten, wurde im Internet noch nach weiteren Spektren gesucht, die Sulfat- oder Phosphat-Ionen enthalten. Zum Vergleich wurde ein Spektrum von Ammoniumsulfat (*Abbildung 4-58*) aus einer Internet-Datenbank entnommen.

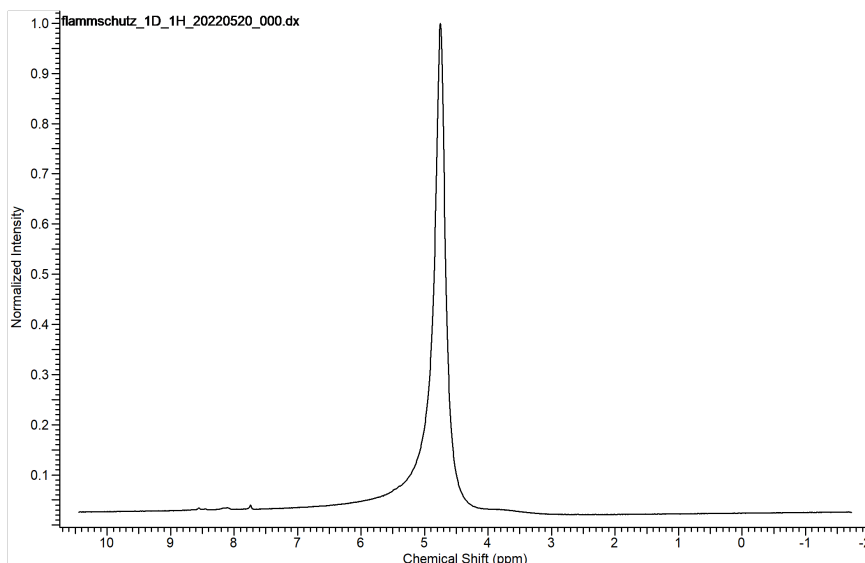


*Abbildung 4-58: Vergleichsspektrum von Ammoniumsulfat;
Quelle: Montanuniversität Leoben*

Damit lassen sich die Peaks bei 1460 cm⁻¹, und bei 1120 cm⁻¹ sehr gut erklären, die nicht mittels der Datenbanksuche gefunden werden konnten.

4.5.2. NMR Spektroskopie

Hier wurden ¹H-NMR-Messungen durchgeführt. Mittels ¹H-NMR ist es möglich, Wasserstoffe zu detektieren, die an Kohlenstoff gebunden sind und somit organische Komponenten repräsentieren. Dazu wurden ca. 20 mg des Materials in D₂O gelöst. Im aufgenommenen Spektrum (*Abbildung 4-59*) ist nur ein einziger großer Peak zu sehen.



*Abbildung 4-59: 1H-Spektrum der Probe;
Quelle: Montanuniversität Leoben*

Dieser kann dem Wasserstoff aus Wasser zugeordnet werden. Es entsteht nämlich HDO durch einen Austausch von D₂O, dem NMR Lösemittel, mit in der Probe enthaltenem normalem Wasser, sei es Kristallwasser aber natürlich auch das Wasser, das als Lösemittel in der Probe fungiert. Es sind aber keine organischen Komponenten feststellbar.

4.5.3. GC-Massenspektroskopie

Beim GC-MS werden vor allem volatile organische Komponenten nachgewiesen. Dazu wurde eine Probe des Materials 1 zu 4 mit Ethanol verdünnt und vermessen. Es wurde ein Mikroliter der Lösung im Injektor verdampft und die Komponenten aus der Probe mittels eines Verteilungsgleichgewichtes in der Säule aufgetrennt. Detektiert wurden die Komponenten mittels Massenspektroskopie (Abbildung 4-60).

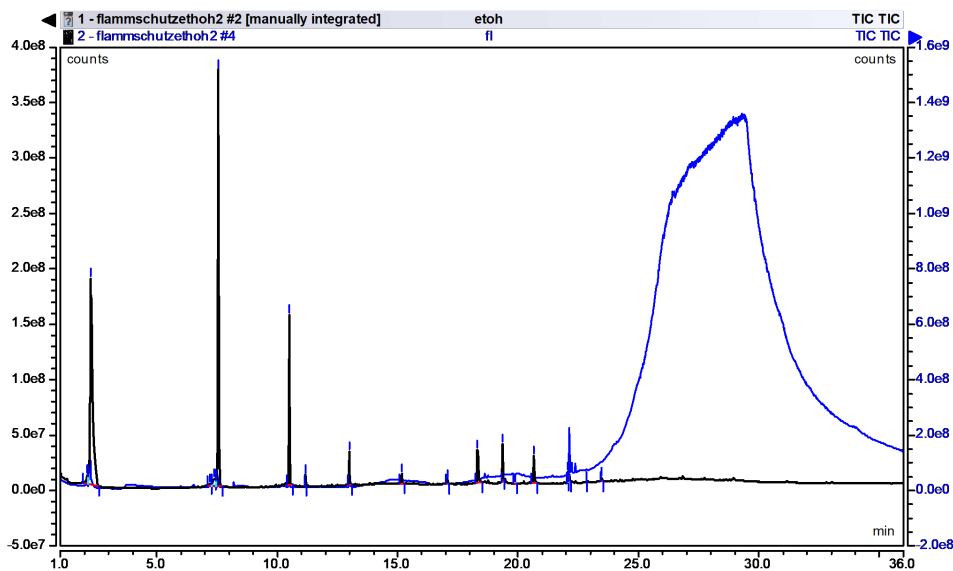


Abbildung 4-60: GC-Kurve von dem reinen Lösemittel (schwarz) und der Probe (blau);
Quelle: Montanuniversität Leoben

Die schwarze Kurve ist das verwendete Lösemittel Ethanol. Man erkennt, dass in der blauen Kurve keine weiteren Peaks mit einer Ausnahme eines großen breiten Peaks mit Beginn bei 25 min zu sehen sind. Hier ist allerdings eine Temperatur von 240 °C (Messprogramm 40/5min, 10 K/min, 250°C/10 min) bereits erreicht, so dass das Flammenschutzmittel sich bereits zersetzt.

4.5.4. Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Für die RFA wurde das Material bei 120°C über eine Woche getrocknet. Es entstand ein weißer Feststoff, der dann charakterisiert wurde. Da sich bei der RFA um eine Methode mit Röntgenstrahlung handelt lassen sich schwere Elemente gut nachweisen. Bis Fluor sind die Elemente nicht detektierbar. Damit werden genau drei Elemente gefunden:

- **Ca** 1001 ppm
- Ca Error 41
- **P** 2923 ppm
- P Error 230
- **S** 249017 ppm
- S Error 2000

Die Konzentrationen von Ca und P passen gut zusammen. Es handelt sich wie bereits aus dem IR-Spektrum gefunden um ein Calciumphosphat. Zum Schwefel (25 %) wurde kein Gegenion gefunden.

Das bedeutet, dass Gegenion aus der zweiten Hauptgruppe stammt, die nicht detektiert werden kann. Das ergibt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des IR Spektrums, wo Ammoniumsulfat gefunden wurde. Es wurden mittels der Untersuchungen folgende Komponenten gefunden:

- Ammoniumsulfat als Hauptkomponente (ca. 80 %)
- Calciumphosphat als Nebenkomponekte (ca. 1 %)
- Organische Komponenten konnten nicht detektiert werden

4.5.5. Thermogravimetriemessung

Bei der Thermogravimetriemessung ist bis 100°C zuerst Wasser (ca. 35%) des Massenanteils und erst ab ca. 170°C wurde das Flammenschutzmittel aktiv und begann zu wirken mit einer Massenabnahme von 10%. Die Zahlen über den Messpunkten entsprechen der Temperatur in °C (Abbildung 4-61).

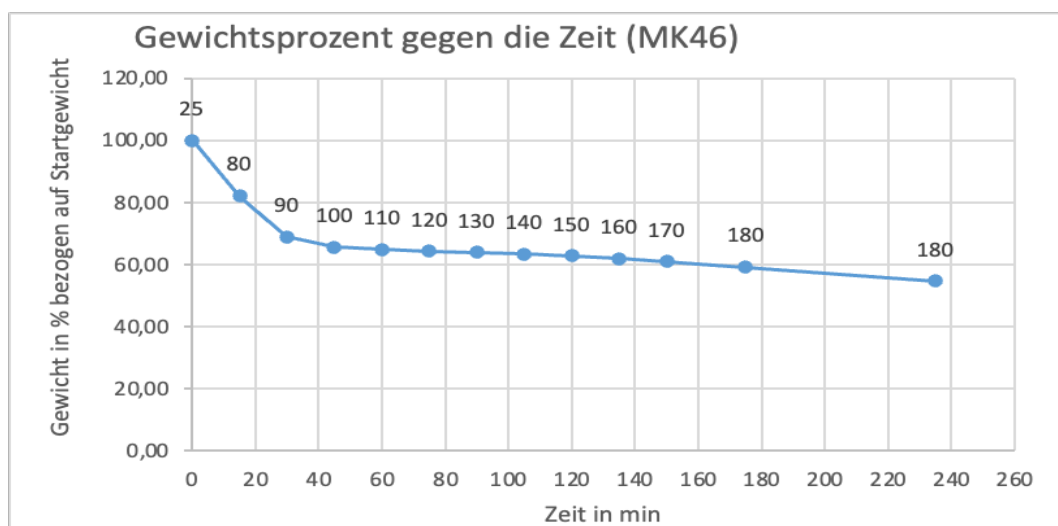


Abbildung 4-61: Thermogravimetriemessung über Zeit;
Quelle: Montanuniversität Leoben

5 Ergebnisse

Das Projekt Urban Straw liefert Erkenntnisse, wie Stroheinblasdämmung als ökologische hochwertiger, nachwachsender Baustoff und CO₂-Senke in den Gebäudeklasse 4 und 5 anwendbar wird. Üblicherweise sind Bauvorhaben dieser Gebäudeklassen großvolumige Projekte, wodurch eine breitere Anwendung dieses Dämmstoffs möglich wird und somit hoffentlich ein breiteres Marktsegment bedient werden kann. Weitere ökologische Vorteile von chemisch unbehandeltem Stroh als Dämmstoff, abseits der Kohlenstoffeinlagerung aus der Atmosphäre, liegen in der möglichen Kaskadierung der Folgenutzungen - beispielweise als Tiereinstreu, bei der thermischen Verwertung auch in Form von Pellets oder der Biogasherstellung sowie alternativ der einfachen Kompostierbarkeit am Ende des Lebenszyklusses. Diese Vorteile des Materials und das geringe Maß an grauer Energie zur Herstellung liefern somit eine gute Möglichkeit die CO₂-Emissionen im Bausektor erheblich zu reduzieren und es kann ein positiver Beitrag zur Architektur der klimaverträglichen Stadt geleistet werden.

Als Ergebnis der Brandversuche mit Beflammung in Anlehnung an die ÖN A 3800-1 ergibt sich, dass einfache alternative chemische Mittel wie Wasserglas und Soda den speziell für die Anwendung hergestellten industriellen Flammschutzmitteln unterlegen sind und kaum Wirkung zeigen. Als effizientestes Additiv erweist sich das Mittel Ecoaphos MK46, welches laut Hersteller aus einer wässrigen Lösung verschiedener saurer organischer und anorganischer Verbindungen besteht. Die durchgeführte chemische Analyse zeigt, dass demnach die Elemente Calcium (Ca), Phosphor (P) und Schwefel (S) vorhanden sind, organische Komponenten werden jedoch nicht detektiert. Das Mittel verfügt zudem laut Hersteller über einen sehr hohen Feststoffanteil von 72%. Auch die Blähgrafitdispersion desselben Herstellers stellt sich als sehr effizient heraus, da Temperaturen über 500° durchgehend wirksam unterbunden werden. Die Tauglichkeit des Mittels für Stroh ist jedoch fraglich, da die Anhaftung am Substrat nicht gut funktioniert und es zum Abrieseln neigt. Sämtliche chemisch behandelten Proben weisen allerdings ein erhebliches Nachglimmen nach Entfernung des Brenners auf. Den wirksamsten Brandschutz liefert daher die Abschirmung des Strohs mit einer handelsüblichen Holzwoleleichtbauplatte (HWL) mit einer Stärke von 15mm der Euroklasse B, es kommt hierbei zu keinerlei Verbrennung des ansonsten unbehandelten Strohs.

Bei den Tests im Cone-Kalorimeter mit Hitzestrahlung zeigt sich, dass eine höhere Dosierung der Mittel über 12 M% kaum zu Verbesserungen führt. Die verwendeten chemischen Mittel haben durchwegs eine ähnliche Wirkung. Sämtliche Proben, bei denen das Stroh mit Flammschutzmittel im Autoklav kesseldruckimprägniert wurde, zeigen eine deutlich bessere Wirkung. Mit Ausnahme der mit Tannin kesseldruckimprägnierten Probe entzündeten sie sich während der Versuchsdurchführung nicht. Das Verfahren der Kesseldruckimprägnierung im Autoklav stellt sich als ebenso effizient wie die konstruktive Abschirmung des Strohs mit der Fassadenbahn Stamisol Safe one der Euroklasse A2 und der 15mm starken HWL-Platte der Euroklasse B heraus. Eine Verbesserung der Wirkung durch die Verwendung einer mit 25mm stärkeren HWL-Platte der höheren Euroklasse A2 und dahinter liegendem Stroh, das mit dem Mittel Ecoaphos MK46 mischkonditioniert wurde, ist nicht feststellbar.

Beim Vergleich im Zuge zweier SBI-Tests zeigt sich, dass die konstruktive Brandschutzlösung mit der Abschirmung durch eine 15mm HWL-Platte Werte erzielt, die der Euroklasse B entsprechen und das mit dem effizientesten Mittel Ecoaphos MK46 mischkonditionierte Stroh lediglich Werte der Euroklasse C ermöglicht. Zudem verhindert die Gefachteilung mit eigens entwickelten Stehern aus HWL-Platten („B-Joist“) eine Glimmbrandweiterleitung in benachbarte Gefache.

Bei Einblasversuchen mit der Fassadenbahn und den unterschiedlichen HWL-Platten erweist sich die Fassadenbahn jedoch als untauglich zur Verwendung beim Einblasverfahren, da sie zu luftdicht ist.

Die HWL-Platten können hingegen überzeugen, sowohl die 15mm als auch die 25mm starke Platte sind sehr gut für die Verwendung mit Einblasstroh geeignet.

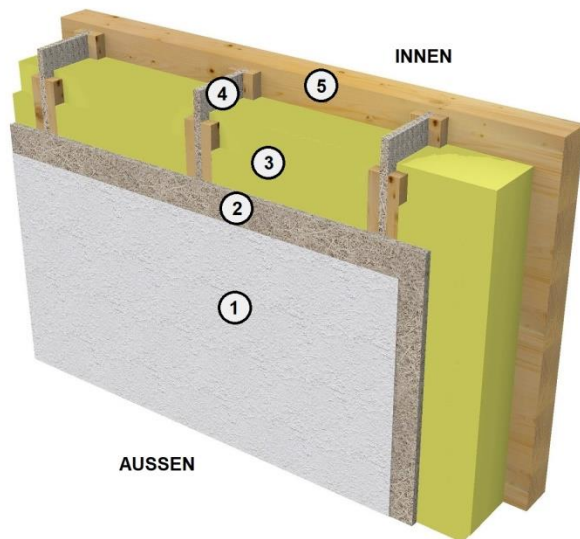
Die bauphysikalische Untersuchung der Proben mit unterschiedlichen mischkonditionierten Flammenschutzmitteln zeigt keine wesentlichen Veränderungen oder Auswirkungen der Additive auf die bauphysikalischen Eigenschaften des Strohs.

Es zeigt sich, dass mit bereits vorhandenen Materialien, wie der vom Partner DPM-Holzdesign entwickelten Einblasstrohdämmung ISO-Stroh in Kombination mit handelsüblichen HWL-Platten, eine ökologisch hochwertige Konstruktion mit hohem Brandschutz umsetzbar ist, die den Anforderungen an Fassadendämmung der Gebäudeklassen 4 und 5 nach der *OIB Richtlinie 2 Brandschutz* entspricht, sogar ohne zusätzlichen Aussenputz. Auch lässt sich dasselbe Plattenmaterial mit einfachen Mitteln zur Herstellung von Stehern zur Gefachteilung (*Abbildung 5-62*) nutzen, um eine Glimmbrandweiterleitung auf benachbarte Dämmgefache wirksam zu verhindern.



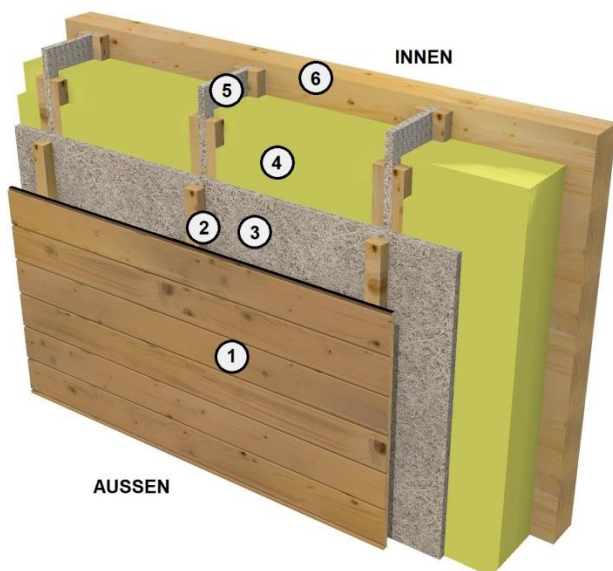
*Abbildung 5-62: B-Joist Dämmständer zur Gefachteilung;
Quelle: capital [A] architects*

Die *Abbildung 5-63* zeigt einen möglichen Fassadenaufbau mit mineralischem Aussenputz, welcher üblicherweise die Euroklasse A2 aufweist. Die *Abbildung 5-64* zeigt einen Aufbau mit einer Holzverschalung als Aussenoberfläche, welche üblicherweise die Euroklasse D aufweist; hierbei sind jedoch ausschließlich HWL-Platten der Euroklasse A2 zu verwenden, um den Anforderungen der ÖNORM B 2332 zu entsprechen.



- | | |
|---------------------------------------|---|
| ① Aussenputz mineralisch "A2" | ④ B-Joist / HWL-Dämmständer "A2" / "B" |
| ② HWL-Gefachabdeckplatte "A2" / "B" | ⑤ Tragende Aussenwand (z.B. Massivholz) |
| ③ Strohhäcksel / Nawaro-Dämmstoff "E" | |

Abbildung 5-63: Fassadenaufbau Urban Straw mit mineralischem Aussenputz;
Quelle: capital [A] architects



- | | |
|-------------------------------|---|
| ① Holzverkleidung | ④ Strohhäcksel / Nawaro-Dämmstoff "E" |
| ② Holzlattung / Hinterlüftung | ⑤ B-Joist / HWL-Dämmständer "A2" |
| ③ HWL-Gefachabdeckplatte "A2" | ⑥ Tragende Aussenwand (z.B. Massivholz) |

Abbildung 5-64: Fassadenaufbau mit Holzverkleidung;
Quelle: capital [A] architects

Mit dieser einfachen konstruktiven Brandschutzlösung würden sich auch andere nawaRo-Einblasdämmstoffe gut gegen Brand schützen lassen, es sind hierzu allerdings weitergehende Untersuchungen notwendig.

6 Schlussfolgerungen

Die chemische Behandlung von Strohhäcksel-Einblasdämmung ohne die Verwendung bei REACH gelisteter Additive wie Borsäure und Borax, welche oftmals bei Einblasdämmungen wie Zellulose- und Holzweichfaserflocken angewendet werden jedoch als reproduktionstoxisch gelten, und Ammoniak-basierten Mitteln, welche in Frankreich zur Verwendung von Gebäudedämmstoffen weitestgehend untersagt sind, ist grundsätzlich möglich. Industrielle Flammenschutzmittel auf Basis verschiedener Säuren und mit mineralischen Bestandteilen (wie beim Blähgraphit) erweisen sich als besonders geeignet. Die Herausforderung besteht jedoch in der dauerhaften Anhaftung aufgrund der wachsartigen Oberfläche des Strohs. Mittel mit einem hohen Feststoffanteil und mit Haftvermittlern als Inhaltsstoffe sind besonders geeignet die Brandeigenschaften des Strohs dauerhaft zu verbessern.

Abgesehen von der Zusammensetzung der Mittel erweist sich das Einbringverfahren der Flammenschutzmittel als ausschlaggebendes Kriterium. Durch Kesseldruckimprägnierung kann ein weitaus höherer Brandschutz erzielt werden, als durch einfaches Mischkonditionieren. Allerdings ist dieses Verfahren sehr aufwendig und ressourcenintensiv, was dem niederschweligen Aufwand zur Herstellung der Strohhäckselämmung widerspricht. Auch ist noch kein Verfahren zur Herstellung größerer Volumina von kleinteiligem Häckselgut durch Kesseldruckimprägnierung bekannt.

Die konstruktive Brandschutzlösung mit Abschirmung der Dämmung durch HWL-Platten ist genauso wirkungsvoll wie die Kesseldruckimprägnierung. Allerdings erfordert dieser Ansatz keinerlei Behandlung des Strohs, wodurch die ökologisch hochwertigen Eigenschaften aufgrund der niedrigen Herstellungsenergie und der Kompostierbarkeit des Strohs gänzlich erhalten bleiben. Diese konstruktive Lösung kann von jedem Handwerksbetrieb einfach umgesetzt werden, ohne Adaption des Bauablaufs. Üblicherweise werden für die fassadenseitige Gefachabdeckungen von Einblasdämmstoffen Holzweichfaserplatten mit einer Mindeststärke von 60mm der Euroklasse E verwendet, neu ist die Holzweichfaserplatte Gutex Pyroresist der Euroklasse C, welche jedoch relativ schlechte Werte in der Ökobilanz aufweist. Der Vergleich der ökologischen Kennwerte (*Tabelle 13*) zeigt die Überlegenheit der HWL-Platten, trotz des CO₂-intensiven Bindemittels Zement. Es sei angemerkt, dass sich diese Werte durch die Verwendung dünnerer Platten noch weiter optimieren lassen; anstelle der 60mm starken Holzweichfaserplatten können in der Praxis HWL-Platten mit 25-35mm Stärke verwendet werden, wodurch die Werte der Ökobilanz quasi halbiert werden.

Tabelle 13: Ökologische Kennwerte Gefachabdeckplatten je m³ für A1-A3 (cradle to gate)

Platten-Dämmstoff	Euroklasse (EN 13501-1)	GWP fossil (kg CO ₂ -Äq.)	GWP total (kg CO ₂ -Äq.)	Primärenergiebedarf PENRT (MJ)
Holzweichfaser-Platte (180 Kg/m ³ ; 190kg/m ³ *)	E; C *	163,62; 297 *	-144,48; 28,20 *	2592; 4050 *
Holzwohle-Leichtbauplatte (380kg/m ³)	A2; B	174,42	- 50,54	1546,60

Quelle: IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie GmbH

* Gutex Pyroresist laut Umwelt-Produktdeklaration des Instituts Bauen und Umwelt e.V., 2022

7 Ausblick und Empfehlungen

Aus Sicht des Projektteams sind nawaRo-Einblasdämmstoffe ihren Pendanten als Matten- und Plattendämmstoffe in mehrerlei Hinsicht überlegen. Diese Ansicht beruht darauf, dass das lose Dämmmaterial zumeist keine zusätzlichen Komponenten wie synthetische Stützfasern oder chemische Additive als Bindemittel braucht. Gerade die Stroheinblasdämmung ist somit ein naturreines, einstoffliches Baumaterial. Auch ist diese Art der Dämmung flexibler einsetzbar - nicht nur im Neubau, sondern auch zur lückenlosen Ausdämmung bestehender Gefache in der Sanierung, beispielsweise beim Dachgeschossausbau. Die großen Vorteile des mehrgeschossigen Holzbaus liegen bekanntlich mitunter in der witterungsunabhängigen Werksvorfertigung, welche auch bessere Arbeitsbedingungen und ergonomischer Arbeitsabläufe ermöglicht. Hierbei kann Einblasdämmung durch neuartige Multifunktionsbrücken mit automatischen Einblasplatten lückenlos und gleichmäßig computergesteuert eingebracht werden - ohne den sonst bei Matten- und Plattendämmstoffen üblichen Materialverschnitt. Eine erste derartige Anlage in Österreich wurde 2020 im Südburgenland von der Firma O.K. Energie Haus GmbH in Betrieb genommen (Kittel, 2020).

Zur Anwendung von fassadenseitiger Stroheinblasdämmung in den Gebäudeklasse 4 und 5 ist die konstruktive Brandabschirmung durch HWL-Platten einfach technisch und wirtschaftlich realisierbar, ein zusätzlich aufgebracht mineralischer systemkonformer Außenputz würde den Brandschutz hierbei zusätzlich steigern. Bei Verwendung von HWL-Platten der Euroklasse A2 ist entsprechend der ÖNORM B 2332 alternativ zum Außenputz auch eine Holzfassade in den Gebäudeklassen 4 und 5 möglich, um den Anforderungen der OIB Richtlinie 2 „Brandschutz“ im Punkt 1.2.1 der Tabelle 1a zu entsprechen (*Abbildung 4-1*). Eine Anwendung als Dachdämmung in diesen Gebäudeklassen ist jedoch mangels einer entsprechenden Regelung für ein Gesamtsystem dennoch nicht möglich, aus Sicht des Projektteams besteht hier ein Optimierungsbedarf bei der Richtlinie.

HWL-Platten sind europaweit sehr verbreitet und werden für verschiedene Anwendungen verwendet. Dank ihrer hohen Druckbelastbarkeit werden sie als verlorene Schalung im Mantel-Betonbau eingesetzt, aufgrund ihrer hohen Brandschutzwirkung auch in Form von Sandwichelementen mit anderen Dämmstoffen als Keller- und Garagendeckendämmung und basierend auf ihren guten Schallschutzeigenschaften für Schallschutzwände sowie im Innenausbau als Akustikpanelle. Hierbei variieren die Zusammensetzung des Materials, die Feinheit der Holzwollefasern, die Kantenausbildung und die hergestellten Plattenformate von 100cm x 60cm bis 240cm x 60cm mit unterschiedlichen Materialstärken. In Skandinavien gibt es bereits Produktionen ganzer Wendelemente aus dem Material (Träullit AB, 2022). Zur Verwendung als konstruktiver Brandschutz von Einblasdämmstoffen im mehrgeschossigen Holzbau ergeben sich besondere Anforderungen an die HWL-Platten, welche in dieser spezifischen Form noch nicht umgesetzt wurden, jedoch technisch leicht realisierbar sind:

- Kantenausbildung als Nut & Feder oder als Stufenfalz, wie bei einigen HWL-Akustikpanelen. Es ist belegt, dass derartige Kantenausbildungen den Durchgang von Feuer und Gasen erheblich behindern (Winter, Suttner, Werther, & Dumler, 2020), weshalb diese Fugenversätze auch in der deutschen Muster-Holzbaurichtlinie (Muster-Holzbaurichtlinie, MHolzBauRL, 2021) Erwähnung finden.
- Geschosshohe Plattenformate zur Vermeidung kritischer horizontaler Fugen und zur maschinellen Verarbeitung im Zuge der werkseitigen Holzbaufertigung. Vertikale Fugen können mit den Kanten der entwickelten HWL-Steher hinterlegt werden.
- Systemergänzende Fugen-Klebstoffe für Außenbereiche in derselben Euroklasse wie die entsprechenden HWL-Platten.

Darüber hinaus ergibt sich ein großes Potential durch Optimierung des ökologischen Fußabdrucks des Bindemittels Zement durch CO₂ arme Herstellungsweisen (Scrivener, John, & Gartner, 2018) wie

beim Project LC3 (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausann, Central University “Marta Abreu” de Las Villas, The Indian Institute of Technology Delhi, et al., kein Datum) oder FUTURECEM bei der Herstellung der HWL-Akustikpaneele des dänischen Herstellers Trolldtekt (Trolldtekt A/S, 2021).

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Auszug aus der OIB Richtlinie 2 Brandschutz, 2019; Quelle: Österreichisches Institut für Bautechnik	13
Abbildung 4-2: Einsprühen der Flammschutzmittel (links) und fertiger Materialverbund (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects.....	16
Abbildung 4-3: Wirkungsweise des Eirich-Mischers mit Wirbler und drehendem Mischbehälter; Quelle: Maschinenfabrik Gustav Eirich, BFT International	16
Abbildung 4-4: Brandversuch mit Lötlampe und Keramikschale (Fassadenbahn Euroklasse B); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects	17
Abbildung 4-5: Versagen und Flambbildung bei der Fassadenbahn A2 Stamisol Safe one; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects	17
Abbildung 4-6: Abwiegen der Prüfmuster (links), Durchführung Beflammung (mitte) und Ermittlung der Abbrandhöhe (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM.....	18
Abbildung 4-7: Temperaturmessung in der Nachglimmphase; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM	18
Abbildung 4-8: Herstellung Prüfmuster im Küchenknetter, Einsprühen Flammschutzmittel; Quelle: eigene Aufnahmen capital [A] architects	20
Abbildung 4-9: Anordnung der Thermosonden am Prüfkorb; Quelle: Eigene Skizze und Aufnahmen capital [A] architects, TGM	20
Abbildung 4-10: Prüfkorb mit Fassadenbahn Stamisol Safe one (links), mit 15mm HWL-Platte (mitte), unbeschädigte HWL-Platte nach Beflammung (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM	21
Abbildung 4-11: Grafische Darstellung der Testergebnisse (ÖN A 3800-1); Quelle: Eigene Aufzeichnungen capital [A] architects, TGM	23
Abbildung 4-12: Darstellung einzelner Temperaturverläufe im Schlyterprüfstand (ÖN A 3800-1); Quelle: Eigene Aufzeichnungen capital [A] architects, TGM.....	25
Abbildung 4-13: Kesseldruckimprägnieren im Labor-Autoklav (FH Salzburg); Quelle: FH Salzburg	26
Abbildung 4-14: Verfärbte kesseldruckimprägnierte Muster; Quelle: FH Salzburg	27
Abbildung 4-15: Herstellung der Prüfmuster; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM.....	28
Abbildung 4-16: Prüfmuster mit Strohhäckseln (links), Folie Stamisol Safe one (mitte) und HWL-Platte (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM.....	28

Abbildung 4-17: Probe mit Entzündung (Stroh unbehandelt, links), ohne Entzündung (AMU kesseldruckimprägniert, mitte) und Ausdehnung des Blähgraphits (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM	29
Abbildung 4-18: Darstellung der Wärmefreisetzungsraten im Cone-Kalorimeter (ISO 5660-1); Quellen 4-18 bis 4-23: Eigene Aufzeichnungen capital [A] architects, TGM	30
Abbildung 4-19: Vergleich der Muster mit MK46	31
Abbildung 4-20: Vergleich der Muster mit AMU.....	31
Abbildung 4-21: Vergleich der Muster mit Blähgraphit (BG 1455)	32
Abbildung 4-22: Vergleich der Muster mit Burnblock	32
Abbildung 4-23: Proben mit Folie A2 Stamisol Safe one und HWL-Platten	33
Abbildung 4-24: Proben MK46 mischkonditioniert 12 % (links), kesseldruckimprägniert (mitte) und mit HWL-Platte (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, TGM.....	33
Abbildung 4-25: SBI-Prüfkörper mit mischkonditioniertem Prüfgut (links) und mit HWL-Platten (rechts); Quelle: Eigene Skizzen capital [A] architects.....	34
Abbildung 4-26: Mischkonditionieren von Strohhäckseln mit dem KKM Labormischer; Quelle: Kniele GmbH und eigene Aufnahmen DPM Holzdesign	35
Abbildung 4-27: KKM mit zentraler Mischschnecke und gegenläufigen Mischarmern; Quelle: Kniele GmbH.....	35
Abbildung 4-28: Prüfkörper mit MK46 vor (links), während (mitte) und nach SBI-Test (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects	36
Abbildung 4-29: Glühende Stahlgitter und Ergebnis SBI-Test; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, MA39	37
Abbildung 4-30: Geöffneter Prüfkörper mit MK46, Abtragen des verbrannten Strohs; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	37
Abbildung 4-31: Prüfkörper mit HWL-Platten vor (rechts), während (mitte) und nach SBI-Test (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects.....	38
Abbildung 4-32: Entfernen der verbrannten HWL-Platte und Ergebnis SBI-Test; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, MA39	38
Abbildung 4-33: Geöffneter Prüfkörper mit HWL-Platten, Untersuchung der Verbrennungen; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	39
Abbildung 4-34: Ergebnisse aus den SBI-Tests; Quelle: Bericht der MA39.....	40
Abbildung 4-35: Herstellung des Wandelements mit HWL-Platten 25mm; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	41

Abbildung 4-36: Herstellung des Wandelements mit Fassadenbahn Stamisol Safe one; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	41
Abbildung 4-37. Versuchsaufbau mit beiden Wandelementen und einer Einblasmaschine; Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	42
Abbildung 4-38: Staubentwicklung beim Einblasen (links), intakte Bauteilfugen (mitte) und befülltes Wandelement (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM.....	42
Abbildung 4-39: 2. Versuch mit HWL-Platte 15mm (links) und rückseitiges Öffnen des Wandelements nach Versuchsdurchführung (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	43
Abbildung 4-40: Bauchung der Fassadenbahn (links), Ausreißen aus der Befestigung (mitte), kaum befülltes Wandelement (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen capital [A] architects, DPM	43
Abbildung 4-41: Versuchskörper Zur Wärmeleitfähigkeit; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	44
Abbildung 4-42: Fertige Proben zur pH-Wert Messung; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	45
Abbildung 4-43: Indikatorstreifenergebnisse der pH-Wertmessung des behandelten Einblasstrohs; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien.....	46
Abbildung 4-44: Proben zu Versuchsbeginn; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	47
Abbildung 4-45: Proben nach 36 Tagen Versuchszeit; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien.....	48
Abbildung 4-46: Proben nach 36 Tagen Versuchszeit, Seitenansicht; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	49
Abbildung 4-47: Schematischer Prüfkörper nach DIN ISO 12572; Quelle: DIN ISO 12572	50
Abbildung 4-48: Von der TU-Wien hergestellter Versuchskörper nach DIN EN ISO 12572; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	50
Abbildung 4-49: REM Bilder AMU; Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien	52
Abbildung 4-50: REM Bilder MK46; Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien.....	53
Abbildung 4-51: REM Bilder Blähgraphit BG 1455; Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien	54
Abbildung 4-52: REM Bilder unbehandeltes Stroh; Quelle: Naturhistorisches Museum, TU Wien.....	55
Abbildung 4-53: Wandaufbau mit Feuchte- & Temperatursensoren; Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	56
Abbildung 4-54: Messtechnikaufbau; Quelle: Skizze TU Wien	57
Abbildung 4-55: Noch offenes Bauteil kurz vor dem liegenden Einblasen (links), Stroh wird stehend eingeblasen (mittig), fertiger Wandaufbau (rechts); Quelle: Eigene Aufnahmen TU Wien	57
Abbildung 4-56: IR-Spektrum der Probe; Quelle: Montanuniversität Leoben.....	58
Abbildung 4-57: Vergleich des IR-Spektrums der Probe mit einer Datenbank; Quelle: Montanuniversität Leoben.....	58

Abbildung 4-58: Vergleichsspektrum von Ammoniumsulfat; Quelle: Montanuniversität Leoben.....	59
Abbildung 4-59: 1H-Spektrum der Probe; Quelle: Montanuniversität Leoben	59
Abbildung 4-60: GC-Kurve von dem reinen Lösemittel (schwarz) und der Probe (blau); Quelle: Montanuniversität Leoben.....	60
Abbildung 4-61: Thermogravimetriemessung über Zeit; Quelle: Montanuniversität Leoben	61
Abbildung 5-62: B-Joist Dämmständer zur Gefachteilung; Quelle: capital [A] architects.....	63
Abbildung 5-63: Fassadenaufbau Urban Straw mit mineralischem Aussenputz; Quelle: capital [A] architects	64
Abbildung 5-64: Fassadenaufbau mit Holzverkleidung; Quelle: capital [A] architects	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flammschutzmittel für Vorversuche	15
Tabelle 2: Ergebnisse der Brandtests aus Vorversuchen	19
Tabelle 3: Prüfmuster für Laborversuche mit Beflammung (ÖN A 3800-1).....	21
Tabelle 4: Ergebnisse der Laborversuche mit Beflammung (ÖN A 3800-1)	22
Tabelle 5: Prüfmuster für Laborversuche mit Hitzestrahlung (ISO 5660-1).....	27
Tabelle 6: Wärmeleitfähigkeit des unterschiedlich behandelten Einblasstrohs.....	45
Tabelle 7: Probennummerierung der pH-Wert Messung	46
Tabelle 8: Probennummerierung Schimmelpilzresistenzversuche	47
Tabelle 9: Bewertungsschema nach EN ISO 846	48
Tabelle 10: Ergebnis der Schimmelpilzversuche	49
Tabelle 11: Ergebnisse Wasserdampfdiffusionsversuche	51
Tabelle 12: Codierung REM Bilder.....	51
Tabelle 13: Ökologische Kennwerte Gefachabdeckplatten je m ³ für A1-A3 (cradle to gate)	65

Literaturverzeichnis

- Gaujard, O. (2020). *LES RISQUES INCENDIE DANS LA CONSTRUCTION PAILLE : COMMENT DÉPASSER LE R+2 ?* Montargis: Réseau Français de la Construction Paille (RFCP).
- Adensam, H. e. (2004). *Stroh kompakt*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Barbu, M. C., Krenn, S., Nagl, K., & Schnabel, T. (2020). *Innovativer Einsatz von ein- und mehrjährigen Pflanzen als Dämmmaterial*. Göttingen: Culliver Verlag.
- Bau EPD GmbH. (2019). *EPD - ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION Baustrohballen*. Wien: Fachverband Strohhallenbau Deutschland e.V.
- Carstens, P. (29. November 2022). *Skurriler Bautrend: Häuser aus Stroh erleben in Deutschland eine Renaissance*. Abgerufen am 30. November 2022 von Skurriler Bautrend: Häuser aus Stroh gefragt wie nie: <https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/skurriler-bautrend--haeuser-aus-stroh-gefragt-wie-nie-32960164.html>
- Danielewicz, I. e. (2008). *Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohhallenbauweise*. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausann, Central University "Marta Abreu" de Las Villas, The Indian Institute of Technology Delhi, et al. (kein Datum). *Lime Calcined Clay Cement*. (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) Abgerufen am 9. Dezember 2022 von LC3: <https://lc3.ch/>
- Fachverband Strohhallenbau Deutschland e.V. (2019). *Strohbaulichlinie SBR-2019*. Verden (Aller): Fachagentur Nachwachsenden Rohstoffe e.V.
- FH Salzburg, Salzburg Center for Smart Materials. (23. Juni 2020). *Verbesserte Holzimprägnierung*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von <https://www.fh-salzburg.ac.at/fhs/aktuelles/news/druckkessel>
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik, et al. (2008). *Verbundvorhaben: Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
- Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI, et al. (2021). *Verbundvorhaben: Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Hammett, J., & Hammett, K. (August 1998). A History Of Straw Bale Resurgence. *DESIGNER/builder monthly*.
- Josef II. (28. September 1781).
- Kakol, A., & Krzosek, S. (2014). *Produktion der Holzwolleleichtbauplatte gestern und heute*. Warschau: University of Life Sciences - SGGW.
- Kampmeier, B. (2013). *Brandschutz für ein 5-geschossiges Gebäude in Strohhallenbauweise*. Köln: 6. Europäischer Kongress EBH.
- Kittel, R. (12. August 2020). *Dämmung ab Werk*. Abgerufen am 09. Dezember 2022 von Automatisierter Einblasvorgang bei O.K. Energie Haus: https://www.holzkurier.com/holzbau/2020/08/daemmung_ab_werk.html

- Magistratsabteilung 34, Wiener Gesundheitsverbund, Wiener Wohnen. (19. November 2020). *Ökologische Kriterien für die Beschaffung von Brandschutzbeschichtungen*. Abgerufen am 2. Juli 2021 von ÖkoKauf Wien : <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekokauf/pdf/brandschutz.pdf>
- Mitteldeutscher Rundfunk, Anstalt des Öffentlichen Rechts. (30. August 2022). *mdr Wissen*. Abgerufen am 9. Dezember 2022 von Holz statt Beton: Natürliche Baustoffe als Klimaretter: <https://www.mdr.de/wissen/klimafreundlich-bauen-holz-statt-beton-und-stahl-100.html>
- Mundigler, N., Sykacek, E., & Schübl, C. (2014). *Grundlagen für die Entwicklung ökologisch hochwertiger Dämmplattenverbundsysteme auf Basis nachwachsender Rohstoffe*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Muster-Holzbaurichtlinie, MHolzBauRL (Juni 2021).
- Muster-Verwaltungsvorschrift Technischen Baubestimmungen Ausgabe 2020 (19. Januar 2021).
- OIB-Richtlinie 2 Brandschutz (April 2019).
- Rogier, G. (25. Januar 1930). Neuer Baustoff "Stroh". *Deutsche Bauzeitschrift*(Beilage zur Deutschen Bauzeitung Nr. 8).
- Schöbel, G. (2006). Fünf neue Häuser im Pfahlbaumuseum. *Plattform*(Ausgabe 11/12).
- Scrivener, L. K., John, M. V., & Gartner, M. E. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. Paris: UN Environment Economy Division, Energy and Climate Branch.
- Träullit AB. (2022). *Träullit Exterior Walls*. Abgerufen am 9. Dezember 2022 von www.traullit.se: https://traullit.se/wp-content/uploads/2021/06/EN-Tra%CC%88ullit-Exterior_Walls-2022.pdf
- Troldtekt A/S. (2021). *Aalborg Portland: Entwicklung eines neuen Zementtyps*. (Troldtekt GmbH) Abgerufen am 9. Dezember 2022 von <https://www.troldtekt.de/inspiration/nachhaltiges-bauen/aalborg-portland-entwicklung-eines-neuen-zementtyps/>
- Van Hees, P., Hertzberg, T., & Hansen, A. S. (2002). *Development of a Screening Method for the SBI and Room Corner using the Cone Calorimeter*. Borås: SINTEF, Swedish National Testing and Research Institute.
- Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).
- Werning, H., Denkl, M., & Moarcas, O. (27. April 2012). *Hintergründe zum Nachweis des Glimmverhaltens*. (FeuerTrutz Network GmbH) Abgerufen am 02. Dezember 2022 von <https://www.feuertrutz.de/hintergruende-zum-nachweis-des-glimmverhaltens-16032020>
- Wickström, U., & Goransson, U. (1987). *PREDICTION OF HEAT RELEASE RATES OF SURFACE MATERIALS IN LARGE-SCALE FIRE TESTS BASED ON CONE CALORIMETER RESULTS*. Luleå: Luleå University of Technology.
- Wimmer, R., Hohensinner, H., Bintinger, R., Eikemeier, S., Burghardt, M., & Pokpong, C. (36/2011). *Stroh-Cert: Zertifizierung, Logistik und Qualitätsmanagement für den Strohballebau*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Winter, S., Suttner, E., Werther, N., & Dumler, P. (2020). *Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch*. München: Technische Universität München.

Abkürzungsverzeichnis

FIGRA	<i>Fire Growth Rate</i>
GK	<i>Gebäudeklasse (OIB RL2)</i>
HWL	<i>Holzwoleleichtbauplatte</i>
KDI	<i>Kesseldruckimprägnierung</i>
KKM	<i>Kniele Konusmischer</i>
LFS.....	<i>Longitudinal Flame Spread</i>
MA39	<i>Magistratsabteilung 39 der Stadt Wien</i>
MVV TB.....	<i>Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen</i>
nawaRo.....	<i>nachwachsende Rohstoffe</i>
REACH.....	<i>Registration, Evaluation, Authorisatioin and Restriction of Chemicals</i>
REM	<i>Rasterelektronenmikroskop</i>
SBI.....	<i>Single Burning Item</i>
SMOGRA.....	<i>Smoke Growth Rate</i>
TGM	<i>Technisches Gewerbemuseum</i>
THR	<i>Total Heat Relaease</i>
WGK.....	<i>Wassergefährdungsklasse</i>

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)