

BBSR-
Online-Publikation
01/2024

Entwicklung eines nicht- brennbaren Montageschaums

A1-Schaum

von

Dr. Torsten Kolb
Robin Terbeck



Entwicklung eines nichtbrennbaren Montageschaums

A1-Schaum

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.17.1 und 10.08.18.7-21.17.2

Projektlaufzeit: 09.2021 bis 02.2024

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Guido Hagel
guido.hagel@bbr.bund.de

Autoren

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Braunschweig
Dr. Torsten Kolb
torsten.kolb@wki.fraunhofer.de

IGP Chemie GmbH, Dülmen
Robin Terbeck
rt@igp-chemie.de

Redaktion

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
IGP Chemie GmbH

Stand

November 2023

Gestaltung

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
IGP Chemie GmbH

Bildnachweis

Titelbild: Manuela Lingnau
Fred Kuhlmann: S. 43; Manuela Lingnau: S. 16
Alle weiteren Abbildungen stammen von dem Autorenteam

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Kolb, Torsten; Terbeck, Robin, 2024: Entwicklung eines nichtbrennbaren Montageschaumes: A1-Schaum.
BBSR-Online-Publikation 01/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung	9
Themenfeld	9
Untersuchungsgegenstand	9
Problemstellung	9
Stand der Forschung/Baupraxis	9
Arten und Funktionsweisen von Ortschäumen	9
Baurechtliche Anforderungen	10
Anforderungen zum Erreichen der Baustoffklasse nichtbrennbar (A1)	10
Anwendungsgrenzen und Perspektiven	11
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	11
Zielstellung	12
Forschungsdesign	12
Arbeitshypothesen	12
Methodischer Ansatz	13
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	13
Arbeitspakete und Meilensteine	13
Arbeitspakete:	13
Meilensteine	13
Projektverlauf	14
Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der Erkenntnisse daraus	14
Anforderungskatalog	14
Voruntersuchungen	14
Versuchsplan	14
Charakterisierung	15
Scale-Up	17
Anwendung	18
Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	18
Erreichung der Meilensteine	19
Ergebnisse	19
Anforderungskatalog	19
Voruntersuchungen zu Rezeptentwicklung	20
Statistischer Versuchsplan	20
Auswertung des Versuchsplans	20
Statistische Auswertung des Versuchsplans	25
Auswahl der Endrezeptur	27

Nichtbrennbarkeitsprüfung nach der DIN EN ISO 1182	28
Wasseraufnahme	28
Mechanische Kennwerte	30
Abschlusscharakterisierung	32
Lagerstabilität	32
Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	32
Verarbeitungszeit/Topfzeit	33
Entformungszeit	34
Porenverteilung	34
Chemikalienbeständigkeit	35
Untersuchung des Emissionsverhaltens gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021)	35
Wasserdampfdiffusion	37
Scale-Up	39
Anwendung	39
Verfüllung einer Brandschutztür (Anwendung als Montageschaum)	39
Verwendung des Brandschutzschaums zur Steigerung des Feuerwiderstands von Gipskartonplatten	40
Thermische Stabilität	40
Herstellen von Dämmboxen für den TGA-Bereich	42
Praxistest	43
Zusammenfassung und Ausblick	44
Mitwirkende	46
Literaturverzeichnis	47
Abbildungsverzeichnis	49
Tabellenverzeichnis	51
Anhang	52

Kurzfassung

Dieses Forschungsvorhaben besaß das Ziel, einen nichtbrennbaren Schaum für den Einsatz in Gebäuden mit erhöhten Anforderungen an den Brandschutz zu entwickeln. Die spezifischen Anwendungsfelder liegen zum einen in der Verfüllung von Türcargen und Fensterrahmen von Brandschutztüren bzw. -fenstern sowie Durchbrüchen (Kabel, Rohre, etc.) und zum anderen zum Herstellen von Isolationssschalen (Armaturverkleidungen, Ventilverkleidungen etc.) im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung. Ausgangslage bildeten dabei Bauschäume auf PU-Basis, welche lediglich als normalentflammbar oder schwerentflammbar eingestuft waren. Darüber hinaus waren keine vorgefertigten, nichtbrennbaren Isolationssschalen für Armaturen und Ventile bekannt. In der Entwicklung bestand daher zum einen die Herausforderung die Rezeptur so anzupassen, dass die Baustoffklasse A1 nach der DIN EN 13501-1 erreicht wird und zum anderen, dass die Wärmeleitfähigkeit gering ist. In der Entwicklung der Schaumrezeptur wurden zehn Komponenten betrachtet, von denen die Konzentration von drei Komponenten konstant gehalten wurde. Um die Schaumrezeptur zu optimieren, wurde ein Versuchsplan für die sieben verbleibenden Komponenten erstellt. Durch Einsatz der Methode der statistischen Versuchsplanung konnte die Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen auf 74 Rezepturen beschränkt werden. Auf Grundlage dieser Rezepturen wurden Probekörper in der Größe 35x35x5 cm³ hergestellt und im Anschluss bezüglich der Verbrennungswärme im Bombenkalorimeter, der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte charakterisiert. Hieraus konnten fünf Rezepturen identifiziert werden, welche zum einen eine Verbrennungswärme von kleiner 2000 J/g, dem Grenzwert zum Erreichen der Baustoffklasse nichtbrennbar (A1), erreichten und eine Wärmeleitfähigkeit von kleiner 90 mW/mK besaßen. Anschließend erfolgte die statistische Auswertung der Versuchsreihe, um die Effekte einzelner und kombinierter Mischungskomponenten zu modellieren. Durch das Modell konnte im Nachgang eine Optimierung der Rezeptur stattfinden. Da die optimale Rezeptur und die fünf Rezepturen des Versuchsplans ähnliche Ergebnisse geliefert haben, erfolgte die weitere Charakterisierung mit diesen Rezepturen. Dabei wurden die folgenden Aspekte untersucht:

- Nichtbrennbarkeit
- Zug- und Druckfestigkeit
- Wasseraufnahme
- Aufschäumverhalten

Fast alle Proben haben die Prüfung im Nichtbrennbarkeitsofen bestanden, die zusätzlich zur Untersuchung im Bombenkalorimeter erforderlich ist, um die Baustoffklasse A1 zu erreichen. Während der Prüfung konnte gezeigt werden, dass es bis auf eine Probe bei allen Prüfungen zu keiner Entflammung kam; der Masseverlust lag bei ca. 25 % und die Temperaturerhöhung zwischen einem und zwanzig Kelvin. Bezüglich der mechanischen Kennwerte sind alle Proben druckfester als die normativen Anforderungen, dagegen konnte nur eine Probe die Anforderungen an die Zugfestigkeit erfüllen. Die Wasseraufnahme liegt um einige Faktoren höher als die normativen Anforderungen. Bezüglich des Aufschäumverhaltens konnte gezeigt werden, dass je nach Rezeptur und Anwendung ausreichend Zeit zur Verfügung steht, um das Material, welches um das Zweifache bis Dreifache expandiert, zu verarbeiten. Anhand der Ergebnisse wurde eine Rezeptur für das Scale-Up, der Abschlussanalyse und der Anwendungsversuche ausgewählt.

Mit der Abschlussrezeptur konnte dargestellt werden, dass dieses Material gegen übliche Haushaltschemikalien unbedenklich ist und nur bei sehr starken Basen Zersetzungerscheinungen beobachtet werden. Des Weiteren wurden die Parameter, die während der Rezepturentwicklung gemessen wurden, ein weiteres Mal bestimmt und bestätigt. Zusätzlich wurde festgestellt, dass das Material sehr diffusionsoffen ist und etwas zu hohe Emissionen an VOC besitzt, besonders an 1,2 Propandiol.

Bei Versuchen mit möglichen Anwendern konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Schaum für die Zargenhinterfüllung und für die Herstellung von Dämmboxen verwendet werden kann. Des Weiteren ist eine Bearbeitung des Schaums mit üblichen Geräten wie Sägen, Bohren oder Fräsen sehr gut möglich.

In einem Folgeprojekt wird ab November 2023 ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, Dämmboxen semikontinuierlich oder kontinuierlich industriell herzustellen. Neben der Entwicklung des Verfahrens wird die Schaumrezeptur bezüglich Emissionen, Wasseraufnahme und der Wärmeleitfähigkeit optimiert.

Abstract

The aim of this research project was to develop a non-combustible foam for use in buildings with increased fire protection requirements. The specific fields of application are, on the one hand, the filling of door frames and window frames of fire protection doors and windows as well as wall penetrations (cables ducts, pipes, etc.) and, on the other hand, the production of insulation shells (armature cladding, valve cladding, etc.) in the field of building services engineering. The starting point of the project were polyurethane-based construction foams, which were until the moment only classified as flammable or not easily flammable. In addition, no prefabricated, non-combustible insulation shells for fittings and valves were known. Therefore, the challenge of the development was, on the one hand, to adapt the formulation so that building material class A1 according to DIN EN 13501-1 was achieved and, on the other hand, to ensure that the thermal conductivity was low. In the development of the foam formulation, ten components were considered, of which the concentration of three components was kept constant. In order to optimize the foam formulation, an experimental design was prepared for the seven remaining components. By using the statistical design of experiments method, the number of combinations to be investigated was reduced to 74 formulations. On the basis of these formulations, test specimens in the size 35x35x5 cm³ were produced and subsequently characterized with regard to the calorific value in the bomb calorimeter, the thermal conductivity and the bulk density. Five formulations were identified which achieved a calorific value of less than 2000 J/g, the limit value for achieving the building material class non-combustible (A1), and a thermal conductivity of less than 90 mW/mK. Subsequently, the statistical evaluation of the test series was carried out in order to model the effects of individual and combined mixture components. The model made it possible to optimize the formulation subsequently. Since the optimum formulation and the five formulations of the experimental design gave relatively similar results, further characterization was carried out using these formulations. The following aspects were investigated:

- Non-combustibility
- Tensile and compressive strength
- Water absorption
- Foaming behavior

All samples passed the test in the non-combustibility oven, which is required in addition to the test in the bomb calorimeter in order to achieve building material class A1. During the test it could be shown that, except for one specimen, no ignition occurred in all tests, the mass loss was about 25% and the temperature increase was between one and twenty Kelvin. With respect to the mechanical properties, all the specimens met the normative requirements in regards to compressive strength, while only one specimen was able to meet the tensile strength requirements. The water absorption is several times higher than the normative requirements. With regard to the foaming behavior, it was shown that, depending on the formulation and application, sufficient time is available to process the material, which expands by two to three times. Based on the results, a formulation was selected for scale-up, final analysis and application trials. With the final formulation, it was shown that common household chemicals are harmless to this material and that decomposition phenomena are only observed with very strong bases. Furthermore, the parameters measured during the formulation development were determined and confirmed a second time. In addition, the material was found to be very diffusible and to have slightly too high emissions of VOCs, especially 1,2 propanediol.

In tests with potential users, it was shown that the developed foam can be used for frame backfill and for the production of insulation boxes. Furthermore, the foam can be processed very well with common machining processes such as sawing, drilling or milling.

In a follow-up project starting in November 2023, a process will be developed that makes it possible to produce insulation boxes semi-continuously or continuously on an industrial scale. In addition to developing the process, the foam formulation will be optimized in terms of emissions, water absorption and thermal conductivity.

Einführung

Themenfeld

Im Bereich der modernen Architektur und Gebäudetechnik sind die Anforderungen an Baustoffe ständig im Wandel, da Sicherheit, Nachhaltigkeit und Energieeffizienz eine immer größere Rolle spielen. Eines der Schlüsselthemen in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung von Materialien, die den Brandschutz in Gebäuden verbessern und gleichzeitig dazu beitragen, den Energieverbrauch zu reduzieren.

Das spezifische Themenfeld dieses Projekts konzentriert sich auf die Entwicklung eines nichtbrennbaren Schaums, der in verschiedenen Anwendungen im Brandschutz und in der technischen Gebäudeausrüstung verwendet werden kann

Untersuchungsgegenstand

Das Ziel dieses Projekts bestand darin, einen Schaum zu entwickeln, der in der Lage ist, Brandschutztüren, -fenster und Durchbrüche effektiv abzudichten, während er gleichzeitig als Isolationsmaterial für technische Gebäudeausrüstungen wie Armaturverkleidungen und Ventilverkleidungen dient. Dies stellte eine Herausforderung dar, da der Schaum nicht nur die Anforderungen an die Baustoffklasse A1 nach DIN EN 13501-1 erfüllen musste, sondern auch eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen sollte.

Problemstellung

Stand der Forschung/Baupraktik

Ortschäume (sog. Bauschäume), die auch unter den Begriffen Montage-, Isolier-, Dämm-, Füll-, oder PU-Schäume bekannt sind, dienen im Bauwesen u.a.

- zum Ausschäumen von Fensterrahmen und Türcargen und
- zum Verfüllen von Hohlräumen (z. B. im Dachbereich oder zwischen Fensterbänken und Brüstung)

und stellen dabei die wärme- und schallschutztechnischen Anforderungen an Bauteile und Bauwerke sicher. Montageschäume dürfen dabei nicht als alleiniges Befestigungsmittel, sondern ausschließlich als Hinterfüllung eingesetzt werden. Alternativ können Fensterrahmen, Türcargen und andere Hohlräume in Bauteilen

- mit erhöhten Brandschutzanforderungen mit nichtbrennbaren Materialien wie Zementmörtel, Gips oder Mineralwolle oder
- ohne erhöhte Brandschutzanforderungen mit normal- oder schwerentflammenden Baustoffen wie Naturbaustoffen (z. B. Jute, Flachs, Wolle, Kork)

hinterfüllt werden (Hestermann und Rongen 2018).

Arten und Funktionsweisen von Ortschäumen

Ortschäume stehen als ein- und zweikomponentige Montageschäume auf PU-Basis zur Verfügung. 1K-Montageschäume beinhalten sogenannte Prepolymere, die sich aus höhermolekularen Polyolen und einem stöchiometrischen Überschuss an Isocyanat zusammensetzen und sich in einer Aerosoldose unter erhöhtem Druck befinden. Durch das Ausströmen aus der Aerosoldose reagieren die reaktionsfreudigen Isocyanatgruppen mit der Luftfeuchtigkeit und der Feuchtigkeit aus den Untergründen der umgebenden Bauteile, wodurch einerseits das zum Aufschäumen benötigte Kohlendioxid freigesetzt und im weiteren Verlauf das Aushärten des Schaums bewirkt wird. Abhängig von äußeren Faktoren wie der Temperatur oder der Luftfeuchtigkeit kann die Aushärtezeit zwischen 5 und 8 Stunden betragen. Aufgrund der Reaktion mit der umgebenden Feuchtigkeit kann es bei 1K-Montageschäumen zu einer Nachreaktion kommen, die ein

Nachquellen mit sich führt. 2K-Montageschäume bestehen hingegen aus niedrigmolekularen Polyolen und Polyisocyanaten, die nicht mit der Umgebungsfeuchte reagieren. Demzufolge wird ein Härter als zweite Komponente eingesetzt. Nachdem beide Komponenten innerhalb oder unmittelbar nach dem Austritt aus der Aerosoldose zusammengeführt wurden, beträgt die Aushärtezeit unabhängig von Temperatur und Luftfeuchtigkeit lediglich 20 bis 30 Minuten. Die fehlende Reaktion von 2K-Montageschäumen mit der Umgebungsfeuchte vermeidet ein Nachquellen, weswegen sich diese besonders gut für die Hinterfüllung von Fensterrahmen, Türcargen und sonstigen Hohlräumen eignen (Habenicht 2009; Hestermann und Rongen 2018).

Baurechtliche Anforderungen

Montageschäume auf PU-Basis können nach DIN 4102-1:1998-05 bestenfalls der Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar) zugeordnet werden. Nach den Anforderungen der Musterbauordnung (MBO 2002) und der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB 2019) müssen feuerbeständige Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Der Einsatz brennbarer Baustoffe ist bei hochfeuerhemmenden Bauteilen nur zulässig, sofern eine Brandschutzbekleidung oder eine durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen in Bauteilebene angeordnet ist. Demnach ist der Einsatz von PUR-Schäumen lediglich bei feuerhemmenden oder sonstigen Bauteilen ohne Brandschutzanforderung erlaubt.

Auch im Bereich von Leitungen und deren Durchführung durch raumabschließende Bauteile ergeben sich Einsatzgrenzen für PUR-Schäume. Gemäß Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR 2016) können Wandöffnungen in feuerhemmenden Bauteilen¹ für einzelne elektrische Leitungen, dicht gepackte Kabelbündel bis 50 mm Durchmesser sowie für nichtbrennbare Rohrleitungen vereinfacht mit nichtbrennbaren Baustoffen verschlossen werden, sodass die anwenderfreundlichen Montageschäume in diesen Fällen nicht eingesetzt werden dürfen.

Brennbare Schäume dürfen lediglich als Komponente in Abschottungssystemen, die nach DIN 4102-9:1990-05 oder DIN 4102-11:1985-12 klassifiziert und abhängig vom umgebenden Bauteil mindestens als feuerhemmend (F30) eingestuft wurden, eingesetzt werden (z. B. Hilti Brandschutz-System CP 660).

Anforderungen zum Erreichen der Baustoffklasse nichtbrennbar (A1)

Damit ein Baustoff die Baustoffklasse A1 erreicht, müssen sowohl Prüfungen im Nichtbrennbarkeitsofen nach der DIN EN ISO 1182 als auch im Bombenkalorimeter nach der DIN EN ISO 1716 durchgeführt werden. Die genaue Durchführung der Messungen sind im Kapitel Projektverlauf dargestellt. Die einzuhaltenden Grenzwerte sind in der Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 1: Grenzwerte für die Prüfung im Bombenkalorimeter.

Parameter	Wert
Verbrennungswärme	< 2000 J/kg

Tabelle 2: Grenzwerte für die Prüfung im Nichtbrennbarkeitsofen.

Parameter	Wert
Temperaturerhöhung	max. 30 K

¹ Ausnahme: Wände notwendiger Treppenräume sowie Wände zwischen notwendigen Treppenräumen und Ausgängen ins Freie.

Parameter	Wert
Masseverlust	50 %
Entflammung	keine

Anwendungsgrenzen und Perspektiven

Durch die Anforderungen der MBO (2002) und der MVV TB (2019) ergeben sich für bestehende Ortschäume besonders bei der Montage von Brandschutztüren und -fenstern erhebliche Einschränkungen. Fensterrahmen und Tüorzargen mit Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer dürfen ihrer bauaufsichtlichen Zulassung zufolge im Regelfall lediglich mit nichtbrennbaren Materialien wie Zementmörtel, Gips oder Mineralwolle hinterfüllt werden. Gleiches gilt für die von der MLAR (2016) erfassten Durchbrüche in feuerhemmenden Wänden. Durch die Entwicklung eines nichtbrennbaren Montageschaums können diese baurechtlich bedingten Anwendungslücken geschlossen und ein einfaches sowie zuverlässiges Bauprodukt für Hohlraumfüllungen bereitgestellt werden. Des Weiteren kann ein solcher, nichtbrennbarer Ortschaum zur Herstellung individueller Wärmedämmung für Teile von Rohrleitungsanlagen (z. B. Absperrventile, Druckminderer, Wasserzähler) dienen. Somit kann auch bei erhöhten Brandschutzanforderungen (z. B. bei Leitungsanlagen in Rettungswegen) der Wärmeschutz von Rohrleitungsanlagen hergestellt werden. Zusätzlich kann mithilfe dieser individuell herstellbaren und nichtbrennbaren Wärmedämmung ein Temperaturübergang von hochtemperierten Rohrleitungsanlagen an den umgebenden Raum vermindert und dieser vor Überhitzung geschützt werden.

Ein erster Lösungsansatz wird von der Firma IGP Chemie beschrieben (Große-Perdekamp 2019). Dabei handelt es sich um ein zweikomponentiges System auf Basis anorganischer Substanzen, Mikrohohlkugeln und eines Carbonats. Das Carbonat (Komponente B) bewirkt beim Zusammenführen mit der Komponente A die Auflösung der Polymerhülle der Mikrohohlkugeln, wodurch ein Treibmittel freigesetzt wird, welches zum Aufschäumen der Masse führt. Die Mengen an Carbonat und Mikrohohlkugeln ist nur gering, weswegen das volumenbezogene Aufschäumverhältnis lediglich bei 1:3 (Volumenverhältnis) liegt. Marktübliche PU-Ortschäume weisen bei einem Aufschäumverhältnis von 1:20 bis 1:50 eine deutlich höhere Ausbeute auf. Zudem besitzen Schäume auf PU-Basis weitaus niedrigere Wärmeleitfähigkeiten ($0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) als das beschriebene anorganische System ($0,2 \text{ bis } 0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) und eignen sich daher besser zur Wärmedämmung.

Mit weitergehenden Forschungsarbeiten kann eine anwenderfreundliche Schaummasse hergestellt werden, die ein ähnliches Aufschäumverhältnis und ebenso gute Wärmedämmwerte wie marktübliche PUR-Schäume aufweist. Die verwendeten anorganischen Substanzen bewirken dabei eine Nichtbrennbarkeit des Schaums und erlauben den Einsatz bei erhöhten Brandschutzanforderungen. Zusätzlich kann der Einsatzbereich der nichtbrennbaren Schaummasse durch die Erarbeitung eines mobilen Mischsystems deutlich erweitert werden, indem daraus nichtbrennbare Bauprodukte (z. B. Isolierungen im TGA-Bereich) individuell und vor Ort gefertigt werden können.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Vor Beginn des Projekts war kein Ortschaum (auch: Bau-, Montage-, oder Isolierschaum) bekannt, der als nichtbrennbarer Baustoff klassifiziert ist und somit zum Beispiel zur Hinterfüllung von Fensterrahmen und Tüorzargen in Bauteilen mit erhöhten Brandschutzanforderungen verwendet werden kann. Ein nichtbrennbarer Ortschaum, der sowohl durch Aerosoldosen als auch durch ein zu erarbeitendes mobiles Mischsystem aufgetragen wird, kann einerseits zur Montage von Fenstern und Türen in Bauteilen mit hohen Anforderungen an den Brandschutz und andererseits zur Herstellung individueller nichtbrennbarer Bauprodukte (z. B. Dämmung im TGA-Bereich) genutzt werden.

Zielstellung

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines nicht brennbaren Schaums, der zum einen zur Verfüllung von Türzargen und Fensterrahmen von Brandschutztüren bzw. -fenstern oder von Durchbrüchen (Kabel, Rohre, etc.) und zum anderen zum Herstellen von Isolationsschalen (Armaturverkleidungen, Rohrschalen etc.) im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung verwendet werden kann.

Dafür erfüllt der Schaum folgende Parameter:

- Baustoffklasse A1 nach DIN EN 13501-1
- Aufschäumverhalten von 1:10
- Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Mineralwolldämmung

Weitere Ziele:

- Entwicklung einer mobile Dosiereinheit, mit der ca. 25 kg des 2K-Systems so verarbeitet werden können, dass ähnliche Bedingungen wie die mit einer 600 ml Kartusche erreicht werden.
- Der entwickelte Schaum soll chemisch unbedenklich sein und die Emissionen an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) sind nicht vorhanden oder sollen zumindest unterhalb der Grenzwerte liegen.
- Der entwickelte A1-Schaum soll auf der Baustelle so verarbeitet werden können, wie es mit dem weit verbreiteten PU-Schaum möglich ist.

Forschungsdesign

Arbeitshypothesen

Die folgenden Hypothesen wurden vor Bearbeitung dieses Projekts aufgestellt:

- Ein nichtbrennbarer Schaum wird entwickelt. Dieses erfolgt dadurch, dass das zu entwickelnde Material hauptsächlich aus nichtbrennbaren anorganischen Materialien besteht. Damit sich ein Schaum bildet, werden kleine Mengen an organischen Substanzen benötigt.
- Die benötigte niedrige Wärmeleitfähigkeit des Schaums wird durch die Verwendung von anorganischen Materialien mit geringen Wärmeleitfähigkeiten wie Schaumglasperlen, Keramikhohlkugeln oder Bimsgranulat erreicht.
- Der zu entwickelnde Schaum besitzt ein Aufschäumverhältnis von 1:10, was durch Verwendung von gasgefüllten Mikrokugeln gelöst wird. Diese Mikrokugeln werden durch ein organisches Carbonat aufgelöst, wodurch ein Gas freigesetzt wird, welches die Masse aufschäumt.
- Der nichtbrennbare Schaum besitzt nach dem Aushärten ähnliche mechanische Eigenschaften wie die herkömmlichen Schäume.
- Der ausgehärtete Schaum ist chemisch unbedenklich und die Emissionen an VOC sind unterhalb der Grenzwerte.
- 25 kg des Schaums kann durch den Einsatz eines mobilen Dosiersystems auf der Baustelle in einem Batch verarbeitet werden.

Methodischer Ansatz

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts soll ein nichtbrennbarer Schaum entwickelt werden. Dazu erfolgten Entwicklungsarbeiten an der Rezeptur des eigentlichen Schaums. Zum einen wurde das Aufschäumverhalten, nach dem beide Komponenten zusammengeführt wurden, durch den Einsatz von gasgefüllten Mikrokugeln erhöht. Zum anderen wurde für die Anwendung als Isolationsmaterial die Wärmeleitfähigkeit neben der Verwendung von Mikrokugeln auch durch die Verwendung von Schaumglasperlen, Keramikhohlkugeln, Vermiculit oder ähnlichem verringert. Bei all den Entwicklungsarbeiten musste die Rezeptur des Schaums so angepasst werden, dass dieser zum einen die Baustoffklasse A1 erreicht (eventueller Einsatz von anorganischen Flammschutzmittel) und zum anderen muss die Performance des Schaums äquivalent zum PU-Schaum sein. Die Entwicklungsarbeiten erfolgten unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung. Die entwickelten Materialien wurden mittels unterschiedlicher Methoden charakterisiert. Die wichtigsten Methoden waren:

- Prüfung auf Nichtbrennbarkeit
- Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit
- Aufschäumverhalten nach der Zusammenfügung der beiden Komponenten

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das Forschungsteam bestand mit der IGP Chemie GmbH, der GWK Kuhlmann GmbH sowie der WF-Formprojekt GmbH aus drei Firmen und mit dem Fraunhofer WKI aus einer Einrichtung für Forschung und Wissensverbreitung. Dabei war die IGP Chemie als Koordinator des Projekts für die Entwicklung des A1-Schaums zuständig. Gemeinsam mit dem Fraunhofer WKI wurde der statistische Versuchsplan erstellt. Beide geförderten Partner haben die Charakterisierung des A1-Schaums durchgeführt. Sowohl die GWK Kuhlmann als auch die WF-Formprojekt waren als spätere Anwender assoziierte Partner. Der erstgenannte war für die Analyse der Anwendbarkeit zur Dämmung von Heizungsanlagen verantwortlich und der zweitgenannte zur Untersuchung des A1-Schaums als Füllmaterial von 3-D-Schalen.

Arbeitspakete und Meilensteine

Das Projekt bestand aus fünf Arbeitspaketen und drei Meilensteinen, die im Folgenden aufgezählt werden.

Arbeitspakete:

1. Erstellen eines Anforderungskatalogs
2. Entwicklung des nichtbrennbaren A1-Schaums
3. Scale-UP und Entwicklung eines 2K-Dosiersystems
4. Anwendung des entwickelten A1-Schaums
5. Projektbegleitende Arbeiten

Meilensteine

1. Ein nichtbrennbarer A1-Schaum mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit und einem guten Aufschäumverhalten ist entwickelt worden.
2. Eine mobile 2K-Dosiereinheit ist entwickelt worden, mit der 25 kg Material auf einmal verarbeitet werden können.
3. Der entwickelte Schaum kann für die jeweilige Anwendung gut verarbeitet werden.

Projektverlauf

Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der Erkenntnisse daraus

Anforderungskatalog

Damit die Eigenschaften und Kennwerte, die der zu entwickelnde Schaum erfüllen soll, bekannt sind, wurde zu Beginn des Projekts ein Lastenheft erstellt, in dem diese Parameter definiert sind. Diese Zusammenstellung erfolgte auf Grund von Erfahrungen, Diskussion mit den Projektpartnern und einer Recherche in relevanten Literaturen und Normen.

Voruntersuchungen

Der zu entwickelnde Schaum entsteht durch die Reaktion einer Hauptkomponente A und einer Härterkomponente B. Durch die Vermischung dieser beiden Komponenten entsteht eine Reaktionsmasse, welche aufschäumt und chemisch härtet. Beide Komponenten stellen jeweils ein Mehrphasensystem dar und werden durch das Vermischen von verschiedenen flüssigen und festen Stoffen hergestellt.

Die ersten Schritte im Entwicklungsprozess waren die Entwicklung eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung dieser beiden Reaktionskomponenten, die Entwicklung eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung von geschäumten Probekörpern und die Entwicklung des Grundgerüsts der Schaumrezeptur. Im Folgenden ist der Verlauf dieser drei Prozesse zusammengefasst:

- **Fertigungsverfahren Reaktionskomponenten:** Die beiden Reaktionskomponenten wurden separat in einem Dispergierprozess hergestellt. Dazu wurden im Labormaßstab die flüssigen Rohstoffe vorgelegt und feste Rohstoffe durch eine Dispergierscheibe in die Komponente eingemischt.
- **Fertigungsverfahren feste Schaumkörper:** Für die Charakterisierung der festen Schaumkörper war es notwendig, Prüfkörper als Plattenmaterial herzustellen. Dazu wurden aus einer reaktiven Silikonabformmasse Silikonformen hergestellt, welche die Größen 350 mm x 350 mm x 50 mm sowie 550 x 550 mm x 60 mm besaßen und mit einem Holzrahmen verstärkt waren. Um Prüfkörper herzustellen, wurden die beiden Reaktionskomponenten nach obigen Verfahren hergestellt. Anschließend wurde die A-Komponente in einem Eimer vorgelegt, mit der entsprechenden Menge B-Komponente versetzt und für ca. 20 Sek. per Dispergierscheibe zu einer Reaktionsmasse zusammengemischt. Diese wurde in eine Silikonform gefüllt und so dass sie frei schäumend reagieren konnte. Nach einem Tag Trocknung bei ca. 20 °C wurde die geschäumte Masse aus der Silikonform entnommen und in einem Trockenschrank bei ca. 45 °C für einen weiteren Tag getrocknet.
- **Entwicklung des Grundgerüsts der Schaumrezeptur:** Es wurden verschiedene Leichtfüllstoffe in größtmöglicher Menge in die Schaumrezeptur eingearbeitet, so dass die resultierende Viskosität eine Verarbeitung nach obigen Verfahren erlaubte. Diese neuen Schaumrezepturen wurden auf die Eigenschaften des ausgehärteten Schaums, des Schaumprozesses und der Aushärtung hin untersucht. Insbesondere der Einfluss auf die Nichtbrennbarkeit (Verbrennungswärme) und die Wärmeleitfähigkeit wurde analysiert. Des Weiteren wurde ermittelt innerhalb welcher Grenzen die Rezepturbestandteile variiert werden können, so dass ein stabiler Schaum entsteht.

Versuchsplan

Auf Basis der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurde die technisch erfolgversprechendste Rezeptur ausgewählt. Besagte Rezeptur zeigte durch den Einsatz von Hohlkugeln eine signifikant reduzierte Wärmeleitfähigkeit und bestand aus zehn verschiedenen Komponenten.

Um den Einfluss der verschiedenen Komponenten auf die projektrelevanten Schaumeigenschaften zu erfassen und eine optimierte Rezeptur zu entwickeln, wurde über eine statistische Versuchsplanung ein umfangreicher Versuchsplan erstellt. Dazu wurde mit der Software DesignExpert® ein Versuchsplan des Designs „Special

Cubic“, „D-optimal“ erstellt. Innerhalb des Versuchsplans wurden sieben der zehn Rezepturbestandteile innerhalb einer Ober- und Untergrenze variiert; dies ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3: Komponenten des Versuchsplans mit Angabe der minimalen und maximalen Gewichtsmenge.

Komponente	Minimum [%]	Maximum [%]
Bindemittel	70	80
Leichtfüllstoff	5	10
Füllstoff 1	4	10
Treibmittel	2	4
Benetzungsadditiv	0,2	0,2
LSM A	1	1,5
LSM B	1	1,5
LSM C	3	5
Rheologie Additiv	0,2	0,2
Füllstoff 2	3,4	3,4

Alle durch die statistische Versuchsplanung berechneten Versuche ergaben je eine Rezeptur für die A- und eine Rezeptur für die B-Komponente. Diese wurden hergestellt, im flüssigen Zustand charakterisiert und anschließend zu einem Reaktionsgemisch zusammengefügt und hinsichtlich der im folgenden Abschnitt dargestellten Größen charakterisiert.

Charakterisierung

Im Rahmen des Projekts wurden von den entwickelten Materialien verschiedene Kennwerte ermittelt. Dabei wurden die Wärmeleitfähigkeit, die Bestimmung der Verbrennungswärme sowie die Versuche im Nichtbrennbarkeitsofen als wichtigste Untersuchungsmethoden definiert. Die verwendeten Methoden zur Charakterisierung der entwickelten Materialien werden im Folgenden kurz dargestellt.

- **Nichtbrennbarkeit:** Um die Baustoffklasse nichtbrennbar (A1) nach der DIN EN 13501-1 zu erreichen, wird einerseits die Verbrennungswärme nach der DIN EN ISO 1716 ermittelt und andererseits mit den vielversprechendsten Materialien eine Analyse im Nichtbrennbarkeitsofen nach DIN EN ISO 1182 durchgeführt. Im erstgenannten Verfahren werden wenige Milligramm einer zerkleinerten Probe unter Sauerstoffatmosphäre in einer kalorimetrischen Bombe verbrannt. Bei der zweitgenannten wird ein zylindrischer Probekörper für 30 Minuten in einen 750 °C heißen Prüfofen gehängt und währenddessen die Temperaturentwicklung, die Entflammung und der Masseverlust ermittelt.
- **Wasseraufnahme:** Die Prüfung erfolgte nach DIN EN ISO 29767 (Verfahren A – Abtropfen). Je Produkt wurden vier Prüfkörper mit den Abmaßen 200 mm x 200 mm (LxB) und Dicke < 50 mm zugeschnitten und bis zur Massekonstanz im Normklima (20 ± 2) °C und (65 ± 5) % r.F. gelagert. Anschließend wurden die Prüfkörper vermessen, gewogen und mit der Unterseite mit (10 ± 2) mm in ein Wasserbad (23 °C) gelegt. Nach 24 h wurden die Prüfkörper entnommen, für 10 Minuten senkrecht auf einen um 45° geneigten Maschendraht gelegt und danach erneut gewogen. Aus den Massedifferenzen und der unteren Begrenzungsfläche der Prüfkörper wurde die Wasseraufnahme in kg/m² bestimmt.
- **Wärmeleitfähigkeit:** Hierfür wurde ein Plattenmessgerät der Firma Linseis verwendet und die Durchführung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 12667. Da die Oberflächen der Proben nicht plan waren, wurden diese geschliffen und bei einer Mittentemperatur von 10°C vermessen. In der Abschlusscharakterisierung erfolgten Messungen zwischen 10 und 80 °C.

- Der Montageschaum A1 wurde auf sein Emissionspotential unter Anwendung des AgBB-Bewertungsschemas (2021) untersucht und bewertet, um sicherzustellen, dass Bauproduktemissionen flüchtiger organischer Stoffe die Gesundheit nicht gefährden und auch keine unzumutbaren Belästigungen, etwa durch Gerüche, verursachen (UBA). Die Emissionsprüfung erfolgte gemäß der Vorgaben der DIN EN 16516:2020-10 mit Bestimmung der Emissionen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Die Auswertung bzw. Bewertung der Emissionen erfolgte gemäß des AgBB-Bewertungsschemas (Version 2021 mit NIK-Werteliste 2020).

Folgende Prüfparameter wurden erfasst:

- Flüchtige organische Verbindungen (VOC) gemäß DIN ISO 16000-6:2022-03
- Leichtflüchtige Aldehyde gemäß DIN ISO 16000-3:2013-01
- C1- und C2-Carbonsäuren gemäß VDI 4301 Blatt 7:2018-10
- Geruchsstoffemissionen (empfundene Intensität, hedonische Wirkung) gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11
- Druckfestigkeit: Die Prüfung erfolgte nach DIN EN ISO 29469. Je Produkt wurden fünf Prüfkörper mit den Abmaßen 50 mm x 50 mm (LxB) und Lieferdicke zugeschnitten, wobei $D < B$ gilt. Entsprechend wurden die Prüfkörper auf eine Dicke < 50 mm geschliffen. Diese wurden bis zur Massekonstanz im Normklima (20 ± 2 °C und (65 ± 5) % r.F. gelagert. Anschließend wurden die Prüfkörper vermessen, gewogen und zentrisch zwischen die Druckplatten einer Universalprüfmaschine gelegt, wobei die obere Druckplatte über ein Kugelgelenk beweglich aufgehängt ist. Beide Druckplatten hatten einen größeren Durchmesser als das größte Maß der Prüfkörper. Beide Platten fuhren mit einer konstanten Geschwindigkeit von $0,1 \times D$ (mm/min) aufeinander zu. Die Prüfung wurde solange fortgesetzt, bis ein Kraftabfall zu verzeichnen war bzw. bis eine Stauchung von 10 % erreicht wurde. Abschließend wurden als maßgebliche Kennwerte die Druckfestigkeit sowie das Druckmodul in kPa berechnet.
- Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene: Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 1607. Je Produkt wurden fünf Prüfkörper mit den Abmaßen 50 mm x 50 mm (LxB) und Dicke < 50 mm zugeschnitten. Diese wurden bis zur Massekonstanz im Normklima (20 ± 2 °C und (65 ± 5) % r.F. gelagert. Anschließend wurden die Prüfkörper vermessen, gewogen und auf beide Oberflächen Sperrholzjoche aufgeklebt, um diese in die kardanische Aufhängung einer Universalprüfmaschine einspannen zu können. Mit einer konstanten Geschwindigkeit von (10 ± 1) mm/min wurden die Proben auseinandergezogen und aus der Maximalkraft und der Querschnittsfläche die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene in kPa berechnet.
- Wasserdampfdiffusion: Aus der geschäumten Platte wurden 10 Prüfkörper mit einem Durchmesser von $\varnothing 90$ mm ausgeschnitten und die Schnittflächen mit ALU-Klebeband dampfdicht versiegelt. Vor der Prüfung erfolgte die Klimatisierung bis zur Massekonstanz bei (23 ± 5) °C und (50 ± 5) %. Für die Prüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach der ISO 12572 wurden die Probekörper dampfdicht in Gefäße eingebaut (siehe Abbildung 1).

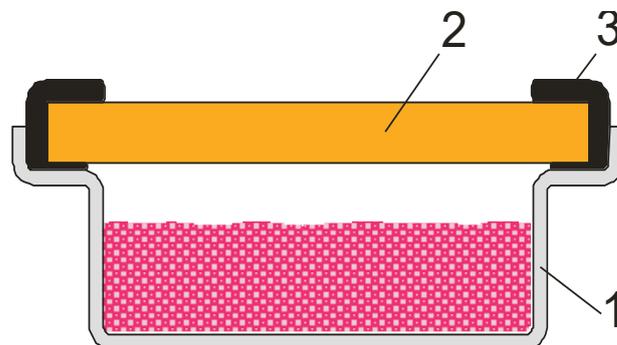


Abbildung 1: Prüfaufbau zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion (Prüfgefäß mit Trocknungsmittel (1), Probe (2) und Dichtmasse (3)).

Wobei fünf Gefäße mit einem Trocknungsmittel (Dry-Cup) und fünf Gefäße mit gesättigter Salzlösung (Wet-Cup) ausgestattet wurden. Die Prüfung erfolgte klimatisiert bei (23 ± 5) °C und (50 ± 5) %. Von Montag bis Freitag wurden die Proben in 24-stündigen Zeitintervallen gewogen und die diffundierte

Wassermasse ermittelt. Die Wägungen wurden so lange fortgeführt, bis die Massenänderung je Zeiteinheit im Rahmen der Messunsicherheit keiner Änderung mehr unterlag (stationärer Diffusionsstrom).

- **Chemikalienbeständigkeit:** Zur Bestimmung der Chemikalienbeständigkeit wurden auf den ausgehärteten Platten jeweils drei Tropfen der folgenden Substanzen gegeben:
 - Kaliumhydroxid 10%
 - Essigsäure
 - Salzsäure
 - Aceton
 - Isopropanol
 - Wasser
 - Öl

Nach 24 Stunden wurden die Substanzen mit Leitungswasser abgespült und die Oberflächen visuell beobachtet. Für die KOH wurden zusätzlich Verdünnungsreihen zwischen pH 15 und pH 10 erstellt und die Versuche wiederholt.

- **Viskosität der flüssigen Reaktionskomponenten:** Die dynamische Viskosität beider Komponenten der Schaumrezepturen wurden an einem Rotationsviskosimeter bestimmt. Dazu wurden die hergestellten Proben in ein 250 mL Gefäß gefüllt, in einem Wasserbad auf 20 °C temperiert und anschließend am Rotationsviskosimeter Viscotester C der Fa. Thermoscientific Fischer vermessen. Für die A-Komponente wurde die Spindel R5 mit einer Drehzahl von 30 Umdrehungen pro Minute gewählt, die B-Komponente wurde mit der Spindel R5 und einer Drehzahl von 100 Umdrehungen pro Minute analysiert. Die dynamische Viskosität wurde nach drei Minuten vom Display des Gerätes abgelesen.
- **Dichte der flüssigen Reaktionskomponenten:** Ca. 150 mL Probe der A- oder B-Komponente wurden in einem Wasserbad auf 20 °C temperiert. Anschließend wurden 100 mL Probe in einen Messzylinder gefüllt und das Gewicht bestimmt. Der Quotient aus Gewicht und Volumen ergab die Dichte der flüssigen Probe.
- **Schäumungseigenschaften:** Nachdem die Reaktionsmasse aus A-Komponente und B-Komponente vermischt wurde, wurden ca. 20 mL der Masse in einen 100-ml Messzylinder gefüllt. Es wurde notiert, nach welcher Zeit das Reaktionsgemisch eine Volumenzunahme zeigte (Schaubeginn), ab wann keine Volumenzunahme mehr zu beobachten war (Schaumende) und um welchen Faktor das Reaktionsgemisch an Volumen (Schaumfaktor) zunahm.
- **Lagerstabilität:** 100 mL der A-Komponente und 100 mL der B-Komponente wurden in dichten Polyethyldosen für sechs Monate gelagert. Nach Ablauf der 6 Monate wurden die Proben qualitativ auf ihre Beschaffenheit (Phasentrennung/Homogenität und Konsistenz) beurteilt.
- **Verarbeitungszeit/Topfzeit:** Die Verarbeitungszeit wurde indirekt bestimmt, indem die Schäumungseigenschaften beobachtet wurden. Mit dem Beginn des Schäumvorganges ist der Schaum nicht mehr verarbeitbar, da sonst die Schaumstruktur geschädigt wird.
- **Entformungszeit:** Während der Versuche wurde die Zeit und Trocknungstemperatur notiert, welche benötigt wurde, bis Proben zerstörungsfrei aus ihren Herstellungsgebinden entnommen werden konnten.
- **Porenverteilung:** An einem Digitalmikroskop VHX 5000 der Firma Keyence wurde eine aufgesägte, getrocknete Schaumprobe 26 mit einem Objektiv VH-Z100R mit einem Vergrößerungsfaktor 100 untersucht. Es wurde eine Fläche von ca. 5x5 cm erfasst und mit der Software der Durchmesser von ca. 50 Poren ausgemessen.

Scale-Up

Zu Beginn des Projekts wurden die A-Komponenten und B-Komponenten des Schaums im Labormaßstab in Volumina bis maximal 1 Liter hergestellt. Die Schaummasse entstand durch die Reaktion / das Vermischen der A- und B-Komponente.

Dazu wurden mit einem Labor-Dissolver mit einem Fassungsvermögen von ca. zwei Liter die flüssigen Komponenten der A-Komponente vorgelegt und die festen, pulverförmigen Bestandteile in einem Dispergierprozess hinzugegeben. Analog zu diesem Prozess wurde die B-Komponente hergestellt.

Die Schaummasse wurde durch Vorlegen der A-Komponente in einem 2,5-Liter-Eimer mit anschließender gravimetrischer Dosierung der B-Komponente und Durchmischung per Bohrmaschine und Dispergierscheibe erzeugt.

Für die Herstellung von Plattenmaterial (550x550x60 mm³) waren größere Schaumvolumen notwendig. Daher wurden im Technikum Materialmengen bis ca. 5 Liter hergestellt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein größerer Mischer mit einem größeren Fassungsvermögen genutzt.

Zum Ende des Projekts wurden für die Anwendungsversuche im Technikum 25 Liter der A-Komponente mit entsprechender Menge B-Komponente hergestellt. Dazu wurde mit einem Kreis-Dissolver mit einem Fassungsvermögen von 50 Liter die A-Komponente produziert.

Über den Verlauf des Scale-Up-Prozesses wurden die hergestellten A- und B-Komponenten hinsichtlich ihrer Viskosität und Dichte untersucht. Die reagierenden Schaummassen wurden hinsichtlich ihrer Schäumungseigenschaften kontrolliert. Es wurde geprüft, ob Unterschiede über den Scale-Up-Prozess auftreten.

Anwendung

- In Kooperation mit der Firma WF-Formprojekt wurde eine geschlitzte Gipskartonplatte mit dem entwickelten Brandschutzschaum veredelt. Dazu wurde ein Liter der Reaktionsmasse hergestellt und mit einem Spachtel in die Schlitz der Gipskartonplatte eingebracht. Anschließend wurde eine zweite geschlitzte Gipskartonplatte auf die erste Platte aufgelegt. Der Verbund der beiden Platten mit dem schäumenden Material dazwischen wurde mit Schraubzwingen zusammengedrückt und für zwei Tage bei Raumtemperatur trocknen und aushärten gelassen. Zu Vergleichszwecken wurde zusätzlich eine geschlitzte Gipskartonplatte mit einer zweiten geschlitzten Gipskartonplatte durch einen handelsüblichen Polyvinylacetat-Holzleim verklebt.
- Bei der Firma GWK Kuhlmann wurden die beiden Komponenten des Schaums zusammengefügt und anschließend in verschiedene händische Werkzeuge gegeben. Dort fand der Ausschäumprozess in einem geschlossenen Prozess bei leicht erhöhter Temperatur statt. Nach einer gewissen Zeit wurde die Form geöffnet und die Probekörper wurden entnommen und visuell begutachtet.
- Um den Anwendungsfall einer Brandschutztür zu simulieren, wurde ein Aluminiumrahmenprofil mit dem entwickelten Schaum gefüllt. Dazu wurde die reagierende Schaummasse von oben in das Profil gegossen. Das überquellende Material wurde abgeschnitten. Anschließend wurde das verfüllte Profil in einem Trockenschrank getrocknet und nach der Trocknung aufgeschnitten, um die Porenverteilung und den Füllgrad zu beurteilen.
- Die ausgehärteten Materialien wurden bezüglich der Bearbeitbarkeit mit üblichen Handwerksgeräten (Sägen, Fräsen, Bohren) analysiert.
- Die thermische Stabilität der ausgehärteten Materialien wurde zum einen mittels thermomechanischer Analyse (TMA) und zum anderen durch Ermittlung des Feuerwiderstands analysiert. Für die erstgenannte Untersuchung wurde ein 5x5x5 mm³ großer Probekörper in der TMA von 25 – 1000 °C mit 10 K/min aufgeheizt und währenddessen die Höhenänderung aufgezeichnet. Die zweitgenannte Untersuchung erfolgte in einem Kleinprüfstand nach DIN 4102-8, in dem Proben der Größe 50x50 cm² mittels Einheitstemperaturkurve beflammt wurden und auf der dem Feuer abgewandten Seite die Oberflächentemperatur mittels fünf Thermoelementen bestimmt wurde.

Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

- 2 K-Maschine: Ursprünglich war die Entwicklung einer Maschine für die kontinuierliche Förderung und Durchmischung der beiden Schaumkomponenten zu einer Reaktionsmasse angedacht. Diese Maschine sollte eine Applikation des Schaums auf Baustellen ermöglichen. Von diesem Ziel wurde Abstand

genommen, da die Rücksprache mit möglichen Anwendern des entwickelten Schaums zeigte, dass eine maschinelle Austragung des Schaums auf Baustellen nicht zielführend ist. Gewünscht ist seitens der Anwender eine einfache Applikation aus zwei baustellenüblichen, zu vermischenden Gebinden, wie zum Beispiel die Applikation aus einer Zweikomponenten-Kartusche.

- 1:10 Aufschäumverhältnis: Im Antrag wurde der zu entwickelnde Schaum fälschlicherweise mit dem bekannten Polyurethanschaum gleichgesetzt und der Wunsch nach einem ähnlichen Aufschäumverhältnis wurde formuliert. Nach Rücksprache mit möglichen Anwendern des entwickelten Schaums wurde festgestellt, dass weniger das Aufschäumverhalten und mehr die Dichte, Nichtbrennbarkeit und Wärmeleitfähigkeit relevante Eigenschaften darstellen. Zudem zeigten alle Proben aus den Versuchen mit einem Aufschäumverhältnis von größer 3 eine starke Tendenz zu Rissen und ausgeprägtem Volumenschwund während der Aushärtung.
- Aushärtung in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit: Im Gegensatz zum ursprünglichen Antrag wurde die Aushärtung des Materials nur in Abhängigkeit von der Materialtemperatur und nicht in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit untersucht. Grund dafür ist, dass der entwickelte Schaum auf einer wasserbasierten Rezeptur basiert und die Luftfeuchtigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Aushärtung des Schaums hat, wie es beispielweise bei feuchtigkeitsvernetzenden Silikonharzen oder auch Polyurethan zu erwarten wäre.

Erreichung der Meilensteine

M1: Ein nichtbrennbarer A1-Schaum mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit und einem guten Aufschäumverhalten ist entwickelt worden. → Der Meilenstein wurde erreicht.

M2: Eine mobile 2K-Dosiereinheit ist entwickelt worden, mit der 25 kg Material auf einmal verarbeitet werden können. → Der Meilenstein wurde nicht erreicht, da diese Problematik aus dem Arbeitsplan gestrichen wurde (siehe vorheriger Absatz).

M3: Der entwickelte Schaum kann für die jeweilige Anwendung gut verarbeitet werden. → Der Meilenstein wurde erreicht.

Ergebnisse

Anforderungskatalog

Das entwickelte Material soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Nichtbrennbarkeit A1/A2 nach der DIN EN 13501-1
- Wärmeleitfähigkeit von max. 0,08 W/mK
- Rohdichte von max. 250 kg/m³

Nebenanforderungen:

- UV-Stabilität min. 2 Jahre
- Lagerstabilität beider Komponenten min. 2 Monate
- Akzeptable glatte Oberfläche nach dem Trocknen
- Beginn Schaumbildung ca. 30 Sek. / erst langsamer
- Entformen nach 30-60 Min.
- Aufschäumverhalten: 1:5
- Verarbeitungstemperatur: 15 – 40 °C
- Gleichbleibender 3D-Schrumpf während des Trocknungsprozesses
- Das Emissionsverhalten erfüllt die Anforderungen des AgBB-Bewertungsschemas (2021)

Voruntersuchungen zu Rezepturentwicklung

Um die Rezeptur zu entwickeln, wurde der Einfluss diverser (Leicht)-Füllstoffe auf die Eigenschaften des ausgehärteten Schaums untersucht. Dafür wurden die Verbrennungswärme und die Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Beide sind in Abbildung 2 graphisch dargestellt.

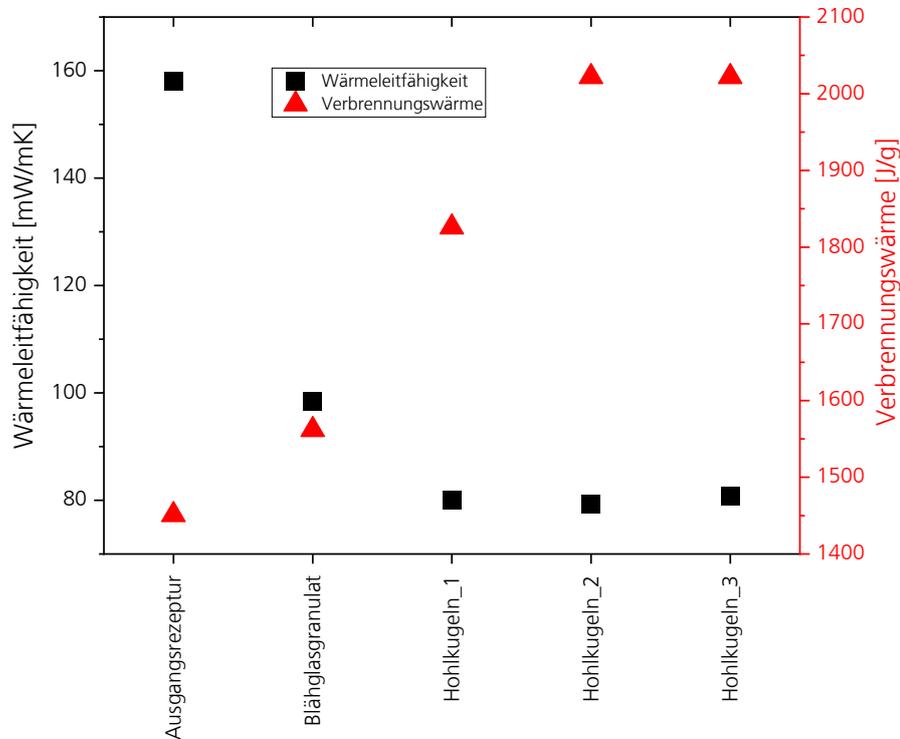


Abbildung 2: Einfluss verschiedener Leichtfüllstoffe auf die Wärmeleitfähigkeit und die Verbrennungswärme des Montageschaums.

Anhand der Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Hohlkugeln die Wärmeleitfähigkeit um fast die Hälfte verringert wird, aber gleichzeitig durch die Zugabe von organischem Material die Verbrennungswärme ansteigt. Letzteres muss zum Bestehen der Baustoffklasse A1 kleiner 2000 J/g sein. Um eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit zu erreichen und gleichzeitig die Verbrennungswärme von 2000 J/g nicht zu überschreiten, wurde eine Rezepturentwicklung mittels statistischer Versuchsplanung für die Hohlkugeln 1 durchgeführt.

Statistischer Versuchsplan

Der erstellte Versuchsplan bestand aus 74 Rezepturen, von denen fünf Rezepturen Wiederholungsversuche waren, sowie weitere fünf Rezepturen, die für den „Lack of fit“ Test verwendet wurden. Hätten durch Vorversuche drei Komponenten (Benetzungs- und Rheologie-Additiv sowie Füllstoff 2) nicht als konstant eingestuft werden können, ergäbe sich ein Versuchsplan mit mehr als 200 Rezepturen, was die Kapazität des Projekts überschritten hätte.

Auswertung des Versuchsplans

Zur Auswertung des Versuchsplans wurden von den 74 Proben die Wärmeleitfähigkeit, die Verbrennungswärme nach der DIN EN ISO 1716 sowie die Rohdichte bestimmt. Dabei war das Ziel, mindestens eine Rezeptur zu erhalten, die eine Verbrennungswärme von kleiner als 2000 J/g aufweist, um so die Anforderung an die Baustoffklasse nichtbrennbar nach der DIN EN 13501-1 zu erfüllen. Als weiteres Kriterium wurde definiert, dass die Wärmeleitfähigkeit kleiner 90 W/mK betragen soll und die Rohdichte möglichst gering sein soll.

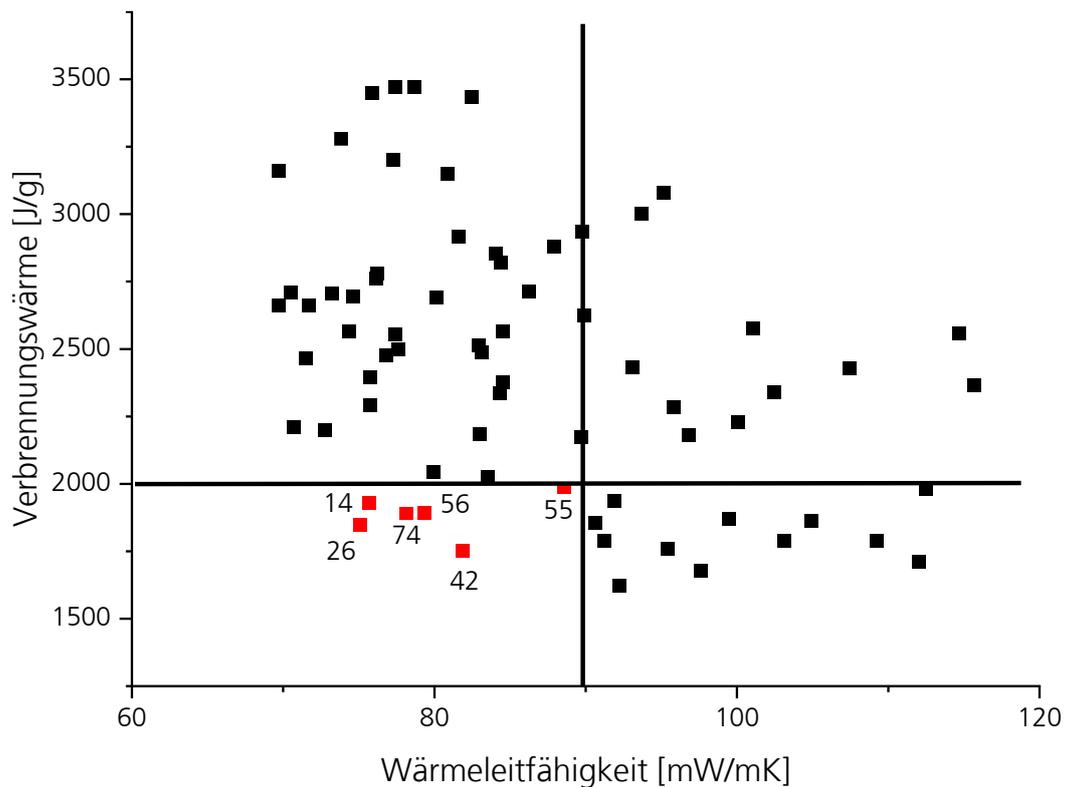


Abbildung 3: Gemessene Wärmeleitfähigkeit vs. Verbrennungswärme für alle Schäume aus dem Versuchsplan.

Da nicht der einzelne Parameter für die Rezepturentwicklung wichtig ist, sondern die Gesamtperformance, wurde in Abbildung 3 die für jede Probe gemessene Verbrennungswärme als Funktion der Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass viele Proben eine geringere Verbrennungswärme als 2000 J/g besitzen und somit diese Prüfung bestehen würden. Gleichzeitig sind mindestens genauso viele Proben vorhanden, die eine Wärmeleitfähigkeit von kleiner 90 W/mK besitzen. Werden beide Grenzwerte in Betracht gezogen, so bleiben sechs Rezepturen, von denen alle mit Ausnahme der Rezeptur 55 weiterverfolgt wurden. Die Rezeptur 55 wurde ausgeschlossen, da sie zu dicht an den Grenzwerten lag.

Die Rohdichte spielt im Vergleich zu den anderen beiden Parametern eine untergeordnete Rolle. Sie ist in Abbildung 4 zusammen mit der Wärmeleitfähigkeit dargestellt und variiert zwischen 160 kg/m^3 und 370 kg/m^3 . Dabei ist ein gewisser Trend erkennbar, dass mit steigender Rohdichte die Wärmeleitfähigkeit zunimmt. Neben diesem Aspekt bedeutet eine geringere Rohdichte einen geringeren Materialbedarf und damit verbunden geringere Kosten.

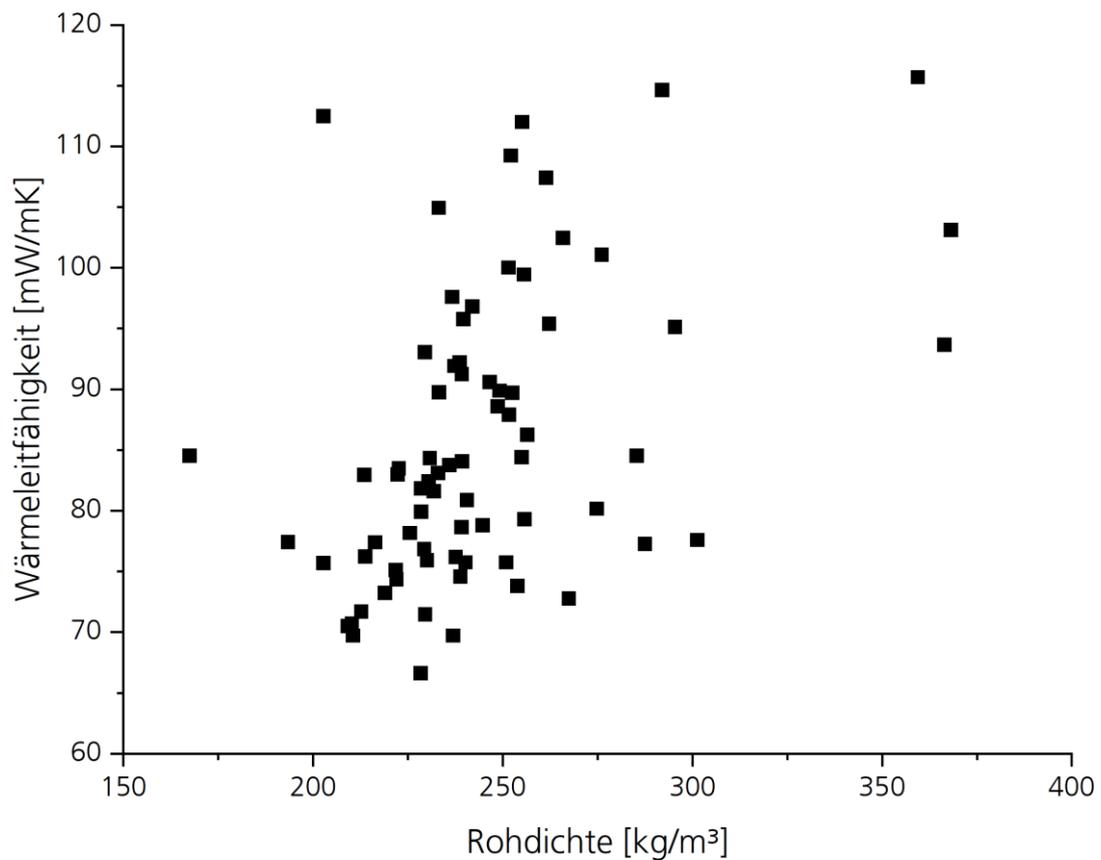


Abbildung 4 Auftragung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte der 74 Proben des Versuchsplanes.

In der Grafik in Abbildung 5 ist die dynamische Viskosität der A- und B-Komponenten der 74 Rezepturen des Versuchsplans dargestellt. Die dynamischen Viskositäten der A-Komponenten variieren von 520 bis 9950 mPas und die der B-Komponenten zwischen 315 und 12454 mPas.

Es ist ersichtlich, dass im Mittel die Komponente B oft niedrig viskoser ist als Komponente A; dies liegt unter anderem daran, dass die A-Komponente einen deutlichen höheren Festkörperanteil, als die Härter-Komponente (B) aufweist. Mit einigen Ausnahmen sind alle hergestellten Proben so viskos, dass eine gute Herstellung und Verarbeitung möglich sind.

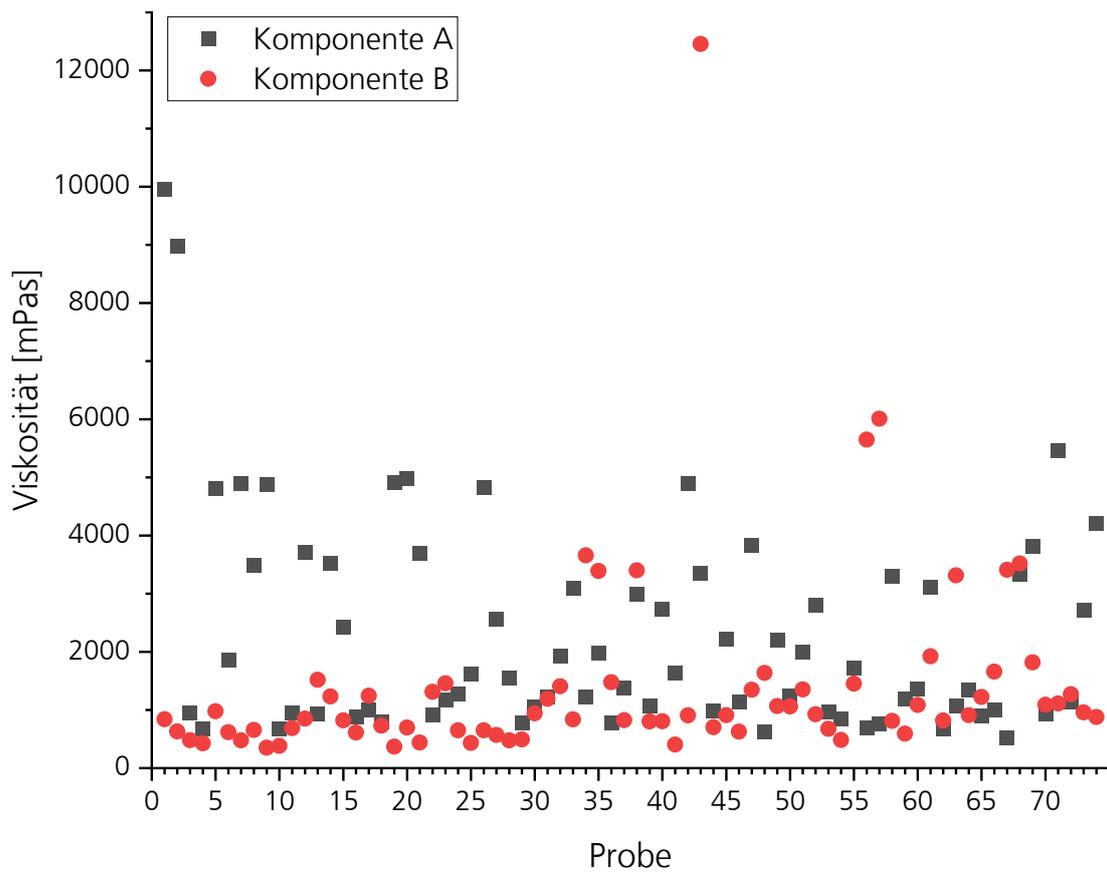


Abbildung 5: Darstellung der Viskosität der beiden Ausgangskomponenten A und B.

Neben den diskutierten Parametern wurde von jeder Rezeptur während des Aufschäumens und Aushärtens der Expansionsfaktor sowie der Beginn und das Ende des Schaumprozesses bestimmt. Diese Daten sind in Abbildung 6 dargestellt. Für den erstgenannten Kennwert bedeutet ein hoher Expansionsfaktor auch eine geringe Rohdichte und eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit. Mit einigen Ausnahmen expandierte das Volumen der Rezeptur, nachdem beide Komponenten zusammengegeben wurden, um einen Faktor zwischen 2,5 und 4,5. Die fünf Rezepturen, welche als positiv bewertet und weiterverfolgt wurden, variieren in diesem Bereich und zeigen keinen Trend.

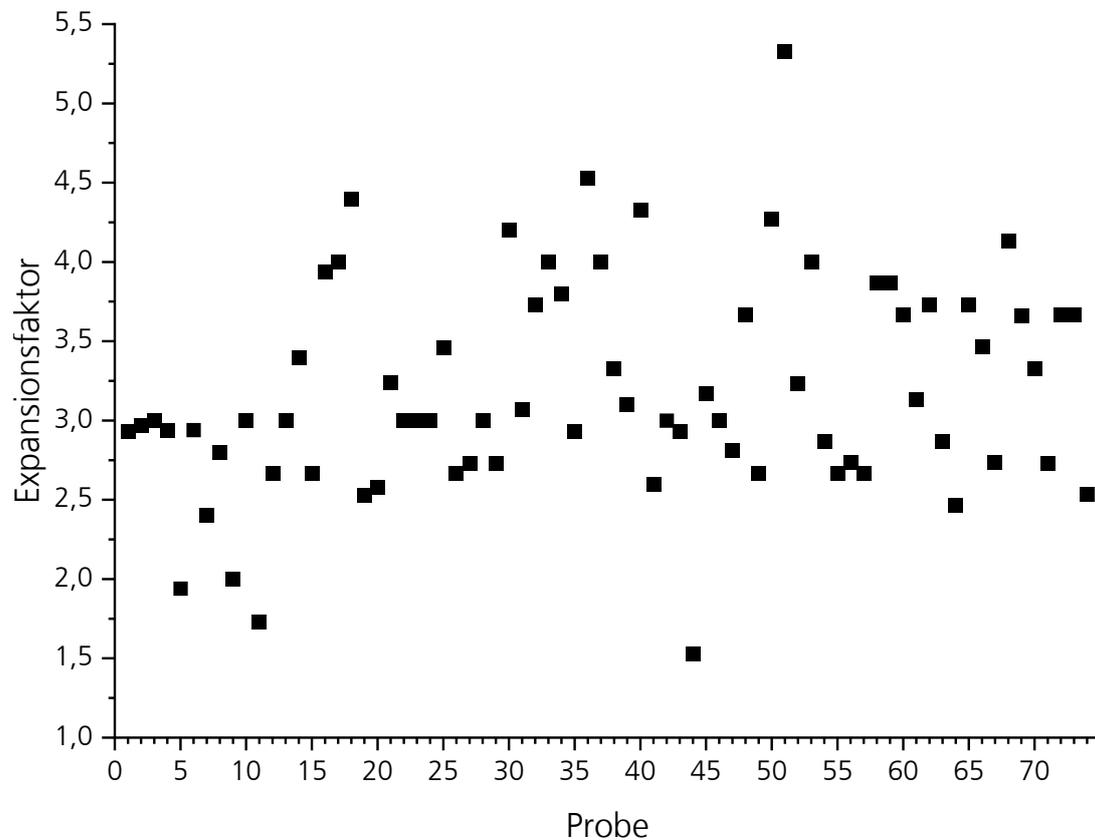


Abbildung 6: Auftragung des Expansionsfaktors der 74 Proben.

Der Beginn und das Ende des Schaumprozesses sind wichtige Parameter (Abbildung 7), um die Zeit zu bestimmen, in denen das Material verarbeitet werden kann. Da zwei Komponenten zusammengegeben werden müssen und anschließend reagieren, sollte der Beginn nicht zu früh sein; dieser liegt zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten. Anschließend erfolgt die Reaktion bzw. das Aufschäumen in der Regel zwischen 3 und 15 Minuten.

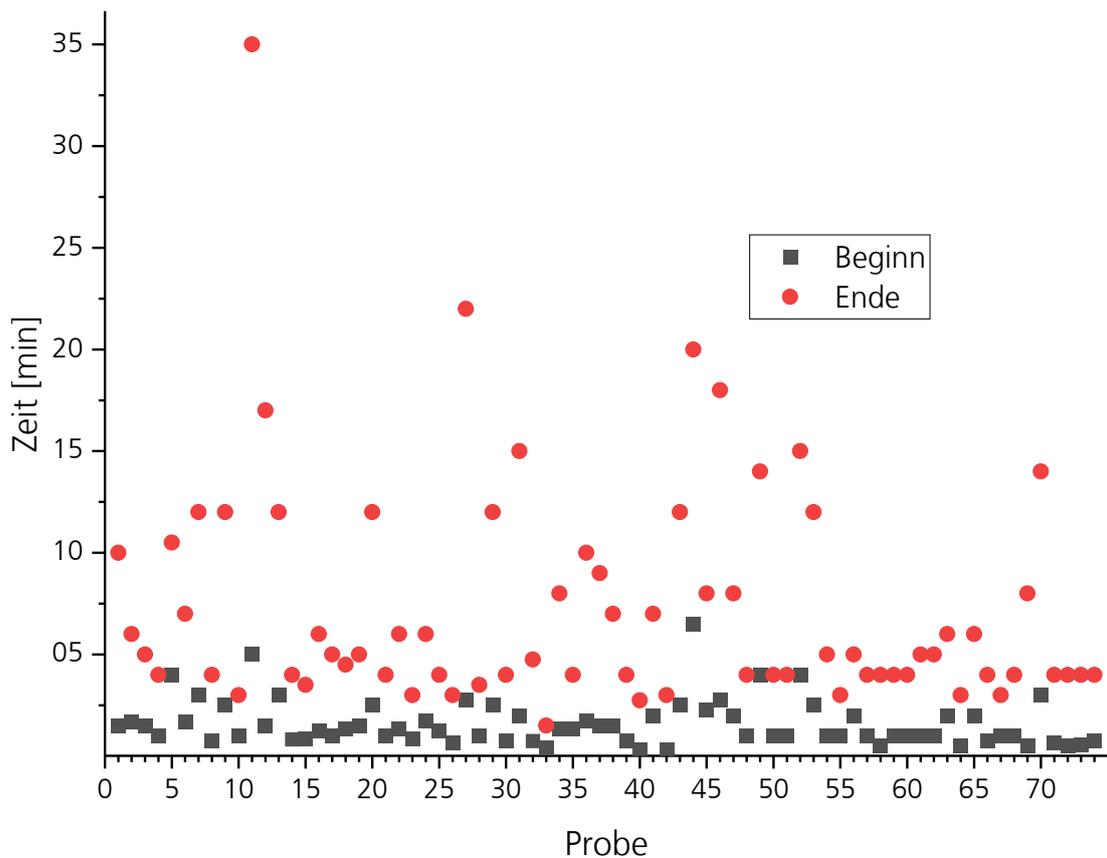


Abbildung 7: Auftragung des Beginns und Ende des Aufschäumprozesses für alle 74 hergestellten Proben.

Statistische Auswertung des Versuchsplans

Aus den Ergebnissen des Versuchsplans ergaben sich sechs Rezepturen, die als vielversprechend angesehen wurden. Um die optimale Rezeptur zu ermitteln, wurden die Ergebnisse statistisch mit dem Programm Design Expert ausgewertet. Da es sich um ein siebendimensionales Mischungsexperiment handelt, ist deren visuelle Darstellung nur indirekt möglich. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Verbrennungswärme funktional in Abhängigkeit der Konzentration der sieben Komponenten dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Komponenten nicht linear sind. Folgende Effekte werden beobachtet:

- Je höher der Anteil an Treibmittel, desto größer ist die Verbrennungswärme, da es sich hier um eine organische Komponente handelt.
- Mit einem höheren Füllstoffanteil steigt die Verbrennungswärme etwas an.
- Da die Komponenten A und B anorganisch sind, ist deren Einfluss auf diesen Parameter gering.

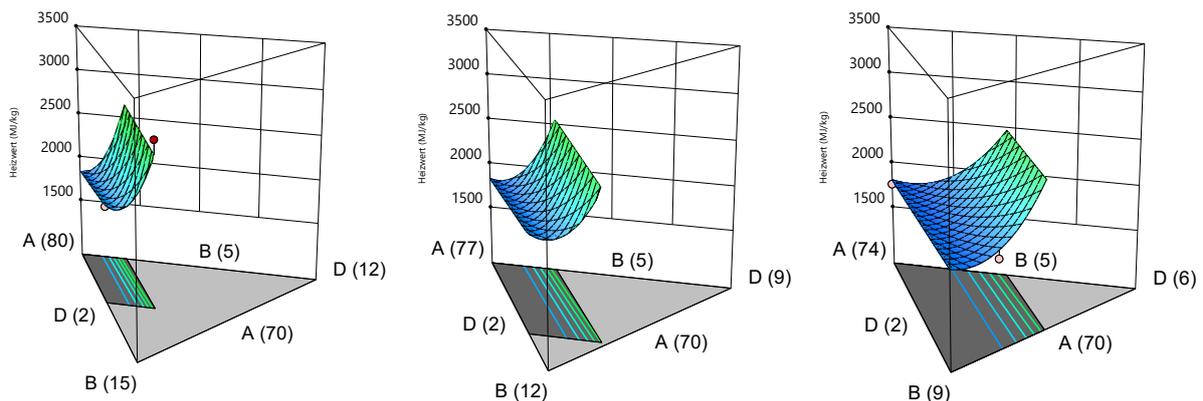


Abbildung 8: Ausgewertete Verbrennungswärme für unterschiedliche Zusammensetzungen des Schaums (F und G = 1 %; H = 3 %, E und J = 0,2 % sowie K = 3,4 %) Die Komponente C ist in der linken Darstellung 4 %, in der Mitte 7% und rechts 10%.

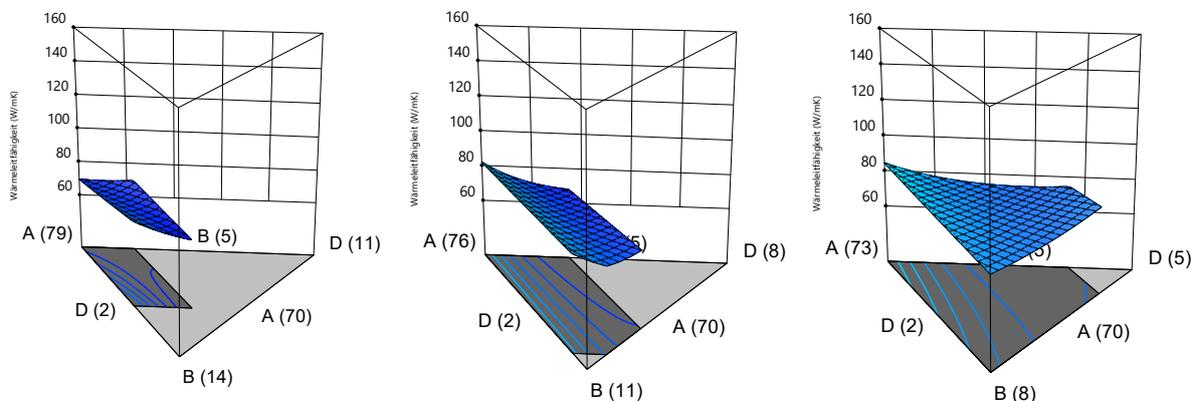


Abbildung 9: Ausgewertete Wärmeleitfähigkeit für unterschiedliche Zusammensetzungen des Schaums (F = 1,3 %, G = 1,4 %; H = 3,8 %, E und J = 0,2 % sowie K = 3,4 %) Die Komponente C ist in der linken Darstellung 4 %, in der Mitte 7 % und rechts 10 %.

Im Falle der ausgewerteten und optimierten Wärmeleitfähigkeit, welche in Abbildung 9 dargestellt ist, ergeben sich andere Erkenntnisse:

- Je mehr Treibmittel in der Rezeptur, desto niedriger ist die Wärmeleitfähigkeit, da durch das Treibmittel ein Gas im Schaum gebunden wird.
- Der Einfluss der weiteren Komponenten auf die Wärmeleitfähigkeit ist nicht eindeutig zu erkennen.

Um aus den vielen Erkenntnissen die optimale Rezeptur zu ermitteln, müssen im nächsten Schritt Grenzwerte und Bedingungen definiert werden, die der ausgehärtete Schaum erfüllen soll. Die folgenden Parameter wurden definiert:

- Der Heizwert soll minimiert werden und dabei kleiner als 1950 J/kg sein, um sicherzustellen, dass der Grenzwert für die Nichtbrennbarkeitsprüfung von 2000 J/kg nicht unterschritten wird.
- Die Wärmeleitfähigkeit soll minimiert werden, um so die beste Dämmwirkung zu erreichen.
- Die Rohdichte soll minimiert werden, da dadurch die Materialkosten reduziert werden.

Dabei sind die Kriterien in absteigender Wichtigkeit aufgelistet. Die optimale Rezeptur ist in Abbildung 10 graphisch dargestellt und in Tabelle 4 zusammengefasst. Es ist erkennbar, dass möglichst wenig Treibmittel verwendet werden muss, da es sich hierbei einerseits um eine Substanz handelt, welche die Wärmeleitfähigkeit und die Rohdichte verringert, aber andererseits auf Grund ihres organischen Charakters die Verbrennungswärme erhöht. Von der Komponente B wird relativ viel Material benötigt, da es sich hier um mit Luft gefüllte Glashohlkugeln handelt, die einen positiven Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben.

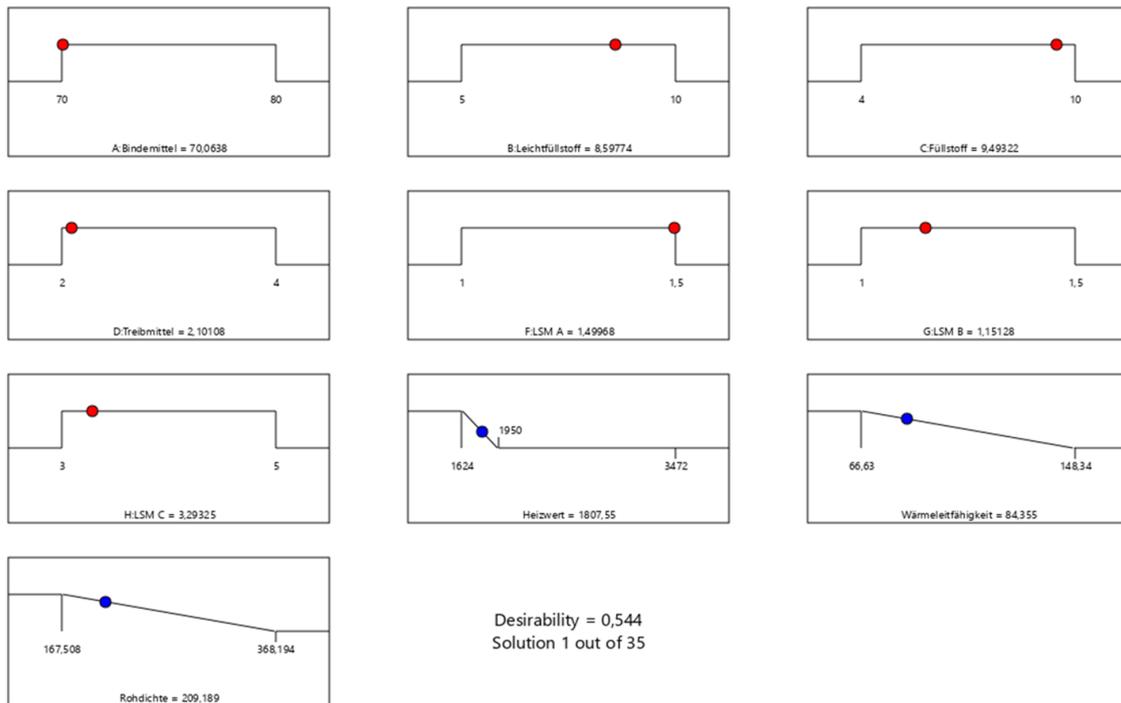


Abbildung 10: Darstellung der optimalen errechneten Rezeptur und dem daraus errechneten Heizwert, Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte.

Tabelle 4: Zusammenfassung der optimierten Rezeptur.

Komponente	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Anteil [%]	70,1	8,6	9,5	2,1	0,2	1,4	1,1	3,3	0,2	2,3

Diese rechnerisch ermittelte Rezeptur wurde real hergestellt und bezüglich der Parameter Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und Verbrennungswärme charakterisiert. Die rechnerisch und experimentell ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 5 gegenübergestellt. Neben dieser Rezeptur wurde im weiteren Projektverlauf auch die zweitbeste Rezeptur aus der Auswertung der statistischen Versuchsplanung weiterverfolgt.

Tabelle 5: Rechnerisch und experimentell ermittelte Kennwerte für den optimalen A1-Schaum.

Parameter	Rohdichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [mW/mK]	Verbrennungswärme [J/kg]
Soll	209	84	1808
Ist	221	87	1617

Auswahl der Endrezeptur

Anhand der Ergebnisse des Versuchsplans und der zwei Rezepturen erfolgte eine umfangreiche Charakterisierung, um eine Rezeptur zu identifizieren, mit denen ein Scale-Up und eine erweiterte Charakterisierung durchgeführt werden soll. Zu den Methoden, die zur Auswahl der Schaumrezeptur geführt hat, gehörten die folgenden:

- Nichtbrennbarkeitsprüfung nach der DIN EN ISO 1182
- Wasseraufnahme nach der DIN EN ISO 29767
- Querkzugfestigkeit nach der DIN EN 1607

- Druckfestigkeit und Druckmodul nach der DIN EN ISO 29469

Nichtbrennbarkeitsprüfung nach der DIN EN ISO 1182

Damit ein Material als nichtbrennbar klassifiziert ist, muss neben der Untersuchung im Bombenkalorimeter auch eine Prüfung im Nichtbrennbarkeitsofen erfolgen. Um diese Prüfung zu bestehen, fordert die DIN EN 13501-1, dass folgende Grenzwerte nicht überschritten werden:

- Temperaturerhöhung ≤ 30 K und
- Masseverlust: ≤ 50 % und
- keine Entzündung der Probe.

Mit der Probe 14 konnten keine reproduzierbaren Proben hergestellt werden. Daher wurde diese Probe nicht im Nichtbrennbarkeitsofen analysiert. Die anderen sechs Proben wurden in diesem Prüfstand untersucht, die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt. Da es bei Probe 74 zu einer längeren Entflammung kam, wurde der Versuch abgebrochen. Bei den anderen Proben wurde keine Entflammung beobachtet. Die Masseverluste waren bei allen fünf Proben mit 22 bis 26 % sehr ähnlich. Gleichzeitig betrug die Temperaturerhöhung für die Proben 26, 42, 56 und 75 unter zwei Kelvin. Nur die Probe 76 hat mit 14 Kelvin eine etwas höhere Temperaturerhöhung, die trotzdem weit entfernt vom Grenzwert (30 K) lag.

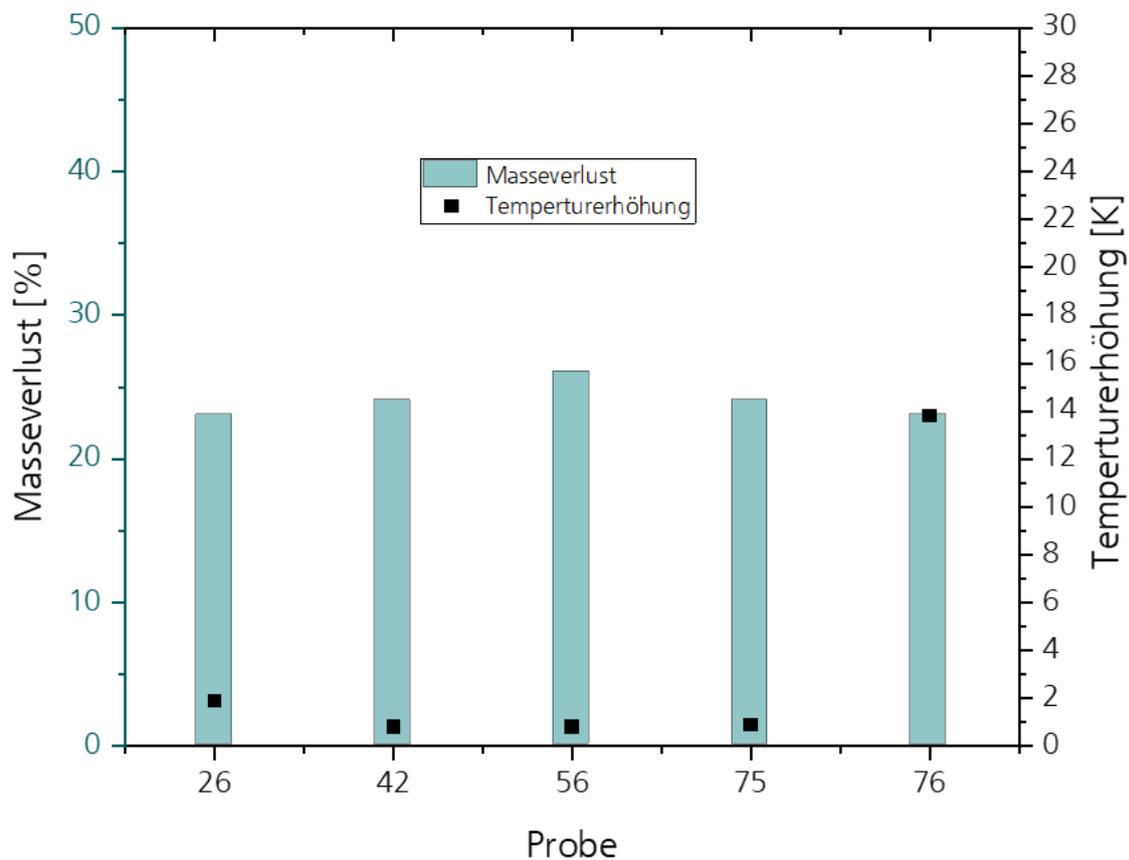


Abbildung 11: Ergebnisse der Nichtbrennbarkeitsversuche bezüglich Masseverlust und Temperaturerhöhung.

Wasseraufnahme

Die Ergebnisse der Wasseraufnahme nach der DIN EN ISO 29767 sind in Abbildung 12 dargestellt. Da sich die Probe 76 schon während der Wasserlagerung stellenweise aufgelöst hat, sind deren Ergebnisse für den weiteren

Projektverlauf uninteressant. Die anderen drei Proben liegen mit 10-12 kg/m² weit oberhalb des Grenzwerts von Schaumglas (0,5 kg/m²).

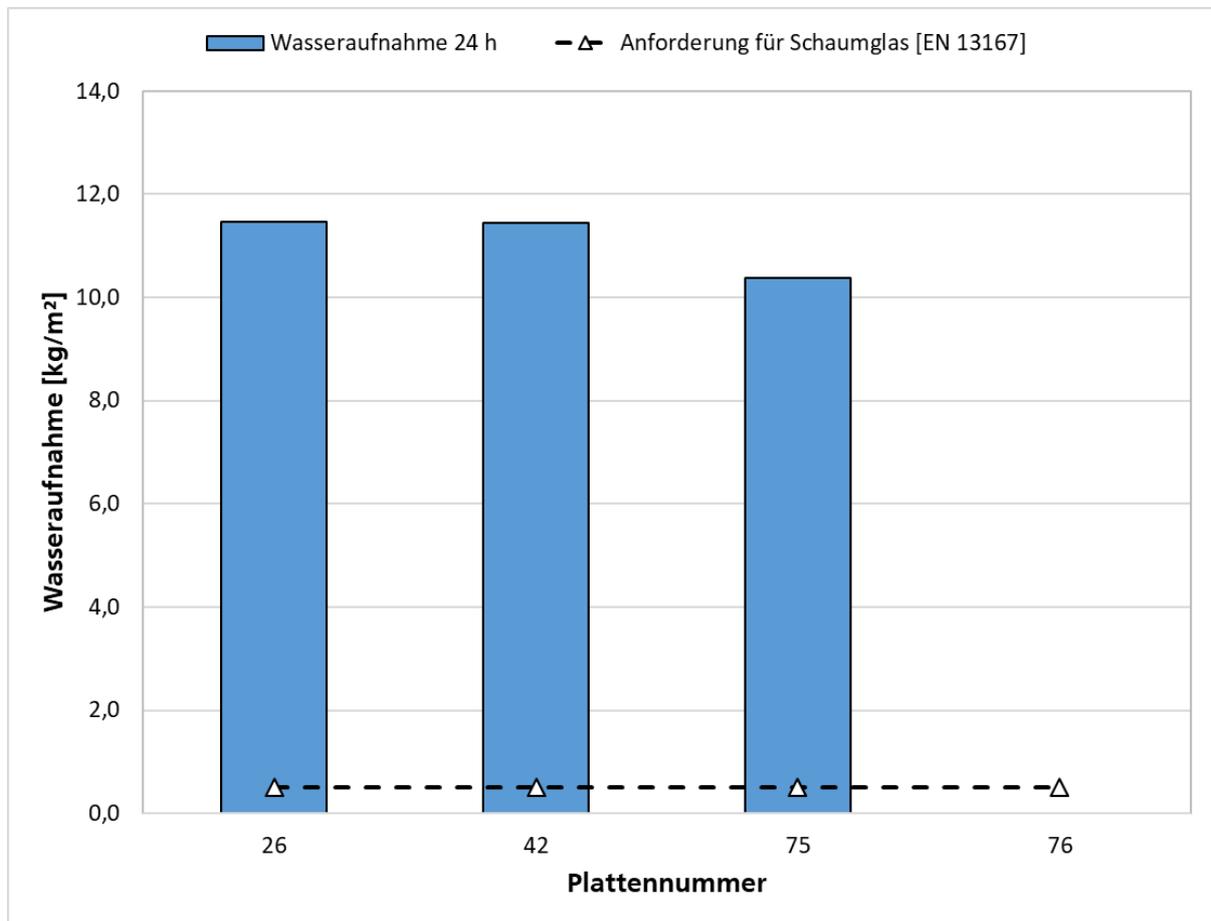


Abbildung 12: Ergebnisse der Wasseraufnahme nach der DIN EN ISO 29767. Die Probe IGP 086 ist im Wasser zerfallen, daher kann der Kennwert nicht bestimmt werden.

Um eine Verringerung der Wasseraufnahme zu erzielen, wurde die Probe 26 mit ca. einem Prozent Hydrophobierungsmittel versetzt. Diese Modifikation (026H) wurde im Vergleich zur unbehandelten 26 nach der DIN EN ISO 29767 auf ihre Wasseraufnahme untersucht. Für beide Varianten wurden vier Proben hergestellt. Die Mittelwerte der Wasseraufnahme beider Probentypen sind in Abbildung 13 dargestellt. Die hydrophobierte Probe zeigt eine ca. 13 % geringere Wasseraufnahme, liegt jedoch deutlich über dem Grenzwert von Schaumglas (0,5 kg/m²).

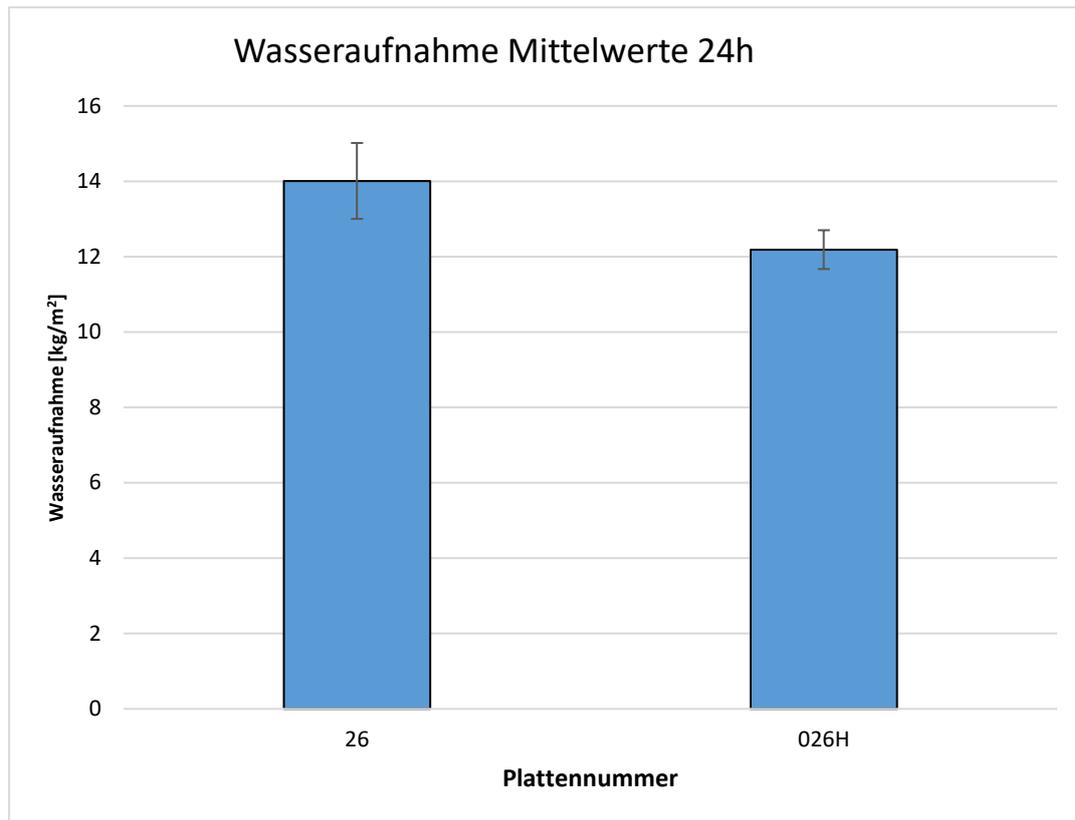


Abbildung 13: Wasseraufnahme 24h der Probe 26 im Vergleich zur Probe 026H mit Hydrophobierungsmittel.

Mechanische Kennwerte

Zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte war es nicht mehr ausreichend, Proben in der Größe 300 x 300 mm² zu produzieren, sondern in der Größe 500 x 500 mm². In diesem Scale-Up-Schritt zerbrachen nach dem Trocknen die Proben mit den Nummern 74 und 56, was zu einem Ausschluss geführt hat. In den folgenden Abbildungen sind die Untersuchungen der Querkzugfestigkeit nach der DIN EN 1607 und der Druckfestigkeit nach der DIN EN ISO 29469 dargestellt. Nur die Probe 26 hat eine im Vergleich zum Schaumglas ausreichende Querkzugfestigkeit. Dagegen erfüllen alle Proben die Anforderungen an die Druckfestigkeit, wobei auch hier die höchsten Werte bei der Probe 26 erzielt werden.

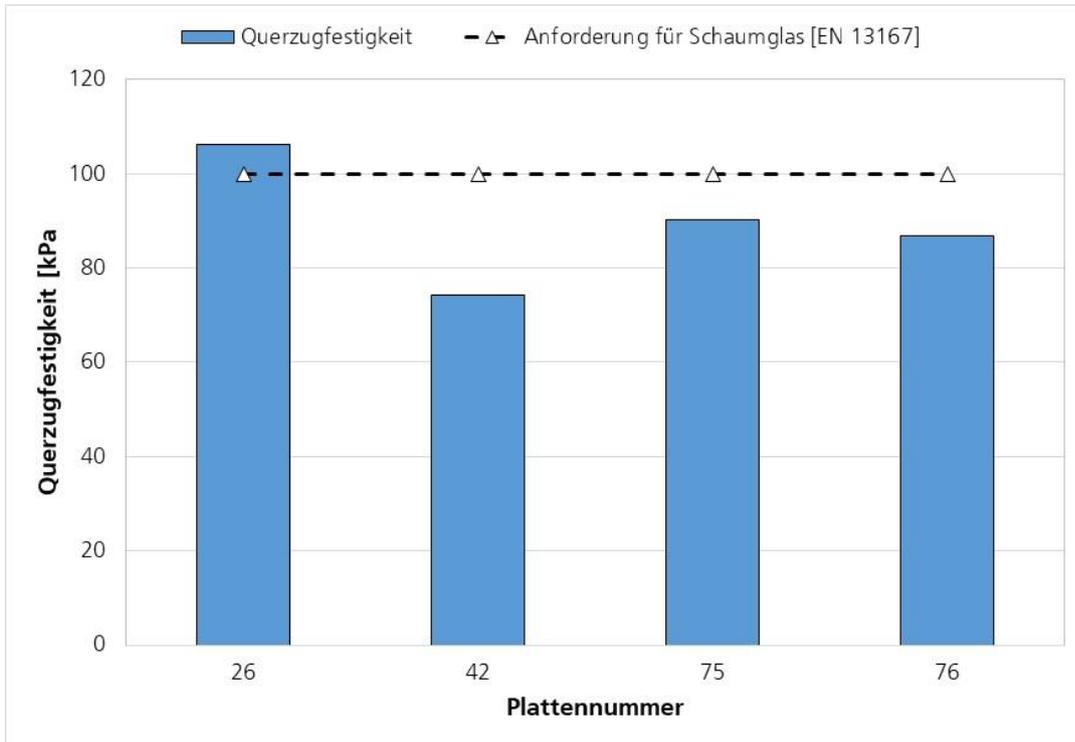


Abbildung 14: Querzugfestigkeit der Schaumproben nach der DIN EN 1607.

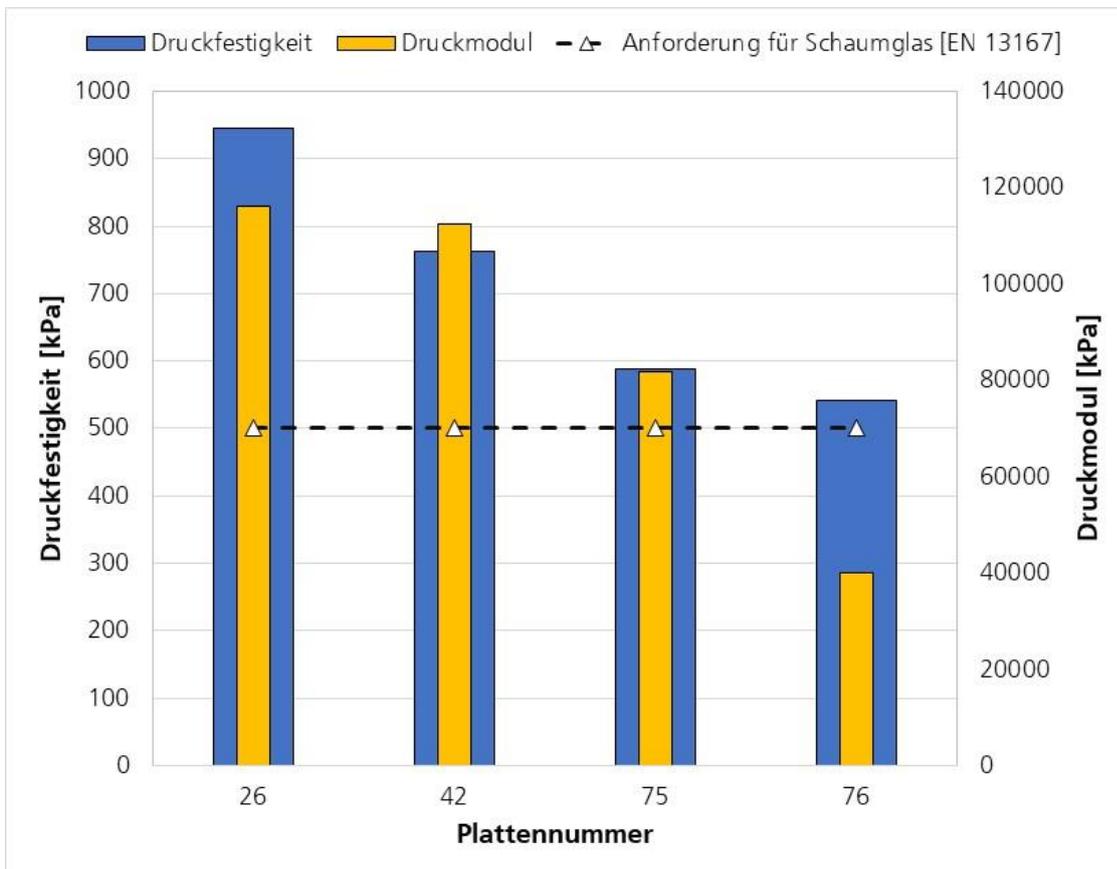


Abbildung 15: Druckfestigkeit und Druckmodul bei F_{max} oder 10 % Stauchung nach der DIN EN ISO 29469 im Vergleich zu den Anforderungen an Schaumglas.

Anhand der Ergebnisse des Versuchsplans und der daran anschließenden Charakterisierung im Nichtbrennbarkeitsofen und der Bestimmung der mechanischen Kennwerte wurde die Rezeptur mit der Nummer 26 als am vielversprechendsten eingestuft, da diese die durchgeführten Prüfungen bestand und im Vergleich zu den anderen sechs übriggebliebenen Rezepturen während der Herstellung nicht zerbrochen ist sowie in den einzelnen Prüfungen die besten Ergebnisse geliefert hat.

Abschlusscharakterisierung

Im Rahmen der Abschlusscharakterisierung wird die Rezeptur 26 bezüglich diverser Parameter charakterisiert, die für eine spätere Anwendung relevant sind.

Lagerstabilität

Um die Lagerstabilität der Probe 26 zu beurteilen, wurde diese nach sechs Monaten Lagerung in einer geschlossenen PE-Dose beobachtet. Abbildung 16 zeigt im zweigeteilten Bild auf der linken Seite, dass insbesondere die A-Komponente starke Lagerinstabilitäten zeigt. Auch bei der B-Komponente sind nach sechs Monaten Lagerung zwei separierte Phasen zu erkennen.

Beide Komponenten ließen sich mit einem Labor-Dissolver aufrühren und homogenisieren, dies ist auf der rechten Seite von Abbildung 16 gezeigt.

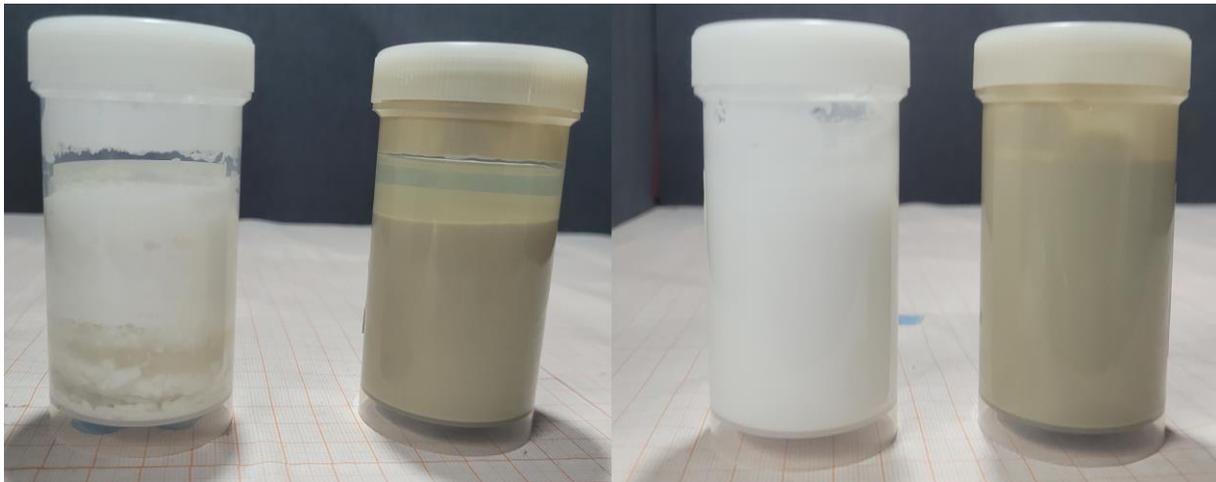


Abbildung 16: Lagerung der Probe 26 nach sechs Monaten. Linkes Bild A-Komponente (weiß) und B-Komponente (braun) vor dem Aufrühren und rechter Teil nach dem Aufrühren.

Die Komponente A wies nach dem Aufrühren eine stark erhöhte Viskosität auf, dies wurde nur qualitativ beobachtet und nicht quantitativ per Viskosimeter gemessen. Bei der B-Komponente wurde keine veränderte Viskosität beobachtet. Nach dem Aufrühren wurden beide Komponenten zusammengegeben und es konnte ein Schaum erzeugt werden. Der Schaum entstand unmittelbar nach dem Verrühren von Komponente A und B. Daher konnten keine anderen Schaumeigenschaften im Vergleich zu einer nicht gelagerten Kontrolle verglichen werden.

Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur

Während der Abschlusscharakterisierung erfolgte die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten bei verschiedenen Temperaturen, die in Abbildung 17 dargestellt sind. Dabei ist erkennbar, dass dieser Parameter kontinuierlich mit der Temperatur steigt.

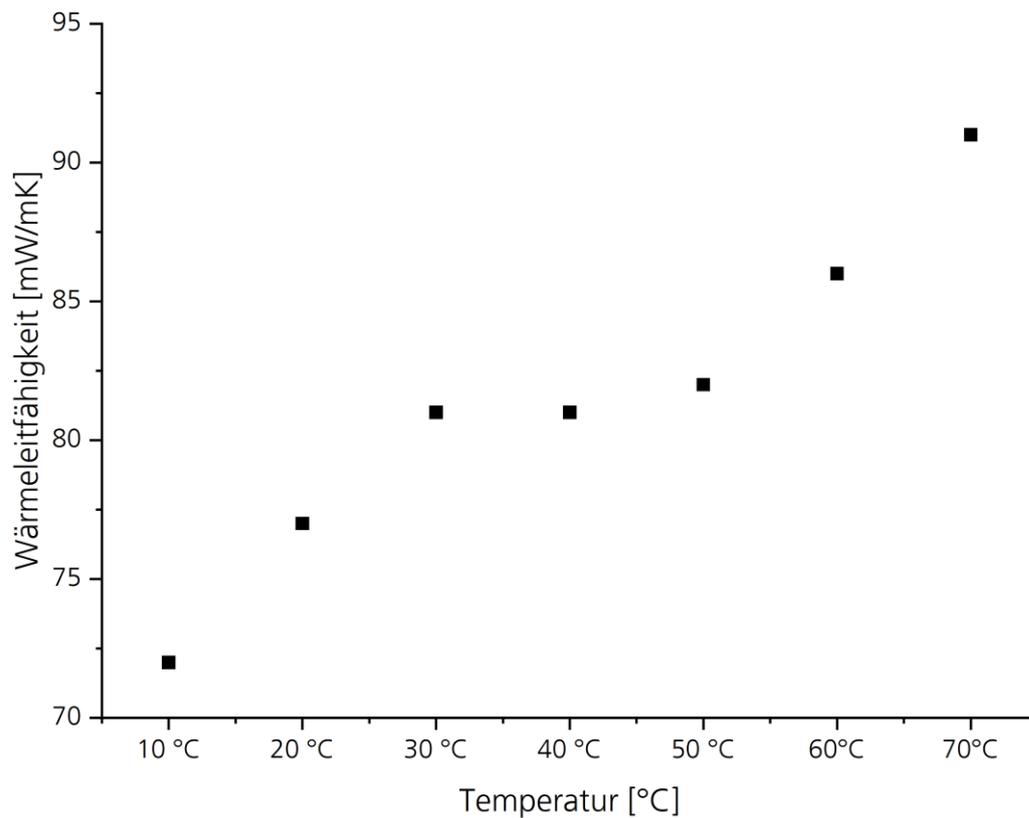


Abbildung 17: Wärmeleitfähigkeit der Probe 26 als Funktion der Temperatur.

Verarbeitungszeit/Topfzeit

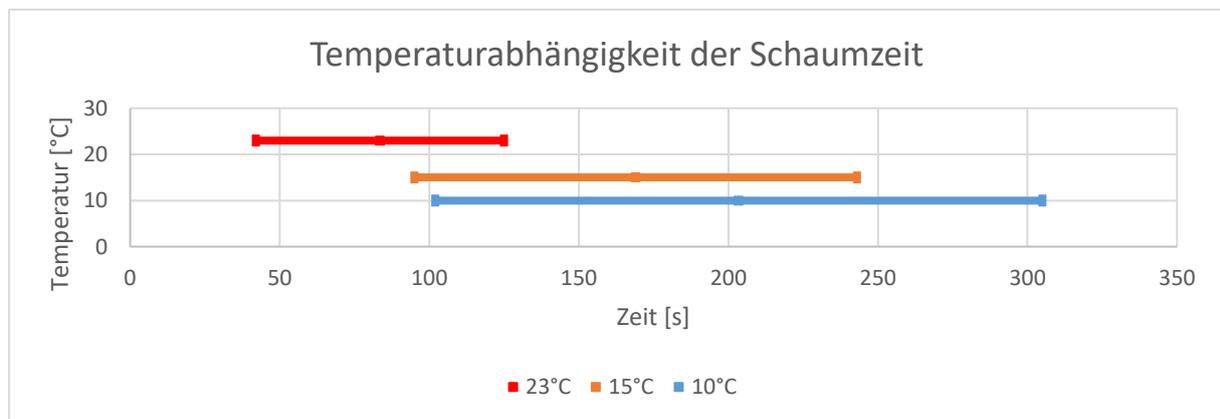


Abbildung 18: Temperaturabhängigkeit des Schäumens - als Maß für die Temperaturabhängigkeit der Verarbeitungszeit.

Die Verarbeitungszeit des Schaums endet mit dem Beginn des Schäumens und ist abhängig von der Umgebungs- und Materialtemperatur. In der Abbildung 18 sind der Beginn und das Ende des Schäumens der Probe 26 bei drei verschiedenen Temperaturen gezeigt. Das Verhalten bei Temperaturen über 23°C konnte nicht ermittelt werden, da der Schaumprozess der Probe so schnell begann, dass eine Erfassung nicht möglich war. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass

- das Schäumen mit höheren Temperaturen früher beginnt und endet
- die Dauer des Schäumens sich mit niedrigeren Temperaturen verlängert

Entformungszeit

In der folgenden Tabelle ist dargestellt, wie lange bei welcher Temperatur und Probengröße gewartet werden musste, bis die Proben zerstörungsfrei aus ihren Herstellungsgebinden entnommen werden konnten:

Tabelle 6: Zusammenfassung ermittelte Entformungszeit der Probe 26 für verschiedene Probegrößen und Temperaturen.

Probengröße Rezeptur 26	Entformung nach: [h, °C]
Bis 0,1 Liter	2 h bei 20°C
Bis ca. 6 Liter	12 h bei 20°C
Bis ca. 15 Liter	24 h bei 20°C

Tabelle 6 zeigt, dass die Entformungszeit maßgeblich von der Größe der hergestellten Probe abhängig ist. Da die Proben hauptsächlich über das Verdampfen von Wasser aushärten, ist damit zu rechnen, dass ein günstiges Oberflächen/Volumen-Verhältnis sowie höhere Temperaturen die Entformungszeit verringern.

Porenverteilung

Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt aus der Porenverteilung des Schaums 26. Der Durchmesser von 49 Poren wurde gemessen und ausgewertet. Es ergab sich ein mittlerer Porendurchmesser von $952 \pm 274 \mu\text{m}$.

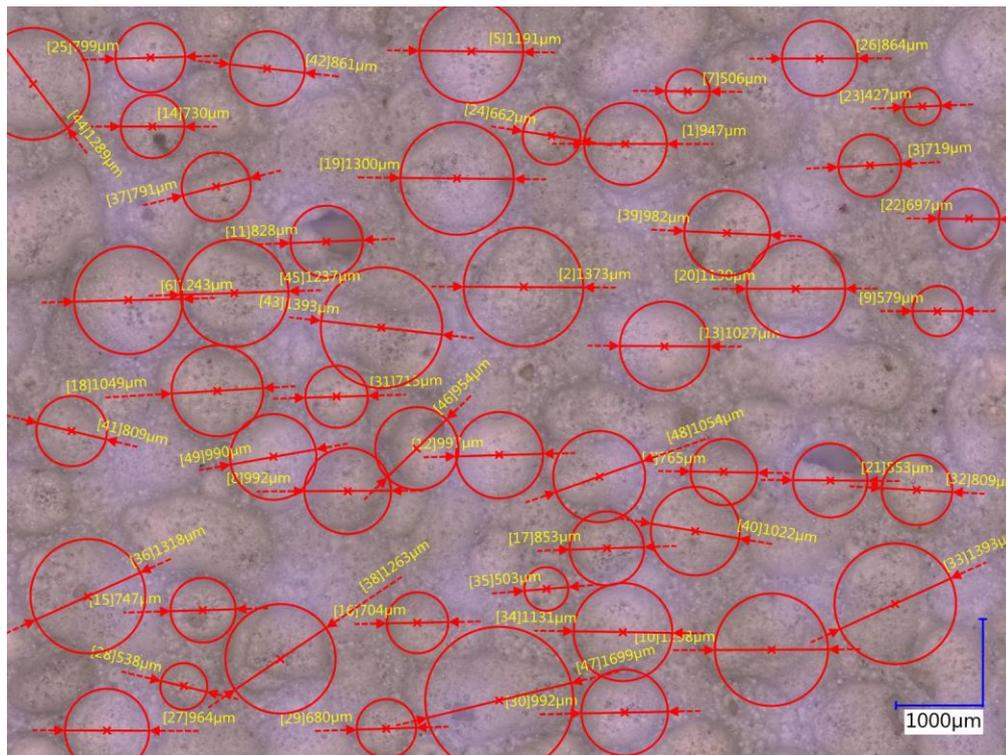


Abbildung 19: Porenverteilung der Probe 26 per Digitalmikroskop. Messung der durchschnittlichen Schaumporen-Durchmesser.

Chemikalienbeständigkeit

Die Ergebnisse der Chemikalienbeständigkeit ist in Abbildung 20 dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass nach 24 Stunden Einwirkzeit nur Säuren, Lösemittel wie Aceton und Isopropanol sowie Wasser und Ethanol das Material nicht verändern. Bei der Verwendung von Speiseöl entstehen typische Ölflecken. Wird dagegen mit Kaliumhydroxid (KOH) eine starke Base verwendet, so hat sich die Struktur des Schaums sichtbar verändert. Es ist in diesem Fall ein Loch entstanden. In einem zweiten Versuch wurden KOH-Lösungen mit unterschiedlichen pH-Werten hergestellt und ermittelt, wie sich das Material nach 24 h verändert hat. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt. Dort ist erkennbar, dass ab den Experimenten mit einer KOH-Lösung, welche einen pH-Wert von kleiner 13 besitzt, keine Veränderungen der Oberflächen auftreten. Nur der Einsatz von sehr konzentrierten Basen zerstört das Material. Solche Basen werden im normalen Einsatz eines Gebäudes in der Regel nicht verwendet, so dass dieser Schaum gegen übliche Alltagschemikalien inert ist.

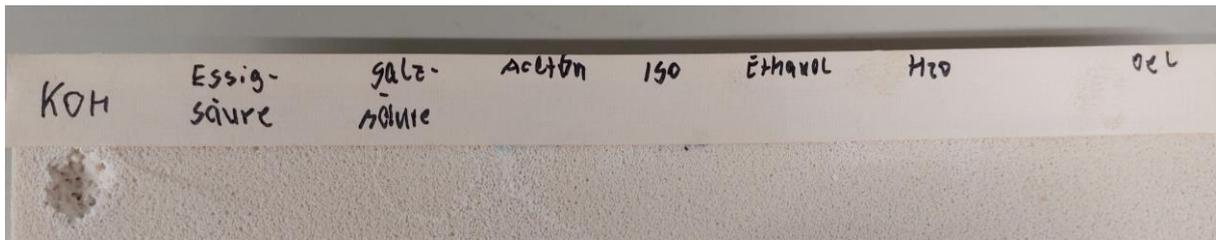


Abbildung 20: Ergebnis der Durchführung der Chemikalienbeständigkeit.

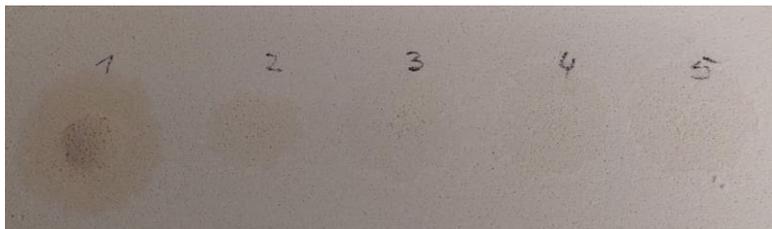


Abbildung 21: Ergebnisse der Prüfung auf Chemikalienbeständigkeit der Probe gegenüber Kaliumhydroxidlösungen mit unterschiedlichen pH-Werten (1: pH = 15; 2: pH = 13,7; 3: pH = 12,8; 4: pH = 12; 5: pH = 11,7).

Untersuchung des Emissionsverhaltens gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021)

Der Montageschaum A1 wurde auf sein Emissionspotential unter Anwendung des AgBB-Bewertungsschemas (2021) untersucht und bewertet, um sicherzustellen, dass potentielle Emissionen flüchtiger organischer Stoffe die Gesundheit nicht gefährden und auch keine unzumutbaren Belästigungen, etwa durch Gerüche, verursachen. Die Emissionsprüfung erfolgte gemäß der Vorgaben der DIN EN 16516:2020-10 [2] mit Bestimmung der Emissionen nach einem Prüfzeitraum von 3, 7 und 28 Tagen. Die Auswertung bzw. Bewertung der Emissionen erfolgte gemäß des AgBB-Bewertungsschemas (Version 2021 mit NIK-Werteliste 2020) und ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Folgende Prüfparameter wurden erfasst:

- Flüchtige organische Verbindungen (VOC) gemäß DIN ISO 16000-6:2022-03
- Leichtflüchtige Aldehyde gemäß DIN ISO 16000-3:2013-01
- C1- und C2-Carbonsäuren gemäß VDI 4301 Blatt 7:2018-10
- Geruchsstoffemissionen (empfundene Intensität, hedonische Wirkung) gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11

Während der gesamten Prüfdauer konnten nahezu keine leichtflüchtigen Aldehyde nachgewiesen werden (Bestimmungsgrenze $\leq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Lediglich Formaldehyd und Acetaldehyd wurden in geringen Mengen vom Material freigesetzt. Somit stellten die leichtflüchtigen Aldehyde bei dieser Probe eine untergeordnete Rolle dar. Gleiches gilt für die C1- und C2-Carbonsäuren Ameisensäure und Essigsäure. Beide Komponenten konnten nur in geringen Konzentrationen über die gesamte Prüfdauer von 28 Tagen nachgewiesen werden.

Demgegenüber war der untersuchte Schaum eine sehr starke Quelle für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Als Hauptemittent wurde die Verbindung 1,2-Propandiol identifiziert, die in hohen Konzentrationen über den gesamten Prüfzeitraum von der Probe freigesetzt wurde. Die Konzentrationen von 1,2-Propandiol stiegen dabei von anfänglich 30481 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h) auf 79896 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (28d) über 28 Tage an. Aufgrund der sehr hohen Konzentrationen des mehrwertigen Alkohols erfüllte das untersuchte Material nicht die Anforderungen der Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten gemäß AgBB-Bewertungsschema 2021, NIK-Liste² 2020. Der jeweilige Grenzwert für die Parameter „TVOC-Wert“ und „R-Wert“ wurde nach 3 und 28 Tagen bzw. nach 28 Tagen überschritten. Darüber hinaus hat der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR), der am Umweltbundesamt (UBA) angesiedelt ist, für die Substanz 1,2-Propandiol Innenraumrichtwerte (RW II: 0,60 mg/m^3 ; RW I: 0,060 mg/m^3) abgeleitet. Auch wenn diese ausschließlich zur Bewertung von Luftfremdstoffen in realen Innenräumen unter Nutzungsbedingungen anzuwenden sind und nicht zur Bewertung von Messergebnissen herangezogen werden dürfen, die im Rahmen von Prüfkammermessungen erhoben wurden, ist davon auszugehen, dass es bei Verwendung des Schaums im Innenraum durch die Emissionen des Materials ggf. zu Richtwertüberschreitungen kommen kann.

Tabelle 7: Ergebnisse der Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021) von Probe A1-Schaum.

Parameter	3. Tag		28. Tag	
	Messwert	Anforderungen	Messwert	Anforderungen
TVOC [mg/m^3]	49,624	≤ 10	79,972	$\leq 1,0$
TSVOC [mg/m^3]	< 0,005	-	< 0,005	$\leq 0,1$
Kanzerogene Stoffe [mg/m^3]	< 0,001	$\leq 0,01$	< 0,001	$\leq 0,001$
VOC ohne NIK [mg/m^3]	0,197	-	0,021	$\leq 0,1$
R-Wert	23,701	-	38,194	≤ 1
Empfundene Intensität [pi]			2,4	7
Anforderungen gemäß AgBB-Schema erfüllt? (Version Juni 2021, NIK-Liste 2020)		Nein		Nein

Zusätzlich zur Freisetzung der flüchtigen organischen Verbindungen wurde das Material auf sein Geruchspotential mittels einer geschulten Prüfergruppe geprüft. Hierbei wurden die Parameter der empfundenen Intensität, der hedonischen Wirkung und der Geruchsart nach einer Prüfzeit von 28 Tagen bewertet.

Das Material wurde von der Probandengruppe mit einer empfundenen Intensität von 2,4 pi als schwache Geruchsquelle bewertet. Die hedonische Wirkung des Materials wurde mit 0,6 als weder angenehme noch unangenehme Quelle durch die Testpersonen wahrgenommen. Der Großteil der Probanden beschrieb den Geruch als leicht holzig. Vereinzelt wurde die Probe als teppichartig empfunden.

Die geruchliche Bewertung von Bauprodukten ist im aktuellen AgBB-Bewertungsschema (2021) auf freiwilliger Basis aufgeführt. Die vorläufige Anforderung liegt dabei für die Geruchsintensität eines Bauproduktes bei 7 pi nach einer Prüfdauer von 28 Tagen. Somit liegt die ermittelte empfundene Intensität nach 28 Tagen mit 2,4 pi unterhalb der Anforderung des AgBB-Bewertungsschemas (2021).

² NIK: Niedrigste Interessierende Konzentration

Eine detaillierte Auflistung aller Untersuchungsergebnisse sowie der Prüfparameter der Emissionsuntersuchung finden Sie im Anhang in Tabelle 10 - Tabelle 12.

Wasserdampfdiffusion

Während der Bestimmung der Wasserdampfdiffusion wird die Diffusion von Wasserdampf aus einem Gefäß (Wet-Cup-Verfahren) bez. in ein Gefäß hinein (Dry-Cup-Verfahren) untersucht. Dabei wird zu fest definierten Zeitpunkten das Gewicht bestimmt. Die Gewichtszunahmen sind für das Dry-Cup-Verfahren in Abbildung 22 und für das Wet-Cup-Verfahren in Abbildung 23 dargestellt. Wie zu erwarten, nehmen die Gewichte beim Erstgenanten mit der Zeit zu und beim Zweitgenanten ab. Aus den Werten lassen sich dann der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ), welcher als Quotient aus dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten der Luft und dem des betrachteten Stoffes definiert ist, nach der folgenden Formel berechnen:

$$\mu = \frac{s_d}{s} \quad (1)$$

mit

s_d = wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke

s = Probendicke

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl gibt an, wievielfach größer der Widerstand des Stoffes ist, verglichen mit einer gleich dicken Schicht ruhender Luft bei derselben Temperatur.

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m] ist die Dicke einer ruhenden Luftschicht, die den gleichen Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand hat wie der Probekörper. Dieser berechnet sich nach der folgenden Formel:

$$s_d = \frac{d_L \cdot A \cdot (p_1 - p_2)}{G - s_L - s_P} \quad (2)$$

Mit

d_L = Diffusionsleitkoeffizient

A = Probenfläche

p = Luftdruck

G = Wasserdampfdiffusionsstrom durch den Probekörper

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 8 dargestellt. Dabei ist erkenntlich, dass das Material diffusionsoffen ist. Erst für s_d Werte größer 0,5 m wird ein Material als diffusionshemmend eingestuft und ab 1500 m als diffusionsdicht.

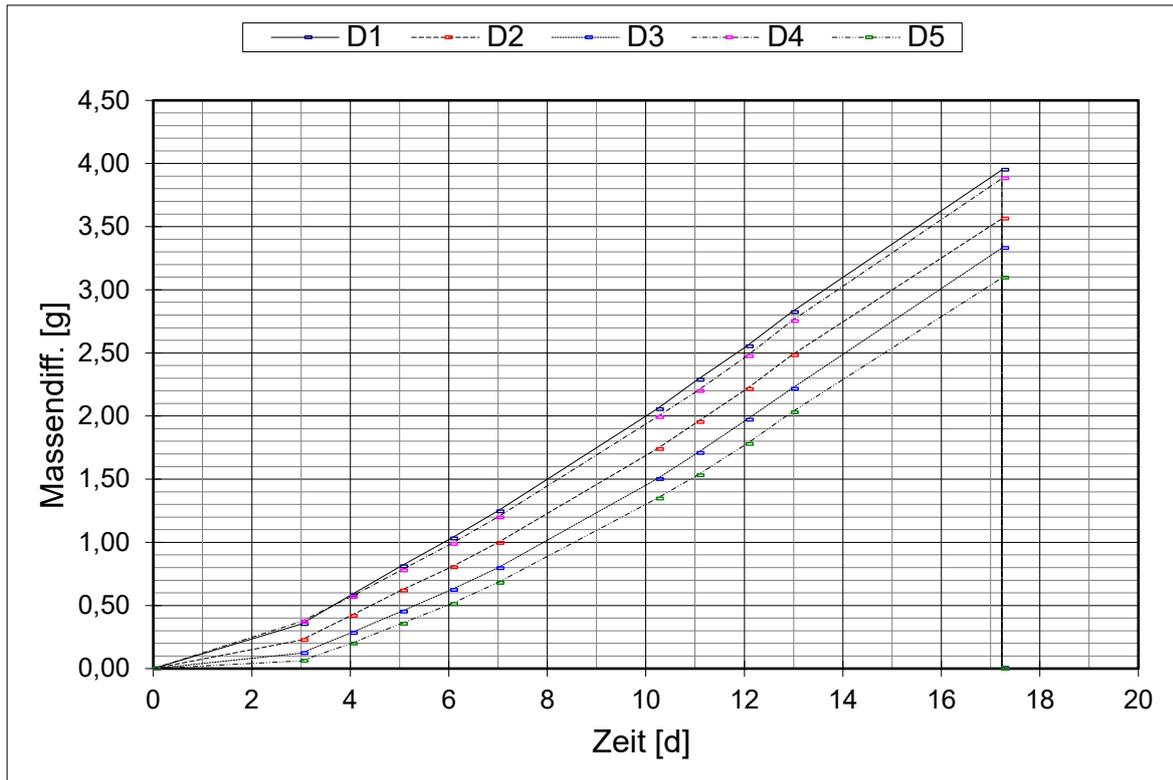


Abbildung 22: Massenzunahme während der Untersuchungen mit dem Dry-Cup-Verfahren.

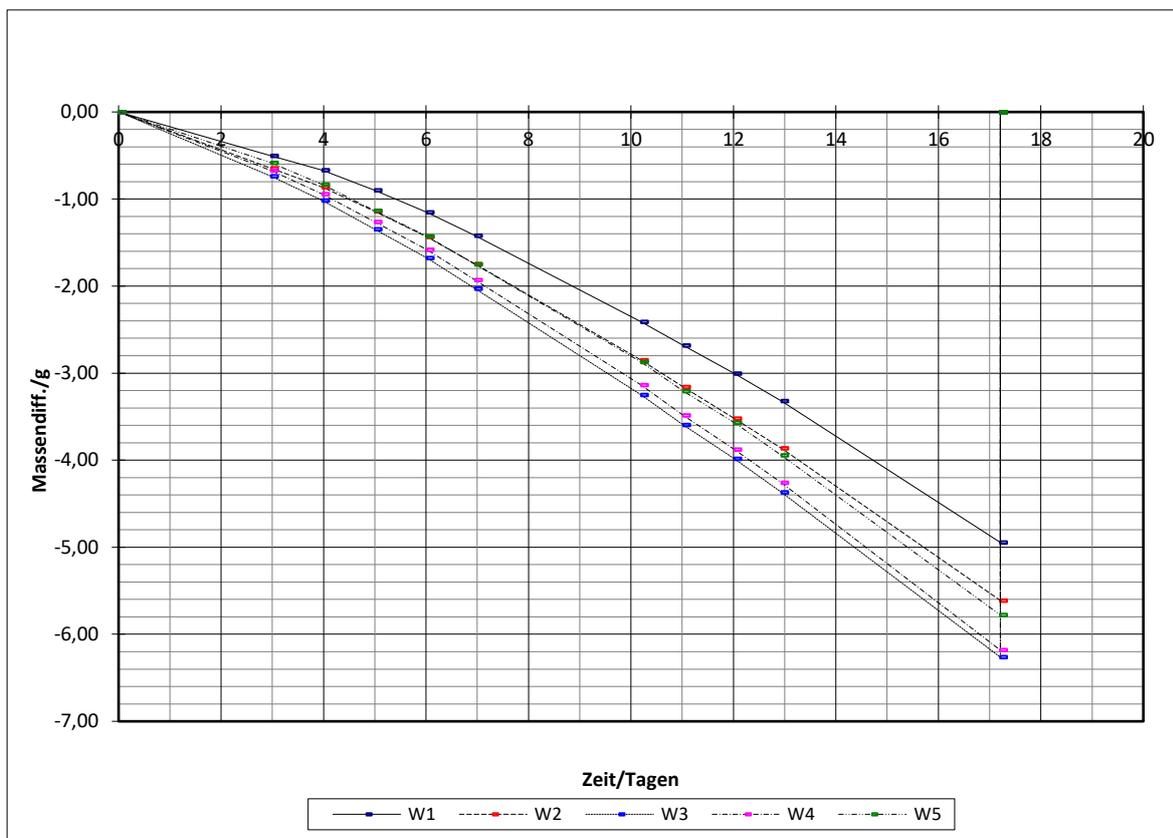


Abbildung 23: Massenabnahme während der Untersuchungen mit dem Wet-Cup-Verfahren.

Tabelle 8: Ergebnisse der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.

Methode	s_d - Wert [m]	μ -Wert
Dry-Cup	0,51	7,4
Wet-Cup	0,31	4,6

Scale-Up

Das Material 26 konnte im Labormaßstab bis 1 Liter, im Technikumsmaßstab bis 5 Liter und im letzten Scale-Up-Schritt in einer Ansatzgröße bis 25 Liter hergestellt werden; dieser Upscaling-Prozess ist in Abbildung 24 gezeigt. Zwischen den verschiedenen Ansatzgrößen wurden keine Unterschiede in den Viskositäten und Dichten der Komponente A oder B sowie im Verhalten des entstehenden Schaums beobachtet.

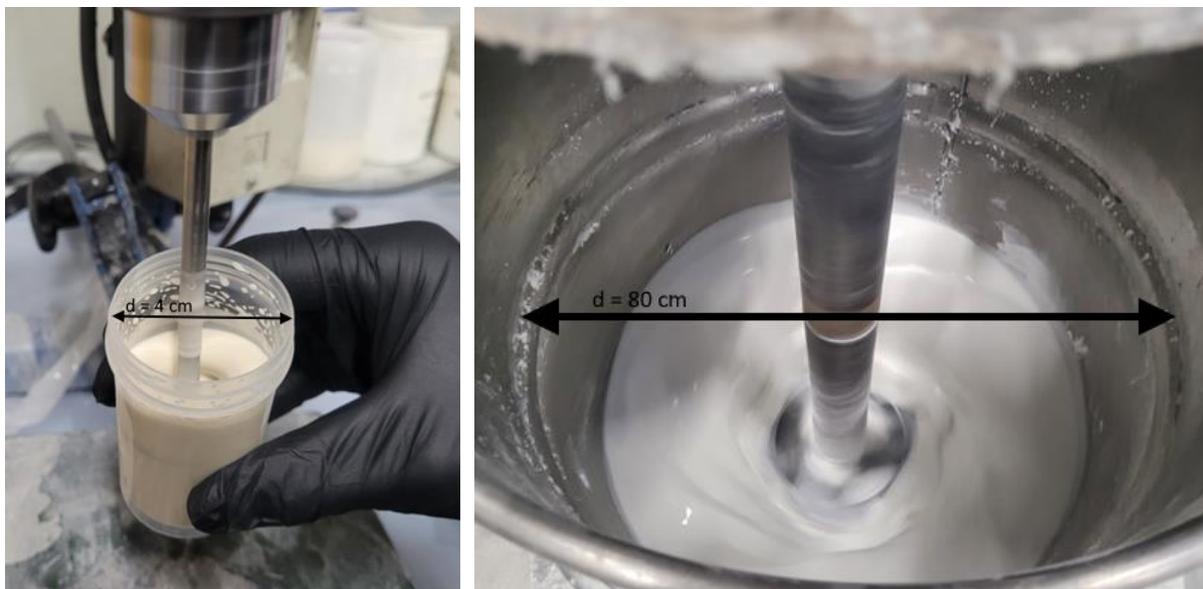


Abbildung 24: Scale-Up-Prozess über den Projektverlauf: Geringe Mengen im Labormaßstab (links) und bis zu 25 Liter im industriellen Dissolver (rechts).

Des Weiteren wurden im Projektverlauf sowohl kleinere Schaumkörper mit einem Volumen von ca. 0,1 Liter als auch geschäumte Platten mit 6,125 Liter bis hin zu geschäumten Platten mit 15,125 Liter hergestellt.

Anwendung

In diesem Projekt wurden verschiedene Anwendungsfelder analysiert. Dazu zählte der Einsatz als Montageschaum, das Verfüllen von Gipskartonplatten und das Herstellen von Formkörpern, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Verfüllung einer Brandschutztür (Anwendung als Montageschaum)

Ein 50 cm langes Aluminiumprofil einer Brandschutztür wurde mit der Probe 26 ausgeschäumt. Das auszuschäumende Volumen lag bei ca. 380 mL und konnte durch das Mischen von 150 g Komponente A und 15,9 g Komponente B (Probe 26) erfolgreich gefüllt und ausgeschäumt werden. Nach dem Ausschäumen wurde das gefüllte Profil bei 40 °C für zwei Tage getrocknet und anschließend mit einer Säge aufgeschnitten.



Abbildung 25: Schnitt und Aufsicht auf das ausgeschäumte Aluminiumprofil.

Die obige Abbildung 25 zeigt den Querschnitt des aufgesägten Aluminiumprofils. Der Schaum konnte das Profil vollständig füllen und zeigte insgesamt eine sehr gute Haftung auf der Aluminiumoberfläche.

Verwendung des Brandschutzschaums zur Steigerung des Feuerwiderstands von Gipskartonplatten

Abbildung 26 zeigt die Anwendung des Materials 26 zur Verfüllung der Schlitze in einer Gipskartonplatte. Nach dem Zusammenrühren von Komponente A und B wurde die Reaktionsmasse auf eine geschlitzte Gipskartonplatte gegeben und mit einem Spachtel in die Schlitze verteilt. Anschließend wurde eine zweite Platte auf die gefüllte Platte gesetzt und der Verbund aus den zwei Platten mit schäumendem Material dazwischen mit Spannklemmern zusammengedrückt.



Abbildung 26: Applikation des Schaums per Spachtelauftrag auf eine geschlitzte Gipskartonplatte.

Der entwickelte Schaum konnte die Schlitze ausfüllen und die beiden Platten zusätzlich miteinander verkleben. Dabei wurde eine gute Haftung auf der Gips- und der Kartonoberfläche erzielt. Überschüssiges Material quoll an den Seiten heraus und konnte leicht mit einer Klinge abgeschnitten werden.

Thermische Stabilität

1. Thermomechanische Analyse

Während dieser Untersuchung wird die Längenänderung einer Probe in Abhängigkeit der Temperatur online aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Messung unter Sauerstoff- oder Stickstoffatmosphäre sind in Abbildung 27 dargestellt. Dort ist erkennbar, dass die Probe bis ca. 630 °C dimensionsstabil ist und anschließend anfängt zu schrumpfen. Unter thermischen Bedingungen, also für Messungen, welche unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt werden, schrumpfte das Material bis ca. 820 °C um ca. 55 % und blieb dann annähernd konstant. Für die Messungen unter Sauerstoffatmosphäre herrschten oxidative Bedingungen, so dass das Material im

selben Temperaturbereich bis auf 20 % schrumpfte und im weiteren Temperaturverlauf sich um ca. 15 Prozentpunkte wieder expandierte. Mit den Messungen kann gezeigt werden, dass der Montageschaum in den üblichen Temperaturbereichen, in der er ohne Brandbedingungen eingesetzt wird, kein Schrumpfverhalten zeigt.

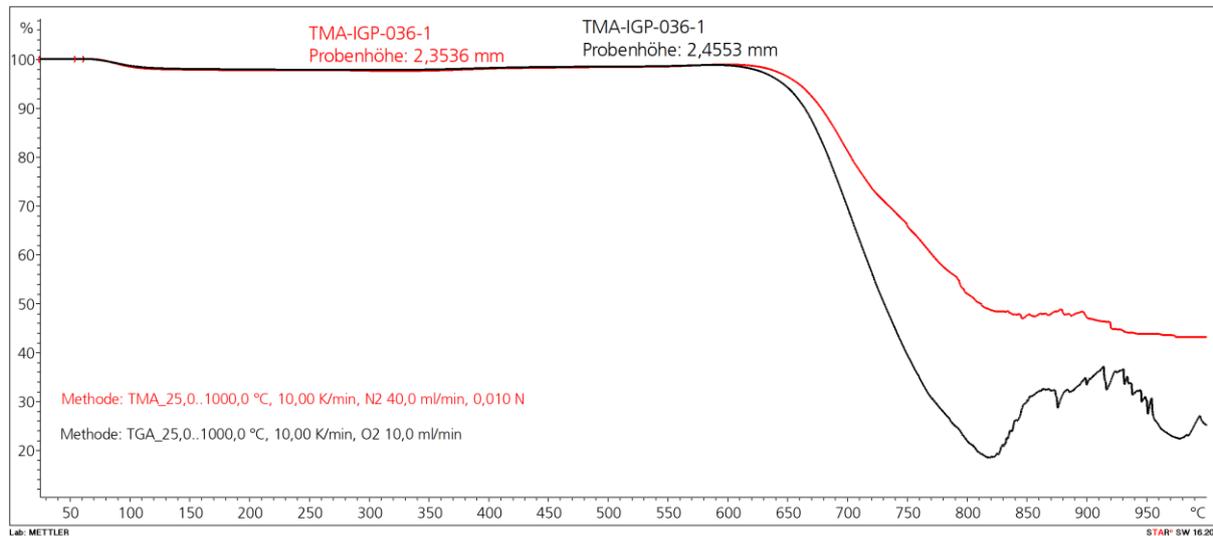


Abbildung 27: Thermische Analyse des ausgehärteten Montageschaums.

2. Bestimmung des Feuerwiderstands

Um den Feuerwiderstand der Bauteile zu bestimmen, wurden diese mittels Einheitstemperaturkurve so lange beflammt, bis auf der dem Feuer abgewandten Seite die mittlere Temperaturerhöhung an allen Teilen 140 K beträgt und dabei an keinem Messpunkt eine Temperaturerhöhung von 180 K überschreitet.

Die Temperaturentwicklung auf der dem Feuer abgewandten Seite für die gefüllte und ungefüllte geschlitzte Gipskartonplatte ist in Abbildung 28 dargestellt. Dabei wurden alle Versuche so lange durchgeführt, bis eines der Versagenskriterien überschritten wurde. Es ist zu erkennen, dass kurz nach Beginn beider Versuche die Temperatur um 50 K bzw. 70 K steil ansteigt. Ab Minute 4 bzw. Minute 7 blieb die Temperatur auf der dem Feuer abgewandten Seite konstant. Dieses Plateau hält im Falle der ungefüllten Platte für ca. 7 Minuten und für die gefüllte Platte für ca. 20 min. Anschließend steigt die Temperatur wieder kontinuierlich an, so dass der Versuch nach 15 bzw. 37 Minuten abgebrochen wurde. Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Gipsfaserplatte ab einer gewissen Einwirktemperatur das gebundene Kristallwasser freisetzt und durch den endothermen Verdampfungsvorgang die Temperatur für eine gewisse Zeit konstant gehalten werden kann. Gleichzeitig sind durch die Schlitze, die zum Erstellen von 3D-Bauteilen notwendig sind, Fehlstellen eingebaut, wodurch die Wärme einfacher durch das Material geführt werden kann. Werden die Schlitze dagegen mit dem Montageschaum gefüllt, so wird das Bauteil brandschutztechnisch ertüchtigt und verbessert die Feuerwiderstandsdauer um ca. 22 min. Die Probekörper nach der Feuerwiderstandsprüfung sind in Abbildung 29 dargestellt. Wobei die ungefüllte Gipskartonplatte einen bedeutend stärkeren Zerstellungsgrad nach der Prüfung aufwies als die gefüllte.

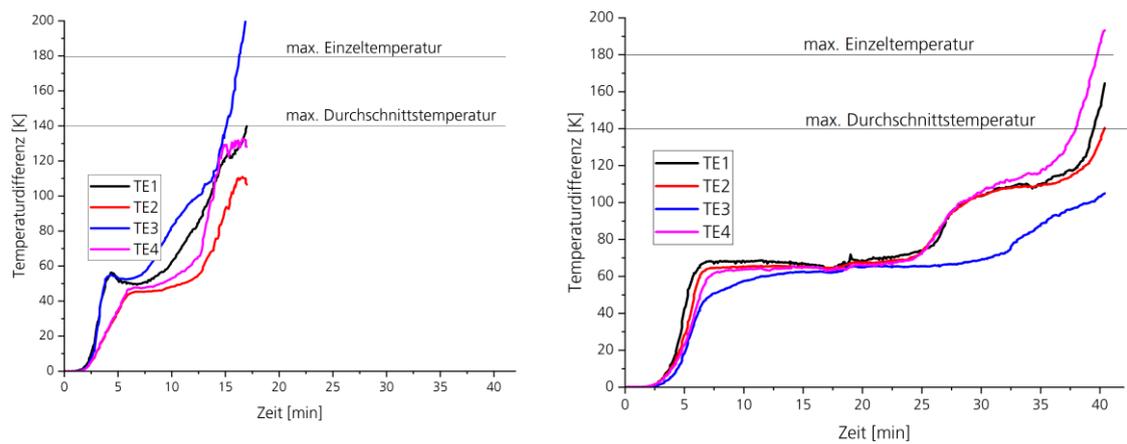


Abbildung 28: Temperaturentwicklung während der Feuerwiderstandsprüfung auf der dem Feuer abgewandten Seite für die gefüllte (rechts) und ungefüllte (links) geschlitzte Gipskartonplatte.



Abbildung 29: Probekörper nach der Feuerwiderstandsprüfung für die gefüllte (rechts) und ungefüllte (links) geschlitzte Gipskartonplatte.

Herstellen von Dämmboxen für den TGA-Bereich

Die bei der GWK hergestellten Dämmboxen sind in Abbildung 30 dargestellt: Dabei konnte gezeigt werden, dass aus dem entwickelten Schaum Dämmboxen hergestellt werden können. Um die Herstellung teilweise automatisiert vornehmen zu können, sind weitere FuE-Arbeiten erforderlich, die in einem Folgeprojekt bearbeitet werden.



Abbildung 30: Hergestellte Dämmboxen.

Praxistest

Im Rahmen der Praxistests konnte gezeigt werden, dass das ausgehärtete Material mit üblichen Geräten bearbeitet werden konnte. Dazu zählt das Sägen mit einer Bandsäge sowie das Bohren, Schleifen und Fräsen. Daraus folgt, dass das ausgehärtete Material auf der Baustelle bei Bedarf nachgearbeitet werden kann.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, einen Montageschaum zu entwickeln, welcher nichtbrennbar ist und eine gute Dämmeigenschaft besitzt.

Die Entwicklungsarbeiten erfolgten unter Zuhilfenahme der statistischen Versuchsplanung, wodurch es möglich war, die Anzahl der Experimente zu reduzieren und gleichzeitig Informationen bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Komponenten untereinander zu erhalten. Der Versuchsplan bestand aus 72 Rezepturen, die hergestellt und bezüglich Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und Verbrennungswärme charakterisiert wurden. Nach Auswertung der Ergebnisse sind fünf Rezepturen als vielversprechend deklariert worden, die sowohl den Grenzwert bezüglich der Verbrennungswärme von 2000 J/g nicht überschreiten und gleichzeitig eine Wärmeleitfähigkeit von kleiner 90 mW/mK besitzen. Des Weiteren wurde mit der Design Expert Software die optimale Rezeptur ermittelt. Mit diesen sechs Rezepturen wurden anschließend verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um eine Rezeptur zu erhalten, mit der die Abschlusscharakterisierung durchgeführt werden kann. Die folgenden Methoden wurden dafür angewandt:

- Untersuchung im Nichtbrennbarkeitsofen
- Zug- und Druckverhalten
- Wasseraufnahme
- Schaumverhalten

Während der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine Rezeptur für alle dargestellten Parameter die beste Performance gezeigt hat. Diese Rezeptur hat die Prüfung im Nichtbrennbarkeitsofen mit Bravour bestanden und besitzt ein besseres Druck- und Zugverhalten als die normativ geforderten Werte für das Referenzmaterial Blähglas. Die Wasseraufnahme ist dagegen zu hoch und muss durch Zugaben von Hydrophobierungsmitteln angepasst werden. Bezüglich des Schaumverhaltens konnte gezeigt werden, dass der Schaum um den Faktor 3 zunimmt und genügend Zeit für die Verarbeitung besteht.

Mit der Rezeptur erfolgte im nächsten Schritt ein Scale-Up des Herstellungsprozesses sowie die Abschlusscharakterisierung unter verschiedenen Gesichtspunkten, die im Folgenden kurz zusammengefasst sind:

Tabelle 9: Kenndaten des entwickelten Montageschaums.

Parameter	Wert
Bewertung nach dem AgBB-Schema	Nicht bestanden, da zu viel 1,2 Propandiol emittiert wird
Chemikalienbeständigkeit	Beständig gegen übliche Haushaltschemikalien, sofern der pH-Wert kleiner 13 ist
Druckfestigkeit	945 kPa → oberhalb der normativen Anforderung des Referenzmaterials Blähglas
Entformungszeit	2-24 Stunden, abhängig von Probengröße + Temperatur

Lagerstabilität	Phasentrennung, jedoch aufrührbar
Nichtbrennbarkeitsofen	Masseverlust: 23 % Temperaturerhöhung: 2 K Keine Entflammung
Porenverteilung	Porendurchmesser: 952±274 µm
Querzugfestigkeit	106 kPa → oberhalb der normativen Anforderung des Referenzmaterials Blähglas
Rohdichte	220 kg/m ³
Schaumparameter	Schaumbeginn: Ca. 45 Sek. bei 23 °C Schaumende: Ca. 120 Sek. bei 23 °C Schaumfaktor: 2,67-3 bei 23 °C
Verarbeitungszeit	45 Sek. bei 23 °C
Verbrennungswärme	1847 J/kg
Wärmeleitfähigkeit	75 mW/mK
Wasserdampfdiffusion	Diffusionsoffen

Der entwickelte Schaum wurde auf Anwendbarkeit in drei verschiedenen Szenarien analysiert:

1. Anwendung als Montageschaum

Hier konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, einen Zwischenraum homogen zu verschäumen und gleichzeitig eine sehr gute Haftung zum Aluminiumprofil herzustellen.

2. Verwendung des Brandschutzschaums zur Steigerung des Feuerwiderstands von Gipskartonplatten

In diesen Versuchen war es möglich, eine geschlitzte Gipskartonplatte zu verfüllen und gleichzeitig den Feuerwiderstand um ca. 22 Minuten zu verbessern.

3. Herstellen von Dämmboxen für den TGA-Bereich

Mit dem Montageschaum kann in Formen geschäumt werden, um daraus Dämmboxen zur Isolation von Heizungen in Bereichen, in denen ein Anforderung nichtbrennbar besteht, herzustellen.

Der entwickelte Montageschaum weist hervorragende Eigenschaften auf, die der Tabelle 9 entnommen werden können. Trotzdem sind einige Parameter noch nicht ideal. So müssen die Wasseraufnahme und die Wärmeleitfähigkeit verringert werden sowie die Emission an 1,2-Propandiol angepasst werden. Diese Herausforderungen wurden ab 01.11.2023 in einem Folgeprojekt angegangen, welches vom BMBF über die Ausschreibung KMU-Innovativ Produktionsforschung gefördert wird. In dem Projekt wird neben der Optimierung der Rezeptur ein Herstellungsverfahren zur semi-kontinuierlichen Produktion von Dämmboxen entwickelt. Neben der IGP Chemie GmbH sind auch die GWK Kuhlmann GmbH und das Fraunhofer WKI in das Folgeprojekt involviert.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Dr. Kolb, Torsten (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI)

Terbeck, Robin (IGP Chemie GmbH)

Weitere Mitwirkende

Schulz, Nicole (Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI)

Projektpartner

IGP Chemie GmbH, Wierlings Busch 42, 48249 Dülmen

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Riedenkamp 3, 38108 Braunschweig

WF - Formprojekt GmbH, Wierlings Busch 52, 48249 Dülmen

GWK Kuhlmann GmbH, Franz-Kleine-Straße 16, 33154 Salzkotten

Literaturverzeichnis

AgBB Bewertungsschemas (2021), Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten, Herausgeber: Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten.

DIN 4102-1:1998-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

DIN 4102-8:2003-10 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 8: Kleinprüfstand.

DIN 4102-9:1990-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 9: Kabelabschottungen - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

DIN 4102-11:1985-12, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 11: Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Abschlüsse ihrer Revisionsöffnungen - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

DIN EN 1607:2013-05 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene.

DIN EN 12667:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand.

DIN EN 13167:2015-04 Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) – Spezifikation.

DIN EN 13501-1:2019-05 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten.

DIN EN 16516:2020 Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft.

DIN EN ISO 1182:2010-10 Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten – Nichtbrennbarkeitsprüfung.

DIN EN ISO 1716:2018-10 Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten - Bestimmung der Verbrennungswärme (des Brennwertes).

DIN EN ISO 29469:2023-02 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung.

DIN EN ISO 29767:2019-11 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen.

DIN ISO 16000-3:2013-01 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern – Probenahme mit einer Pumpe.

DIN ISO 16000-6:2022 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID.

DIN ISO 16000-28:2021 Innenraumluftverunreinigungen - Teil 28: Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten.

Große-Perdekamp (2019) Schaummassen und deren Herstellung, Patent DE 10 2017 011 280 A1.

Habenicht, G. (2009), Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hestermann, U.; Rongen, L. (2018), Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2. 35. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

ISO 12572:2016-08 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß.

MBO (2002), Musterbauordnung in der Fassung vom November 2002, zuletzt geändert durch den Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22.02.2019.

MLAR (2016), Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie) in der Fassung vom 10.02.2015.

MVV TB (2019), Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, Ausgabe 2019/1.

VDI 4301 Blatt 7:2018-10 Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Carbonsäuren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prüfaufbau zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion (Prüfgefäß mit Trocknungsmittel (1), Probe (2) und Dichtmasse (3)).	16
Abbildung 2: Einfluss verschiedener Leichtfüllstoffe auf die Wärmeleitfähigkeit und die Verbrennungswärme des Montageschaums.	20
Abbildung 3: Gemessene Wärmeleitfähigkeit vs. Verbrennungswärme für alle Schäume aus dem Versuchsplan.	21
Abbildung 4 Auftragung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte der 74 Proben des Versuchsplanes.	22
Abbildung 5: Darstellung der Viskosität der beiden Ausgangskomponenten A und B.	23
Abbildung 6: Auftragung des Expansionsfaktors der 74 Proben.	24
Abbildung 7: Auftragung des Beginns und Ende des Aufschäumprozesses für alle 74 hergestellten Proben.	25
Abbildung 8: Ausgewertete Verbrennungswärme für unterschiedliche Zusammensetzungen des Schaums (F und G =1 %; H= 3 %, E und J = 0,2 % sowie K = 3,4 %) Die Komponente C ist in der linken Darstellung 4 %, in der Mitte 7% und rechts 10%).	26
Abbildung 9: Ausgewertete Wärmeleitfähigkeit für unterschiedliche Zusammensetzungen des Schaums (F = 1,3 %, G =1,4 %; H= 3,8 %, E und J = 0,2 % sowie K = 3,4 %) Die Komponente C ist in der linken Darstellung 4 %, in der Mitte 7 % und rechts 10 %).	26
Abbildung 10: Darstellung der optimalen errechneten Rezeptur und dem daraus errechneten Heizwert, Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte.	27
Abbildung 11: Ergebnisse der Nichtbrennbarkeitsversuche bezüglich Masseverlust und Temperaturerhöhung.	28
Abbildung 12: Ergebnisse der Wasseraufnahme nach der DIN EN ISO 29767. Die Probe IGP 086 ist im Wasser zerfallen, daher kann der Kennwert nicht bestimmt werden.	29
Abbildung 13: Wasseraufnahme 24h der Probe 26 im Vergleich zur Probe 026H mit Hydrophobierungsmittel.	30
Abbildung 14: Querzugfestigkeit der Schaumproben nach der DIN EN 1607.	31
Abbildung 15: Druckfestigkeit und Druckmodul bei F_{max} oder 10 % Stauchung nach der DIN EN ISO 29469 im Vergleich zu den Anforderungen an Schaumglas.	31
Abbildung 16: Lagerung der Probe 26 nach sechs Monaten. Linkes Bild A-Komponente (weiß) und B-Komponente (braun) vor dem Aufrühren und rechter Teil nach dem Aufrühren.	32
Abbildung 17: Wärmeleitfähigkeit der Probe 26 als Funktion der Temperatur.	33
Abbildung 18: Temperaturabhängigkeit des Schäumens - als Maß für die Temperaturabhängigkeit der Verarbeitungszeit.	33
Abbildung 19: Porenverteilung der Probe 26 per Digitalmikroskop. Messung der durchschnittlichen Schaumporen-Durchmesser.	34
Abbildung 20: Ergebnis der Durchführung der Chemikalienbeständigkeit.	35

Abbildung 21: Ergebnisse der Prüfung auf Chemikalienbeständigkeit der Probe gegenüber Kaliumhydroxidlösungen mit unterschiedlichen pH-Werten (1: pH = 15; 2: pH = 13,7; 3: pH = 12,8; 4: pH = 12; 5: pH = 11,7).	35
Abbildung 22: Massenzunahme während der Untersuchungen mit dem Dry-Cup-Verfahren.	38
Abbildung 23: Massenabnahme während der Untersuchungen mit dem Wet-Cup-Verfahren.	38
Abbildung 24: Scale-Up-Prozess über den Projektverlauf: Geringe Mengen im Labormaßstab (links) und bis zu 25 Liter im industriellen Dissolver (rechts).	39
Abbildung 25: Schnitt und Aufsicht auf das ausgeschäumte Aluminiumprofil.	40
Abbildung 26: Applikation des Schaums per Spachtelauftrag auf eine geschlitzte Gipskartonplatte.	40
Abbildung 27: Thermische Analyse des ausgehärteten Montageschaums.	41
Abbildung 28: Temperaturentwicklung während der Feuerwiderstandsprüfung auf der dem Feuer abgewandten Seite für die gefüllte (rechts) und ungefüllte (links) geschlitzte Gipskartonplatte.	42
Abbildung 29: Probekörper nach der Feuerwiderstandsprüfung für die gefüllte (rechts) und ungefüllte (links) geschlitzte Gipskartonplatte.	42
Abbildung 30: Hergestellte Dämmboxen.	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für die Prüfung im Bombenkalorimeter.	10
Tabelle 2: Grenzwerte für die Prüfung im Nichtbrennbarkeitsofen.	10
Tabelle 3: Komponenten des Versuchsplans mit Angabe der minimalen und maximalen Gewichtsmenge.	15
Tabelle 4: Zusammenfassung der optimierten Rezeptur.	27
Tabelle 5: Rechnerisch und experimentell ermittelte Kennwerte für den optimalen A1-Schaum.	27
Tabelle 6: Zusammenfassung ermittelte Entformungszeit der Probe 26 für verschiedene Probegrößen und Temperaturen.	34
Tabelle 7: Ergebnisse der Auswertung gemäß AgBB-Bewertungsschema (2021) von Probe A1-Schaum.	36
Tabelle 8: Ergebnisse der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.	39
Tabelle 9: Kenndaten des entwickelten Montageschaums.	44
Tabelle 10 Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe 26.	52
Tabelle 11: Ergebnisse der organischen Säuren von Probe 26, Analyse gemäß DIN VDI 4301 Blatt 7:2018-10.	54
Tabelle 12: Ergebnisse der Geruchsbewertung von Probe 26 - Durchführung gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11.	55

Anhang

Tabelle 10 Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe 26.

RT	CAS-Nr.	Substanz	Konzentration in µg/m ³ nach				Ri-Wert nach			NIK-Liste 2020		
			24h	3d	7d	28d	3d	7d	28d	Info ⁶	Nr.	Wert
Analyse gemäß DIN ISO 16000-3												
	000050-00-0	Formaldehyd	13	13	13	11	0,130	0,130	0,110	<C6bag	7-22	100
	000075-07-0	Acetaldehyd	7	4	5	4		0,017		<C6bdg	7-20	300
	000107-02-8	Acrolein	< 2	< 2	< 2	< 2				<C6bad	7-23	14
	000123-38-6	Propanal	< 2	< 2	< 2	< 2				<C6bd	7-21	650
	000123-72-8	Butanal	< 2	< 2	< 2	< 2				<C6bd	7-1	650
	000067-64-1	Aceton	< 2	< 2	< 2	< 2				<C6b	8-10	12000 0
Analyse gemäß DIN ISO 16000-6												
4.72	000064-17-5	Ethanol _(Toluen)	2	2	< 1	< 1				<C6c		
5.30	000071-23-8	n-Propanol _(Toluen)	2	< 1	< 1	< 1				<C6c		
5.72	001066-40-6	Trimethylsilanol _(Toluen)	1	< 1	< 1	< 1				<C6c		
5.87	000075-65-0	tert-Butanol	32	5	1	< 1	0,008			bcd	4-4	620
6.40	000078-93-3	2-Butanon (MEK)	2	1	< 1	< 1				bd	8-1	20000
6.75	000064-19-7	Essigsäure	9	14	20	25	0,012	0,017	0,021	bd	9-1	1200
8.46	000110-82-7	Cyclohexan	1	< 1	< 1	< 1				b	2-3	6000
8.54	000071-36-3	n-Butanol	17	4	< 1	< 1				bd	4-6	3000

8.90	000107-98-2	1-Methoxy-2-propanol	4	2	1	< 1				bd	6-8	7900
8.97	000116-09-6	1-Hydroxy-2-propanon	10	10	13	14	0,005	0,006	0,007	bd	8-9	2100
17.51	000057-55-6	1,2-Propandiol	*30481	*49367	*51186	*79896	23,508	24,374	38,046	b	6-1	2100
20.57	000627-69-0	2-Hydroxypropyl acetate (Toluen)	7	4	4	4						
21.13	006214-01-3	1,2-Propanediol, 2-acetate (Toluen)	3	< 1	< 1	< 1						
21.19	000108-94-1	Cyclohexanon	4	2	< 1	< 1				bd	8-5	410
21.63	005131-66-8	1-Butoxy-2-propanol	1	< 1	< 1	< 1				b	6-44	650
22.50	000623-39-2	1,2-Propanediol, 3-methoxy- (Toluen)	2	< 1	2	1						
24.32	000100-52-7	Benzaldehyd	2	2	1	1				bd	7-19	90
24.90	000108-95-2	Phenol	2	2	2	2				abd	5-1	70
25.08	000108-32-7	1,2-Propylencarbonat	13	7	6	1	0,007	0,006		b	6-40	1000
26.35	034590-94-8	DPGMME Isomeregemisch	3	3	2	2				b	6-12	3100
26.68	000623-84-7	Propylenglykoldiacetat	20	18	16	16	0,011	0,010	0,010	b	6-27	1600
26.99	000104-76-7	2-Ethyl-1-hexanol	8	6	4	2	0,020			bd	4-10	300
29.72		N-haltige Substanz (Toluen)	14	9	6	3						
33.51	000937-05-3	Cyclohexanol, 4-(1,1-dimethylethyl)-, cis- (Toluen)	28	22	11	2						
33.95	021862-63-5	Cyclohexanol, 4-(1,1-dimethylethyl)-, trans- (Toluen)	176	166	106	21						
Summe VVOC (< C6) ¹ :			< 5	< 5	< 5	< 5						
Summe VOC (C6-C16) als TVOC _{Originalresponse} ^{1,2} :			*30815	*49624	*51364	*79972						
Summe VOC (C6-C16) als TVOC _{Toluen} gemäß DIN EN 16516 ^{1,3} :			8014	12241	12648	19526						
Summe VOC (C6-C16) als TVOC _{Toluen} gemäß DIN EN ISO 16000-6 ⁴ :			8177	12461	12853	19813						
Summe SVOC (> C16) ¹ :			< 5	< 5	< 5	< 5						
Summe VOC ohne NIK ¹ :			225	197	123	21						
Summe kanzerogene Substanzen ⁵ :			< 1	< 1	< 1	< 1						

R-Wert ⁶ (Summe aller Ri-Werte, dimensionslos)	23,701	24,560	38,194
---	--------	--------	--------

(Die tiefgestellt angegebenen Fragmente/Substanzen wurden als Referenz für die Quantifizierung verwendet)

¹ Die Berücksichtigungsgrenze liegt bei 5 µg/m³

² Die NIK-Stoffe wurden mit der Originalsubstanz und die nicht NIK-Stoffe mit Toluol quantifiziert

³ Summe TVOC_{Originalresponse} mit Toluol quantifiziert

⁴ Summe aller gemessenen VOC mit Toluol quantifiziert

⁵ Summe kanzerogene Substanzen gemäß AgBB

⁶ R-Wert (Summe aller Ri-Werte = Summe aller Quotienten (Ci / NIKi),

⁷ Zusatzinformationen: **a** akut toxische Verbindung Kat. 1+2+3 (nach UN-GHS/CLP); **b** Deutsche NIK-Liste; **c** ‚safe sampling volume‘ zu klein, Minderbefunde möglich;

d geruchsrelevant; **e** Siedepunkt der Substanz ist höher als die thermische Obergrenze des Desorbers, Minderbefunde möglich; **f** vermutlich vom Holzanteil freigesetzt;

g chronisch toxische Verbindung CMR Kat. 1A+1B (nach UN-GHS/CLP); **h** aromatische Substanzen; **i** chlorierte Substanzen;

l: spezifisch zielorgan-toxische Verbindung STOT RE1+SE; **p** gelistet in Proposition 65; **<C6** WVOC-Substanz; **>C16** SVOC-Substanz.

* Dieser Messwert liegt oberhalb des Kalibrationsbereichs, daher ist der zu erwartende absolute Fehler höher als üblich. Dies kann zu Minderbefunden und Überlagerungen von anderen, gering konzentrierten Substanzen führen.

Tabelle 11: Ergebnisse der organischen Säuren von Probe 26, Analyse gemäß DIN VDI 4301 Blatt 7:2018-10.

CAS-No.	Substanz	Konzentration in µg/m ³ nach				Bestimmungsgrenze [µg/m ³]
		24h	3d	7d	28d	
64-18-6	Ameisensäure	<5	11	10	<5	5
64-19-7	Essigsäure	14	23	38	19	5

Hinweis: Die Bestimmung der organischen Säuren entspricht nicht der Vorgehensweise gemäß AgBB-Bewertungsschema. Aus diesem Grund fließen die Ergebnisse dieser Messungen nicht in die Auswertung und Beurteilung gemäß AgBB ein.

Tabelle 12: Ergebnisse der Geruchsbewertung von Probe 26 - Durchführung gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11.

Proband*	Intensität [pi]	Hedonik [dimensionslos]	Geruchsart
Proband 1	0	0	-
Proband 2	3	0	neutral, leicht holzig
Proband 3	4	0	Holzstaub
Proband 4	2	0	-
Proband 5	4	0	leicht holzig
Proband 6	3	1	Schaumstoff, Teppich, Gewebe
Proband 7	1	2	minimal holzig
Proband 8	2	1	-
Proband 9	3	1	Teppich, leicht fruchtig
Mittelwert	2,4	0,6	
Stdabw	1,3	0,7	
VB90%	0,8	0,5	

*Die geforderte Anzahl von zehn Probanden gemäß DIN ISO 16000-28:2021-11 konnte bei der Bestimmung der empfundenen Intensität nicht eingehalten werden. Dennoch liegt die Bewertung mit $\pm 0,8$ pi unterhalb des einzuhaltenden Vertrauensbereichs (90%) von ± 2 pi.

Bemerkungen: Die Probe P98611 ist mit einer empfundenen Intensität von 2,4 pi nach 28 Tagen eine sehr schwache Geruchsquelle. Die hedonische Wirkung des Materials wurde mit 0,6 als weder angenehme noch unangenehme Quelle durch die Probanden wahrgenommen. Der Großteil der Testpersonen beschrieb den Geruch als leicht holzig. Vereinzelt wurde die Probe als teppichartig empfunden.

Die geruchliche Bewertung von Bauprodukten ist im aktuellen AgBB-Schema auf freiwilliger Basis aufgeführt. Die im AgBB-Schema 2021 vorläufige Anforderung für die Geruchsintensität eines Bauproduktes liegt bei 7 pi nach 28 Tagen Prüfdauer. Somit liegt die ermittelte empfundene Intensität nach 28 Tagen mit 2,4 pi unterhalb der Anforderung des AgBB-Schemas 2021