

Christoph Sprengard, Susanne Regauer  
Carolin Kokolsky, Sebastian Treml, Max Engelhardt

**Programm zur wissenschaftlichen  
Begleitung der Produktentwicklung  
und Markteinführung von  
Dämmstoffen auf Basis von Aerogelen  
und Advanced Porous Materials (APM)**

F 3174

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0409-6

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

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

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

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

## Programm zur wissenschaftlichen Begleitung der Produktentwicklung und Markteinführung von Dämmstoffen auf Basis von Aerogelen und Advanced Porous Materials (APM)

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard  
Susanne Regauer, M.Sc  
Carolin Kokolsky, M.Sc  
Dr.-Ing. Sebastian Tremel  
Max Engelhardt, B.Eng

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft  
Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.61)

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



# FIW München

## Forschungsbericht FO-2015/09



**Titel:** Programm zur wissenschaftlichen Begleitung der Produktentwicklung und Markteinführung von Dämmstoffen auf Basis von Aerogelen und Advanced Porous Materials (APM)

**Gefördert durch:** Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
am 29. September 2015  
Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.61

**Bericht Nr.:** FO-2015/09

**Ausstellungsdatum:** 09.05.2018

**Seiten:** 125



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>6</b>
1.1	Aerogele und Advanced Porous Materials (APM)	7
1.2	Aerogele und APM in der Bauanwendung	8
<b>2</b>	<b>STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK</b>	<b>11</b>
2.1	<b>Rohstoffe und Herstellung von Aerogelen und APM</b>	<b>11</b>
	Aerogele	11
	Amorphe Kieselsäuren	15
2.2	<b>Nachhaltigkeit</b>	<b>16</b>
	Grundlagen	16
	Ökobilanzierung	18
	Recycling	21
2.3	<b>Bauphysikalisch wichtige Eigenschaften</b>	<b>23</b>
	Wärmeleitfähigkeit	23
	Feuchtetechnisches Verhalten	24
	Mechanische Eigenschaften	25
	Akustische Eigenschaften	25
2.4	<b>Typologisierung aktuell verfügbarer Produkte und Anwendungsgebiete</b>	<b>27</b>
2.5	<b>Alterungsmechanismen von APM</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG UND FORSCHUNGSANSATZ</b>	<b>33</b>
3.1	<b>Forschungsbereich A „Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss“</b>	<b>33</b>
	Problemstellung	33
	Forschungsansatz	34
3.2	<b>Forschungsbereich B „Untersuchungen zur Rezyklierfähigkeit“</b>	<b>35</b>
	Problemstellung	35
	Forschungsansatz	36
<b>4</b>	<b>FORSCHUNGSBEREICH A „UNTERSUCHUNG DER DAUERHAFTIGKEIT UNTER FEUCHTE- UND TEMPERATUREINFLUSS“</b>	<b>37</b>
4.1	<b>Material</b>	<b>37</b>
	Aerogelbasierte Produkte	37
	APM-Produkte	37

<b>4.2</b>	<b>Methoden</b>	<b>38</b>
	Methoden zur hygrothermischen Bauteilsimulation	38
	Methoden zur künstlichen Alterung	45
	Prüfmethode	48
<b>4.3</b>	<b>Versuchsplanung zu Forschungsbereich A</b>	<b>55</b>
<b>4.4</b>	<b>Ergebnisse zu Forschungsbereich A</b>	<b>58</b>
	Ergebnisse hygrothermische Bauteilsimulation	58
	Ergebnisse aus der künstlichen Alterung durch Klimalagerung	69
	Ergebnisse aus der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung	77
	Ergebnisse zur UV-Beständigkeit	80
	Ergebnisse aus der Strukturanalyse	81
	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Forschungsbereich A	95
<b>5</b>	<b>FORSCHUNGSBEREICH B „UNTERSUCHUNGEN ZUR REZYKLIERFÄHIGKEIT“</b>	<b>97</b>
<b>5.1</b>	<b>Einfluss der Zusammensetzung der Materialien auf die Trennbarkeit</b>	<b>97</b>
	Wärmedämmverbundsysteme	97
	Systeme mit rein mechanischer Befestigung	99
	Kerndämmung	99
<b>5.2</b>	<b>Versuchsplanung zu Forschungsbereich B</b>	<b>100</b>
<b>5.3</b>	<b>Ergebnisse zu Forschungsbereich B</b>	<b>101</b>
	Ergebnisse aus der Literaturrecherche	101
	Versuche zur Trennung und Sortierung	103
	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Forschungsbereich B	114
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION</b>	<b>116</b>
<b>7</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>121</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>122</b>

# 1 Einleitung

Bei der Erfüllung der Vorgaben an den Wärmeschutz der Gebäudehülle im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) steht heute eine breite Auswahl an Dämmstoffen am Markt zur Verfügung. Neben konventionellen und bereits erprobten Produkten werden regelmäßig neue und innovative Produkte entwickelt. Dazu gehören in den vergangenen Jahren insbesondere mikro- und nanoporöse Stoffe, die sich durch eine herausragend niedrige Wärmeleitfähigkeit auszeichnen. Dadurch ergeben sich Vorteile in der Anwendung. Wandaufbauten mit konventionellen Dämmstoffen erfordern bei den aktuellen Anforderungen an den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) hohe Dämmstoffstärken. Gerade wenn bei Sanierungen der Bausubstanz das Raumangebot begrenzt ist, kann so unter Umständen nur ein geringer energetischer Standard erreicht werden. Die Anwendung von APM und Aerogelen mit entsprechend niedriger Wärmeleitfähigkeit ermöglicht dann die Entwicklung platzsparender Lösungen mit einem gleichzeitig hohen energetischen Niveau.

Mit Hilfe der Nanotechnologie und nanostrukturierten Materialien wurden bereits für zahlreiche industrielle Anwendungen innovative und sehr leistungsfähige Lösungsansätze gefunden. Im Bereich des Bauwesens handelt es sich bei der wichtigsten Entwicklung um mikro- und nanoporöse Wärmedämmstoffe (advanced porous materials), die aufgrund ihrer hochwärmedämmenden Eigenschaften in der Zukunft eine Alternative auf dem Dämmstoffmarkt darstellen können. (TA-Swiss 2013)

Der Marktanteil von hochwärmedämmenden Materialien wie Aerogel-Dämmstoffen ist aktuell jedoch noch sehr gering. Die Ausschöpfung der Potentiale wird neben wirtschaftlichen Aspekten vor allem in einer Verunsicherung der Planer und Anwender vermutet, die allgemein gegenüber neuartigen Produkten und im speziellen gegenüber Produkten aus dem Bereich der Nanotechnologie besteht. Hier spielen gesundheitliche Bedenken eine ebenso große Rolle wie Ungewissheiten über das Langzeitverhalten. Auch ökologische Aspekte, wie Ökobilanzdaten und Recyclingfähigkeit können für den Anwender entscheidend sein und müssen daher für neue Bauprodukte untersucht und bewertet werden.

Durch die Erweiterung der Wissensbasis zu Dämmstoffen auf Basis von Aerogelen und APM soll eine sachgerechte und zweckmäßige Anwendung der neuen Produktgruppen gefördert werden. Ein erhöhtes Vertrauen in die Anwendung auf Basis neuer Erkenntnisse bezüglich Dauerhaftigkeit, hygrothermischer Belastbarkeit und ökologischer Eigenschaften soll zu einer breiteren Anwendung der Produkte beitragen. Ebenso sollen die neuen Erkenntnisse zu den APM- und Aerogel-Dämmstoffen die weitere Produktentwicklung fördern.

Da die bis dato geringen Produktionsmengen von APM- und Aerogel-Dämmstoffen bei einem steigenden Absatz noch ein erhebliches Rationalisierungspotential hinsichtlich der Herstellkosten erwarten lassen, sind bei einer Erhöhung der Akzeptanz und Anwendung deutliche Preissenkungen der Dämmstoffe realisierbar, was der

Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungs- oder energiesparenden Neubau-konzepten unter Anwendung von APM- und Aerogel-Dämmstoffen sehr zuträglich wäre.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden daher Untersuchungen zu den relevanten bauphysikalischen Eigenschaften und insbesondere zur Dauerhaftigkeit dieser neuartigen Dämmstoffe durchgeführt, um das Langzeitverhalten der Produkte zu bewerten, sowie Analysen zur Rezyklierfähigkeit durchgeführt. Das Vorhaben wird vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aufbauend auf einer umfangreichen Recherche zum aktuellen Stand der verfügbaren Produkte und Charakterisierung der im Baubereich wesentlichen Eigenschaften einer repräsentativen Auswahl an APMs und Aerogelen werden Untersuchungen des Alterungsverhaltens durchgeführt. Dadurch sollen die Gebrauchstauglichkeit der Stoffe für verschiedene Anwendungen im Bauwesen geprüft und Näherungswerte bezüglich der voraussichtlichen Lebensdauer der Produkte abgesichert werden.

## 1.1 Aerogele und Advanced Porous Materials (APM)

Mit Advanced Porous Materials werden allgemein neuartige, i.d.R. mit speziell angepassten oder neu entwickelten verfahrenstechnischen Mitteln hergestellte mikro-meso- nano- und makroporöse Stoffe bezeichnet. Es ist damit ein Überbegriff für technisch synthetisierte poröse Stoffe mit unterschiedlichsten Eigenschaften, die für spezielle Einsatzzwecke entwickelt wurden. Die Herstellung von Materialien mit möglichst hoher Porosität ist seit längerem Gegenstand der Forschung.

Im Bereich der Dämmstoffe lassen sich die folgenden wesentlichen Gruppen unterscheiden:

- Aerogele
- synthetisch amorphe Kolloide
- Nanoschäume

Die Stofftypen unterscheiden sich durch den zugrunde liegenden Herstellungsprozess.

Die am stärksten verbreitete Gruppe der APMs, die Aerogele, werden mittels des sogenannten Sol-Gel-Prozesses und anschließender Trocknung hergestellt. Gerade die Trocknung erfordert technisch sehr anspruchsvolle Verfahren, da diese für die Bildung der charakteristischen Feststoffstruktur verantwortlich ist. Die Erfindung des Aerogels geht bereits auf das Jahr 1932 zurück, als es S. S. Kistler erstmals gelang, die Flüssigkeit eines Gels durch Luft zu ersetzen, ohne dass dabei die Porenstruktur zerstört wurde. Ausgangsstoff für die Herstellung des Gels können verschiedene anorganische oder organische Stoffe sein, weshalb der Begriff Aerogel nicht einen bestimmten Stoff, sondern die eigenschaftsbildende Stoffstruktur beschreibt

(Huesing, Schubert 1998). Erste Aerogel-Produkte, die in industriellem Maßstab gefertigt werden können, sind von der US-Amerikanischen Firma Cabot im Jahr 2003 auf den Markt gekommen.

Unter den amorphen Kolloiden, die im Baustoffbereich als kompaktierte Partikel und teilweise mit Bindemitteln oder Stützfasern versehen eingesetzt werden, ist das pyrogene Siliziumoxid (auch pyrogene Kieselsäure genannt) als häufigster Vertreter zu betrachten. Pyrogenes Siliziumoxid wird durch einen technischen Verbrennungsprozess (Hochtemperaturpyrolyse) aus kristallinem Siliziumoxid (Sand) hergestellt, wobei große amorphe Partikel mit geringer Raumdichte entstehen.

Als Nanoschäume werden Schaumstoffe mit Porenstrukturen bezeichnet, deren Durchmesser im Bereich von wenigen Mikrometern oder geringer liegen. Technische Fortschritte dazu wurden in der Vergangenheit insbesondere bei der Entwicklung von Polyurethannanoschäumen gemacht. Dabei wurden Verfahren entwickelt bei denen das Treibmittel in Mikroemulsionen unter überkritischen Bedingungen aufschäumt.

Die Grundlagen der Herstellungsverfahren werden in Abschnitt 2.1 beschrieben.

Anwendung finden diese Materialien in einem breitgefächerten Feld. Vom Hochleistungsdämmstoff über die Pharmaindustrie bis hin zur Raumfahrt können die durch ihre besonderen Strukturen einzigartigen Stoffe eingesetzt werden. Dabei stehen oft das geringe Raumgewicht sowie die guten thermischen und elektrischen Übertragungseigenschaften im Vordergrund. Weitere technisch interessante Charakteristika von Aerogelen sind niedrige Schallübertragungsraten und eine hohe Transluzenz.

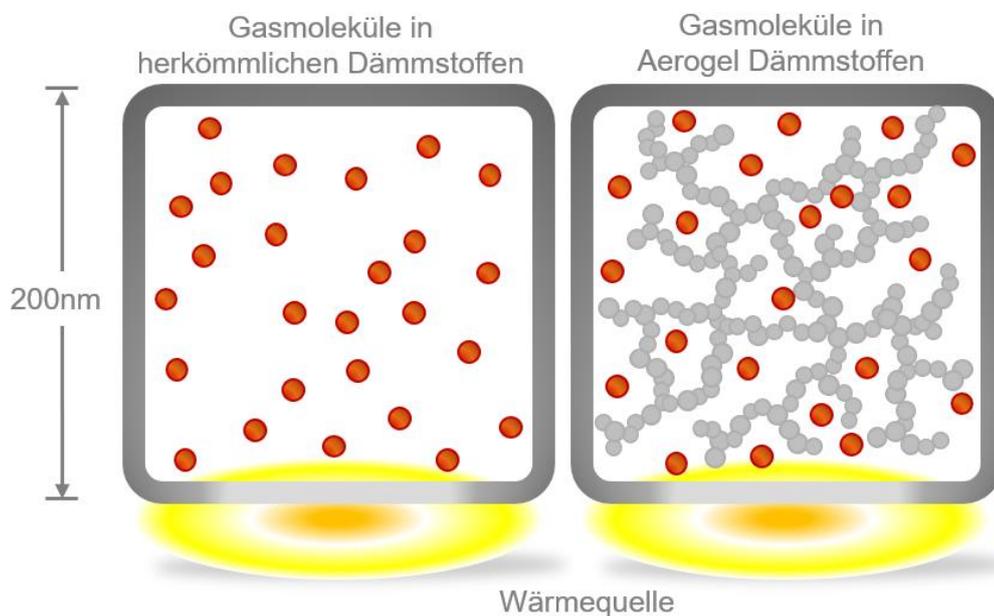
Pyrogene Kieselsäure findet als Thixotropierungsmittel z.B. in Lacken Anwendung, als Abbindebeschleuniger in zementhaltigen Baustoffen, als Kunststoff- und Lebensmittelzusatz oder als Entschäumer in Waschmitteln. Im Dämmstoffbereich ist pyrogene Kieselsäure als bewährtes Stützkernmaterial von Vakuum-Isolations-Paneelen im Einsatz.

Nachfolgender Abschnitt geht detaillierter auf die Anwendungen von APMs als Dämmstoffe im Baubereich ein.

## 1.2 Aerogele und APM in der Bauanwendung

Die herausragenden thermischen Eigenschaften der APM machen diese Stoffe für das Bauwesen besonders interessant und ordnen sie neben den Vakuumisolationspaneelen (VIP) der Gruppe der Hochleistungsdämmstoffe zu. Die Funktionsweise dieser auch als Super Insulating Materials (SIM) bezeichneten Materialien beruht auf einer weitgehenden Ausschaltung des Anteils der Gaswärmeleitfähigkeit.

Dieser Effekt wird bei Vakuumisolationspaneelen durch den sehr niedrigen Innendruck und die dadurch stark vergrößerte freie Weglänge der Luftmoleküle erzielt. Bei den APM hingegen liegen Porenräume im Bereich der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle des Porengases unter Normaldruck ( $< 60 \text{ nm}$ ) vor. Abbildung 1 soll die Funktionsweise von Aerogel- und APM-Dämmstoffen noch einmal verdeutlichen: Beide dargestellten Quadrate haben eine Kantenlänge von  $200 \text{ nm}$ , in ihnen bewegen sich freie Atome im Raum. In einem herkömmlichen Dämmstoff (linkes Quadrat) können die Atome Wärme in Form von Bewegungsenergie nahezu ungehemmt durch das Material tragen. Durch die Verkleinerung der Zwischenräume auf weniger als  $60 \text{ nm}$ , wie es beim APM und Aerogelen der Fall ist, wird die Bewegungsfreiheit der Atome sehr stark eingegrenzt. Auf diese Weise können sie kaum noch Wärme durch das Material transportieren (roda Licht- und Lufttechnik GmbH 2018).



**Abbildung 1 Funktionsweise eines APM (rechts) durch weitestgehende Ausschaltung der Gaswärmeleitung verglichen mit einem herkömmlichen Dämmstoff (links)**

Trotz der voranschreitenden Weiterentwicklung anderer Dämmstofftypen besitzen Aerogele das größte Potential nicht-evakuierter SIM-Dämmsysteme. Ein Vergleich der typischen Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Dämmstoffarten ist in Abbildung 2 dargestellt.

Der Einsatz von APMs als Dämmstoff im Bauwesen ist insbesondere aufgrund der sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit ein interessanter Anwendungsbereich. Mit einer Wärmeleitfähigkeit, die in etwa halb so groß ist wie die von konventionellen Dämmstoffen lassen sich bei gleicher Dämmwirkung deutlich schlankere Aufbauten ausführen.

Besonders bei begrenztem Platzangebot kommt der Vorteil von niedrigen Dämmstärken zum Vorschein wie z.B. bei Sanierungsmaßnahmen durch Innendämmung oder in städtischen Bereichen mit hoher Verdichtung. Auch bei der Dämmung von Fensteröffnungen können geringe Abmaße für den Lichteinfall vorteilhaft sein. Bei anderen Faktoren, die Beschränkungen der Dämmdicke zur Folge haben, wie z.B. ein geringer Dachüberstand, kann die Anwendung von APMs ein vorteilhafter Lösungsansatz sein, der das energetische Einsparpotential durch eine Sanierung signifikant erhöht.

Ein weiterer großer Vorteil ist die Anwendbarkeit und Verarbeitungsfähigkeit von gängigen APM-Produkten, die im Regelfall keine besonderen Vorkehrungen erfordert. Aktuell sind Produkte mit Aerogelen auf Silikat- oder auf Polyurethan-Basis soweit entwickelt, dass diese im Gebäudebereich eingesetzt werden können. Die Verringerung der Produktionskosten und die Optimierung der mechanischen Eigenschaften von Dämmstoffen auf Aerogelbasis stellen für die Hersteller am Markt jedoch noch Herausforderungen dar.

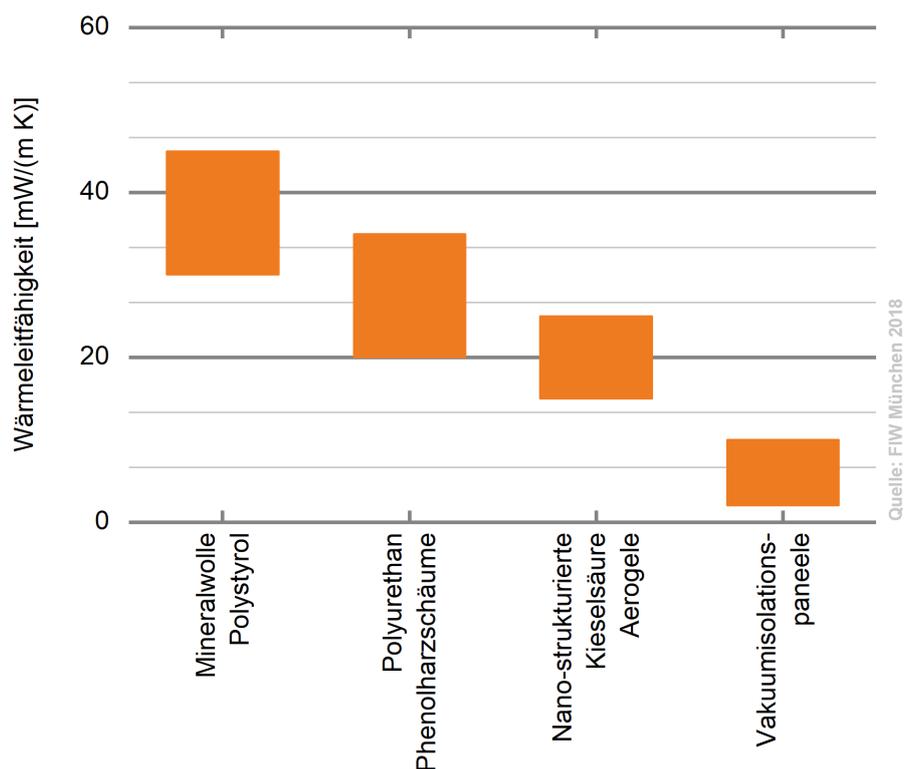


Abbildung 2 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Im Folgenden werden der Stand des Wissens bezüglich der Herstellung, Verarbeitung und wissenschaftlichen Aufklärung der Funktionsweise von APMs erläutert.

### 2.1 Rohstoffe und Herstellung von Aerogelen und APM

Verschiedene Ausgangsstoffe können für die Herstellung von APMs verwendet werden. Im Bauwesen handelt es sich bei einem Großteil der Anwendungen um Kieselsäure-Produkte, deren Eigenschaften auch aus Sicht der anorganischen Chemie schon sehr umfangreich bekannt sind. Die Herstellung von diesen Produkten wird deshalb ausführlich beschrieben. Weitere mögliche Ausgangsstoffe sind Aluminium-, Zinn-, Thorium- und Eisenoxide oder auch Cellulose.

#### **Aerogele**

Bei den Aerogelen handelt es sich um die am weitesten verbreitete Gruppe der APMs. Die Grundlagen und die Herstellung werden in den folgenden Punkten beschrieben.

#### Rohstoffe

Der Großteil der Aerogele basiert auf Siliziumdioxid, dennoch können auch aus anderen anorganischen und organischen Stoffen Aerogele hergestellt werden. Anzupassen ist das jeweils verwendete Lösungsmittel.

#### Strukturbildende Prozesse

Die ungeordnete, hochporöse, dreidimensionale Struktur der Aerogele entsteht durch einen sogenannten Sol-Gel-Prozess. Unter einem Sol versteht man eine Dispersion, in der frei bewegliche kolloide Teilchen mit Größen im Bereich von 1-1000 nm enthalten sind. Ein Gel hingegen besteht aus einem schwammigen, dreidimensionalen, festen Netzwerk, dessen Poren mit einer anderen Substanz (i.d.R. einer Flüssigkeit) gefüllt sind (Hüsing und Schubert 1998).

Der Sol-Gel-Prozess beginnt nun zunächst mit dem Wachstum der Sol-Partikel, woraufhin die Bildung von dreidimensionalen Clustern erfolgt (Aggregation), bis es schließlich zur Entstehung eines zusammenhängenden Netzwerks kommt (Gel). Im Laufe eines Reifungsprozesses wird die Interkonnektivität des Netzwerks verstärkt und ein feuchtes, sogenanntes Hydrogel entsteht. Dieser schrittweise Ablauf ist Abbildung 3 dargestellt (Fricke und Emmerling 1991).

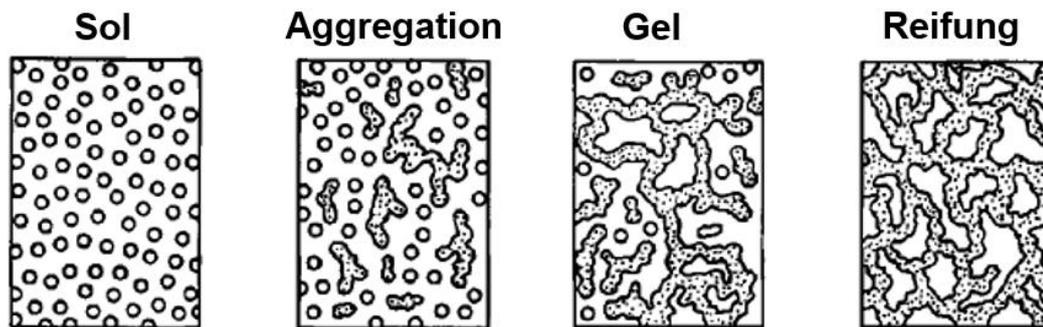


Abbildung 3 Ablauf des Sol-Gel-Prozesses (Fricke und Emmerling 1991)

Allgemein handelt es sich bei dem Sol-Gel-Prozess um ein nasschemisches Verfahren, das zur Synthese von Gelen auf Basis eines Sols eingesetzt wird. Neben Aerogelen können damit auch sehr feine Pulver, monolithische Keramiken und Gläser oder dünne Beschichtungen gewonnen werden.

Die Herstellung eines Aerogels analog zu ist Abbildung 3 wird nun noch einmal ausführlicher beschrieben. Das Sol wird aus einer sogenannten Vorstufen-Lösung gewonnen. In dieser Lösung sind meist Ausgangsstoffe wie Alkoxide von Metallen, Natriumsilikat oder Glykolester zusammen mit Wasser und einem Lösungsmittel enthalten. Die Rolle des Lösungsmittels, das zur Homogenisierung der Vorstufen benötigt wird, ist nicht zu unterschätzen. Auch weitere Parameter, die später die Eigenschaften des Aerogels bestimmen, lassen sich damit einstellen. Hierzu zählen die Art und Konzentration der Vorstufe, des Lösungsmittels und des Katalysators, aber auch Faktoren wie der pH-Wert und die Temperatur der Lösung. Um in der Vorstufen-Lösung das Wachstum von Sol-Partikeln anzuregen, wird eine Hydrolyse eingeleitet. In der folgenden Kondensation entsteht das Gel, dessen Poren mit Flüssigkeit gefüllt sind, woraus seine schwammartige Konsistenz resultiert. (Hüsing und Schubert 1998)

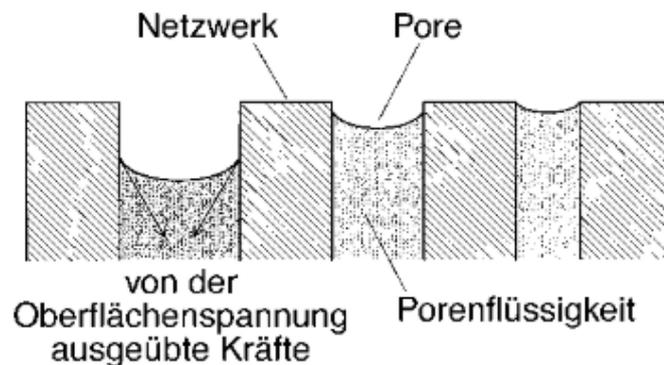
Über den pH-Wert kann die Geschwindigkeit des Ablaufs von Hydrolyse- und Kondensationsreaktionen eingestellt werden. Da eine weiter fortgeschrittene Alterung bzw. Reifung des Gels durch stärkere Netzwerkbildung zu einer höheren Steifigkeit des Endprodukts führt, ist der zeitliche Ablauf richtig einzustellen. Während in einem sauren Milieu die Hydrolyse stärker ausgeprägt ist, findet im basischen Bereich die Kondensation verstärkt statt (Hall 2010).

### Trocknung

Der Trocknungsprozess ist der kritische Schritt in der Aerogelherstellung. Die Poren eines Gels sind mit Flüssigkeit gefüllt. Um aus ihnen ein Aerogel zu erhalten, muss den Poren des Gels die Flüssigkeit entzogen werden, sodass sie fortan mit Luft gefüllt sind. Hierfür ist ein Trocknungsprozess notwendig. Die Erhaltung der Porenstruktur während der Trocknung bestimmt über die späteren Eigenschaften des Ae-

rogels, was nur mit speziellen und sehr aufwendigen Verfahren erreicht werden kann.

Ohne diese Verfahren, d. h. bei einer Trocknung des Gels an Luft, würde die Trocknung in den Poren wie in Abbildung 4 dargestellt ablaufen: Zunächst entleeren sich die größeren Poren, gefolgt von den immer kleiner werdenden. Das Gel schrumpft mehr und mehr zusammen. Durch die von der Oberflächenspannung der Menisken ausgeübten Kräfte kommt es schließlich zu Rissen in der Netzwerkstruktur. An Luft getrocknete und deshalb stark geschrumpfte Gele werden Xerogele genannt.



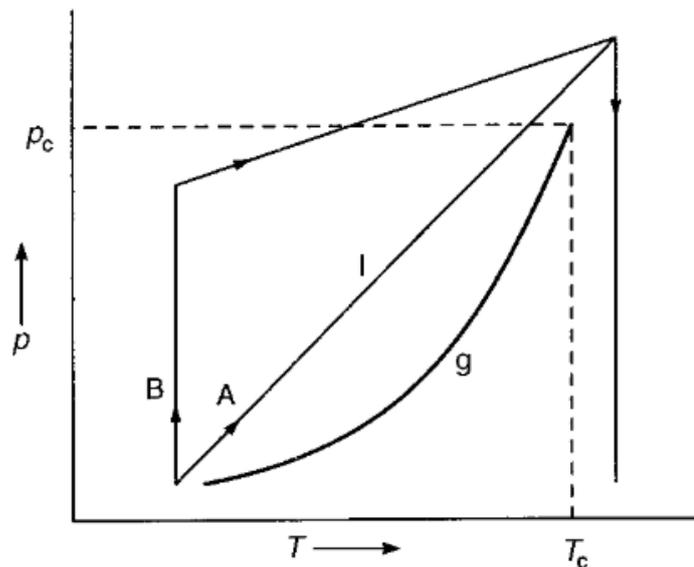
**Abbildung 4** Darstellung der Oberflächenkräfte bei der Trocknung in Poren (Hüsing und Schubert 1998)

Prinzipiell werden drei Trocknungsverfahren zur Herstellung von Aerogelen unterschieden:

- Überkritische Trocknung
- Unterkritische Trocknung
- Gefrietrocknung

Bei der überkritischen Trocknung wird das Lösungsmittel in den sogenannten überkritischen Zustand überführt. Darunter versteht man einen Zustand zwischen der flüssigen Phase und der Gasphase eines Stoffs, bei der die Grenzen zwischen den Aggregatzuständen aufhören zu existieren. Der überkritische Zustand kann, wie in Abbildung 4 dargestellt, über eine Erhöhung von Temperatur und Druck über die zwei möglichen Wege A und B erreicht werden. Am kritischen Punkt entspricht die Dichte der Flüssigkeit der Dichte des Gases. Bei konstanter Temperatur kann das Fluid anschließend langsam abgelassen werden.

Bei der überkritischen Trocknung handelt es sich um ein sehr effizientes Verfahren zur Herstellung von Aerogelen. Allerdings ist es auch relativ zeit- und materialintensiv und aufgrund der benötigten hohen Temperaturen und Drücke nicht ganz unbedenklich.



**Abbildung 5 Schematische Darstellung der überkritischen Trocknung (Hüsing und Schubert 1998)**

Es wurde deshalb nach alternativen Trocknungsmethoden gesucht, die unter dem Begriff unterkritische Trocknung zusammengefasst sind. Die Trocknung findet hier bei weitaus geringerem Druck statt, als bei der überkritischen Trocknung. Da diese Methode verspricht, potentiell kostengünstig und sicher zu sein und sich daher für die Herstellung von Aerogelen im großen Maßstab eignen könnte, erhält sie derzeit viel Aufmerksamkeit aus der Industrie. Noch bringt diese Trocknungsmethode allerdings einige Probleme mit sich. Die größte Herausforderung besteht darin, das Schrumpfen des Aerogels während der Trocknung auf ein annehmbares Maß zu begrenzen. Hierfür müsste das poröse Netzwerk deutlich verstärkt werden, vermutlich durch die Modifizierung der Materialoberfläche vor der Trocknung. Zur Hydrophobierung des Materials ist in vielen Fällen außerdem ein häufiger Wechsel des Lösungsmittels nötig. Dieser Prozess ist zeitaufwendig und erfordert große Mengen an Lösungsmittel, was ökologischen und ökonomische Nachteile mit sich bringt. Dennoch ist die unterkritische Trocknung als die vielversprechendste Alternative zur überkritischen Trocknung anzusehen.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Aerogelen ist die Gefriertrocknung, bei der ebenfalls der Phasenwechsel zwischen der flüssigen Phase und der Gasphase vermieden wird. Zunächst wird dabei die Porenflüssigkeit durch Einfrieren in einen Feststoff überführt, der anschließend im Vakuum durch Sublimation entfernt wird. Zwei Voraussetzungen müssen dafür erfüllt sein: Ersten muss das poröse Netzwerk wie bei der unterkritischen Trocknung verstärkt werden. Zweitens muss ein Lösungsmittel mit einem ausreichend niedrigen Sublimationstemperatur verwendet werden, um ein Entfernen der Porenflüssigkeit möglich zu machen. Während des Gefrierprozesses kommt es zur Kristallisation des Lösungsmittels, wobei das poröse Netzwerk des Aerogels angegriffen bzw. zerstört wird. Die Endprodukte einer Gefriertrocknung liegen daher nur in Pulverform vor. Sie werden als Kryogele bezeichnet (Hall 2010; Aegerter et al. 2011).

## Eigenschaften

Durch die verschiedenen Möglichkeiten zur Herstellung des Gels und des Reifungsprozesses lassen sich auch für die fertigen, getrockneten Aerogele keine eindeutigen Kenngrößen definieren. In Tabelle sind die Wertebereiche der Strukturdaten für SiO<sub>2</sub>-Aerogele aufgeführt.

**Tabelle 1 Wichtige Strukturmerkmale von SiO<sub>2</sub>-Aerogelen (Hüsing und Schubert 1998)**

Eigenschaft	Wertebereich	Typischer Wert
Bulkdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,003 – 0,500	0,100
Skelettdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,7 – 2,1	
Porosität [%]	80 – 99,8	
Mittlere Porengröße [nm]	20 – 150	
Spezifische innere Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	100 – 1600	600
Brechungsindex	1,007 – 1,24	1,02
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(m K)]	0,017 – 0,021	0,020
E-Modul E [MPa]	0,002 – 100	1
Schallgeschwindigkeit $c_L$ [m/s]	< 20 - 800	100
Akustische Impedanz Z [kg/(m <sup>2</sup> s)]		10 <sup>4</sup>

## **Amorphe Kieselsäuren**

Pyrogene amorphe Kieselsäuren sind künstlich hergestellte Siliziumdioxide (SiO<sub>2</sub>), die durch Hydrolyse von Chlorsilan in einer Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme entstehen. Abbildung 6 zeigt die durch den Herstellprozess erzielte amorphe Struktur der Kieselsäure. Im ersten Schritt entstehende Primärteilchen mit glatter Oberfläche sind 5 bis 30 nm groß und nicht mikroporös. Diese verschmelzen zu größeren Aggregaten, somit sind keine isolierten Teilchen mehr vorhanden. Durch das Abkühlen wandeln sich die Aggregate zu offenstrukturierten und mesoporösen Agglomeraten mit einer Größe von 1 bis 250  $\mu$ m um. Genauer betrachtet handelt es sich dabei um SiO<sub>2</sub>-Tetraeder, die durch Siloxanbrücken verbunden sind (Si-O-Si-Bindungen). Da ca. jedes zweite Si-Atom eine Hydroxylgruppe an der Oberfläche trägt bilden sich Si-OH-Gruppen (Silanolgruppen), die als reaktionsfähige Zentren Wasserstoffbrückenbindungen zu anderen polaren Stoffen herstellen. Zusammen mit dem polaren Si-O-Si-Gerüst entstehen herausragenden hydrophilen Eigenschaften. Kleine Partikeldurchmesser und eine hohe spezifische Oberfläche sind charakteristisch für die auf diesem Weg hergestellte Kieselsäure.

Ohne weitere Behandlung ist die Kieselsäure hydrophil und wird häufig als Trockenmittel eingesetzt. Für die Anwendung im Baubereich ohne weitere Schutzschicht wie z.B. die Hüllfolie bei Vakuumpaneelen, wird hydrophobe Kieselsäure verwendet. Durch die Umsetzung der SiOH-Gruppen mit Organosiliciumverbindun-

gen werden die hydrophoben Eigenschaften erzielt. Die Struktur der hydrophoben Kieselsäure ist in Abbildung 6 dargestellt.

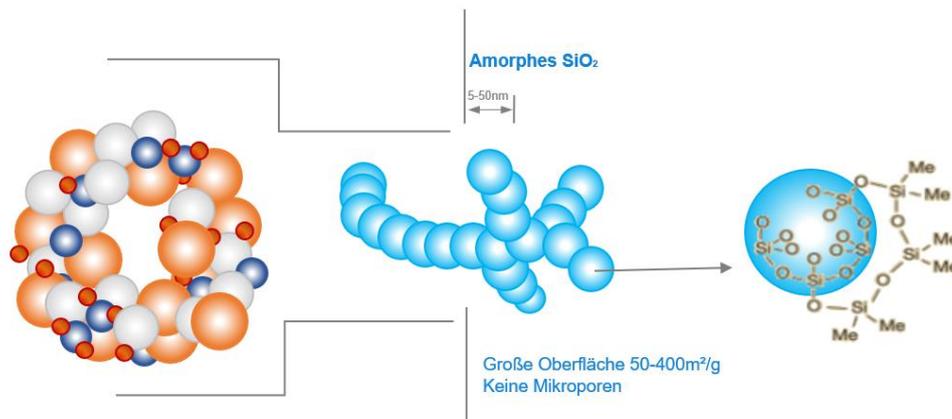


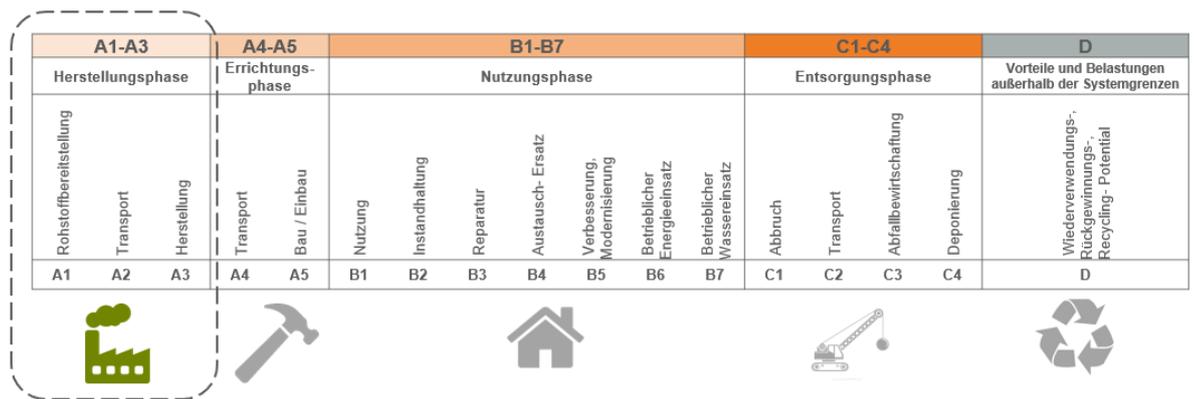
Abbildung 6 Struktur der hydrophoben amorphen Kieselsäure

## 2.2 Nachhaltigkeit

### Grundlagen

Im Hinblick auf immer knapper werdende Ressourcen bei immer weiter steigendem Konsum ist es unerlässlich, Gebäude in Zukunft nachhaltiger, energieeffizienter und ressourcenschonender zu gestalten. Eine materialgerechte Planung, die die Umwelteinflüsse der verschiedenen Baustoffe mitberücksichtigt, gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Ein weit verbreitetes Verfahren, um die umweltrelevanten Vorgänge und Wirkungen verschiedener Produkte zu erfassen, ist die Ökobilanzierung. Für Baumaterialien ist das Verfahren durch die DIN EN 15804 genormt. Hierin werden 24 Indikatoren zur Darstellung der Wirkungsabschätzung von Baustoffen definiert, die über die in Abbildung 7 dargestellten Lebenszyklusphasen bilanziert werden. Häufig beinhalten die produktspezifischen Datensätze (EPD) nur die Auswirkungen der Herstellungsphase, bestehend aus Rohstoffbereitstellung, Transport und Herstellung (A1 – A3), da diese gemäß Norm angegeben werden müssen. Dieser Ansatz wird deshalb als „cradle to gate“ bezeichnet, da die Wirkungen von der Wiege bis zum Werkstor inbegriffen sind.



Von der Wiege zum Werkstor  
„cradle to gate“

**Abbildung 7 Phasen des Lebenszyklus nach DIN EN 15804 nach dem Ansatz „cradle to gate“ (FIW München 2017)**

Die Einbeziehung der weiteren Phasen ist bisher nur optional gefordert, sollte aber im Hinblick auf die knapper werdenden Ressourcen und ein erhöhtes Recyclingbewusstsein an Bedeutung gewinnen. Es gibt bereits verschiedene Konzepte, die den Gedanken von potentiell unendlicher Zirkulation von Materialien in Kreisläufen näher aufgreifen.

Das wohl bekannteste dieser Konzepte ist das sogenannte „cradle to cradle“ Prinzip („Von der Wiege bis zur Wiege“). Hier werden zwei grundsätzliche Rohstoffkreisläufe unterschieden, nämlich der biologische und der technische Kreislauf. Der biologische Kreislauf umfasst hierbei alle Materialien, die gesundheitsverträglich und kompostierfähig sind und dadurch an ihrem Lebensende als Nährstoffgrundlage für neues organisches Wachstum dienen. Auf der anderen Seite umfasst der technische Kreislauf alle Materialien, die als Primärrohstoff begrenzt zur Verfügung stehen (z.B. Metalle oder Kunststoffe). Alle sogenannten Gebrauchsgüter, die keiner Abnutzung ausgesetzt sind, können potentiell endlos im technischen Kreislauf zirkulieren (vgl. Abbildung 8). Dafür ist ein vernünftiger Materialeinsatz sowie eine sortenreine und mit geringem Aufwand durchführbare Trennung der Materialien nötig, um die nötigen Sekundärrohstoffe zu gewinnen.

Ein Cradle to Cradle-Zertifikat beurkundet folglich einen umweltsicheren, gesunden und wiederverwertbaren Baustoff. Zusätzlich werden auch noch der Einsatz erneuerbarer Energien, ein verantwortungsvolles Wassermanagement sowie die Einhaltung sozialer Standards bewertet. Je nachdem, inwiefern ein Unternehmen bzw. ein Produkt die verschiedenen Kriterien erfüllt, werden Zertifikate in den Kategorien „Basis“, „Silber“, „Gold“ und „Platin“ für die Dauer von einem Jahr ausgehändigt (EPEA Internationale Umweltforschung GmbH 2018).

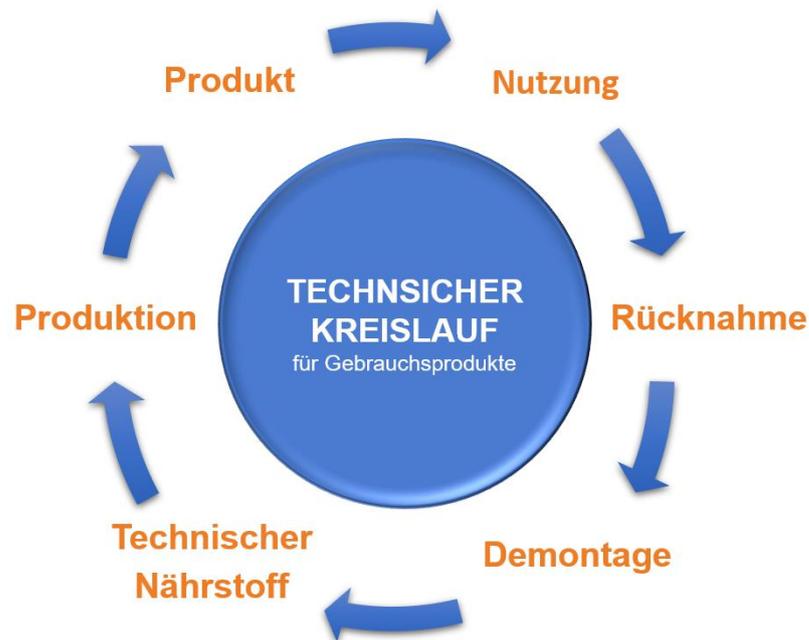


Abbildung 8 Der technische Kreislauf für Verbrauchsprodukte des Cradle to Cradle Prinzips

## Ökobilanzierung

Die Bedenken hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen von Aerogelen- und APM-Dämmstoffen sind bei Planern und Anwendern bisher sehr groß und sollen daher nachfolgend näher betrachtet werden. Da die Datenlage noch sehr dünn ist, ist die hier durchgeführte Ökobilanzierung als exemplarisch zu betrachten. Zusätzlich kann an dieser Stelle nur die Herstellungsphase (Phasen A1-A3) berücksichtigt werden, da über die übrigen Lebenszyklusphasen keine ausreichenden Daten verfügbar sind. Als Datengrundlage dienen Ökobilanzen und Daten aus der ökobaudat und des IBU. Diese sind online frei zugänglich und stellen eine vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung bereit.

Im Folgenden werden zwei wichtige Indikatoren zur Ökobilanzierung für Aerogel-Dämmstoffe und herkömmliche Dämmstoffe verglichen, um die ökologischen Eigenschaften einzuordnen. Diese sind:

- Primärenergie [MJ], aufgeteilt in erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie
- Globales Erwärmungspotential (GWP) [kg CO<sub>2</sub>-Äq.]

Die für die Herstellung benötigte Primärenergie verschiedener Dämmstoffgruppen ist in Abbildung 9 dargestellt, ihr GWP in Abbildung 10. Die Diagramme zeigen die Mittelwerte der verfügbaren Datensätze von ökobaudat, IBU und EPD (environmental product declaration) je Produktgruppe (i.d.R. 6-8 Datensätze) und können nicht einem spezifischen Produkt eines Herstellers zugeordnet werden. Für VIPs und Ae-

rogele gab es jeweils nur zwei Datensätze, aus denen gemittelt wurde. Für diese zwei Produktgruppen sind die dargestellten Werte also mit einer größeren Unsicherheit behaftet, als für die übrigen Dämmstoffe.

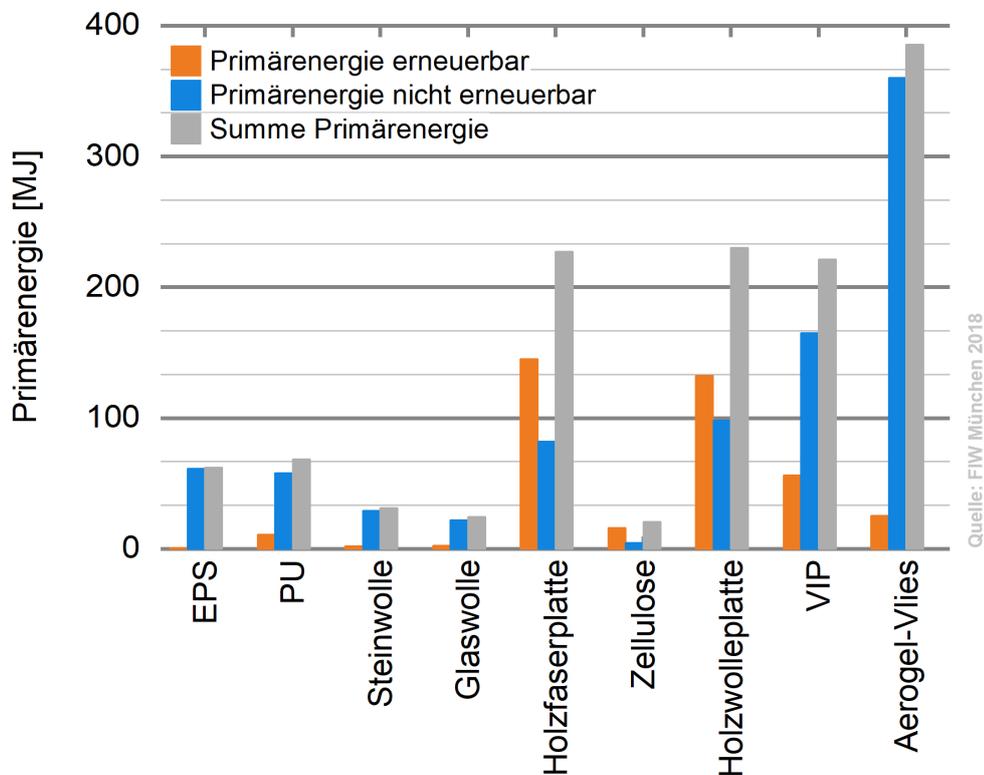


Abbildung 9 Primärenergieverbrauch für die Herstellung verschiedener Dämmstoffe bezogen auf einen R-Wert von 1,0 (m<sup>2</sup> K/W).

Die für die Herstellungsphase benötigte Primärenergie in MJ (Abbildung 9) der einzelnen Produktgruppen wird jeweils bezogen auf einen R-Wert von 1,0 (m<sup>2</sup> K/W) als Funktionseinheit der betrachteten Dämmstoffmenge, um eine bessere Vergleichbarkeit der Materialien zu gewährleisten. Die Primärenergie aus erneuerbaren Energiequellen ist in Orange, die Primärenergie aus nicht erneuerbaren Ressourcen in Blau dargestellt. Zusätzlich ist deren Summe in Grau dargestellt, da die Höhe der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Anteile abhängig vom Hersteller von Datensatz zu Datensatz stark schwankte.

Es ist zu erkennen, dass die dargestellten Aerogel- und APM-Dämmstoffe (hier: Aerogel-Vliese) deutlich mehr Primärenergie in ihrer Herstellung benötigen, als die übrigen betrachteten Dämmstoffe. Dies ist sogar der Fall, obwohl aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen und dem Bezug auf einen einheitlichen R-Wert das Material nur in geringerer Dicke berücksichtigt wird, als für die meisten anderen Dämmstoffe. So liegt die Primärenergie für die Herstellung von Aerogelen um ein Vielfaches höher (knapp 400 MJ), als für häufig verwendete Dämmstoffe wie Mineralwolle, EPS und PU (alle weniger als 70 MJ). Auch liegt der Primärenergiebe-

darf von Aerogelen fast doppelt so hoch, wie bei den nächstschlechteren Produktgruppen (Holzfaserplatten, Holzwolleplatten und VIP, alle mit knapp über 200 MJ).

Ähnlich sieht es für das GWP von Aerogelen in Abbildung 10 aus, das ebenfalls für einen einheitlichen R-Wert von 1,0 (m<sup>2</sup> K/W) ermittelt wurde. Während nachwachsende Rohstoffe wie Holzfaserplatten oder Zellulose aufgrund des in ihnen gebundenen Kohlenstoffs sogar negative Werte aufweisen, liegt das GWP von Aerogelen bei fast 20 kg CO<sub>2</sub> Äquivalenten. EPS, PU und Mineralwolle liegen stattdessen bei unter 3 kg CO<sub>2</sub> Äquivalenten und die im Vergleich zu Aerogelen nächstschlechteren Materialien (Holzwolleplatten und VIP) bei ca. 10 kg CO<sub>2</sub> Äquivalenten.

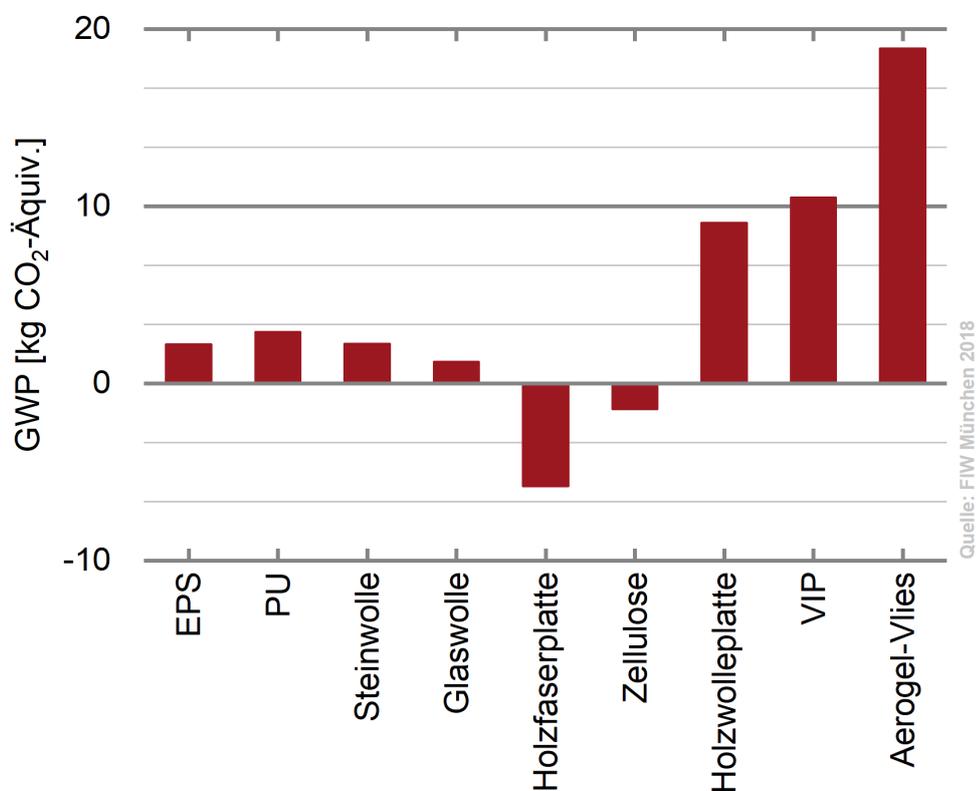
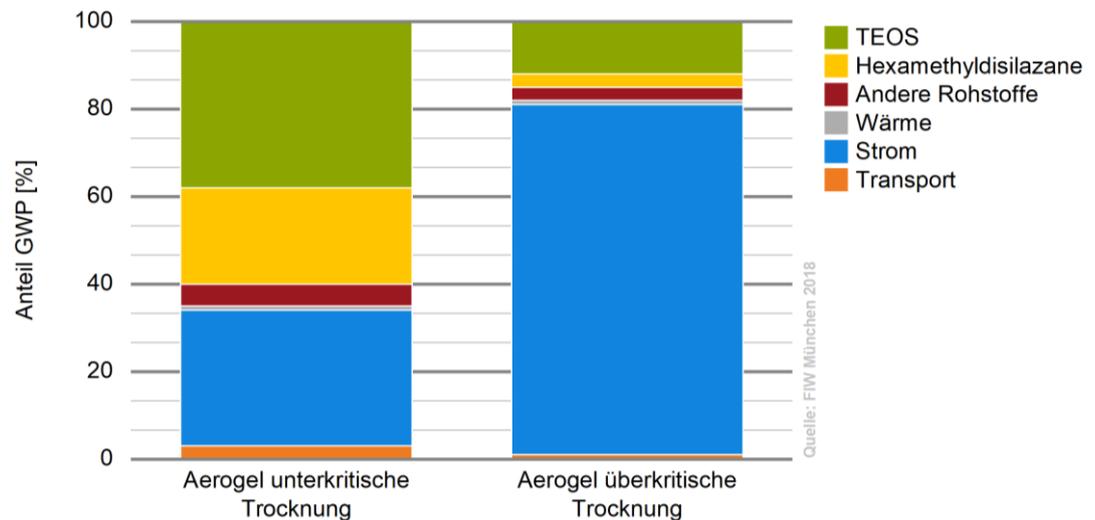


Abbildung 10 Global Warming Potential bei der Herstellung verschiedener Dämmstoffe bezogen auf einen R-Wert von 1,0 mK/W.

Diese beiden hier näher betrachteten Ökobilanz-Indikatoren lassen Aerogel- und APM-Dämmstoffe schlecht abschneiden und machen den vorhandenen Forschungsbedarf innerhalb dieser Materialgruppe deutlich. Für bewährte Dämmstoffe werden die Herstellungsprozesse schon seit Jahrzehnten optimiert und die großen Output-Mengen machen hier die Prozesse effektiver. Aerogele hingegen werden bisher in noch sehr geringer Menge hergestellt. Die Prozesse, insbesondere die überkritische Trocknung mit ihrem hohen Zeit-, Material- und Energieaufwand, bedürfen der Optimierung bzw. der Anpassung. Wie schon erwähnt existieren jedoch bereits alternative Verfahren zu der überkritischen Trocknung, zusammengefasst

unter dem Begriff der unterkritischen Trocknung. Deren Optimierung sowie eine Vergrößerung der produzierten Menge könnten mit der Zeit zu einer deutlichen Verbesserung der Ökobilanz von Aerogelen führen. In Abbildung 11 sind schematisch die prozentualen Anteile des GWP bei der Herstellung von Aerogel-Vlies im Pilotmaßstab bei unterkritischer und überkritischer Trocknung gegenübergestellt. Während der Stromanteil bei unterkritischer Trocknung bei rund 30 % liegt, nimmt er bei der überkritischen Trocknung 80 % ein (International Energy Agency). Das Optimierungspotential der Umweltwirkungen wird dadurch sehr deutlich.



**Abbildung 11 Zusammensetzung der „cradle to gate“-Anteile am globalen Erwärmungspotential in Abhängigkeit des Trocknungsprozesses bei der Aerogel-Herstellung im Pilotmaßstab (International Energy Agency)**

Anzumerken ist aber auch, dass bei allen Ökobilanzierungen der Wahl der Bilanzierungsgrenzen eine große Bedeutung zukommt. Bei einer Betrachtung des Lebenszyklus über die Herstellungsphase hinaus können durchaus andere Ergebnisse erzielt werden, insbesondere wenn die Produkte in ihren Eigenschaften dauerhaft sind und deshalb langfristig eingesetzt werden können. Ebenso beeinflussen gute Rezykliermöglichkeiten die Ökobilanz positiv. Auch vor diesem Hintergrund kommt den Inhalten dieses Forschungsvorhabens eine Bedeutung zu.

## Recycling

Für das Recycling von Baustoffen ist ein umfangreiches nationales und internationales Regelwerk vorhanden. Neben Vorgaben zum Umgang mit Abbruchmaterial sind auch Anforderungen an die Qualität des Rezyklats beim Verbleib der Stoffe im Dämmstoffbereich durch Energieeinsparverordnungen o.ä. zu beachten.

Das am 1. Juni 2012 in Kraft getretene Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) basiert auf der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EC) und legt die in Abbildung

12 dargestellte Abfallhierarchie fest. Über fünf Stufen ist damit die Rangfolge definiert, welche Abfallbewirtschaftungsmaßnahme bei einem zunächst ausgemusterten Stoff angewandt werden soll. Oberste Priorität hat dabei die Vermeidung von Abfall, was durch eine möglichst lange Dauerhaftigkeit eines Materials erreicht werden kann. Die nächste Stufe ist die Verwendung des gleichen Produkts für entweder die gleiche Verwendung oder eine neue Verwendung. Nach Aufschluss und Neukonsolidierung kann das Material neuen Produkten zugeführt werden. Erst als letzter Schritt ist die Beseitigung zu sehen. Aber auch hier stehen verschiedene Methoden wie die thermische Verwertung oder die Deponierung zur Verfügung, wobei die daraus resultierenden Umweltwirkungen zu beachten sind.

Gemäß § 3 (25) des Gesetzestexts lautet die Definition für Recycling:

*„Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“ (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)*

Die Festlegung von Recyclingquoten für bestimmte Stoffgruppen dienen der Förderung des Recyclings und der sonstigen stofflichen Verwertung und liegen für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle ab Januar 2020 bei mindestens 70 Gewichtsprozent.

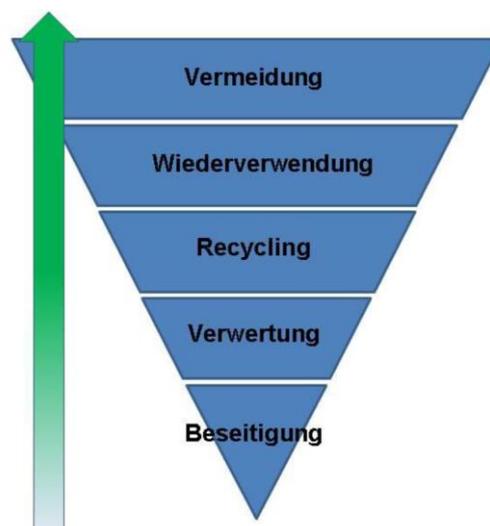


Abbildung 12 Abfallhierarchie nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)

## 2.3 Bauphysikalisch wichtige Eigenschaften

Für die Verwendbarkeit im Bauwesen sind insbesondere die thermischen, hygroskopischen, mechanischen und akustischen Eigenschaften wichtig. Im Folgenden werden typische Werte für die wichtigsten Gruppen von APM anhand von Literaturdaten benannt.

### Wärmeleitfähigkeit

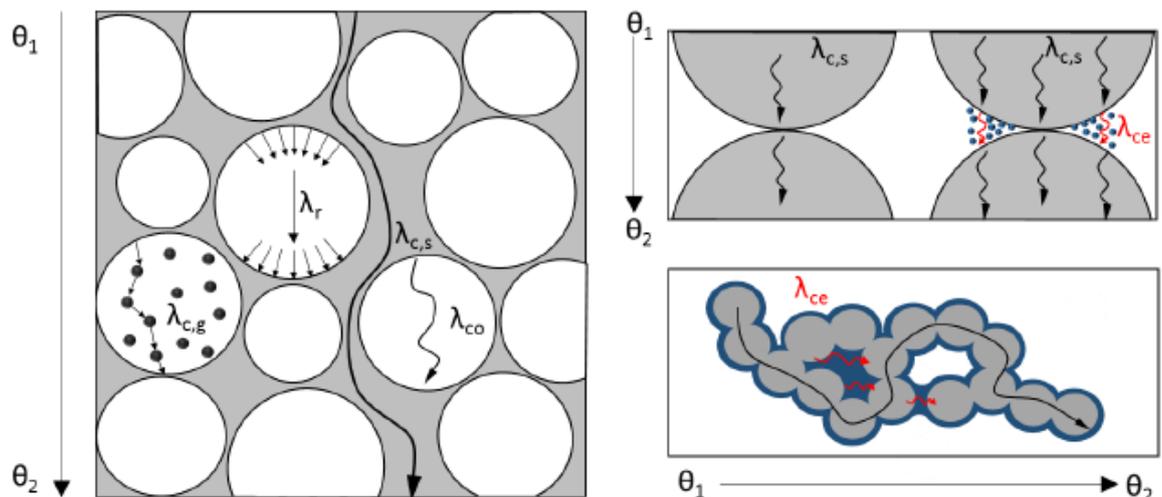
Der Wärmetransport in porösen Stoffen, wie Dämmstoffe es sind, wird durch unterschiedliche Wärmetransportmechanismen beeinflusst:

- Wärmeleitung des Festkörperanteils  $\lambda_F$
- Wärmeleitung des in den Poren enthaltenen ruhenden Gases  $\lambda_G$
- Infrarotstrahlungstransport  $\lambda_S$
- Konvektion  $\lambda_K$
- Kopplungsterm  $\lambda_{KT}$ , der die Kopplungseffekte der verschiedenen Transportpfade enthält

Die äquivalente Gesamtwärmeleitfähigkeit ergibt sich aus diesen Komponenten zu:

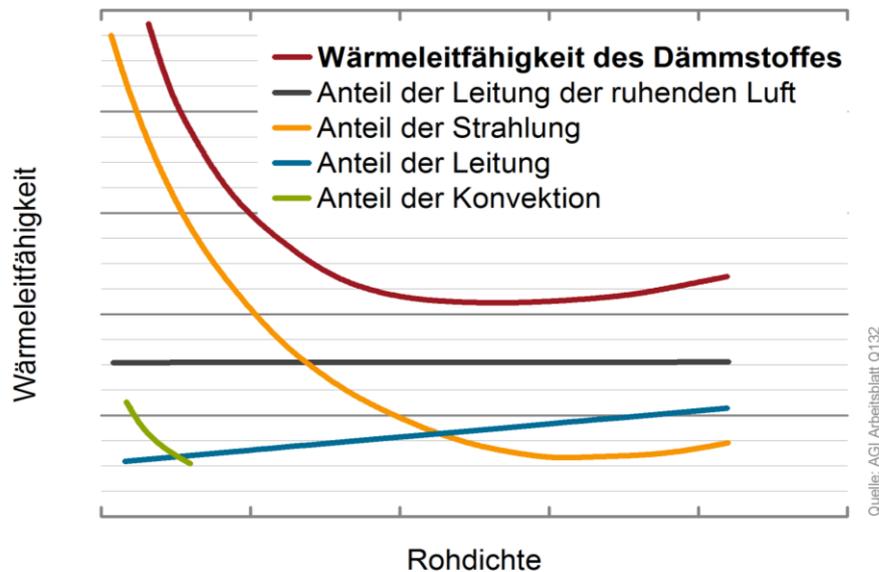
$$\lambda_{eq} = \lambda_F + \lambda_G + \lambda_S + \lambda_K + \lambda_{KT}$$

In Abbildung 13 sind die Wärmeübertragungsmechanismen in einem porigen Festkörper nochmal graphisch zusammengefasst.



**Abbildung 13** Wärmeübertragungsmechanismen in einem porigen Festkörper, Links: Wärmeleitung im Feststoff,  $\lambda_{c,s}$ , Wärmeleitung in der Gasphase,  $\lambda_{c,g}$ , Wärmestrahlung,  $\lambda_r$ , Konvektion,  $\lambda_{co}$  und Kopplungseffekte,  $\lambda_{ce}$ , Rechts: Einfluss von adsorbiertem Wasser und gefüllten Porenräumen auf die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmeübergangswiderstände zwischen Partikeln

Beeinflusst werden diese Komponenten durch die Porosität und somit die Rohdichte des betrachteten Stoffes, die Porengröße und die vorherrschende Temperatur. Für einen konventionellen Dämmstoff setzen sich die Komponenten wie in Abbildung 14 zusammen. Durch eine Verringerung der Poren in den nm-Bereich lässt sich beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit sehr stark verringern, da die Gaswärmeleitung  $\lambda_G$  unterbunden ist. Aus diesem Grund können Aerogele eine Wärmeleitfähigkeit kleiner als die von ruhender Luft (0,026 W/(m K)) erzielen.



**Abbildung 14** Darstellung der Wärmetransportmechanismen und der sich daraus ergebenden Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes als Funktion der Rohdichte

## Feuchtetechnisches Verhalten

Baumaterialien und Dämmstoffe im Besonderen sind häufig einem feuchten Milieu ausgesetzt. Dies kann durch den Ausfall von Tauwasser, Schlagregen oder stehendes Wasser verschuldet sein und kann den Stoff an sich verändern bzw. schädigen und somit seine Lebensdauer reduzieren. Außerdem wirkt sich Feuchte auch negativ auf die Wärmeleitfähigkeit aus. Feuchte Baustoffe sind Quellen für Keime, Schimmel und unerwünschte Geruchstoffe. Neben den optischen Aspekten bergen diese auch ein Gesundheitsrisiko und schädigen großflächig ganze Bauteile.

Der Durchgang von Feuchte durch einen Baustoff in Form von Wasserdampf wird Wasserdampfdiffusion genannt. Je nach anliegendem Wasserdampfpartialdruckgefälle ist die Richtung der Diffusion ausgeprägt. Die Diffusion kann in Bauteilen zu Kondensation und somit zur Auffeuchtung der Materialien führen. Die Anlagerung der Moleküle findet zunächst in den Porenzwischenräumen statt und führt dann zu einer fortschreitenden Füllung des Porenraumes. Die beschriebenen Effekte beeinflussen dann auch die Wärmeleitfähigkeit.

Bei unmodifizierten Aerogelen handelt es sich um hydrophile Stoffe. Es kann zur Adsorption und Kapillarkondensation von Feuchte kommen und die entstehenden Kapillarkräfte können zu einer Schädigung des Netzwerks führen. Deshalb ist eine dauerhafte Hydrophobierung oder ein Feuchteschutz durch die Kombination mit feuchtevariablen Dampfbremsen sehr wichtig ist. Die dauerhafte Hydrophobierung kann mittels verschiedener Methoden zu verschiedenen Prozessschritten stattfinden mit dem Ziel, einen diffusionsoffenen Stoff, der keine Feuchte speichert, zu erhalten. (Hüsing und Schubert 1998).

### **Mechanische Eigenschaften**

Wichtige mechanische Eigenschaften sind die Festigkeit, die Sprödigkeit und die Dimensionsstabilität. Je nach Anwendungsbereich werden an Dämmstoffe unterschiedliche Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften gestellt. An eine Trittschalldämmung werden demnach andere Anforderungen gestellt als beispielsweise an die Dämmung von Rollladenkästen. So wird im einen Fall eine hohe Druckfestigkeit gefordert, während bei der zweiten Anwendung eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Materials von Vorteil ist.

Aerogel-Partikel haben wegen ihrer feinen Struktur und der Sprödigkeit eine vergleichsweise niedrige Festigkeit, die sich durch verschiedene Methoden im Herstellungsprozess geringfügig verbessern lässt. In der Typologisierung der Produkte unter Punkt 2.4 ist schnell zu erkennen, dass APMs in der Regel zu Platten oder Matten verarbeitet werden, um die mechanische Beanspruchbarkeit zu verbessern. An loses Granulat zur Anwendung in Scheibenzwischenräumen werden zwar keine Anforderungen bezüglich Zug- oder Druckverhalten gestellt, in diesem Fall bestehen jedoch Anforderungen an das Setzungsverhalten.

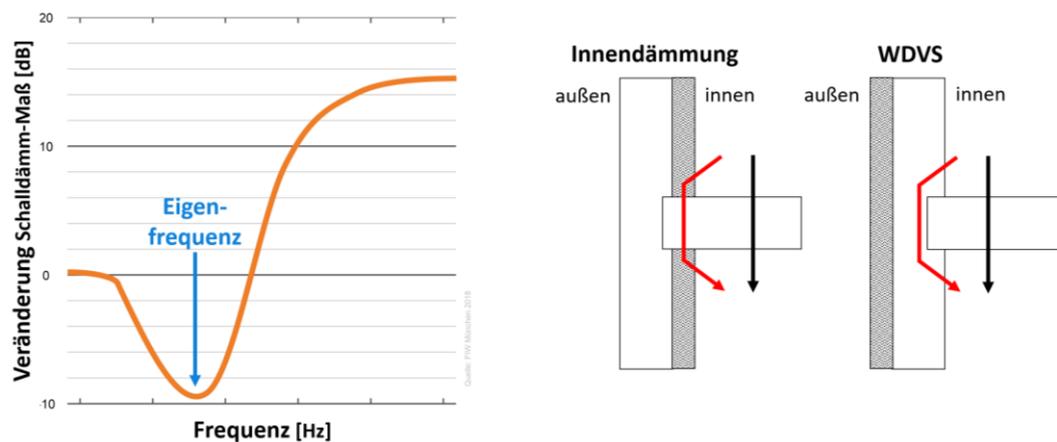
### **Akustische Eigenschaften**

Mechanische Schwingungen von elastischen Stoffen, die im für das menschliche Ohr hörbaren Bereich liegen, werden als Schall bezeichnet. Je nachdem, in welchem Medium die Schwingungen stattfinden, spricht man von Fluidschall (in Flüssigkeiten oder Gasen) oder Körperschall (in Festkörpern). Innerhalb eines Feststoffes pflanzt sich Schall durch die elastische Kopplung von Teilchen fort.

Für die Schallübertragung von Außenlärm ins Innere des Gebäudes über Außenbauteile konzentrieren sich die Anforderungen vor allem auf die Schalldämmung von Straßenverkehr. Das Aufbringen eines WDVS auf eine bestehende Wand kann sich hierbei sowohl positiv als auch negativ auf die schalldämmenden Eigenschaften auswirken. Die Wand mit WDVS bildet ein schwingungsfähiges System mit einer bestimmten Eigenfrequenz, bei der das System ohne Einfluss äußerer Kräfte schwingen kann. Oberhalb der Eigenfrequenz des Systems nimmt das Schall-

dämmmaß deutlich zu (vgl. Abbildung 15, links). Die Eigenfrequenz des WDVS sollte demnach möglichst tief liegen, damit im bauakustisch relevanten Bereich eine möglichst hohe Schalldämmung erzielt wird. Dies kann z.B. durch eine möglichst geringe dynamische Steifigkeit des Dämmstoffs erzielt werden.

Neben der Schallübertragung von Außenlärm ins Innere des Gebäudes spielt in baulichen Anwendungen auch die Schallübertragung zwischen benachbarten Innenräumen, die sogenannte Flankenübertragung, eine Rolle (dargestellt in Abbildung 15, rechts). Während ein WDVS hier eine untergeordnete Rolle spielt, sind in diesem Zusammenhang Innendämmmaßnahmen kritischer zu betrachten: Werden hier Dämmstoffe mit hoher dynamischer Steifigkeit verwendet, kann dies zu einer Verstärkung der Flankenübertragung und damit zu einer Verschlechterung des Schalldämm-Maßes führen (Rexroth et al. 2014). Eine möglichst geringe dynamische Steifigkeit des Dämmstoffs ist somit sowohl in der Anwendung als WDVS als auch als Innendämm-System ein entscheidender Faktor.



**Abbildung 15** Links - Verbesserung der Schalldämmung einer Massivwand durch ein WDVS in Abhängigkeit der Frequenz. Rechts - Flankenübertragung von Schall bei Innen- und Außendämmung (roter Pfeil) über die raumseitige Schale.

Vor diesem Hintergrund weisen Aerogele exzellente schalldämmende Eigenschaften auf, welche mit ihren elastischen Eigenschaften korrelieren: Die dynamische Steifigkeit von Aerogelen ist in der Regel gering und kann durch die Art der Herstellung oder durch die chemische Veränderung der Vorstufen weiter verbessert werden (Hüsing und Schubert 1998). Die Schallübertragung innerhalb eines Aerogels ist abhängig von Art und Partialdruck des Porengases sowie der Dichte und der Struktur des Aerogels. Die feine Netzwerkstruktur, die sich bei den mechanischen Eigenschaften eher negativ auswirkt, ist für die akustischen Eigenschaften sehr zuträglich: Bei der Schallübertragung von einem Gas auf einen Feststoff geht stets ein Teil der Schallenergie verloren, wodurch die Amplitude und die Geschwindigkeit der Schallwellen deutlich gesenkt werden. Die Schallgeschwindigkeit in Aerogelen bewegt sich typischerweise im Bereich von 100 m/s, was den niedrigsten Wert unter allen anorganischen Festkörpern darstellt. Sie sind dadurch neben der baulichen

Anwendung auch zur Anwendung als Schalldämmung in akustischen Geräten, Verkehrsmitteln oder Maschinen geeignet (Hall 2010).

## 2.4 Typologisierung aktuell verfügbarer Produkte und Anwendungsgebiete

Dank der niedrigen Wärmeleitfähigkeit und der daraus resultierenden geringen Materialstärke eignet sich Aerogel grundsätzlich für die Anwendung als Innendämmung. Aber auch in anderen Anwendungen, bspw. als Dämmstoff hinter der Fassade kann Aerogel wie ein gewöhnlicher Dämmstoff verwendet werden. Eine Marktrecherche der derzeit verfügbaren Produkte, die unter Verwendung von APM herausragende Dämmeigenschaften besitzen, zeigt, dass bereits zahlreiche und äußerst verschiedenartige Produkte existieren. Neben den unterschiedlichen Lieferformen von losem Granulat zu Matten und Platten gibt es auch Verbundwerkstoffe. Für die Dämmplatten werden nicht verwobene Vliesmatten mit Aerogel versehen, wodurch flexible, sehr dünne und einfach zu verarbeitende Hochleistungsdämmstoffe entstehen. In der Übersicht in Tabelle 2 sind die vorgestellten Produkte tabellarisch aufgelistet.

Ein sehr großer Hersteller von Aerogeldämmplatten auf Kieselsäure-Aerogel-Basis ist Aspen Aerogels Inc. Je nach Anwendungstemperatur ist eines der drei Produkttypen zu wählen. Spaceloft ist die flexible Aerogel-Isolationsmatte, die für das Bauwesen geeignet ist. Für Anwendungen bei sehr niedrigen Temperaturen ist Cryogel die passende Dämmung mit integrierter Dampfsperre. Die Hochtemperatur-Dämmplatte Pyrogel ist in zwei Ausführungen erhältlich, wobei das Pyrogel XTF einen erhöhten Feuerwiderstand erfüllt.

Cabots Aerogel-Produkte basieren ebenfalls auf Aerogel aus Kieselsäurepartikeln. Lose Partikel mit optimierter Lichttransmission oder mit Trübungsmitteln versehen, decken unterschiedliche Einsatzbereiche ab und unterscheiden sich in der erreichbaren Wärmeleitfähigkeit. Ebenfalls ist eine Aerogel-Matte „Thermal Wrap“ im Produktsortiment, die als flexible und sehr dünne Dämmung in drei Stärken erhältlich ist. Für Tiefsee-Rohrleitungsdämmung sind vorgefertigte „Compression Packs“ vorgesehen.

Die Dämmplatten Calostat von Evonik sind ein mineralisches Produkt, die aus synthetischer amorpher Kieselsäure hergestellt werden. Das hydrophobe, diffusionsoffene und nicht brennbare Bauprodukt ist im Vergleich zu den Aerogel-Matten nicht flexibel und verfügt über eine Druckfestigkeit von ca. 90 kPa.

Das Innendämmsystem Sto Therm In Aevero hat als Kernelement eine Wärmedämmplatte auf Aerogel-Basis. Für den Innenraum oder als Laibungsdämmplatte eignet sich das schlanke System, das vollflächig auf dem Untergrund verklebt wird. Die Platten sind beidseitig mit Vlies kaschiert und in fünf Stärken zwischen 1 cm und 4 cm erhältlich.

BASF entwickelte zwei Aerogel-Dämmstoffe. Slentex ist ein aus anorganischem Aerogel zu flexiblen Platten verarbeiteter Dämmstoff. Slentite dagegen ist ein organisches Aerogel auf Basis von PU, jedoch mit einer sehr viel höheren Druckfestigkeit. Slentite befindet sich noch im Entwicklungsstatus und ist noch nicht kommerziell auf dem Markt verfügbar.

Zusammen mit speziell abgestimmten Komponenten ergibt sich mit der AERO Dämmplatte von Heck ein komplettes Wärmedämmverbundsystem, das sich in seiner Verarbeitung und Anwendung im Wesentlichen nicht von herkömmlichen Systemen unterscheidet. Zur Heck Aero Produktlinie gehört auch ein Hochleistungs-dämmputz für Innenwände, bei dem sich die Anwendung ebenfalls nicht von der allgemein bekannten unterscheidet.

Ein weiterer Hochleistungsdämmputz mit Zusatz von Aerogelgranulat ist der Hasit Fixit 222. Dieser ist im Innen- und Außenbereich anwendbar und zeichnet sich durch seine Atmungsaktivität und feuchteregulierenden Eigenschaften aus.

Der italienische Aerogel-Verarbeiter AMA Nanotech fertigt aus Aerogeldämmmatten unterschiedliche Verbunddämmstoffe, angepasst für verschiedene Einsatzgebiete. So ist das Aeropan-Paneel erhältlich mit einem Finish aus glasfaserverstärktem Polypropylen, einer Glasfaserarmierung oder einer atmungsaktiven Membran mit vorgefertigtem Befestigungsmechanismus. Das Aerogips-Paneel vereint eine Aerogelmatte mit einer Gipskartonplatte für die Innendämmung. Sämtliche Dämmungen des Dachraumes mit erhöhten Anforderungen an die Wasserdichtheit und – beständigkeit können mit Aeroproof ausgeführt werden, da die Aerogeldämmung mit einer Bitumenbahn kaschiert ist.

Das Produkt Aerorock von Rockwool ist inzwischen nicht mehr in der Produktpalette des Herstellers zu finden. Die Kombination von Steinwolle und Aerogel hat sich nicht durchgesetzt. Weitere Produkte sind vom Hersteller Enersens das Granulat Kwark sowie die Dämmmatte Skogar in den Ausführungen Skogar BL, Skogar GF und Skogar PET.

Aerogel Technologies stellt sogenannte Airloys her, ein wesentlich stabileres Material als ursprüngliches Aerogel. Zusätzlich betreibt der Hersteller mit BuyAerogel.com eine Plattform, auf der Aerogelprodukte verschiedener Hersteller vertrieben werden.

Mit AeroZero vereint Blueshift International Materials Inc. die Vorteile von Plastik (Polymer) und Aerogel in einem Produkt. Das organische Aerogel basiert auf Polymeren, erzielt gute Druck- und Zugfestigkeiten und verursacht eine geringere Staubentwicklung bei der Verarbeitung. Verfügbar ist das Material als dünne flexible Matte oder als Monolith in verschiedenen Abmessungen mit einer Kantenlänge von derzeit maximal 30 cm.

Zahlreiche kleinere Anbieter vertreiben die Produkte der großen Hersteller zusammen mit Systemkomponenten als einfach anzuwendendes Dämmsystem.

In Tabelle 2 sind die soeben vorgestellten Dämmstoff-Produkte noch einmal in tabellarischer Form zusammengefasst.

**Tabelle 2 Übersicht über am Markt verfügbare APM-Dämmstoffe**

Hersteller	Produktname	Rohstoff	Lieferform	Anwendungsbereich	$\lambda$ [mW/m K]
Aspen	Spaceloft	SiO <sub>2</sub>	Matte	Bauwesen	16
	Pyrogel	SiO <sub>2</sub>	Matte	Technische Dämmung, hohe Temperatur	20
	Cryogel	SiO <sub>2</sub>	Matte	Industrielle Dämmung, Tiefe Temperatur	14
Cabot	Thermal Wrap	SiO <sub>2</sub>	Matte	Bauwesen, Industrieanlagen	20
	Granulat	SiO <sub>2</sub>	Lose Partikel	Einblasdämmung, Schüttdämmstoff	18 @ 85 kg/m <sup>3</sup>
Evonik	Calostat	SiO <sub>2</sub>	Platte	Plattenförmiger Dämmstoff für inner- und außerhalb der Gebäudehülle	19
STO	Aevero	SiO <sub>2</sub>	Platte	Innendämmsystem, Leibungsdämmung	17
BASF	Slentite	PU	Platte	Bausektor und Kühlwesen	17
	Slentex	Mineral.	Platte	Bauwesen	19
Heck	AERO	SiO <sub>2</sub>	Matte	WDVS	18
	AERO iP	SiO <sub>2</sub>	Putz	Dämmputz für den Innenbereich	40
Hasit Fixit	Fixit 222 Aero-gel Dämmputz	SiO <sub>2</sub>	Putz	Dämmputz für Innen- und Außenbereich	28
AMA Composites	Aeropan Aeropan Basic Aeropan Fast	SiO <sub>2</sub>	Platten	Dämmplatten für Innen- und Außenbereich mit unterschiedlicher Kaschierung	15
	Aerogips	SiO <sub>2</sub>	Platte	Innendämmung	15
	Aeroproof	SiO <sub>2</sub>	Platte	Dachdämmung	15

## 2.5 Alterungsmechanismen von APM

Einflüsse aus der Umgebung können zu kurzzeitigen, reversiblen oder permanent anhaltenden Veränderungen einer oder mehrerer Eigenschaften führen. Bei Wärmedämmstoffen sind insbesondere Veränderungen relevant, die zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führen. Bei kurzzeitigen Veränderungen kann es sich um klimatische Einflüsse handeln, die einem natürlichen Tages- oder Jahresgang unterliegen. Beispielsweise besteht je nach Material eine unterschiedlich stark ausgeprägte Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur und Materialfeuchte, also von Randbedingungen der Anwendung, die sich im Sommer und Winter unterscheiden.

Die tatsächliche Alterung bezeichnet jedoch die langsam stattfindende, irreversible Veränderung des Materials verursacht durch die Umgebungsbedingungen. Betroffen davon sind viele Eigenschaften, wie z.B. mechanische (Druck, Zug, Kriechen), thermische, hygrische, akustische oder ästhetische, wobei häufig nur die thermischen Eigenschaften genauer untersucht werden. Für Aussagen zur Lebensdauer und zum Langzeitverhalten eines Materials sind die Kenntnisse des Alterungsverhaltens entscheidend und für einen neuartigen Stoff wie APMs sind entsprechende Untersuchungen deshalb wichtig.

In Laborversuchen wird die Alterung durch Klimalagerungen künstlich beschleunigt. Aus den erhaltenen Daten kann dann mit Methoden der Extrapolation die Lebensdauer ermittelt werden. Da es sich bei APMs und den in VIPs verwendeten Kernmaterialien um sehr ähnlich strukturierte Materialien mit einer sehr großen spezifischen Oberfläche handelt, zeigen sie gleiche Tendenzen bezüglich des Sorptionsverhaltens und der Strukturveränderung. VIPs allgemein und auch deren Alterungsverhalten im speziellen wurden in letzter Zeit sehr ausführlich untersucht. Für die Alterung von APMs können passende Randbedingungen für die Alterung deshalb aus diesen vorhandenen Erkenntnissen abgeleitet werden.

Die an der effektiven Wärmeleitfähigkeit beteiligten Wärmeübertragungsmechanismen werden durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Wasser bzw. Feuchte spielen eine große Rolle, da sie den Porenraum verkleinern und die Oberflächenstruktur verändern können. Chemisorption und Physisorption sind die beiden Mechanismen der Wasserbindung, die je nach Menge der adsorbierten Feuchte wirken und sich entsprechend ihrer Bindungskräfte unterschiedlich leicht wieder lösen. Wie in Abbildung 16 deutlich zu erkennen, steigt die Materialfeuchte  $\tau_w$  gealterter Proben mit steigender relativer Feuchte stärker an, als dies bei neuer pyrogener Kieselsäure der Fall ist. Mit steigendem Feuchtegehalt steigt der Anteil der Festkörperwärmeleitung.

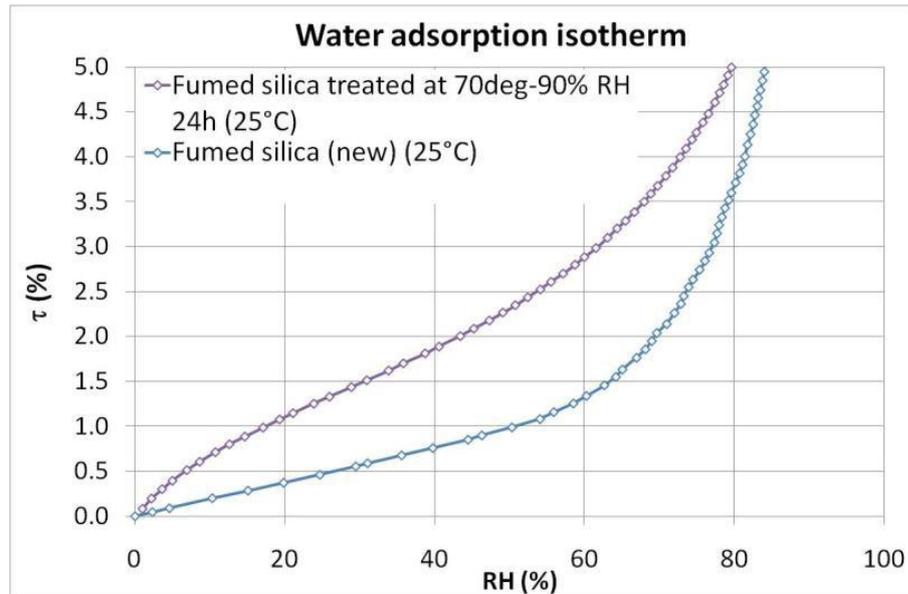


Abbildung 16 Änderung des Sorptionsverhalten und Anstieg der Materialfeuchte  $\tau_w$  (Yrieix et al. 2015)

Die rein hygrische Alterung durch die zunehmende Anlagerung von Wassermolekülen führt dazu, dass die Kontaktstellen zwischen den Festkörperpartikeln wesentlich vergrößert werden und die fein verästelte Netzwerkstruktur weniger stark ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 13). Unter erhöhtem Temperatureinfluss kann es darüber hinaus zur Glättung und Verschmelzung der einzelnen Partikel kommen, was ebenfalls zu einem erhöhten Wärmetransport beitragen könnte (vgl. Abbildung 17).

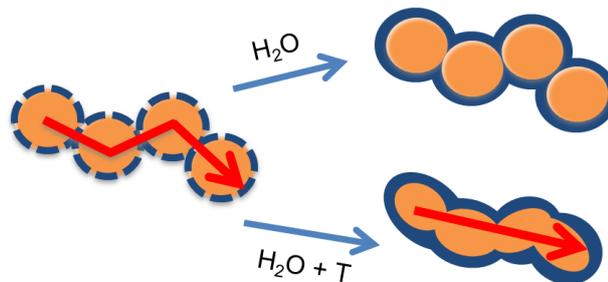


Abbildung 17 Erhöhter Wärmetransport aufgrund von Koagulation einzelner Partikel unter Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit

Im Zuge der Alterung erfolgt eine Verschlechterung der Hydrophobierung durch die Hydrolyse der chemischen Verbindungen. Die Konsequenz ist eine Veränderung des Sorptionsverhaltens, wobei zusätzlich die Änderung der Porengröße (Abbildung 18) zu einer Änderung des Sorptionsverhaltens führen kann.

Da der Einfluss des in den Poren enthaltenen ruhenden Gases  $\lambda_G$  auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei APM in erster Linie von der Porengrößenverteilung abhängt, kann eine Verschiebung der Kurve nach rechts zu größeren Porendurchmessern  $d_p$  aufgrund hygrischer Einflüsse, auch die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen (Abbildung

18). eine VOC-Adsorption kann zu einer Vergrößerung der Masse und Dichte des Materials führen und wirkt gleichzeitig als Hydrophobant, was den Alterungsfortschritt verlangsamt.

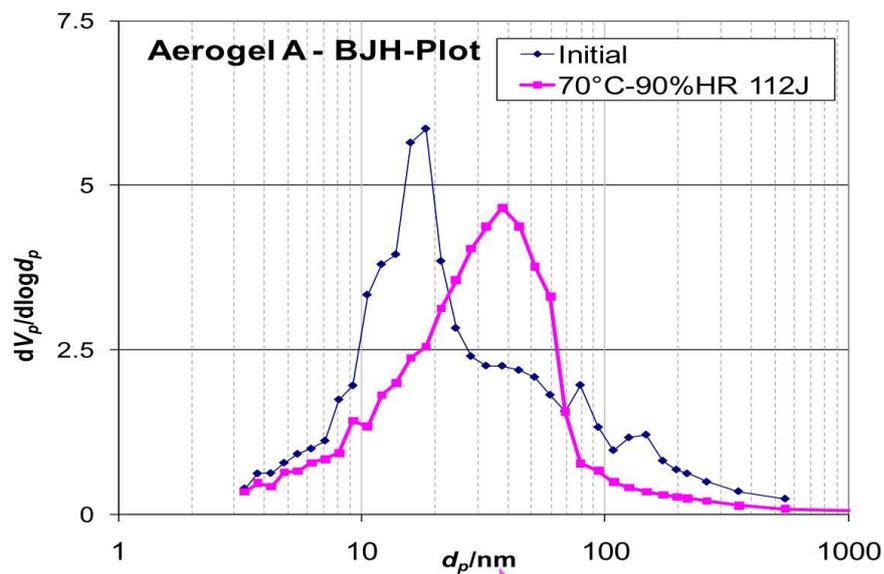


Abbildung 18 Veränderung der Porengrößenverteilung eines Aerogels nach der Alterung bei 70 °C / 90 % r.F. (Yrieix et al. 2015)

Tabelle 3 fasst nochmal die Alterungsmechanismen von Aerogelen und Vakuumisoliationspaneelen zusammen.

Tabelle 3 Alterungsmechanismen von Aerogelen und Vakuumisoliationspaneelen (nach (Yrieix et al. 2015))

Einflussfaktor	VIP	APM
Entwicklung des Strahlungsanteils der Wärmeleitfähigkeit: - Optische Veränderungen durch Sorption	X	X
Entwicklung der Festkörperleitung: • Adsorption von Wasser: - Physisorption - Chemisorption - Hydrolyse chem. Verbindungen • VOC Adsorption - Gewichtszunahme - Interaktion mit Wasser - Weitere chemische und physikalische Einflüsse	X X	X X X X X X
Entwicklung der Gaswärmeleitung: - Druck - Porengrößenverteilung	X X	X X

## 3 Problemstellung und Forschungsansatz

Gemäß Antragstellung werden in vorliegendem Forschungsvorhaben im Wesentlichen zwei unterschiedliche Untersuchungsfelder aufgespannt, die in ihrer Gesamtheit die Bewertung der baupraktischen Anwendung von APM präzisieren sollen.

Diese sind zusammengefasst:

1. Die Dauerhaftigkeit von APM soll unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen untersucht werden.
2. Die Rezyklierfähigkeit der verschiedenen APM-Systeme ist je nach Herstelltechnologie zu untersuchen.

### 3.1 Forschungsbereich A „Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss“

Dämmstoffe auf der Basis von APM sind in den letzten Jahren von der Laborentwicklung zur Marktreife gelangt. Für die ersten Produkte gibt es bereits allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für eine Vielzahl von Anwendungen im und am Gebäude. Für die noch recht neuen Produkte gibt es auch schon eine ganze Reihe von Pilotprojekten und Beispielen. Diese aktuellen Innovationen aus dem Dämmstoffbereich ergänzen die etablierten Dämmstoffe um effiziente Alternativen vor allem für energetisch hochwertige Sanierungen und Neubauten. Diese Hochleistungs-Dämmstoffe drängen von Nischenanwendungen in die volumenintensive Breitenanwendung und stehen für den am stärksten wachsenden Bereich der Dämmstoffe. Umso wichtiger ist es, Vertrauen in diese Materialien bei den Anwendern und Planern aufzubauen und verlässliche Aussagen über das Langzeitverhalten in Bauanwendungen machen zu können. Für Aerogele und APM liegen bisher keine oder nur sehr wenige Informationen vor.

#### Problemstellung

Gerade für das bevorzugte Einsatzgebiet von APMs, nämlich der Innendämmung bestehender Gebäude, sind die feuchtetechnischen Eigenschaften neben der Langzeitstabilität der Wärmeleitfähigkeit von überragender Bedeutung. Für APM-Dämmstoffe liegen Informationen zum Langzeitverhalten unter der kombinierten Beanspruchung von Temperatur und Feuchte, wie sie in baulichen Anwendungen auftreten, nicht vor. Um die Lebensdauer von Aerogel- und APM-Dämmstoffen in bestimmten baulichen Anwendungen berechnen zu können, sind bessere Kenntnisse zu ihrem Alterungsverhalten notwendig. Die verantwortlichen physikalischen und chemischen Prozesse müssen dazu untersucht werden, damit verlässliche Aussagen zur Langzeitstabilität gemacht werden können.

Je nach Anwendungsfall, Standort und Orientierung des Bauteils wirken sehr unterschiedliche Randbedingungen auf die APM-Dämmstoffe ein. Umso wichtiger ist es, Vertrauen in diese Materialien bei den Anwendern und Planern aufzubauen, indem verlässliche Aussagen über das Langzeitverhalten in der Bauanwendung gemacht werden können.

Für einige physikalische Eigenschaften kann auf bewährte Mess- und Simulationsmethoden zurückgegriffen werden, wie sie weit verbreitet für herkömmliche Dämmstoffe seit etlichen Jahren angewendet werden. Für einige weitere Eigenschaften können bestehende und normierte Messmethoden mit zusätzlichen Randbedingungen und Anpassungen für die hochdämmenden Produkte sinngemäß angewandt werden. In vielen Fällen sind diese Randbedingungen jedoch nicht oder nicht ausreichend bekannt.

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens sollen dabei helfen, die Wissenslücken zum Langzeitverhalten zu schließen und können APM-Dämmstoffen den Weg zu einem genormten Dämmstoff mit breiter Akzeptanz am Markt ebnen.

### **Forschungsansatz**

Für typische Anwendungsfälle von APM Dämmstoffen im Bauwesen werden anhand von Beispielkonstruktionen die Anwendungsrandbedingungen mittels hygrothermischer Simulationssoftware (WUFI® Pro) ermittelt. Die Ergebnisse dienen zur Auswahl geeigneter Klimata, um eine beschleunigte künstliche Alterung der Materialien durch Klimalagerung anzuregen. Extremwerte sollen dabei vermieden werden, um Schädigungen des Materials, wie sie in der Bauanwendung nicht stattfinden würden, zu umgehen. Zur Einschränkung der Möglichkeiten und unterstützend für die Auswahl werden die ermittelten Temperatur- und Feuchtebelastungen mit den hygrothermischen Simulationen des Vorgängerprojekts „VIP in der Bauanwendung“ (Sprengard et al. 2017) verglichen.

Ebenso können neueste Erkenntnisse aus den Laborversuchen des Subtask 2 des derzeitig laufenden Forschungsprojekts „Long-Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components and Systems“ (IEA-EBC Annex 65) für die Untersuchungen in Forschungsbereich A als Grundlage verwendet werden. Die Klimalagerung zur Alterung von APM-Probekörpern wurde dabei sehr umfangreich durchgeführt, die Prüfungen nach den einzelnen Alterungsschritten haben allerdings einen wesentlich geringeren Umfang im Vergleich zu den hier geplanten.

Im Anschluss an die beschleunigte künstliche Alterung werden die im Methodenteil des Forschungsbereichs aufgeführten Messungen durchgeführt. Aus diesen Daten können nach abgeschlossener Alterung mittels Extrapolation Aussagen zur Performance während der Lebensdauer der geprüften Produkte getätigt werden.

### 3.2 Forschungsbereich B „Untersuchungen zur Rezyklierfähigkeit“

Die ganzheitliche Betrachtung eines Bauproduktes erfordert neben der geeigneten Rohstoffzusammensetzung, der Herstelltechnologie und des Verhaltens während der Lebensdauer auch die möglichen End-of-Life Szenarien. Bei Lebenszyklusanalysen ist das Recycling ein wichtiger Aspekt, der von Beginn an berücksichtigt werden muss, um die Herstellung eventuell anpassen zu können. Wie in Abbildung 19 zu erkennen, bildet eine lebenszyklusorientierte Betrachtung von Bau- und Dämmstoffen einen geschlossenen Kreislauf, sobald Recycling inbegriffen ist. Im Fall der Entsorgung handelt es sich hingegen um ein lineares Modell.

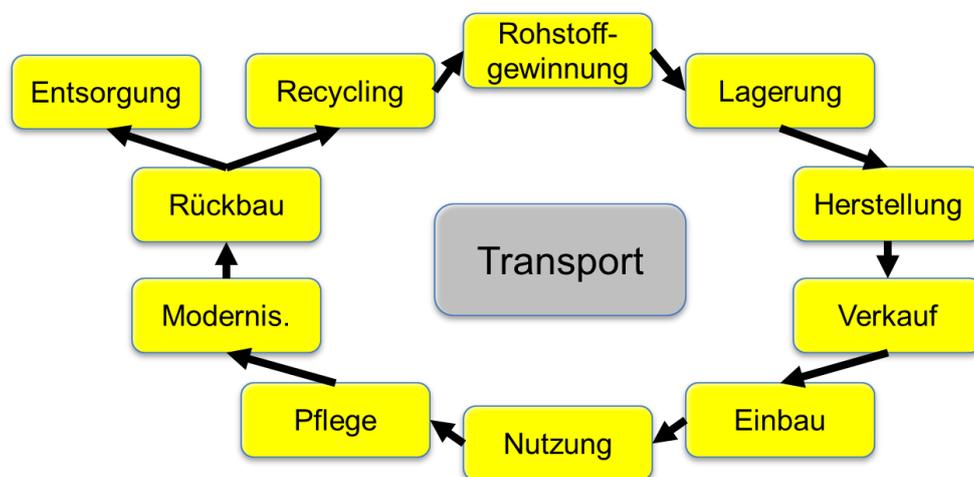


Abbildung 19 Lebenszyklus von Dämmstoffen (FIW München)

#### Problemstellung

Abbruch- und Rückbauarbeiten bilden die Grundlage für die erneute Nutzung von vormals verbauten Materialien. Dieser erste Schritt entscheidet über den weiteren Umgang mit Bauabfällen. Je nach Produktzusammenstellung sind speziell angepasste Verfahren anzuwenden, um einen bestmöglichen Nutzen aus dem ursprünglichen Produkt für die Zukunft zu generieren. Gerade bei Verbundwerkstoffen ist die weitere Nutzung von einer sortenreinen Trennung der Einzelkomponenten abhängig. Die Rezyklierfähigkeit hängt deshalb von der Qualität des Materialaufschlusses und der erzielbaren Qualität der Trennung der Rohstoffe ab. Je nach Herstelltechnologie (Verbundqualität) und Rohstoffen (Trennbarkeit) der Produkte ergibt sich eine erzielbare Recycling-Hierarchieebene. Dabei kann es sich um Wiederverwendung ohne Verschlechterung der Güte des Produktes handeln. Alle anderen Mechanismen wie die Weiterverwendung, die Wiederverwertung oder die Weiterverwendung bis hin zur Entsorgung sind mit einem Downcycling des Ausgangsprodukts verbunden.

Da es sich bei Aerogelen um einen sehr teuren Ausgangsstoff handelt, ist die Wiederverwendung oder -verwertung mit Rückgewinnung der Rohstoffe auch aus wirtschaftlicher Sicht sehr interessant. Häufig machen sehr aufwändige Trennverfahren und zu geringe Mengen an zu recycelndem Material eine erneute Stoffnutzung unrentabel, weshalb viele Stoffe entweder thermisch verwertet oder deponiert werden. Dies soll bei APM-basierten Dämmstoffen vermieden werden, weshalb zusammen mit den Untersuchungen der Eigenschaften auch die Rezyklierfähigkeit betrachtet wird. Wichtig dabei ist die Betrachtung des gesamten Dämmsystems, da häufig die Kombination der Systemkomponenten (z.B. durch Verklebung) die Trennbarkeit erschwert oder verhindert.

### **Forschungsansatz**

Ein Rückbau, bei dem eine getrennte Erfassung der Stoffströme möglich ist, unterscheidet sich von konventionell durchgeführten Abbruchmaßnahmen. Da auch die Kosten für die Entsorgung von nicht sortenrein getrennten Abfällen steigen, lohnt sich der finanzielle Mehraufwand für einen kontrollierten Rückbau immer häufiger. Im Vorfeld geplante Demontagetechniken oder ein verwendungsorientierter Rückbau ermöglichen anschließend eine hochwertige Verwertung.

Um die Rezyklierfähigkeit der unterschiedlichen Materialien beurteilen zu können, werden Ansätze zu funktionsfähigen Aufschluss- und Trennverfahren recherchiert und erprobt. Die Beurteilung der Inhomogenität und der Grad der Verunreinigung des Materials entscheidet dann über die Recyclingfähigkeit bzw. die Eignung einer Recyclingtechnik. In der Praxis bestimmen die örtlichen Gegebenheiten, die Art des Abbruchobjekts und das Abbruchvolumen das anzuwendende Verfahren. Hier spielen auch die Ergebnisse aus Forschungsbereich A eine Rolle. Bei gealterten Dämmstoffen können sich vor allem durch den Einfluss von Feuchte über einen langen Zeitraum Verunreinigungen bilden oder Zersetzungsvorgänge stattfinden.

Die Untersuchungen zum Aufschluss der Produkte und zur Anwendung geeigneter Trennverfahren werden hier nur im Labormaßstab durchgeführt. Folgende Schritte sind dafür vorgesehen:

- Literaturrecherche zu Regularien und Gesetzen zur Klassifizierung von Abfällen, Anforderungen bzw. Einschränkungen für Recyclingverfahren
- Analyse der vorhandenen und prognostizierten Stoffströme von Aerogelprodukten und –abfällen als Grundlage für die wirtschaftliche Rentabilität von Aufbereitungsmaßnahmen
- Vergleich von bekannten Verwertungs- oder Recyclingverfahren anderer Dämmstoffsektoren und deren Anwendbarkeit für APM-Dämmstoffe
- Interviews mit den Herstellern
- Orientierende Versuche im Labor zu Aufschluss- und Trennverfahren wie z.B. Zerkleinern

## 4 Forschungsbereich A „Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss“

Im Folgenden werden das eingesetzte Material und die angewendeten Methoden sowie die Versuchsplanung und die erarbeiteten Ergebnisse zum Forschungsbereich A „Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Aerogel- und APM-Dämmstoffen unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen“ beschrieben.

### 4.1 Material

Untersucht werden aerogelbasierte Produkte in verschiedenen Lieferformen und ein plattenförmiger Werkstoff auf Basis von synthetischer amorpher Kieselsäure. Diese Produktauswahl deckt die derzeit am Markt verfügbaren APM-Dämmstoffe gut ab.

#### Aerogelbasierte Produkte

In Tabelle 4 sind die Parameter der verwendeten Aerogel-Proben zur Durchführung der Messungen aufgelistet.

**Tabelle 4 Für die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss verwendeten Proben auf Aerogelbasis**

Produktkennzeichnung	Rohstoff	Lieferform	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
A.1	SiO <sub>2</sub>	Lose	65 - 85
A.2	PU	Platte	150 - 180
A.3	SiO <sub>2</sub>	Matte	150
A.4	SiO <sub>2</sub>	Platte	130 - 180

#### APM-Produkte

In Tabelle 5 befinden sich die Parameter des Kieselsäure-Produktes, an welchem die im Methodenteil beschriebenen Messungen durchgeführt werden.

**Tabelle 5 Für die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss verwendete Probe auf Basis von synthetischer amorpher Kieselsäure**

Produktkennzeichnung	Rohstoff	Lieferform	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
S.1	SiO <sub>2</sub>	Platte	165

## 4.2 Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Methoden zur hygrothermischen Bauteilsimulation sowie die drei verwendeten Alterungs- und die verschiedenen Prüfmethoden beschrieben.

### Methoden zur hygrothermischen Bauteilsimulation

Zur Modellierung der Temperatur- und Feuchteverteilung in für die gewählten Probekörper repräsentativen Anwendungsbeispielen wird das Programmpaket WUFI® Pro 5.3 verwendet. Die Modelle werden als 1-dimensionale Schichtenmodelle umgesetzt. Als Ergebnisdatei wird eine stundengenaue Darstellung der mittleren Temperatur und Feuchte jeweils auf der Warm- und Kaltseite der untersuchten APM- und Aerogel-Dämmstoffe ausgegeben. Die ermittelten Daten werden verwendet, um aus ihnen auf geeignete Randbedingungen für die künstliche Alterung der Materialien zu schließen.

#### Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI®

Je Material, das in Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgelistet ist, wird ein typischer Anwendungsfall als Musteranwendung definiert. Die Musteranwendungen ergeben sich entweder aus den Herstellerangaben für das jeweilige Produkt oder wurden exemplarisch entsprechend der Produkteigenschaften gewählt. So wird A.1 (Granulat) als Kerndämmung in zweischaligem Mauerwerk eingesetzt. Jeweils zwei der Dämmstoffe werden als Innendämmung (A.2 und A.4) bzw. als Aufsparrendämmung im Steildach (A.3 und S.1) verwendet. Daraus ergeben sich fünf Anwendungsfälle, die in Tabelle 6 genauer definiert werden und deren schichtweise Konstruktionen in Tabelle 7 bis Tabelle 11 genauer beschrieben werden. Die U-Werte der Bauteile orientieren sich an den Vorgaben der aktuellen EnEV. Variiert werden der Standort, die Feuchtelast aus dem Innenraumklima sowie die Orientierung des Bauteils. Die sich daraus ergebenden Varianten werden gemäß Tabelle 12 kombiniert und mit einem Variantenschlüssel gekennzeichnet.

**Tabelle 6 Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI®**

Anwendungsbeispiel	Produktkennzeichnung	Konstruktion	Neigung
Zweischaliges Mauerwerk	A.1	K.1	90°
Innendämmung	A.2	K.2	90°
Steildach	A.3	K.3	30°
Innendämmung	A.4	K.4	90°
Steildach	S.1	K.5	30°

**Tabelle 7 Aufbau und Materialdaten für Konstruktion K.1 (zweischaliges Mauerwerk)**

Material	d [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Außenputzsystem	20	1219	0,25	850	0,3	10,8	0,22
Mauerwerk	100	1900	1,0	850	0,29	28	
Dämmebene	80	70	0,019	850	0,90	2,5	
Mauerwerk	150	1900	1,0	850	0,29	28	
Innenputz	15	850	0,2	850	0,65	8,3	

**Tabelle 8 Aufbau und Materialdaten für Konstruktion K.2 (Innendämmung 1)**

Material	d [mm]	P [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Außenputzsystem	20	1219	0,25	850	0,3	10,8	0,27
Mauerwerk	175	1900	1	850	0,29	28	
Innenputz	15	850	0,2	850	0,65	8,3	
Kleber	5	1180	0,39	850	0,5	20	
Dämmebene	60	130	0,018	850	0,85	10	
Kleber/Armierung	5	1180	0,39	850	0,5	20	
Innenputz	3	16410	0,87	850	0,4	50	

**Tabelle 9 Aufbau und Materialdaten für Konstruktion K.3 (Steildach 1)**

Material	d [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Dämmebene	80	146	0,014	1000	0,92	4,7	0,17
Schalung Fichte	20	455	0,09	1500	0,73	130	
Abdichtung	1	130	2,3	2300	0,001	50000	
Gipskarton	125	850	0,2	850	0,65	8,3	

**Tabelle 10 Aufbau und Materialdaten für Konstruktion K.4 (Innendämmung 2)**

Material	d [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Außenputzsystem	20	1219	0,25	850	0,3	10,8	0,25
Mauerwerk	175	1900	1	850	0,29	28	
Innenputz Gips	10	850	0,2	850	0,65	8,3	
Kleber	5	1180	0,39	850	0,5	20	
Dämmebene	60	150	0,017	850	0,95	10	
Kleber / Armierung	5	1180	0,39	850	0,5	20	
Innenputz	3	16410	0,87	850	0,4	50	

**Tabelle 11 Aufbau und Materialdaten für Konstruktion K.5 (Steildach 2)**

Material	d [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m K)]	c [J/(kg K)]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]
Dämmebene	100	171	0,021	1030	0,93	3,1	0,19
Schalung Fichte	20	455	0,09	1500	0,73	130	
Abdichtung	1	130	2,3	2300	0,001	50000	
Gipskarton	125	850	0,2	850	0,65	8,3	

**Tabelle 12 Matrix der Varianten der Musteranwendungen**

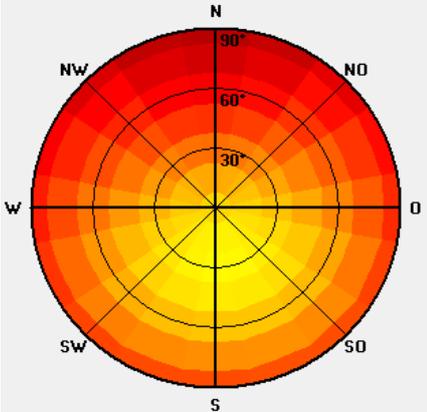
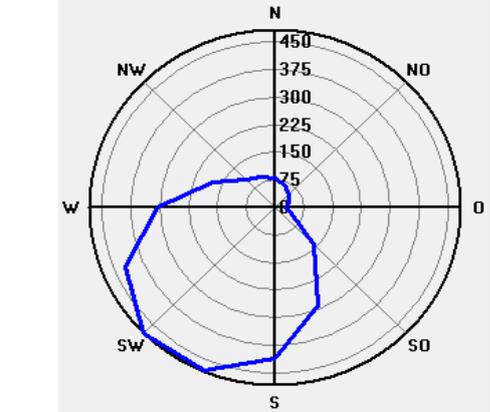
<b>Konstruktion</b>	<b>Standort</b>	<b>Feuchtelast</b>	<b>Bauteilorientierung</b>	<b>Variante</b>
<b>K.1</b>	<b>Holzkirchen</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.1-HNN
			<b>Süd</b>	K.1-HNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.1-HHN
			<b>Süd</b>	K.1-HHS
	<b>Freiburg</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.1-FNN
			<b>Süd</b>	K.1-FNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.1-FHN
			<b>Süd</b>	K.1-FHS
<b>K.2</b>	<b>Holzkirchen</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.2-HNN
			<b>Süd</b>	K.2-HNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.2-HHN
			<b>Süd</b>	K.2-HHS
	<b>Freiburg</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.2-FNN
			<b>Süd</b>	K.2-FNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.2-FHN
			<b>Süd</b>	K.2-FHS
<b>K.3</b>	<b>Holzkirchen</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.3-HNN
			<b>Süd</b>	K.3-HNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.3-HHN
			<b>Süd</b>	K.3-HHS
	<b>Freiburg</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.3-FNN
			<b>Süd</b>	K.3-FNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.3-FHN
			<b>Süd</b>	K.3-FHS
<b>K.4</b>	<b>Holzkirchen</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.4-HNN
			<b>Süd</b>	K.4-HNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.4-HHN
			<b>Süd</b>	K.4-HHS
	<b>Freiburg</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.4-FNN
			<b>Süd</b>	K.4-FNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.4-FHN
			<b>Süd</b>	K.4-FHS
<b>K.5</b>	<b>Holzkirchen</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.5-HNN
			<b>Süd</b>	K.5-HNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.5-HHN
			<b>Süd</b>	K.5-HHS
	<b>Freiburg</b>	<b>Normal</b>	<b>Nord</b>	K.5-FNN
			<b>Süd</b>	K.5-FNS
		<b>Hoch</b>	<b>Nord</b>	K.5-FHN
			<b>Süd</b>	K.5-FHS

Die verwendeten Feuchtelasten „normal“ und „hoch“ entsprechen der in DIN EN 15026 definierten raumseitigen Luftfeuchte in Abhängigkeit von Belegungsgrad und Außenlufttemperatur für normale Belegung (Feuchtelast 30 % - 60 %) und hohe Belegung (40 % - 70 %) bei Raumlufttemperaturen zwischen 20 °C und 25 °C.

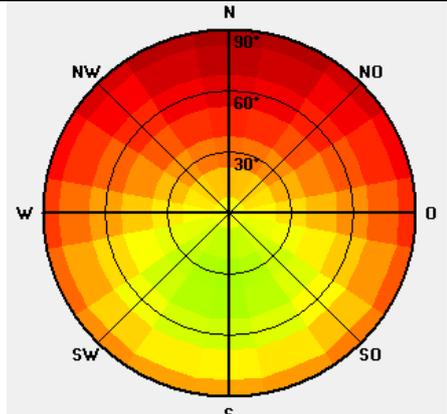
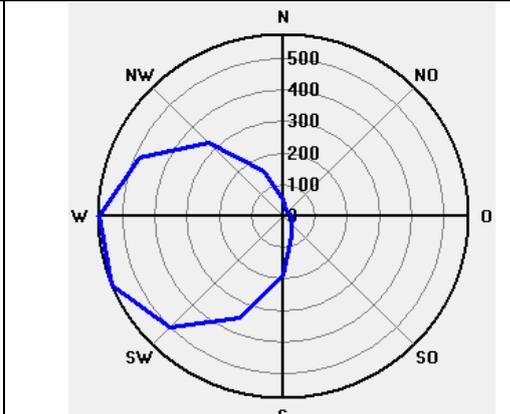
Die Orientierungen des Bauteils führen je nach Standort zu unterschiedlichen Temperaturbelastungen und Feuchteinträgen durch Schlagregen in die Konstruktion. Tabelle 13 und Tabelle 14 zeigen die Klimaanalyse der gewählten Standorte Freiburg und Holzkirchen.

Die Standorte Freiburg und Holzkirchen repräsentieren deutlich unterschiedliche Klimata. Freiburg weist gegenüber Holzkirchen eine höhere mittlere Temperatur auf (Freiburg 10,4°C vs. Holzkirchen 6,6°C). In Holzkirchen liegt dagegen ein insgesamt kühleres, dafür feuchteres Klima mit höherer relativer Luftfeuchte (Freiburg 74 % vs. Holzkirchen 81 %) und intensiverer Schlagregenbelastung vor. Aufgrund des zu erwartenden Einflusses von vorherrschender Temperatur und relativer Feuchte sind Unterschiede im Alterungsverhaltens von APM zu erwarten. Die Wahl der Standorte bietet in diesem Zusammenhang ein entsprechendes Differenzierungspotential.

**Tabelle 13 Klimaanalyse zum Standort Freiburg (WUFI®)**

Mittlere Temperatur [°C]:	10,4	Mittlere relative Luftfeuchte [%]:	74
Max. Temperatur [°C]:	32,5	Max. relative Luftfeuchte [%]:	100
Min. Temperatur [°C]:	-10,7	Min. relative Luftfeuchte [%]:	12
Gegenstrahlungssumme [kWh/(m <sup>2</sup> a)]:	2431,3	Mittl. Windgeschwindigkeit [m/s]:	2,77
Mittl. Bewölkungsgrad [-]:	0,65	Normalregensumme [mm/a]:	940
Solare Strahlungssumme [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Schlagregensumme [mm/a]		
			

**Tabelle 14 Klimaanalyse zum Standort Holzkirchen (WUFI®)**

Mittlere Temperatur [°C]:	6,6	Mittlere relative Luftfeuchte [%]:	81
Max. Temperatur [°C]:	32,1	Max. relative Luftfeuchte [%]:	98
Min. Temperatur [°C]:	-20,1	Min. relative Luftfeuchte [%]:	24
Gegenstrahlungssumme [kWh/(m <sup>2</sup> a)]:	2668,4	Mittl. Windgeschwindigkeit [m/s]:	2,33
Mittl. Bewölkungsgrad [-]:	-	Normalregensumme [mm/a]:	1185
Solare Strahlungssumme [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	Schlagregensumme [mm/a]		
			

Ableitung der Randbedingungen der künstlichen Alterungsmethoden aus den Musteranwendungen

In diesem Forschungsvorhaben sollen drei Methoden zur künstlichen Alterung der APM- und Aerogel-Dämmstoffe durchgeführt werden:

- Klimalagerung
- Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung
- UV-Beanspruchung

Deren Durchführung wird im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert. Nun soll zunächst beschrieben werden, wie aus den oben beschriebenen hygrothermischen Bauteilsimulationen auf die Randbedingungen der verschiedenen Versuche zur künstlichen Alterung geschlossen werden kann.

*Klimalagerung*

Um abschätzen zu können, was für einer Alterung des Materials eine verschärfte Klimalagerung im für die Bauanwendung herkömmlichen Bereich für Temperatur und Feuchte entspricht, wird ein sogenannter kombinierter Alterungsfaktor für Temperatur und Feuchte ( $AF_{TH}$ ) berechnet. Verwendet wird hierbei das von Berardi und Nosrati (2018) beschriebene Vorgehen. Der Alterungsfaktor gibt an, um wie viel

schneller ein Material bei künstlicher Klimalagerung altert, als unter gewöhnlichen Umständen.

Der Alterungsfaktor für Temperatur und Feuchte berechnet sich zu:

$$AF_{TH} = AF_T \times AF_H \quad (1)$$

Wobei  $AF_T$  den Alterungsfaktor durch Temperatur und  $AF_H$  den Alterungsfaktor durch Feuchte darstellt. Beide müssen zunächst einzeln berechnet werden.

Der Alterungsfaktor durch Temperatur wird auf Grundlage der Arrhenius-Gleichung ermittelt:

$$AF_T = e^{-\frac{E_A}{K} \times (\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_U})} \quad (2)$$

Dabei stellt  $E_A$  die minimal benötigte Aktivierungsenergie dar, um einen bestimmten Baustoff zu einer Reaktion anzuregen. Für Aerogele wird eine Aktivierungsenergie von 70 kJ/mol gewählt (Aegerter et al. 2011).  $K$  ist die sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante ( $1,380 \times 10^{-23}$  J/K).  $T_A$  ist die bei der künstlichen Alterung eingesetzte, erhöhte Temperatur und  $T_E$  die in der Bauanwendung zu erwartende Temperatur.

Das Peck-Modell kann angewandt werden, um den Beschleunigungsfaktor durch erhöhte Feuchte zu ermitteln:

$$AF_H = \left(\frac{RH_A}{RH_U}\right)^m \quad (3)$$

$RH_A$  ist die relative Feuchte bei künstlicher und  $RH_U$  die relative Feuchte unter realen Bedingungen. Die Feuchtigkeitskonstante  $m$  wird zu 2,66 angenommen.

Aus den hygrothermischen Bauteilsimulationen wird auf typische Umgebungstemperatur  $T_U$  und -feuchten  $RH_U$  in der Bauanwendung von Aerogelen geschlossen. Anschließend werden die Alterungsfaktoren für verschiedene Klimalagerungen gegenüber diesen typischen Werten verglichen und daraus eine der Projektdauer angemessene Kombination aus Temperatur- und Feuchte für die künstliche Klimalagerung gewählt.

### *Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung*

Auch für den Wechsel von Frost-Tau-Beanspruchung kann ein Alterungsfaktor  $AF_{Freeze-Thaw}$  analog zum Vorgehen von Berardi und Nosrati (2018) berechnet werden. Dieser wird durch die Coffin-Mason-Gleichung bestimmt:

$$AF_{freeze-thaw} = \left( \frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Use}} \right)^m \quad (4)$$

Hierbei ist  $\Delta T_{Test}$  die Temperaturdifferenz bei künstlicher Alterung und  $\Delta T_{Use}$  die Temperaturdifferenz, die bei gewöhnlicher Alterung zu erwarten ist. Der Coffin-Mason-Ermüdungskoeffizient  $m$  wird auf den herkömmlich verwendeten Wert 3 gesetzt.

Für die für Frost-Tau-Wechsel relevanten Musteranwendungen wird aus den Simulationsdaten auf eine sinnvolle Temperaturdifferenz in der Bauanwendung während Frost-Tau-Bedingungen geschlossen. Auch wird aus den Daten ermittelt, an wie vielen Tagen im Jahr es aufgrund von einem Wechsel von positiven zu negativen Temperaturen zu einem Frost-Tau-Wechsel kommen kann. Zusammen mit dem nach Gleichung (4) errechneten Alterungsfaktor lässt sich auf eine Anzahl an Frost-Tau-Wechseln in der künstlichen Alterung schließen, die eine angemessen lange Dauer in der realen Bauanwendung wiedergibt.

#### *UV-Beanspruchung*

Laut Berardi und Nosrati (2018) lässt sich der Alterungsfaktor rein durch UV-Bestrahlung  $AF_{UV}$  als Verhältnis der Bestrahlung bei künstlicher Alterung ( $\Phi_A$ ) und der UV-Strahlung bei natürlicher Alterung ( $\Phi_U$ ) berechnen:

$$AF_{UV} = \frac{\Phi_A}{\Phi_U} \quad (5)$$

$\Phi_A$  lässt sich aus den Eigenschaften der in der künstlichen Alterung verwendeten UV-Lampen sowie der Versuchsdauer berechnen.  $\Phi_U$  kann für die beiden untersuchten Standorte Holzkirchen und Freiburg aus den Klimadaten der hygrothermischen Bauteilsimulation abgeleitet werden.

Da die UV-Beanspruchung auch mit einer erhöhten Temperatur einhergeht, wird auch hier ein zusätzlicher Alterungsfaktor durch erhöhte Temperatur  $AF_T$  berücksichtigt, der nach Gleichung (2) berechnet wird. Der kombinierte Alterungsfaktor  $AF_{UV+T}$  lässt sich anschließend als Produkt der beiden Einzelkomponenten bestimmen:

$$AF_{UV+T} = AF_{UV} \times AF_T \quad (6)$$

Für die genannten Randbedingungen wird anschließend eine Versuchsdauer für die UV-Beanspruchung bestimmt, die einer in der Bauanwendung üblichen Alterungsdauer des Materials entspricht.

## Methoden zur künstlichen Alterung

Die Thermo-hygrische Alterung stellt eine beschleunigte Alterung unter kombinier-tem Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit dar. Nach diesem Verfah-ren der Alterung registrierte Effekte können durch die Anwendung von Beschleuni-gungsfaktoren, die aus einem Vergleich mit unter natürlichen Bedingungen ermittel-ten Eigenschaftsveränderungen berechnet werden, auf reale Expositionszeiten um-gerechnet werden. Die Alterung durch Frost-Tau-Wechsel soll den Einsatz von Dämmstoffen unter zyklischer Beanspruchung von flüssigem Wasser mit anschlie-ßendem Einfrieren simulieren und ist laut EN 12091 beispielsweise für Anwendun-gen im Perimeterbereich und Umkehrdach wichtig. Eine Beanspruchung durch UV-Strahlung ist im Falle von Dämmstoffen in transluzenten Anwendungen oder bei-spielsweise bei Fugen in Fassadenbekleidungen interessant.

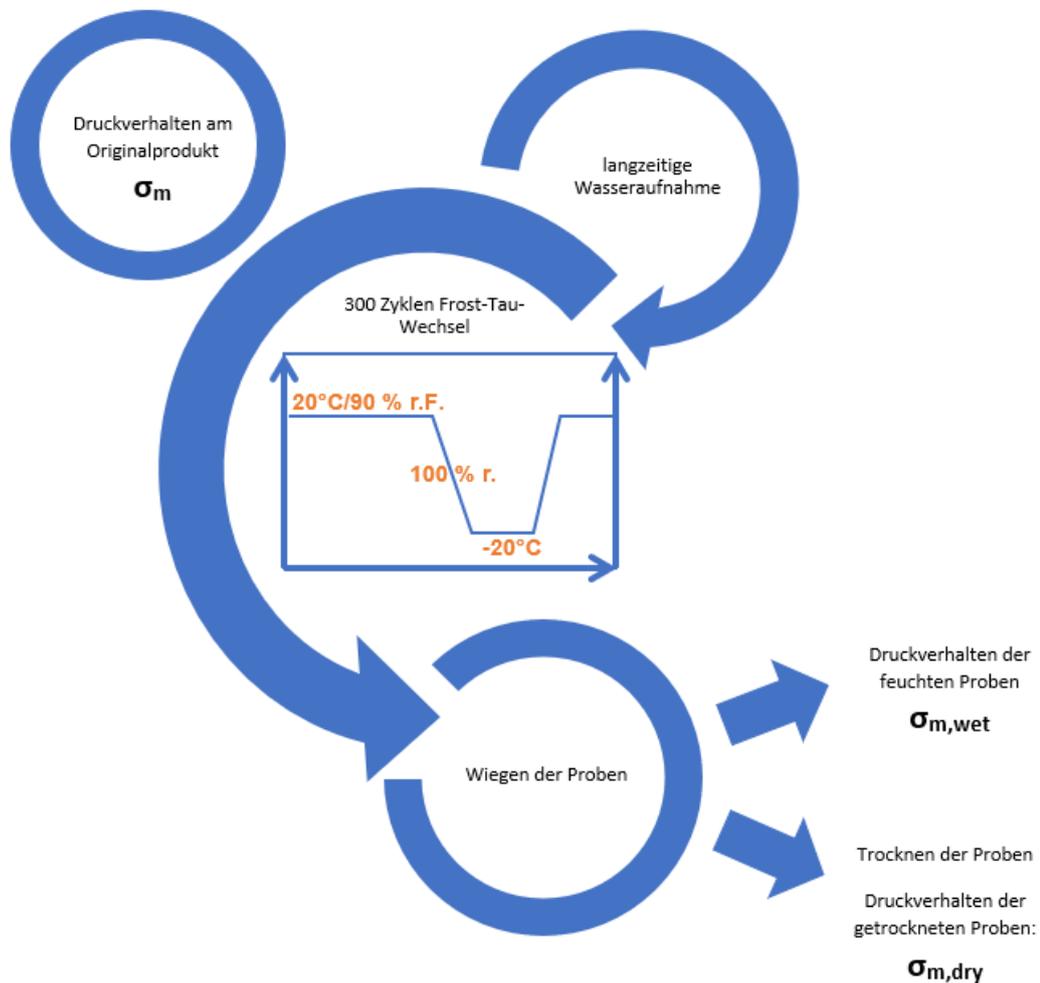
### Künstliche Alterung durch Klimalagerung

Zur Durchführung der künstlichen Alterung mit erhöhter Temperatur und Feuchte-beanspruchung stehen unterschiedliche Klimaschränke und –kammern zur Verfü-gung, die einen Klimabereich von -40°C bis +90°C bei Regelung der relativen Luft-feuchte im Temperaturbereich von 10°C – 90°C in einem Bereich von 20 % - 100 % r. F. abdecken. Die Genauigkeit der Temperaturregelung beträgt  $\pm 1^\circ\text{C}$ , die Genau-igkeit der Regelung der relativen Feuchte beträgt  $\pm 3\%$  r. F.

Mit diesen vorhandenen Geräten lässt sich eine große Bandbreite an Temperatur-und Feuchtekombinationen realisieren. Aus den Simulationsergebnissen wird die repräsentative Kombination aus Temperatur und relativer Feuchte abgeleitet und für die Klimalagerung angewandt. Wie im Ergebnisteil dieses Forschungsbereiches ausführlicher erläutert, wird im Rahmen dieses Projekts die Klimalagerung bei 50 °C und 70 % relativer Luftfeuchte durchgeführt.

### Frost-Tauwechsel-Beanspruchung

Die Frostbeständigkeit eines Dämmstoffs bei gleichzeitig hoher Feuchtelast ist eine weitere wichtige Anforderung. Zur Untersuchung dieser Beanspruchung werden Frost-und-Tau-Wechsel in mehreren Zyklen mit zwischenzeitlichen kondensieren-den Bedingungen durchgeführt.



**Abbildung 20 Flussdiagramm Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung**

Wie in DIN EN 12091 festgelegt, werden die Probekörper daraufhin untersucht, wie sie nach wiederholter Durchfeuchtung mit darauffolgender Frostbeanspruchung einer Druckbeanspruchung standhalten. Ebenso wird untersucht, ob sich eine Änderung in der Wasseraufnahme ergibt. Insgesamt werden 300 aufeinanderfolgende Zyklen durchgeführt, wobei der Wechsel zwischen  $+ 20^{\circ}\text{C}$  und  $- 20^{\circ}\text{C}$  abwechselnd feuchte und trockene Umgebungsbedingungen darstellt.

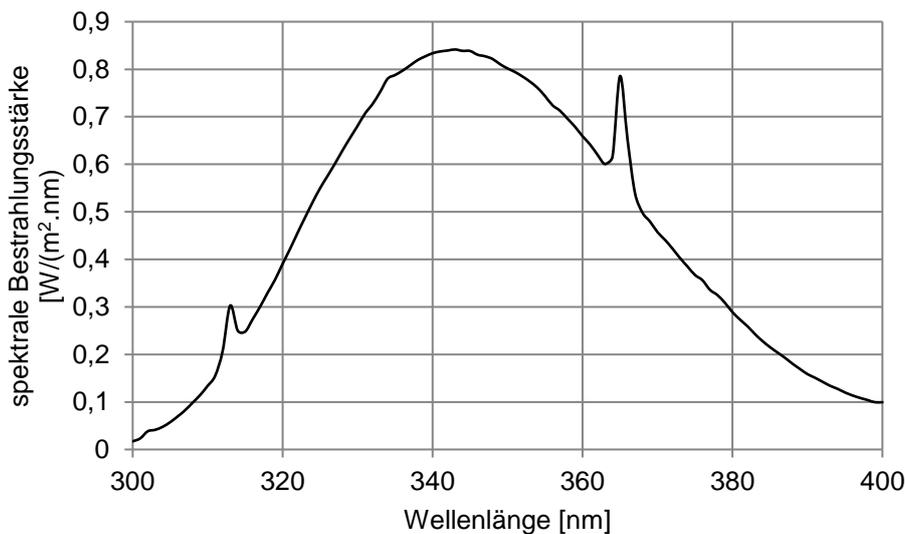
Die Beanspruchung findet im Anschluss an die Prüfung zur Bestimmung der langzeitigen Wasseraufnahme gemäß DIN EN 12088 mit Probekörpern der Größe  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times d\text{ mm}$  statt. Für die anschließenden Druckprüfungen sind ausreichend Probekörper vorzusehen, da ein Teil im feuchten Zustand und ein Teil erst nach Trocknung bis zur Massekonstanz geprüft wird. Mit einem weiteren Satz Probekörper wird die Druckprüfung am Ausgangsprodukt ohne spezielle Feuchte oder Temperatureinwirkungen nach EN 826 durchgeführt. Aus den ermittelten Druckspannungen wird die mittlere Änderung nach unten aufgeführter Gleichung berechnet. Eine optische Beurteilung der Probekörper auf Risse, Beschädigungen

oder Veränderungen ist ebenfalls durchzuführen. Abbildung 20 zeigt den schematischen Ablauf zur Prüfung des Verhaltens bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchung. Die Veränderung des Druckverhaltens nach Feuchteinflusses wird analog zu Formel (7) berechnet.

$$\Delta\sigma_{wet} = \frac{\sigma_{m,wet}}{\sigma_m} \cdot 100 \quad (7)$$

### UV-Beständigkeit

Baustoffe, die ohne schützende Verkleidung im Freien verwendet werden, sind zusätzlich zu Regen und Tau auch dem Sonnenlicht ausgesetzt. Da Aerogel-Granulat auch als transluzente Dämmung beispielsweise in Zwischenräumen von Scheiben Anwendung findet, ist der Einfluss von UV-Strahlung ein weiterer wichtiger Untersuchungspunkt, der die Dauerhaftigkeit beeinflusst. Untersucht werden kann die UV-Beständigkeit durch Bestrahlung mittels UV-A Lampen. Die kurzwelligeren UV-Strahlen verursachen physikalische Schäden, die sich in Form von Rissen, Farbveränderung oder Versprödung auswirken.



**Abbildung 21 Spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke der verwendeten UVA 340 Lampen mit einer Kontrolle der Strahlungsstärke von 0,84 W/(m<sup>2</sup>·nm @340nm)**

Die Durchführung der künstlichen Alterung bei Beanspruchung durch UV-Strahlung findet in Anlehnung an das Vorgehen aus DIN EN 1297 für Abdichtungsbahnen statt. Die darin empfohlene Dauer der Beanspruchung des Materials mit den UV-A Lampen ist mit 5000 Stunden bei einer Temperatur von 50 °C angegeben. Abbildung 21 zeigt die spektrale Bestrahlungsstärke über dem relevanten Wellenlängenbereich der in den verwendeten Q-UV Öfen zum Einsatz kommenden UV-A-340-Lampen, die dem Sonnenlicht sehr nahekommt. Gerade in dem besonders schädlichen Bereich der kürzeren Wellenlängen ist die Übereinstimmung sehr gut. Bei die-

sen Apparaturen zur beschleunigten Bewitterung lässt sich die Temperatur, die Feuchte sowie die UV-Strahlung einstellen, um mehrere Zyklen während eines Tests zu durchlaufen. Zusätzlich existiert in einigen Ausführungen zur Simulation von Regen eine Sprühvorrichtung.

## Prüfmethoden

In definierten zeitlichen Abständen werden die Probekörper aus der Alterung entnommen, um Prüfungen zu den betrachteten Eigenschaften durchzuführen. Aus der Kombination dieser verschiedenartigen Untersuchungsmethoden lässt sich ein genaueres Bild über die Dauerhaftigkeit von APMs gegenüber unterschiedlichen klimatischen und hygrischen Einflüssen aus der Nutzung erstellen. Unmittelbar im Anschluss daran wird die Alterung fortgesetzt. Abbildung 22 gibt einen Überblick über den Projektumfang.

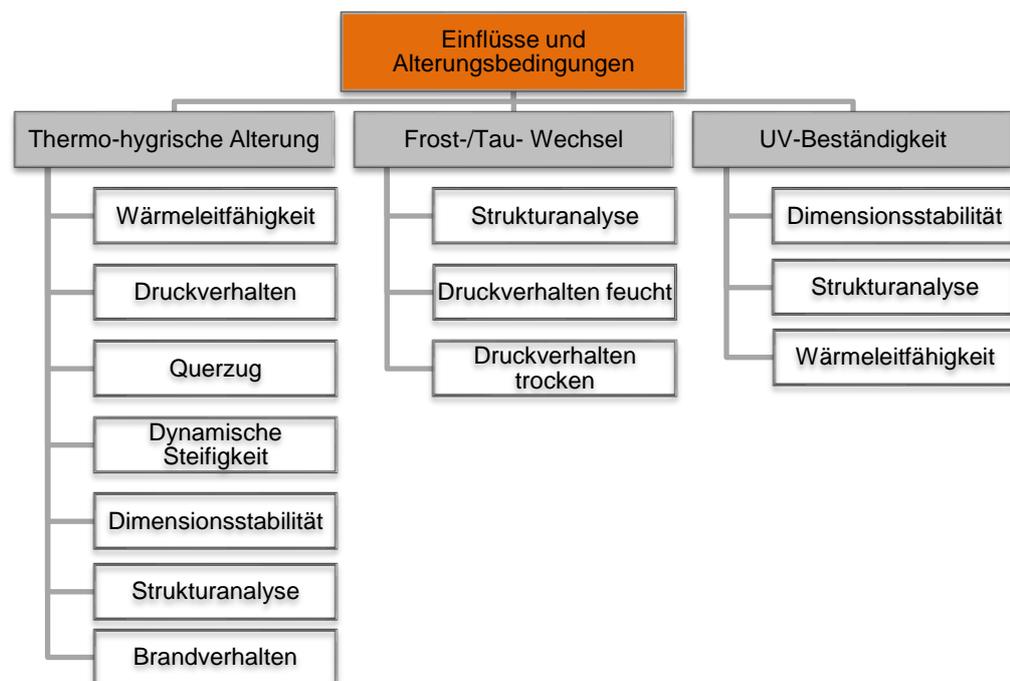


Abbildung 22 Organisationsdiagramm zu Forschungsbereich A

### Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit als entscheidende Kenngröße für Wärmedämmstoffe existieren verschiedene normativ geregelte Verfahren. Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit werden im Plattengerät nach DIN EN 12667 durchgeführt. Bestimmt wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei einer mittleren Probekörpertemperatur von 10°C. Die Temperaturdifferenz über der Probe beträgt jeweils 10 K.

Bei diesem Verfahren wird die Probe vollflächig zwischen einer temperaturgeregelten Heizplatte auf der einen Probekörperseite und einer Kühlplatte auf der gegenüberliegenden Seite positioniert. Jeder Messpunkt wird solange angesprochen bis sich ein stationärer Zustand der Leistung der Heizplatte und der Temperaturdifferenz über der Probe einstellt.

Aus den Messgrößen Leistung der Heizplatte [W], Fläche der Heizplatte [m<sup>2</sup>], Dicke der Probe [m] und der Temperaturdifferenz über der Probe [K] errechnet sich die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/(m·K)]. Um die Werte auf eine einheitliche Probenmitteltemperatur zu beziehen wird aus den ermittelten Messwerten eine Regression durchgeführt:

$$\lambda = f(T_{\text{mittel}}) = m \cdot T_{\text{mittel}} + b \quad (8)$$

Aus dem nach (2) bestimmten funktionalen Zusammenhang wird schließlich die Wärmeleitfähigkeit bei  $T_{\text{mittel}} = 10^{\circ}\text{C}$  ( $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$ ) ermittelt, welche üblicherweise für Bauprodukte in Deutschland angegeben wird.

Die erforderliche Probekörpergröße beträgt 300 x 300 x d mm. Vor der Messung ist eine dem Material entsprechenden Vorbereitung zu tätigen, um den Einbau der Proben in das Messgerät ordnungsgemäß durchführen zu können. Dünne Folien eignen sich bei den plattenförmigen Dämmstoffen als Schutzhülle, ohne die Messung negativ zu beeinflussen. Staubempfindliche Bestandteile der Messapparate können so geschützt werden aber auch Korrosion an der Messtechnik durch die beim Herstellprozess von pyrogener Kieselsäure als Nebenprodukt entstehende Salzsäure wird vermieden. Kompressible Materialien erhalten an den Ecken Abstandhalter aus druckfestem Material, für das lose Granulat werden Stützrahmen aus XPS verwendet, um eine konstante Dicke der Probe während der Messung zu gewährleisten.

### Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die zu untersuchenden mechanischen Eigenschaften sind die Zug- und Druckfestigkeit, die dynamische Steifigkeit und die Dimensionsstabilität. Für jede dieser Eigenschaften ist ein gesondertes Verfahren anzuwenden und Probekörper bereit zu stellen, da es sich teilweise um zerstörende Prüfungen handelt. Vor Beginn der Prüfungen sind alle Probekörper zu vermessen und zu wiegen.

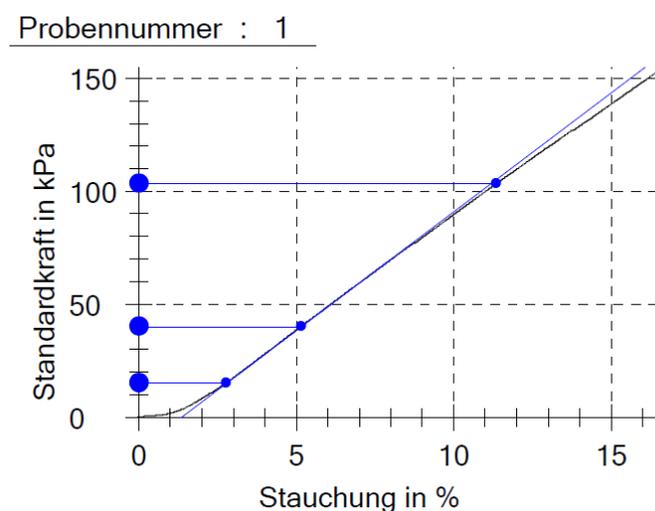
#### *Zugfestigkeit*

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach EN 1607 wird an Proben mit den Abmessungen 200 mm x 200 mm durchgeführt. Das Material wird vollflächig auf

steife Trägerplatten aufgeklebt, um die Proben in das Zugprüfgerät einbauen zu können. Schäumhüte oder Deckschichten dürfen vor dem Aufkleben nicht entfernt werden. Während der Prüfung bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min, wird die Dehnung des Materials in mm mit der aufgetragenen Kraft in N aufgetragen. Die größtmögliche Zugkraft ist aufzuzeichnen, um daraus die Zugfestigkeit zu berechnen. Eine Serie aus fünf Proben wird zu einem Ergebnis gemittelt.

### *Verhalten bei Druckbeanspruchung*

Bei der Prüfung der Drucksteifigkeit nach EN 826 wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10% der Probendicke je Minute eine Druckbeanspruchung auf den Prüfkörper aufgebracht, während die Dickenverminderung als Stauchung  $\epsilon$  in % aufgezeichnet wird. Nach Aufbringen einer Vorlast von 250 Pa wird der Druck erhöht, bis ein Versagen auftritt oder bis eine Stauchung von 10 % erreicht ist. Bei Versagen wird das Ergebnis als Druckfestigkeit  $\sigma_m$  ausgewertet, andernfalls wird die Druckspannung  $\sigma_{10}$  bei 10 % Stauchung ermittelt. Dazu ist die Nullpunktverformung zu bestimmen, indem die steilste gerade Strecke in der Kraft-Verformungs-Kurve bis  $F = 0$  verlängert wird. Alle Verschiebungen zur Berechnung der Stauchung werden von diesem Verformungsnullpunkt aus gemessen. Der Mittelwert aus einer Serie von fünf Prüfkörpern wird als Ergebnis ausgewertet. Falls in der Kurve kein exakt gerader Abschnitt gefunden werden kann, ist das Verfahren nicht anwendbar, es ist dann lediglich eine Angabe der verformungsabhängigen Druckspannungswerte ohne angepassten Verformungsnullpunkt möglich. Es sind Probekörper der Größe 200 mm x 200 mm x d mm vorzusehen.



**Abbildung 23 Kraft-Verformungs-Kurve mit linearem Bereich und Verformungsnullpunkt zur Bestimmung der Kraft bei 10 % Stauchung (FIW München)**

### *Dynamische Steifigkeit*

Für die Bestimmung der dynamischen Steifigkeit ist zum Ausgleich von eventuellen Unebenheiten der Probenoberfläche eine dünne Gipsschicht aufzutragen, in die eine quadratische Stahlplatte zur Beschwerung eingebettet wird. Die gesamte Auflast aus Stahlplatte und Messeinrichtung muss 8 kg betragen. Eine wasserdichte Folie verhindert das Eindringen des Gipses in die Poren der Probe und da die Prüfung an sich zerstörungsfrei ist, können die Proben im Anschluss weiter gealtert werden. Die Stahlplatte und die drei benötigten Proben haben Abmessungen von 200 mm x 200 mm x d mm. Über die aufliegende Stahlplatte werden vertikale Schwingungen in den Probekörper eingeleitet. Dieser stellt die Feder in dem Masse-Feder-System dar und die Resonanzfrequenz kann gemessen werden. Die Anregung des Systems erfolgt mit sinusförmigen Schwingungen.

### *Dimensionsstabilität*

Die Bestimmung der Dimensionsstabilität nach DIN EN 1604 beinhaltet eine Vorconditionierung, zwei Messungen von Länge, Breite und Dicke der Probe an normativ festgelegten Punkten und eine zwischenzeitlichen Lagerung von 48 Stunden bei 70 °C / 90 % r.F.. Durch diese extreme Klimabeanspruchung kann gegebenenfalls eine Änderung der Dimensionen bewirkt werden. Die Maßänderungen werden aus den beiden Messungen berechnet und in Prozent nach (3) angegeben:

$$\Delta \varepsilon_l = 100 \cdot \frac{l_t - l_0}{l_0}. \quad (9)$$

### Brandverhalten

Das Brandverhalten der Produkte wird gemäß DIN EN ISO 11925-2 mit einem Kleinbrenner geprüft. Der Versuch zum Nachweis der Klasse E beinhaltet eine Beflammung für 15 Sekunden und einer Beobachtung des Brandverhaltens über weitere 5 Sekunden. Die Durchführung einer Flächenbeflammung und einer Kantenbeflammung führt ggf. zu unterschiedlichen Ergebnissen, weshalb beide Varianten untersucht werden. Hierzu sind zwei separate Sätze an Prüflingen bereit zu halten. Die Abmessungen des Probekörpers betragen 250 mm x 90 mm x d mm.

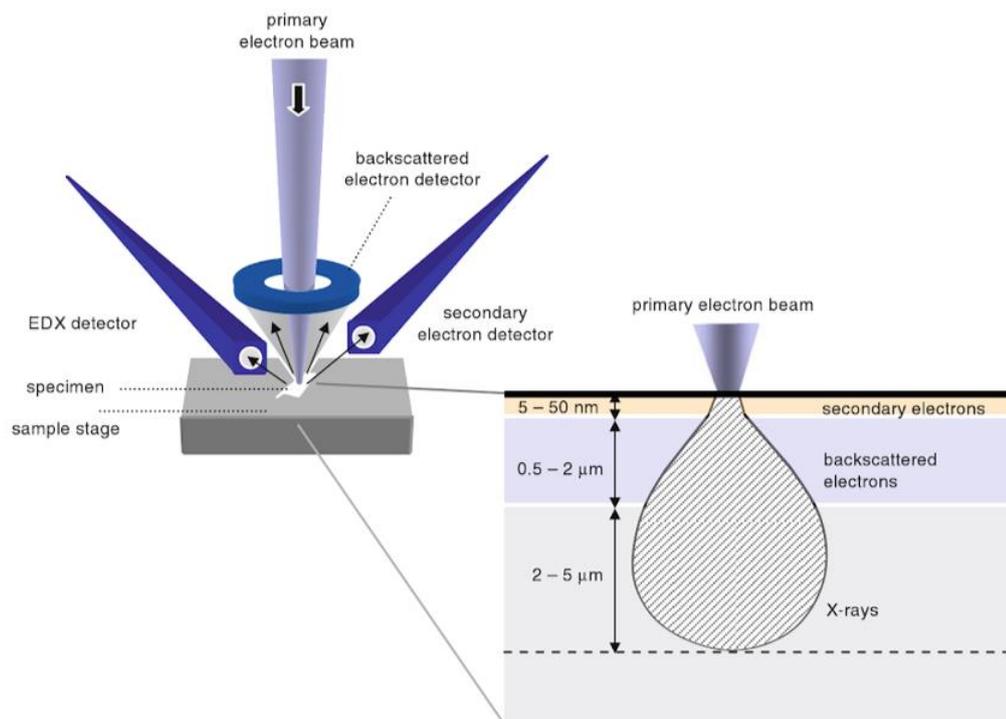
### Strukturanalyse

#### *Mikroskopie*

Um Veränderungen in der Morphologie bei fortschreitender Alterung der Produkte verfolgen zu können, werden mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Partikelgrößen, die Form und Anordnung der Partikel beeinflussen die chemischen und

physikalischen Eigenschaften, weshalb ihre Beobachtung interessante Erkenntnisse liefern kann. Nach jedem Alterungsschritt wird mit geeigneter Vergrößerung jeder Probekörper betrachtet. Zur Verfügung stand ein Digitalmikroskop mit hochauflösender 10 Megapixel Kamera und Objektiven für eine maximale Vergrößerung bis 2350x und einer Auflösung von 425 nm.

Mit einem Raster-Elektronenmikroskop (REM) können hochauflösende Aufnahmen im Bereich bis 1 nm erzeugt werden. Dieses Verfahren eignet sich deshalb zur Veranschaulichung der dreidimensional vernetzten Struktur. Mit Beschleunigungsspannungen bis 30 kV wird ein Elektronenstrahl über die Probenoberfläche geführt wobei Sekundärelektronen aus der Oberfläche gelöst werden, die wiederum von einem Detektor analysiert werden. Die Höhe der Beschleunigungsspannung entscheidet über die Eindringtiefe der Elektronen und somit darüber, ob eine Aufnahme der Probenoberfläche oder oberflächennahen Masse entsteht. Damit keine Streuung der Elektronen entsteht, werden Elektronenmikroskop-Aufnahmen im Vakuum getätigt. Nichtleitende Proben müssen für REM-Aufnahmen mit wenigen Nanometern eines leitfähigen Materials wie Gold oder Palladium beschichtet werden. (Aegerter et al. 2011)



**Abbildung 24** Schematische Funktionsweise eines Raster-Elektronen-Mikroskops (REM) und Eindringtiefe des Elektronenstrahls bei einer Beschleunigungsspannung von bis zu 30kV (Aegerter et al. 2011)

### *Sorptionsverhalten*

Prinzipiell stehen verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung des Sorptionsverhaltens eines porösen Stoffes zur Verfügung. In jedem Fall wird die Feuchteaufnahme

bei Exposition des Prüfkörpers in einem bestimmten Klima durch die Änderung der Masse mittels Wiegung bestimmt.

Bei der sogenannten Klimakammermethode werden die Probekörper typischerweise in den baulich relevanten Klimaten 23 °C / 50 % r.F. und bei 23 °C / 80 %r.F. gelagert, wobei die Gewichtszunahme durch manuelle Wiegungen protokolliert wird.

Die automatisierte Bestimmung von Sorptionsisothermen bei konstanter Temperatur in einem weiten Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit ist mit einer sogenannten Dynamic Vapor Sorption Analysis (DVS) möglich. Hierbei wird die Masseänderung einer Probe automatisiert durch zyklische Wiegungen ermittelt. Eine sehr genaue Waage ermöglicht die Verwendung relativ kleiner Proben, was die Zeitdauer bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte deutlich reduziert. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch die Unterschiede zwischen Adsorption, also der Aufnahme von Wassermolekülen während der Auffeuchtung, und der Desorption, also der Abgabe von Wassermolekülen während der Trocknung von Proben. Typischerweise liegen die Feuchtegehalte bei der Desorption höher. Die Ausprägung und ggf. Veränderung dieser sogenannten Hysterese ist von der Mikrostruktur und Porengrößenverteilung abhängig, die sich durch eine Alterung verändern können und auch für andere Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit entscheidend sind.

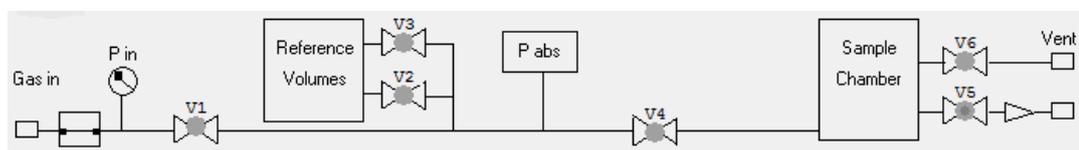


**Abbildung 25 Sorptionsanalysegerät zur Bestimmung der Sorptionsisothermen mit drehbarem Multi-Probenteller zur Wägeposition im hier Bild bei Probe R**

## Dichte und Volumen

Die Porosität ist eine sehr kennzeichnende Eigenschaft für APM. Durch die verschiedenen Alterungsmechanismen und den Einfluss und die Anlagerung von Feuchte im Porenraum ändert sich die Struktur der Materialien. Eine regelmäßige Messung der Reindichte und des Volumens mittels Helium-Pyknometer ermöglicht es, diese Veränderungen zu ermitteln.

Das Flussschema in Abbildung 26 zeigt den schematischen Ablauf zur Bestimmung des Volumens und der Dichte von Pulvern, Granulaten und porösen Werkstoffen. Gerade für Materialien mit einer großen Oberfläche (z.B. poröse Stoffe oder feine Pulver) eignet sich Helium als Prüfgas für sehr präzise Messungen, da es selbst in kleinste Poren eindringt und in der Regel nicht adsorbiert. Der Probekörper mit bekannter Masse wird bei diesem Messverfahren in einer Prüfkammer mit bekanntem Volumen platziert. Nach einigen Spülvorgängen der Probe mit Helium beginnen die tatsächlichen Messzyklen. Helium wird mit einem Druck von ca. 2 bar in die Referenzkammer mit ebenfalls bekanntem Volumen geleitet. Durch Öffnen des Ventils V4 entspannt sich das Gas und nimmt den gesamten freien Raum ein. Es stellt sich entsprechend den Gesetzmäßigkeiten idealer Gase ein Gleichgewichtsdruck ein durch den die Bestimmung des Volumens des Probekörpers möglich ist. Variable Parameter sind die Stabilisierungszeit in der Probenkammer, die zulässige Abweichung vom Gleichgewichtsdruck und die Gleichgewichtszeit, die nach der Prüfung anzupassen sind.



**Abbildung 26 Flussdiagramm zum Messablauf einer Dichtemessung im Helium-Pyknometer (www.porotec.de)**

Bei Schüttgütern kann die Dichte auf verschiedene Arten angegeben werden. Unter Verwendung des Helium-Pyknometers kann, wie bei allen Stoffen, die sogenannte Reindichte bestimmt werden. Dabei handelt es sich ausschließlich um die Dichte des Feststoffs. Unter Berücksichtigung des Volumens der Hohlräume als Anteil am Gesamtvolumen kommen noch die Schüttdichte und die Stampfdichte bzw. Schütt- und Stampfvolumen hinzu. Liegt ein kohärent disperses System vor, mit sich berührenden festen Partikeln und einem umgebenden Medium, wie es bei Aerogel-Granulat der Fall ist, kann die Stampfdichte nach DIN EN ISO 787 Teil 11 bestimmt werden. Das Schüttgut wird in Messzylinder mit einem Volumen von 250 ml eingefüllt. Unter Einwirkung von Rüttelbewegungen verkleinert sich das Volumen des Schüttguts vom Schüttvolumen zum Stampfvolumen unter Erhöhung der Dichte. Das Verhältnis der Veränderung wird mit dem Hausner-Faktor angegeben. Die Norm sieht dafür mindestens 1250 reproduzierbare Umdrehungen des Stampfvolumeters vor. Die Angabe der Dichte erfolgt immer als Masse pro Volumen, i.d.R. in [g/ml] oder [kg/m<sup>3</sup>]. Die vorhandene Laborausstattung ermöglicht die Durchführung

dieses Versuchs in Anlehnung an das genormte Verfahren mit einem Versuchsaufbau bestehend aus einem Rütteltisch und antistatischen Messbechern.

### 4.3 Versuchsplanung zu Forschungsbereich A

Um den Einfluss von Temperatur und Feuchte auf die ausgewählten Probekörper (s. Tabelle 4 und Tabelle 5) abzubilden, wird für jede der drei Alterungsmethoden eine Versuchsmatrix (Tabelle 15 bis Tabelle 17) erstellt. Die Proben werden entweder in einem Klima mit der aus der WUFI®-Simulation abgeleiteten Temperatur- und Feuchtekombination oder unter wechselndem Einfluss von Frost und Feuchte bzw. UV-Bestrahlung gelagert und in zyklischen Abständen gemessen.

An allen Probekörpern werden vor Beginn der künstlichen Alterung Frischwerte bestimmt. Nach jedem Alterungsschritt werden Messungen an den Proben durchgeführt, um einen zeitlichen Verlauf der Materialparameter darstellen und das Degradationsverhalten abbilden zu können. Bei der Anwendung von zerstörenden Prüfungen ist für jeden Alterungsschritt ein separater Satz Probekörper vorzusehen.

**Tabelle 15 Versuchsmatrix zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss durch Klimalagerung**

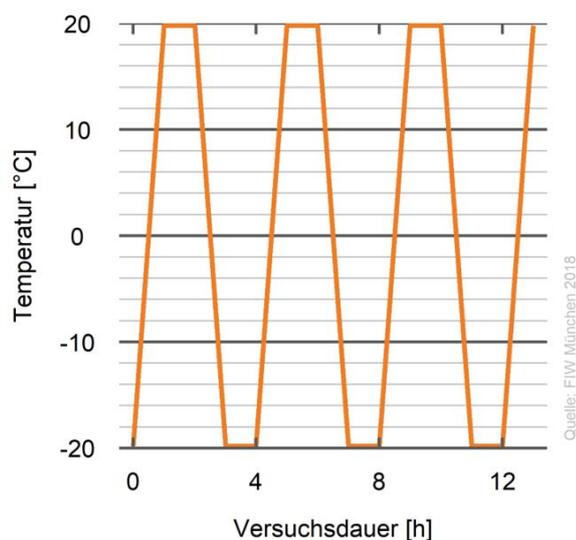
Prüfung	Frischwert	3 Monate	6 Monate	9 Monate
Wärmeleitfähigkeit	Alle	Alle	Alle	Alle
Sorption	Alle	-	-	Alle
Mikroskopie	Alle	-	-	Alle
Druckbeanspruchung	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1
Zugbeanspruchung	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1
Brandverhalten	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1
Dichte	Alle	-	-	Alle
Dimensionsstabilität	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1
Dynamische Steifigkeit	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1
Stampfdichte	A.1			A.1

Aufgrund der extremen Staubbildung wird für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eine spezielle Probenvorbereitung durchgeführt. Mit dünnen Folien werden die Probekörper verpackt, um die Geräte nicht zu verunreinigen und die Handhabung beim Einbau der teilweise relativ empfindlichen Proben zu erleichtern.

**Tabelle 16 Versuchsmatrix zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit durch Frost-Tauwechsel-Beanspruchung**

Prüfung	Frischwert	300 Zyklen feucht	300 Zyklen getrocknet
Wärmeleitfähigkeit			
Sorption	A.2, A.4, S.1	-	A.2, A.4, S.1
Mikroskopie	A.2, A.4, S.1	-	A.2, A.4, S.1
Druckbeanspruchung	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1	A.2, A.3, A.4, S.1
Zugbeanspruchung			
Brandverhalten			
Dichte	A.2, A.4, S.1	-	A.2, A.4, S.1
Dimensionsstabilität			
Dynamische Steifigkeit			
Stampfdichte			A.1

Auch im Fall der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung ist der Probeneinbau in die herkömmlichen Frost-Tau-Geräte aufgrund der instabilen Beschaffenheit der Produkte nicht möglich. In den feuchten Tauphasen würden viele Partikel ausgespült werden, sodass die Filter und Pumpen verstopft oder beschädigt werden. Die Proben werden deshalb vor dem Einbau auf die Maße 200 x 200 mm zugeschnitten und wie in Abbildung 27 rechts dargestellt in spezielle Halterungen eingebaut. In Umweltsimulationsanlagen wird der in Abbildung 27 abgebildete Zyklus von -20°C und 20 °C gefahren, wobei jeweils eine Übergangsphase von einer Stunde das Erreichen der gewünschten Werte garantiert. Zu Beginn jeder Tauphase werden die Proben für ca. 15 Minuten mit Wasser umspült.



**Abbildung 27 Zyklus zur Frost-Tauwechsel-Beanspruchung und Einbau der Proben in die Halterungen**

Da in der Bauanwendung nur das Aerogel-Granulat einer UV Alterung ausgesetzt ist, werden die weiteren Probekörpertypen nicht in dem Q-UV-Schnellbewitterungsgerät gealtert. Typische Anwendungsformen für transluzente Dämmung stellen mit Granulat gefüllte Scheibenzwischenräume aus Acrylglas oder Fensterglas dar. Deshalb werden spezielle Halterungen aus PMMA Stegplatten und Fensterglas angefertigt (Abbildung 29). Die verwendete Stegplatte hat eine Dicke von 16 mm und einen Stegabstand von 32 mm und wurde nicht speziell UV-stabilisiert. Mit herkömmlichem Fensterglas und einem Abstandshalter aus XPS von 10 mm werden weitere Probekörper angefertigt und das Granulat in den Zwischenraum eingefüllt. Zusätzlich wird das Granulat in einer flachen Schale direkt bestrahlt. Ebenso wie in der Anwendung im Scheibenzwischenraum wirkt das Acrylglas als Filter für die UV-Strahlung. Abbildung 28 zeigt den Vergleich zwischen direkt von den UVA Lampen abgestrahltem Spektrum sowie das messbare Spektrum hinter einer Glasscheibe von Sonnenlicht und UVA-340 Lampe. Die Übereinstimmung ist extrem hoch. Genauere Angaben zur Absorption von UV-Strahlung durch das Acrylglas sind nicht bekannt jedoch können mit den oben beschriebenen Probeneinbauten realistische Einflüsse simuliert werden. Bei allen Expositionsarten dringt ausreichend Strahlung zum Granulat, um gegebenenfalls Schäden zu verursachen zu können.

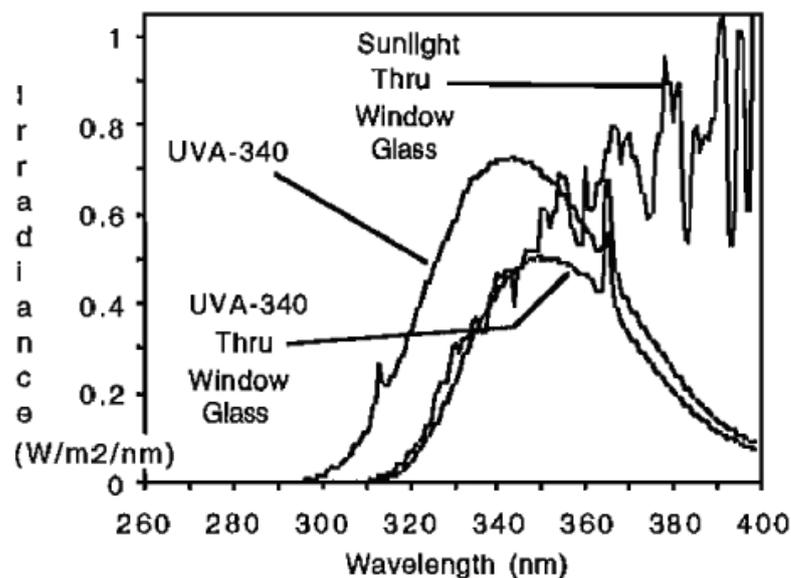


Abbildung 28 Vergleich von UVA-340 direkt und durch Fensterglas sowie direkter Sonneneinstrahlung (Q-Lab)

Die Kennzeichnung der Proben in Abhängigkeit von der Art der UV-Exposition unterscheidet sich wie folgt:

- Freie Exposition
- Hinter Glas (Abbildung 29 im Bild rechts)
- In Stegplatte (Abbildung 29 im Bild links)

**Tabelle 17 Versuchsmatrix zur Untersuchung der UV-Beständigkeit**

Prüfung	Frischwert	3000 h
Wärmeleitfähigkeit	A.1 hinter Glas	A.1 hinter Glas
Sorption	Alle A.1	Alle A.1
Mikroskopie	Alle A.1	Alle A.1
Druckbeanspruchung		
Zugbeanspruchung		
Brandverhalten		
Dichte	A.1 freie E.	A.1 freie E.
Dimensionsstabilität		
Dynamische Steifigkeit		
Stampfdichte		Alle A.1



**Abbildung 29** Probekörper zum Einbau in das Q-UV Schnellbewitterungsgerät. Links: PMMA-Steckplatte mit Aerogelgranulat gefüllt. Rechts: Aerogel im Scheibenzwischenraum von Fensterglas

#### 4.4 Ergebnisse zu Forschungsbereich A

Die geringe Dicke, Sprödhheit und das Staubbildungspotential der untersuchten Produkte stellt besondere Anforderungen an den Umgang. Insbesondere beim Einbau in Prüfgeräte ist eine Umhüllung mit dünnen Folien ratsam, um die Messtechnik, Lagerungen und Antriebe nicht zu beschädigen.

#### **Ergebnisse hygrothermische Bauteilsimulation**

##### Untersuchung der Anwendungsrandbedingungen

Für die in Tabelle 6 definierten Musteranwendungen wurde die Temperatur- und Feuchtebelastung an Innen- und Außenoberfläche der Dämmschicht ausgewertet.

Der Einfluss verschiedener Randbedingungen soll abgeschätzt werden: Dazu zählen der Standort (Freiburg oder Holzkirchen), die Feuchtelast (normal oder hoch) sowie die Orientierung nach Süd oder Nord. Auch Unterschiede, die sich aus der Anwendung in Wänden (Neigung 90° K.1, K.2, K.4) oder als Steildach (Neigung 30°, K.3, K.5) ergeben, können erkannt werden.

In Abbildung 30 bis Abbildung 34 sind dazu jeweils die Mittelwerte des dritten Simulationsjahres für die Temperaturen auf der Außenseite (links, blau) und der Innenseite (links, orange) der Dämmung sowie die relativen Feuchten auf der Außenseite (rechts, grau) und Innenseite (rechts, rot) der Dämmung für die fünf verschiedenen Anwendungsfälle dargestellt.

Bei den ermittelten Mitteltemperaturen treten für alle fünf Musteranwendungen die zu erwartenden Abstufungen zwischen den Standorten auf. Auf der Außenseite der Dämmung liegen die Temperaturen für den Standort Freiburg immer etwas höher, als für den entsprechenden Fall in Holzkirchen. Auch weisen die Fälle in südlicher Orientierung erhöhte Temperaturen gegenüber der nördlichen auf. Die Feuchtelast im Innenraum hat wie erwartet keinen Einfluss auf die Temperatur. Auf der Innenseite der Dämmung liegt die Jahresdurchschnittstemperatur für alle betrachteten Fälle über 20°C. Wieder sind die Temperaturen in Freiburg erhöht gegenüber denen in Holzkirchen. Ein Einfluss der Bauteilorientierung ist jedoch für die Temperaturen auf der Innenseite kaum noch zu erkennen.

Die relativen Feuchten auf der Außenseite der Dämmung sind entweder für alle betrachteten Fälle sehr ähnlich (K.1) oder weisen leicht erhöhte Werte bei einer Orientierung Richtung Norden gegenüber der Orientierung Richtung Süden auf. Auch eine erhöhte Feuchtelast im Innenraum kann die relative Feuchte auf der Außenseite der Dämmung leicht erhöhen, wobei dieser Effekt in Holzkirchen deutlicher auftritt als in Freiburg.

Bei den relativen Feuchten auf der Innenseite der Dämmung ist vor allem auffällig, dass diese für die südliche Orientierung für die Steildachkonstruktionen und vor allem für das zweischalige Mauerwerk ein wenig höher liegen, als für die nördliche Orientierung. Dies ist genau der gegenteilige Effekt, als auf der Außenseite der Dämmung zu beobachten war. Eventuell ist dies mit der Schlagregenverteilung an den beiden Standorten zu erklären: Für den Standort Freiburg liegt die Schlagregenbelastung vor allem im Südwesten und Süden. In Holzkirchen ist die höchste Schlagregenbelastung an der Westfassade zu erwarten (hier nicht betrachtet), jedoch liegt auch hier die Belastung im Süden höher als die im Norden. Außerdem ist zu erkennen, dass eine erhöhte Feuchtelast im Innenraum nur für die beiden innen gedämmten Anwendungsfälle (K.2 und K.4) am Standort Holzkirchen zu einer signifikanten Erhöhung der relativen Feuchte auf der Innenseite der Dämmung führt.

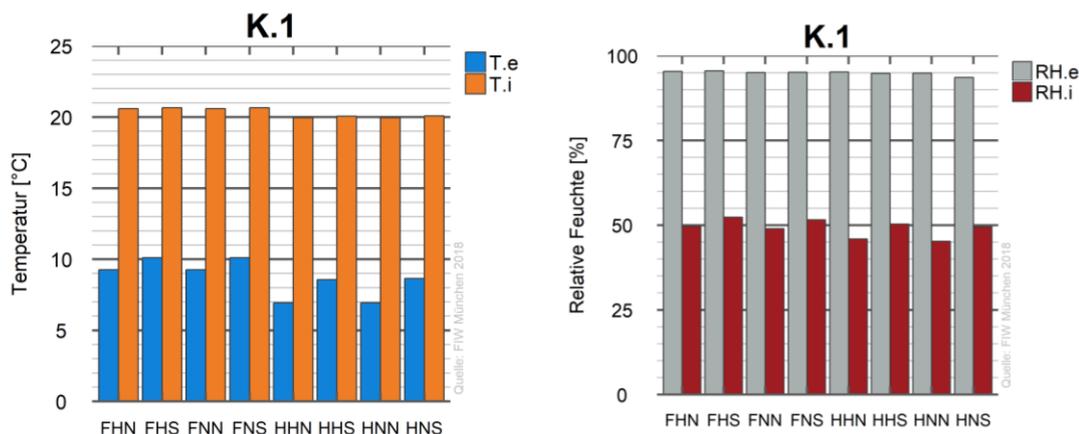


Abbildung 30 Ergebnisse des Variantenvergleichs für K.1 (zweischaliges Mauerwerk). Links – Temperatur an der Außenseite (Blau) und Innenseite (Orange) der Dämmung; Rechts – relative Feuchte an der Außenseite (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung.

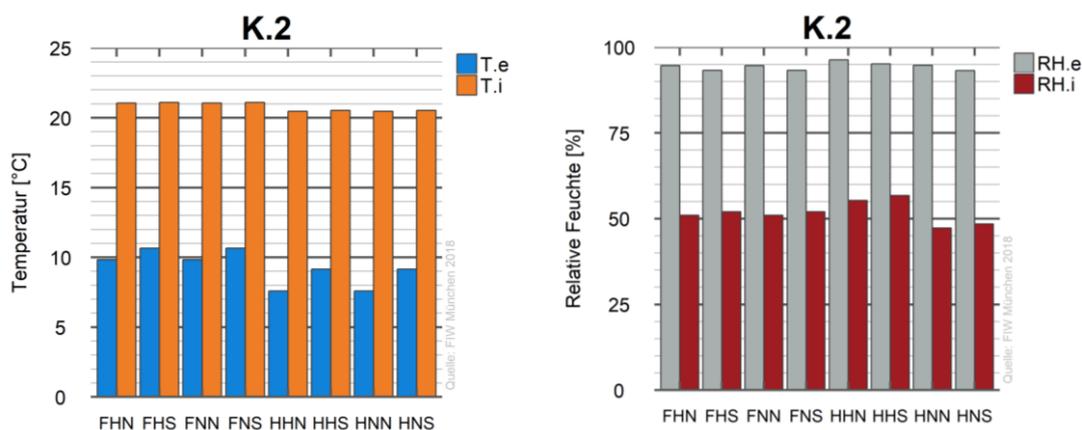


Abbildung 31 Ergebnisse des Variantenvergleichs für K.2 (Innendämmung 1). Links – Temperatur an der Außenseite (Blau) und Innenseite (Orange) der Dämmung; Rechts – relative Feuchte an der Außenseite (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung.

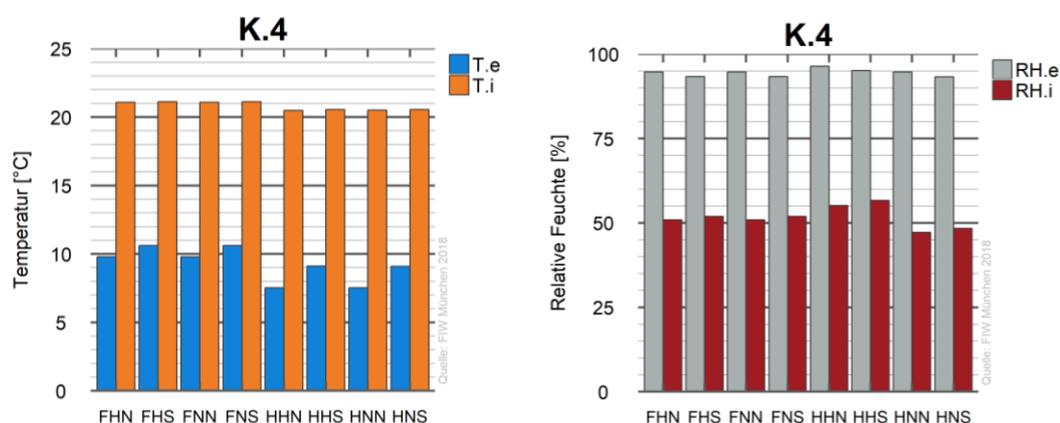
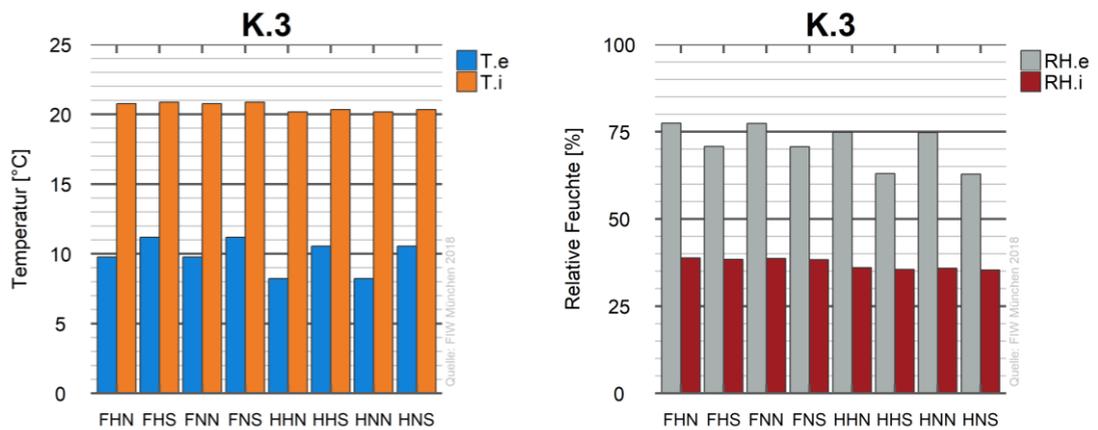
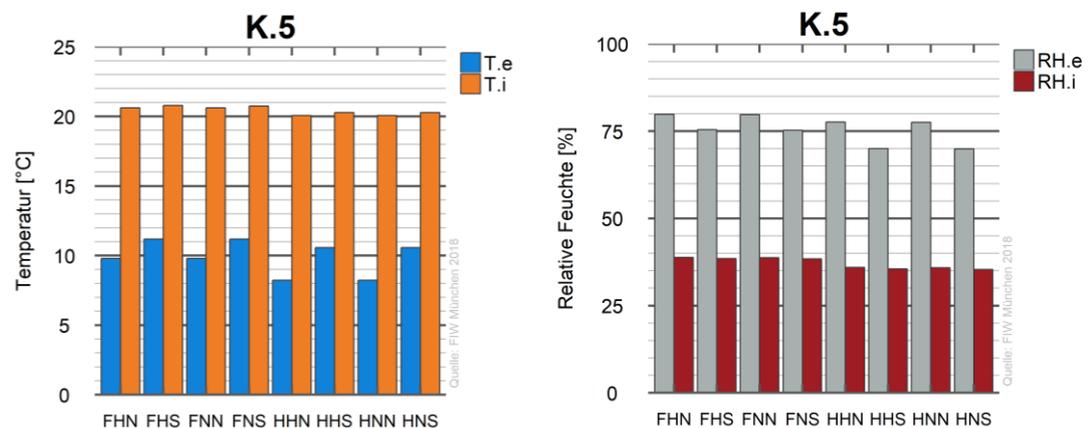


Abbildung 32 Ergebnisse des Variantenvergleichs für K.4 (Innendämmung 2). Links – Temperatur an der Außenseite (Blau) und Innenseite (Orange) der Dämmung; Rechts – relative Feuchte an der Außenseite (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung.



**Abbildung 33** Ergebnisse des Variantenvergleichs für K.3 (Steildach 1). Links – Temperatur an der Außenseite (Blau) und Innenseite (Orange) der Dämmung; Rechts – relative Feuchte an der Außenseite (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung.

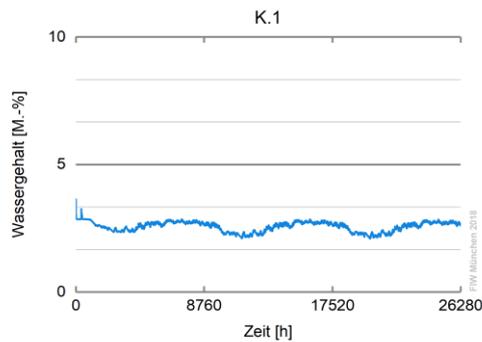


**Abbildung 34** Ergebnisse des Variantenvergleichs für K.5 (Steildach 2). Links – Temperatur an der Außenseite (Blau) und Innenseite (Orange) der Dämmung; Rechts – relative Feuchte an der Außenseite (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung

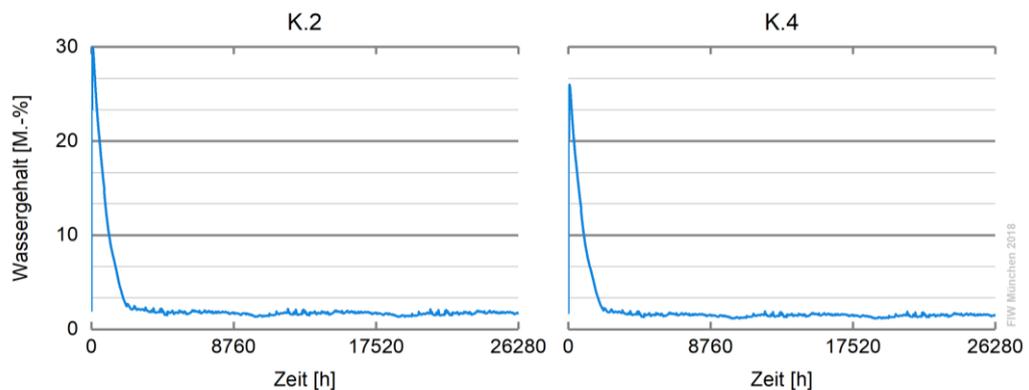
Zusätzlich wird der Verlauf des Wassergehalts über den Rechenzeitraum von drei Jahren innerhalb der Dämmstoffschicht analysiert. Dargestellt ist in den folgenden Abbildungen jeweils der Fall HNS (Holzkirchen, normale Feuchtelast, Südorientierung), da gemäß Tabelle 14 die Schlagregenbelastung für die Süd-Orientierung stärker ausfällt als für den Fall Nord und als Feuchtelast auf der Innenseite der „Normalfall“ angesetzt werden soll.

Der Verlauf des Wassergehalts zeigt sehr unterschiedliche Kurvenverläufe für die unterschiedlichen Konstruktionsarten. Dies liegt einerseits an der Lage des Dämmstoffs in der Konstruktion aber auch an der Art der Befestigung. Für die beiden Fälle der Innendämmung K.2 und K.4 mit den Materialien A.2 und A.4 mit geklebter Befestigung ist ein anfänglicher Feuchteeintrag durch die Klebstoffschicht und ein Austrocknen der Baufeuchte sehr deutlich erkennbar. Bei den Materialien A.1, A.3 und S.1 ist trotz abweichender Anwendung als Kerndämmung und Dämmung im Steildach ein Jahreszeitlicher Verlauf sichtbar, bei Konstruktion K.5 ist dieser jedoch sehr schwach ausgeprägt.

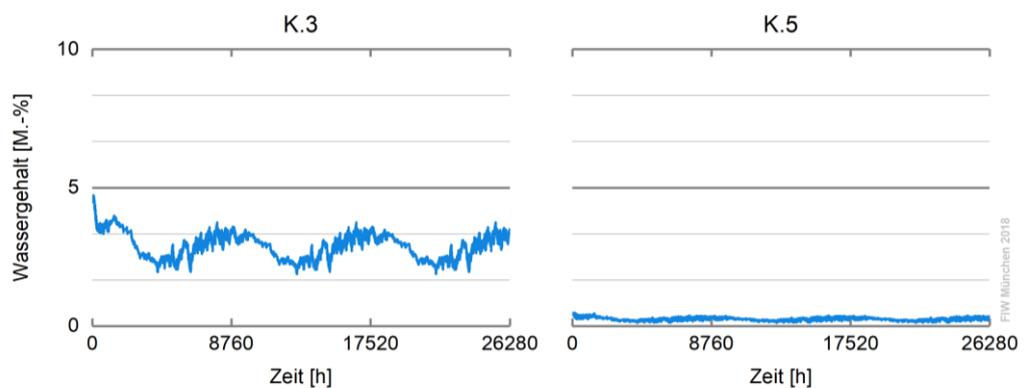
Zusätzlich ist zu erkennen, dass alle fünf Konstruktionen sich bereits ab dem 2. Jahr der Simulationsrechnung im eingeschwungenen Zustand befinden. Der Wassergehalt in der Dämmschicht liegt dann für alle hier betrachteten Anwendungsfälle deutlich unter 5 M.-%, für K.5 sogar unter 1M.-%, was die hydrophoben Eigenschaften der Materialien widerspiegelt.



**Abbildung 35 Verlauf des Wassergehalts in der Dämmschicht für den Anwendungsfall zweischaliges Mauerwerk (K.1)**



**Abbildung 36 Verlauf des Wassergehalts in der Dämmschicht für den Anwendungsfall Innendämmung**



**Abbildung 37 Verlauf des Wassergehalts in der Dämmschicht für die Konstruktionstypen Steildach**

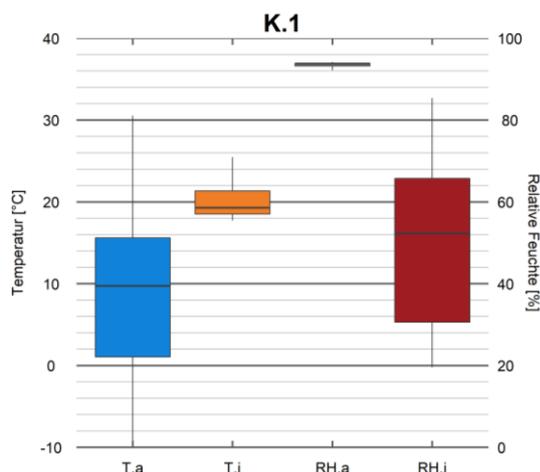
## Festlegung der Randbedingungen der künstlichen Alterungsmethoden aus den Musteranwendungen

Um eine Vorstellung über die Häufigkeitsverteilung der Temperaturen und relativen Feuchten aus der Bauteilsimulation zu erhalten, sind die Ergebnisse der verschiedenen Musteranwendungen (Variante HNS) in Abbildung 38 bis Abbildung 40 in Form von Box Plots dargestellt. Zu sehen ist jeweils die Temperatur an der Außenseite (Blau) und an der Innenseite (Orange) des Dämmstoffs sowie die relative Feuchte an der Außenseite (Grau) sowie Innenseite (Rot) des Dämmstoffs für jeweils das dritte Jahr der Simulationsrechnung. Die vertikale Linie im Inneren jeder Box gibt den Median der Temperatur/relativen Feuchte über den Betrachtungszeitraum an. Die untere Begrenzung der Box ist das 25%-Quantil der Werte, die obere das 75%-Quantil, sodass genau 50% aller Ergebnisse im Inneren der Box liegen. Je größer die vertikale Höhe der Box, desto höhere Schwankungen über den Betrachtungszeitraum weisen die Temperaturen/relativen Feuchten auf.

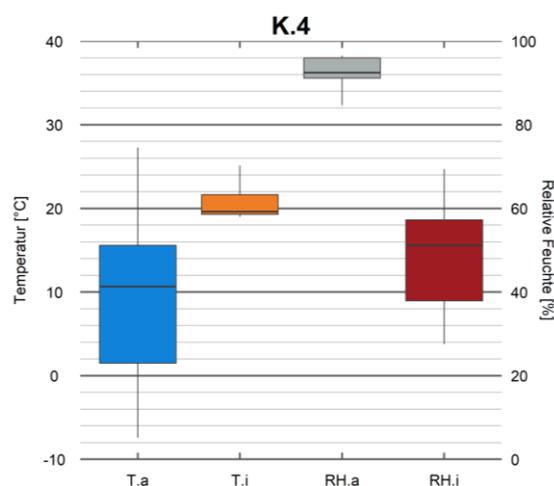
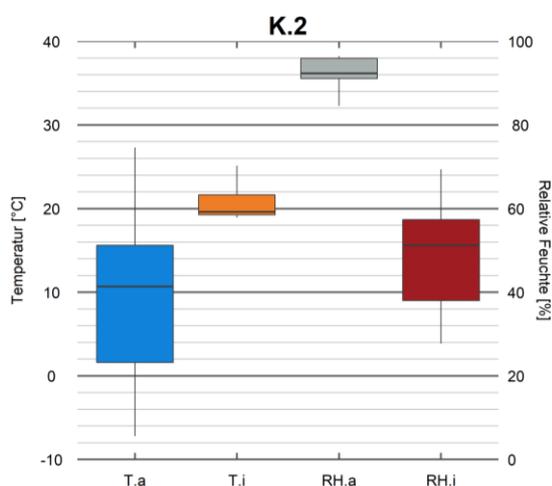
Aus dieser Darstellungsweise lassen sich Schlüsse auf typische durchschnittliche Umgebungstemperaturen und Umgebungsfeuchten von Aerogel- und APM-Dämmstoffen in den beispielhaften Bauanwendungen ziehen. Diese sind in Tabelle 18 noch einmal zusammengetragen und werden in den nachfolgenden Kapiteln als Referenzwerte verwendet, um die Randbedingungen für die künstlichen Alterungsverfahren festzulegen.

**Tabelle 18 Typische Umgebungstemperaturen und Umgebungsfeuchten von Aerogel-Dämmstoffen in den verschiedenen Musteranwendungen. Da es sich um Näherungen handelt, sind die Temperaturen auf 5°C genau gerundet und relative Feuchten auf 5 % genau.**

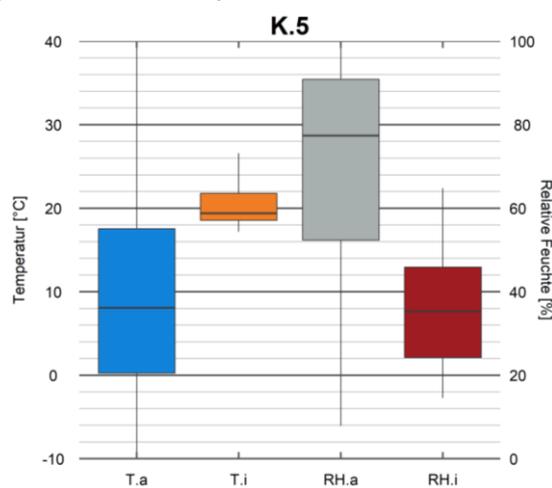
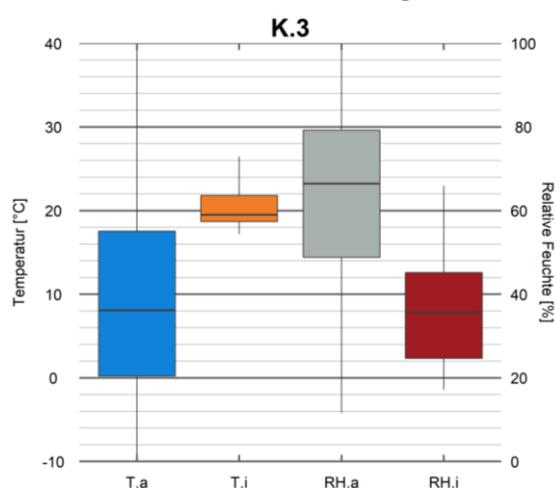
Anwendungsfall	T.aMedian	T.iMedian	RH.aMedian	RH.iMedian
Zweischaliges MW (K.1)	10 °C	20 °C	95 %	55 %
Innendämmung (K.2)	10 °C	20 °C	95 %	50 %
Innendämmung (K.4)	10 °C	20 °C	95 %	50 %
Steildach (K.3)	10 °C	20 °C	65 %	35 %
Steildach (K.5)	10 °C	20 °C	75 %	35 %



**Abbildung 38** Temperaturen auf der Außen- (Blau) und der Innenseite (Orange) sowie der relativen Feuchte auf der Außen- (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung für den Anwendungsfall zweischaliges Mauerwerk (K.1)



**Abbildung 39** Temperaturen auf der Außen- (Blau) und der Innenseite (Orange) sowie der relativen Feuchte auf der Außen- (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung für den Anwendungsfall Innendämmung (K2 links, K4 rechts)



**Abbildung 40** Temperaturen auf der Außen- (Blau) und der Innenseite (Orange) sowie der relativen Feuchte auf der Außen- (Grau) und Innenseite (Rot) der Dämmung für den Anwendungsfall Steildach (K.3 links, K.5 rechts)

Die hierbei berechneten Alterungsfaktoren sind als grober Anhaltspunkt dafür zu sehen, welche künstliche Alterung welchem Alterungszeitraum unter realen Bedingungen entspricht. Die verwendeten Rechenmodelle sind zum Teil stark abhängig von den Eingabeparametern können daher sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Auch werden die Alterungsfaktoren auf Basis von Literaturwerten für die Materialgruppe der APM-Dämmstoffe abgeschätzt. Die genaue Übertragbarkeit auf ein bestimmtes Produkt sollte im Einzelfall überprüft werden.

Da das hier verwendete Vorgehen jedoch vor allem dazu dienen soll, Tendenzen aufzuzeigen, ist davon auszugehen, dass sich die berechneten Alterungsfaktoren als Näherungswerte eignen. Ziel ist es, die künstliche Alterung so auszulegen, dass sie in etwa einer Alterung von 40-50 Jahren in der Bauanwendung entspricht. Dies wird als angemessene Annahme für die Lebens- bzw. Einsatzdauer eines APM- oder Aerogel-Dämmstoffs betrachtet.

#### *Randbedingungen der Klimalagerung*

Im Folgenden werden zwei mögliche Kombinationen aus Temperatur und Feuchte für die künstliche Klimalagerung verglichen, die auch im IEA Annex 65 Subtask 2 zur Alterung von Hochleistungsdämmstoffen vorgeschlagen werden (Holm und Sprengard 2017). Dies sind eine Lagerung bei 50°C/70% r.F., was dem vorgegebenen Klima in der Produktnorm für Vakuum-Isolations-Paneele entspricht, sowie eine Lagerung 80°C/60% r.F.

Ein kombinierter Alterungsfaktor für Temperatur und Feuchte  $AF_{TH}$  wird analog zu Gleichung (1), (2) und (3) für diese zwei Lagerungsbedingungen in Abhängigkeit der typischen ermittelten Umgebungstemperaturen (5 °C, 10 °C, 15 °C) und Umgebungsfeuchten (40 % bis 70 %) ermittelt. Die Ergebnisse für die Lagerung bei 50 °C/ 70 % r.F. sind in Tabelle 19, die bei 80 °C/ 60 % r. F. in Tabelle 18 zu sehen. Die Alterungsfaktoren steigen deutlich an, je geringer die Referenzwerte für Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte gewählt werden.

**Tabelle 19 Alterungsfaktoren bei Klimalagerung bei 50°C und 70% r.F. in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte in der Bauanwendung. Orange markierter Fall entspricht am ehesten den simulierten Temperatur- und Feuchtegehalten.**

<b>AF.TH 50/70</b>	<b>RH<sub>U</sub> = 40 %</b>	<b>RH<sub>U</sub> = 50 %</b>	<b>RH<sub>U</sub> = 60 %</b>	<b>RH<sub>U</sub> = 70 %</b>
T <sub>U</sub> = 5 °C	298	169	102	68
T <sub>U</sub> = 10 °C	175	99	60	40
T <sub>U</sub> = 15 °C	104	59	36	24

**Tabelle 20** Alterungsfaktoren bei Klimalagerung bei 80°C und 60% r.F. in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte in der Bauanwendung. Orange markierter Fall entspricht am ehesten den simulierten Temperatur- und Feuchtegehalten.

AF.TH 80/60	RH <sub>U</sub> = 40 %	RH <sub>U</sub> = 50 %	RH <sub>U</sub> = 60 %	RH <sub>U</sub> = 70 %
T <sub>U</sub> = 5 °C	1857	990	619	409
T <sub>U</sub> = 10 °C	1089	581	363	240
T <sub>U</sub> = 15 °C	648	346	216	143

Im zeitlichen Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist eine neunmonatige Klimalagerung der Aerogel- und APM-Proben möglich. In Tabelle 21 ist für die beiden Temperatur- und Feuchte-Kombinationen umgerechnet worden, welcher Alterung unter realen Umständen eine Lagerung von drei, sechs und neun Monaten entspricht. Dabei wurde jeweils von den Alterungsfaktoren für eine Umgebungstemperatur von 10°C und eine Umgebungsfeuchte von 60 % ausgegangen (orange markierter Fall in Tabelle 19 bzw. Tabelle 20). Es wurde abgeschätzt, dass dieser Fall am ehesten einem Mittelwert aus den Umgebungsbedingungen in allen simulierten Musteranwendungen entspricht.

**Tabelle 21** Umrechnung der Versuchsdauer in die entsprechende Alterung in Jahren in der Bauanwendung (Annahme von 10°C Umgebungstemperatur und 60% Umgebungsfeuchte) für die zwei Alterungsverfahren

Versuchsdauer [d]	Entspricht in Jahren (Klimalagerung bei 50/70)	Entspricht in Jahren (Klimalagerung bei 80/60)
90	15	90
180	30	179
270	44	269

Die künstliche Alterung bei 50 °C und 70 % relativer Feuchte liefert bei einer neunmonatigen Versuchsdauer eine Alterung im gewünschten Rahmen. Die Klimalagerung bei 80 °C und 60 % relativer Feuchte hingegen liefert über diesen Versuchszeitraum Ergebnisse, die als nicht realistisch für die Nutzungsdauer eines Gebäudes bzw. eines Dämmstoffs eingeschätzt werden. Eine kürzere Versuchsdauer von weniger drei Monaten würde hier genügen, um eine Alterung im gewünschten Rahmen zu erzielen.

Ziel der künstlichen Klimalagerung ist es, die Alterung des Dämmstoffs durch eine angemessenen anspruchsvolle Belastung zu beschleunigen. Allerdings sollte dabei stets darauf geachtet werden, allzu überkritische Bedingungen zu vermeiden. Hier könnten Mechanismen der Materialdegradation einsetzen, die so in der Realität nicht auftreten. In Anbetracht des zur Verfügung stehenden Lagerungszeitraums fällt die Wahl auf eine Klimalagerung bei 50 °C und 70 % relativer Feuchte. Es ist davon auszugehen, dass das Material hier nicht unrealistisch beansprucht wird und gleichzeitig ausreichend lang altert. Auch entspricht diese Temperatur- und Feuchte-Kombination dem im aktuellen Entwurf der Produktnorm für VIP verankerten Verfahren zur künstlichen Alterung. Die Verwendung des gleichen Alterungsverfahrens könnte zukünftige Vergleiche innerhalb der Gruppe der Hochleistungsdämmstoffe erleichtern. Auf eine Lagerung der Proben bei anderen Klimata zur künstlichen Alterung als 50 °C und 70 % r.F. wird aus oben genannten Gründen bewusst verzichtet.

### Randbedingungen der Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung

Nun soll aus den Ergebnissen der hygrothermischen Bauteilsimulation auf eine angemessene Zahl an Frost-Tau-Wechseln in der künstlichen Alterung analog zu Abbildung 27 geschlossen werden. Hierzu werden die für Frost-Tau-Wechsel am ehesten relevanten Musteranwendungen K.3 und K.5 (Steildach-Konstruktionen) näher betrachtet.

Für die beiden Standorte Holzkirchen und Freiburg sowie jeweils die Orientierung Richtung Süden und Norden werden die Temperaturbedingungen an der Außenseite des Dämmstoffs während des dritten Jahres der Simulationsrechnung betrachtet. Dabei werden für die verschiedenen Varianten folgende Kenngrößen ermittelt:

- Anzahl der Tage pro Jahr, an denen es zu Frost-Tau-Wechseln kommen kann, da hier ein Wechsel vom positiven in den negativen Temperaturbereich stattfindet
- Typische gemittelte Temperaturdifferenz ( $\Delta T_{Use}$ , vgl. Gleichung (4)) für alle Tage, an denen es zu Frost-Tau-Wechseln kommen kann

Die Ergebnisse dieser Betrachtungen für die acht relevanten Varianten sind in Tabelle 22 dargestellt. Zusätzlich wird jeweils ein über alle Varianten gemittelter Wert angegeben, woraus sich eine Temperaturdifferenz bei gewöhnlicher Bauanwendung ( $\Delta T_{Use}$ ) von 9 °C ergibt. Mit einer Temperaturdifferenz unter Testbedingungen ( $\Delta T_{Test}$ ), die 40°C beträgt, kann damit mithilfe von Gleichung (4) der Alterungsfaktor  $AF_{Freeze-Thaw}$  ermittelt werden. Er wird mit den getroffenen Annahmen auf 88 geschätzt.

**Tabelle 22 Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel in den relevanten Simulationsvarianten sowie gemittelte Temperaturdifferenz**

Variante	Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel	$\Delta T_{Use}$ [°C]
K3 – HNN	132	8
K3 – FNN	99	7
K3 – FNS	115	10
K3 – HNS	155	12
K5 – FNN	99	7
K5 – FNS	114	10
K5 – HNN	131	8
K5 – HNS	155	12
Mittel aller Varianten	125	9

Analog zur DIN EN 12091 werden zur künstlichen Alterung Frost-Tau-Wechsel in vierstündigen Zyklen durchgeführt (siehe Abbildung 27), woraus sich pro Tag eine Anzahl von sechs Zyklen ergibt. In Tabelle 23 ist in Abhängigkeit der Anzahl der Zyklen die Testdauer in Tagen sowie die sich daraus ergebende Alterung unter realen Bedingungen in Jahren aufgetragen. Dabei wird vom soeben ermittelten Alte-

rungsfaktor von 88 ausgegangen sowie von 125 Tagen mit Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung in einem üblichen Jahr in der Realität.

**Tabelle 23 Testdauer in Tagen sowie entsprechende Alterung unter realen Bedingungen (Alterungsfaktor 88) in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel Zyklen**

Anzahl der Frost-Tau-Zyklen	100	200	300	400	500
Testdauer in Tagen	17	33	50	67	83
Entspricht Alterung in Jahren	12	23	35	47	59

In der DIN EN 12091 zur Bestimmung der Frost-Tau-Beständigkeit von Dämmstoffen wird eine Anzahl von 300 Zyklen vorgeschrieben. In diesem Forschungsvorhaben werden aber stattdessen bewusst 400 Zyklen durchgeführt, da sich dadurch eine geschätzte Alterung in der Realität ergibt, die im gewünschten Bereich von 40 bis 50 Jahren liegt.

#### *Randbedingungen der UV-Beanspruchung*

Für die Bestimmung der UV-Beständigkeit stehen analog zu Abbildung 21 UV-A-340-Lampen zur Verfügung, die im verwendeten Wellenlängenbereich von 340 nm eine Strahlungsstärke von  $0,84 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$  aufweisen. Die Bestrahlung bei künstlicher Alterung ( $\Phi_U$ ) entspricht folglich  $286 \text{ W}/\text{m}^2$ . Ziel ist es nun, aus Simulationsdaten auf eine geeignete Bestrahlungslänge bei künstlicher Alterung zu schließen, die in der realen Bauanwendung wiederum einer geschätzten Alterung von 40 bis 50 Jahren entspricht.

Hierzu werden die WUFI®-Klimadatensätze der beiden untersuchten Standorte Holzkirchen und Freiburg zurate gezogen. Für die Simulation ergibt sich über das Jahr eine mittlere Solarstrahlung  $\Phi_A$  von  $113 \text{ W}/\text{m}^2$  in Holzkirchen und von  $89 \text{ W}/\text{m}^2$  in Freiburg. Durch Anwendung von Gleichung (5) ergibt sich daraus ein Alterungsfaktor durch UV-Beanspruchung  $AF_{UV}$  von 2,5 für den Standort Holzkirchen und von 3,2 für den Standort Freiburg.

Im Versuch geht mit der erhöhten UV-Beanspruchung auch eine auf  $50 \text{ °C}$  erhöhte Temperatur einher. Wird wiederum eine durchschnittliche Umgebungstemperatur von  $10 \text{ °C}$  in der Bauanwendung angenommen, ergibt sich aus Gleichung (2) ein Alterungsfaktor durch Temperatur  $AF_T$  von 40. Multipliziert zum kombinierten Alterungsfaktor  $AF_{UV+T}$  nach Gleichung (6) erhält man einen Alterungsfaktor von 101 für den Standort Holzkirchen und von 128 für den Standort Freiburg.

In Tabelle 25 ist angegeben, welche entsprechende Alterung an den beiden Standort und gemittelt sich in etwa aus einer bestimmten Dauer der erhöhten UV-Beanspruchung ergibt.

**Tabelle 24 Alterung durch UV-Beanspruchung unter Normalbedingungen in Jahren in Abhängigkeit der Versuchsdauer.**

Versuchsdauer Bestrahlung in Stunden	1000	2000	3000	4000	5000
Entspricht für Standort Freiburg in Jahren	15	29	44	59	73
Entspricht für Standort Holzkirchen in Jahren	12	23	36	46	58
<b>Gemittelt</b>	<b>14</b>	<b>26</b>	<b>40</b>	<b>53</b>	<b>66</b>

In der DIN EN 1297 zur UV-Beanspruchung von Abdichtungsbahnen entspricht die empfohlene Versuchsdauer 5000 Stunden. Für die hier verwendeten Randbedingungen ergibt sich daraus allerdings eine Alterung in der Bauanwendung, die über dem gewünschten Rahmen von rund 40 bis 50 Jahren liegt. Die UV-Beanspruchung wird daher stattdessen für eine Dauer von 3000 h durchgeführt.

### **Ergebnisse aus der künstlichen Alterung durch Klimalagerung**

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, wurde für die künstliche Alterung eine Kombination aus Temperatur- und Feuchtebelastung von 50°C und 70% r. F. gewählt. Messungen ausgewählter Eigenschaften wurden in Intervallen von jeweils 90 Tagen für eine Dauer von 270 Tagen durchgeführt.

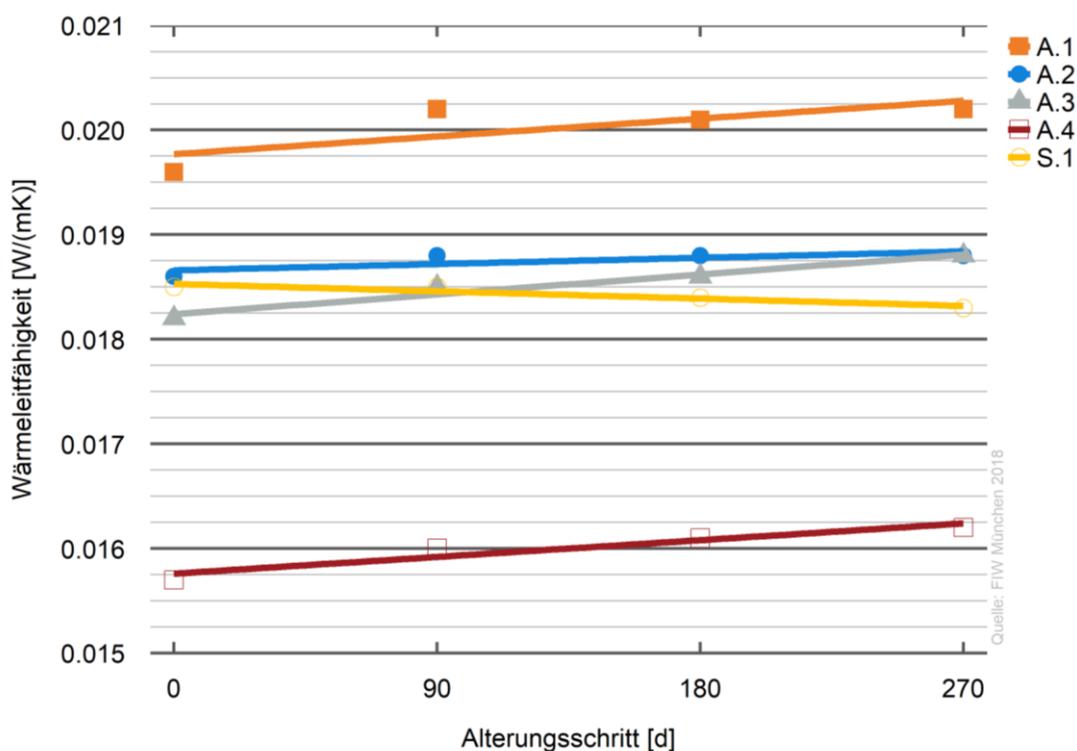
#### Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung

In Abbildung 41 sind die Ergebnisse der Messungen zur Wärmeleitfähigkeit der fünf untersuchten APM dargestellt. Vor der künstlichen Alterung liegt ihre Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,0157 W/mK und 0,0196 W/mK. Für die Aerogele A.1 bis A.4 ist ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit über die Zeit zu erkennen. Innerhalb der 270-tägigen Versuchsdauer liegt dieser im Bereich von ca. 0,0006 W/mK (A.1, A.3 und A.4) bis 0,0002 W/mK (A.2).

Das Produkt auf Basis von synthetischer amorpher Kieselsäure (S.1) verhält sich dagegen entgegen der Erwartungen: Hier sinkt die Wärmeleitfähigkeit mit fortschreitendem Alterungsprozess um 0,0002 W/mK. Dieser geringe Unterschied kann zu einem Anteil der Messunsicherheit zugeschrieben werden. Darüber hinaus wurden die zwei Proben für das Zweiplattenverfahren nach jedem Alterungsschritt vor der Messung gewogen, aber nicht neu vermessen. Die in die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eingehende Dicke ist somit unverändert, der Verlauf der Rohdichte ist Tabelle 25 zu entnehmen. Die leichte Abnahme deckt sich mit dem Verlauf des Gewichts der Proben während der Alterung. Ebenso kann bei diesem instabilen Material durch die Auflast der Kühlplatte während der Messung eine Kompression des Materials verursacht werden, weshalb vielleicht doch eine Änderung in der Dicke vorliegt. In Summe kann deshalb von einem sehr stabilen Verhalten des Materials gesprochen werden.

**Tabelle 25 Entwicklung der Rohdichte der Probe S.1 während der Klimalagerung bei gleichbleibenden Probekörperabmessungen**

Alterungsschritt	0 Tage	90 Tage	180 Tage	270 Tage
Einbaurohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	169,2	168,7	168,7	168,5
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	0,0185	0,0185	0,0184	0,0183



**Abbildung 41 Messwerte der Wärmeleitfähigkeit nach den Alterungsschritten**

### Ergebnisse aus der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Dimensionsstabilität und dynamische Steifigkeit wurden für vier der fünf untersuchten Materialien (A.2, A.3, A.4, S.1) bestimmt, da es sich hierbei um platten- bzw. mattenförmige Dämmstoffe handelt. Für das Produkt A.1 werden die mechanischen Eigenschaften nicht bestimmt, da hier eine lose Lieferform vorliegt. Die Alterungsschritte gleichen denen der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung und stellen somit dreimonatige Intervalle dar.

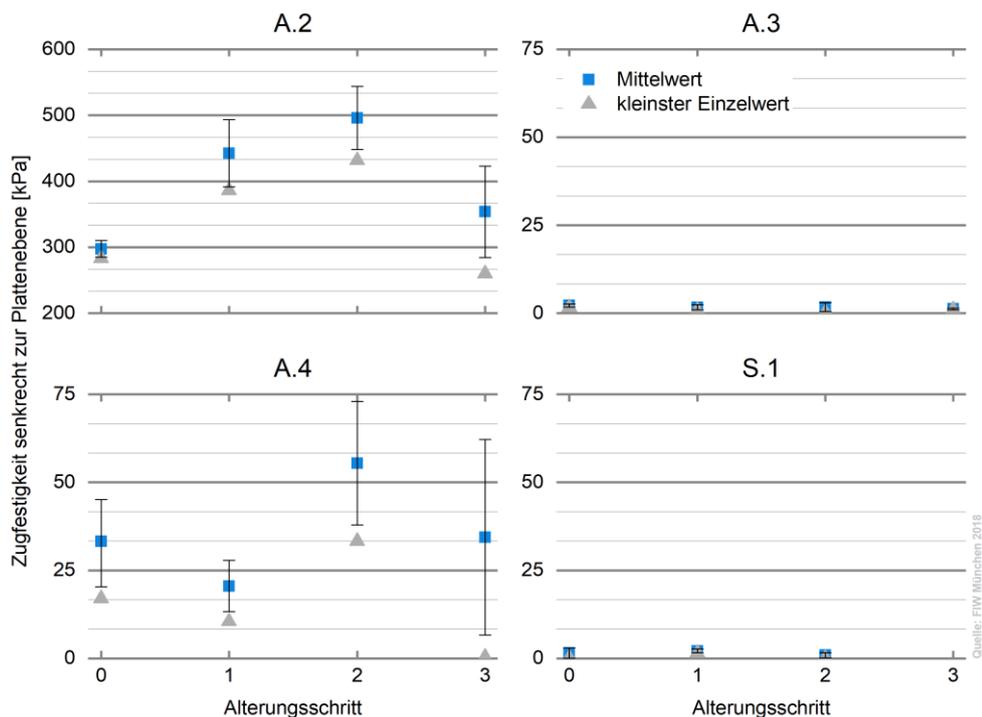
#### **Zugfestigkeit**

Pro Alterungsschritt wurden 4 bis 5 Messungen für die Zugfestigkeit der Materialien durchgeführt. Die Proben wurden, wie in Abbildung 42 zu erkennen, auf starre Trä-

gerplatten aufgeklebt und mit Bolzen in die Zugprüfmaschine eingebaut. Zur Eindämmung der Staubbildung wurde der gesamte Probekörper in große Beutel verpackt, die keinen Einfluss auf die erzielte Zugfestigkeit haben.



**Abbildung 42 Probekörper in der Zugprüfmaschine mit Versagen des Materials in Probenmitte**



**Abbildung 43 Messwerte der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach den Alterungsschritten. Für Produkt A.2 wurde eine abweichende Skalierung der Ordinate gewählt**

In Abbildung 43 sind für jeden Alterungsschritt jeweils der Mittelwert aller Messungen (blau) sowie der kleinste gemessene Einzelwert (grau dargestellt). Das Material A.2 weist die höchste Zugfestigkeit der untersuchten Materialien vor (Mittelwerte zwischen rund 300 bis 500 kPa), gefolgt von Material A.4 (Mittelwerte zwischen 20 und 55 kPa). Allerdings weisen die einzelnen Messungen innerhalb jedes Zeitschrittes größere Abweichungen voneinander auf (für A.2 bis zu über 100 kPa, für A.4 über 60 kPa). Auch lässt sich mit zunehmender Alterung keine Tendenz zu einer zunehmenden oder abnehmenden Zugfestigkeit erkennen. Lediglich die Schwankungsbreite der Messwerte innerhalb eines Zeitschritts scheint mit zunehmender Versuchsdauer größer zu werden.

Die Materialien A.3 und S.1 weisen durchgängig eine gleichbleibende, sehr niedrige Zugfestigkeit auf.

### **Druckbeanspruchung**

Für die Bestimmung der Druckfestigkeit wurden pro Alterungsschritt ebenfalls 3 bis 5 Einzelmessungen in der Druckprüfmaschine, wie in Abbildung 44 dargestellt, durchgeführt. Zum Schutz der Messtechnik wurden die Proben wieder mit Folie umhüllt.



**Abbildung 44** Probe während der Prüfung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung

Für alle Proben konnte der Versuch bis 10 % Stauchung durchgeführt werden, ohne dass es zuvor zum Versagen gekommen ist. Es kann somit für jedes Material die Druckspannung bei 10 % Stauchung ermittelt werden. Abbildung 45 zeigt die Mittelwerte der Messwerte für jeden Alterungsschritt.

Die höchste Druckspannung weist wiederum das Material A.2 mit Einzelmesswerten im Bereich von 620-760 kPa auf. Wieder ist die Schwankungsbreite innerhalb der Alterungsschritte recht hoch. Ein Trend mit zunehmender Alterung ist nicht zu erkennen.

Die Kraft-Verformungs-Kurven von Material A.3 zeigen auch über 10 % Verformung hinaus keinen eindeutigen linearen Bereich, sodass zur Auswertung der Druckspannung kein Verformungsnullpunkt festgelegt werden kann. Gemäß Prüfnorm EN 826 wird in solchen Fällen der Verformungsnullpunkt bei der Verformung durch die Vorlast von 250 Pa gesetzt. Es ist nur eine Angabe der Druckspannungswerte in Abhängigkeit der Verformung möglich, die in Abbildung 45 stellvertretend für dieses Material eingezeichnet wurden und deshalb sehr geringe Werte aufweisen.

Material A.4 weist Einzelmesswerte im Bereich von 180-300 kPa mit hohen Schwankungsbreiten innerhalb der Zeitschritte auf. Es ist kein zeitlicher Trend zu erkennen.

Mit Werten knapp über 100 kPa weist das Material S.1 die geringste Druckbelastbarkeit auf. Jedoch sind die gemessenen Einzelwerte hier recht homogen über den gesamten Versuchsverlauf.

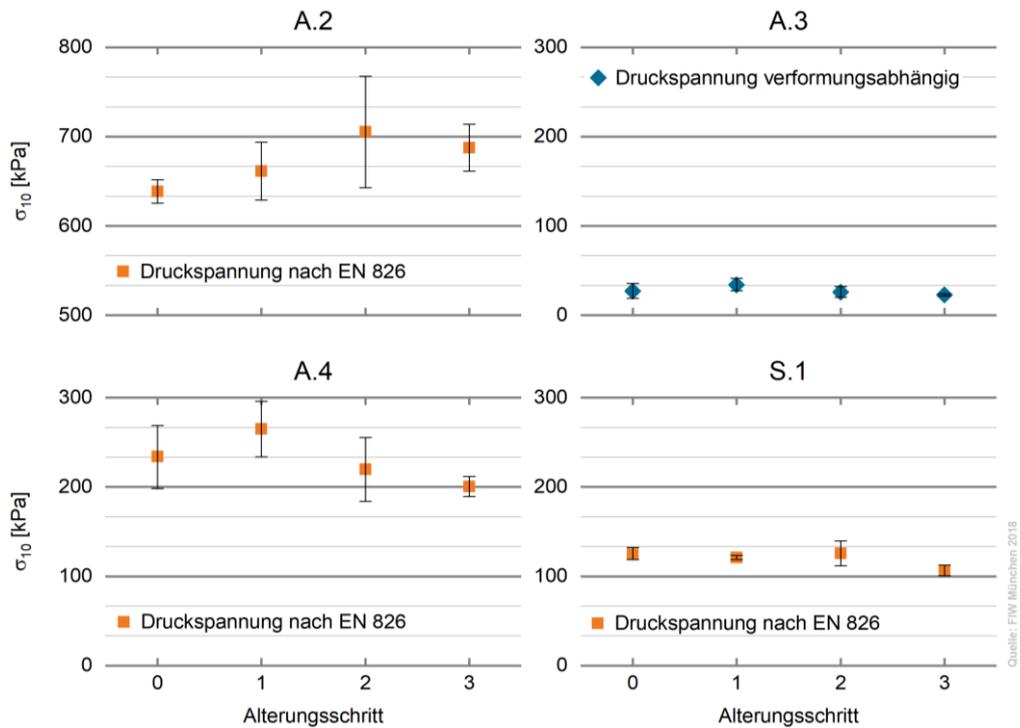


Abbildung 45 Messwerte der Druckbeanspruchung bei 10 % Stauchung. Bei Produkt A.2 wurde eine abweichende Skalierung der Ordinate gewählt. Für Produkt A.3 können die Druckspannungswerte nur verformungsabhängig angegeben werden.

### Dimensionsstabilität

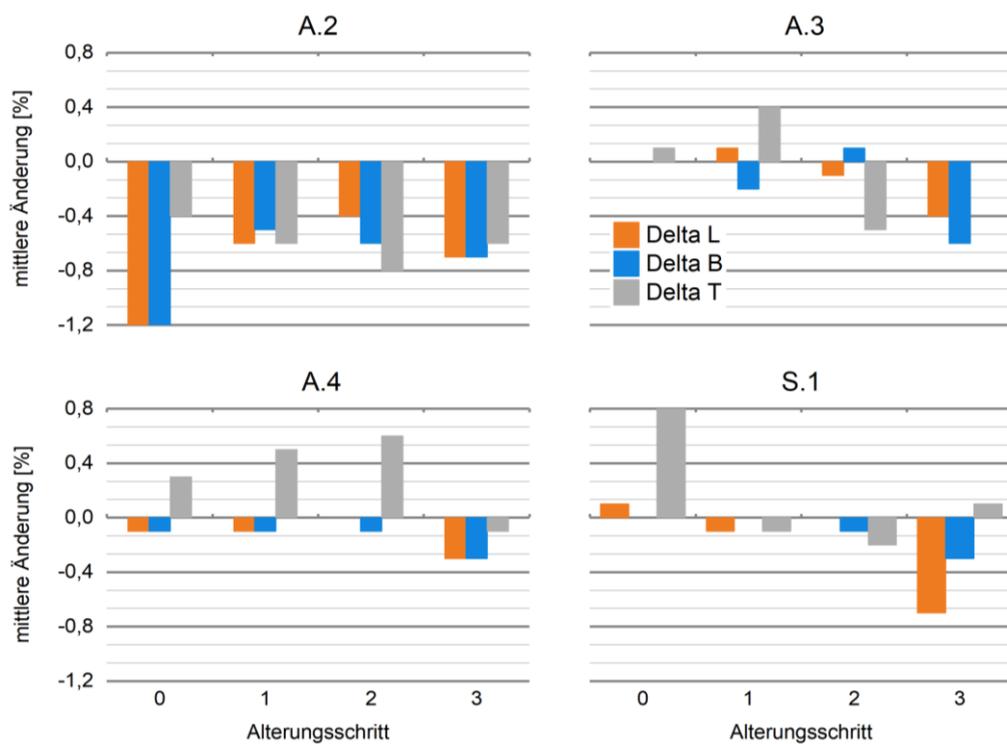


Abbildung 46 Messwerte der mittleren Änderungen der Probekörperabmessungen zur Bestimmung der Dimensionsstabilität

Die Ergebnisse der Dimensionsstabilitätsmessungen sind in Abbildung 46 dargestellt (Längenänderung Orange, Breitenänderung Blau, Dickenänderung Grau). Die geringste Dimensionsstabilität weist das Material A.2 auf. Für keines der vier untersuchten Materialien ist ein eindeutiger Trend für die Dimensionsstabilität im Verlauf der künstlichen Alterung erkennbar.

### Dynamische Steifigkeit

Die dynamische Steifigkeit wurde in drei Einzelmessungen je Zeitschritt bestimmt. In Abbildung 47 sind die Einzelwerte (Orange) sowie der Mittelwert (Grau) und die zugehörigen Resonanzfrequenzen je Zeitschritt dargestellt. Die Materialien A.2 und A.4 weisen eine höhere dynamische Steifigkeit und höhere Abweichungen der Einzelwerte auf, als die Materialien A.3 und S.1. Ein Einfluss der künstlichen Alterung auf die dynamische Steifigkeit ist nicht erkennbar.

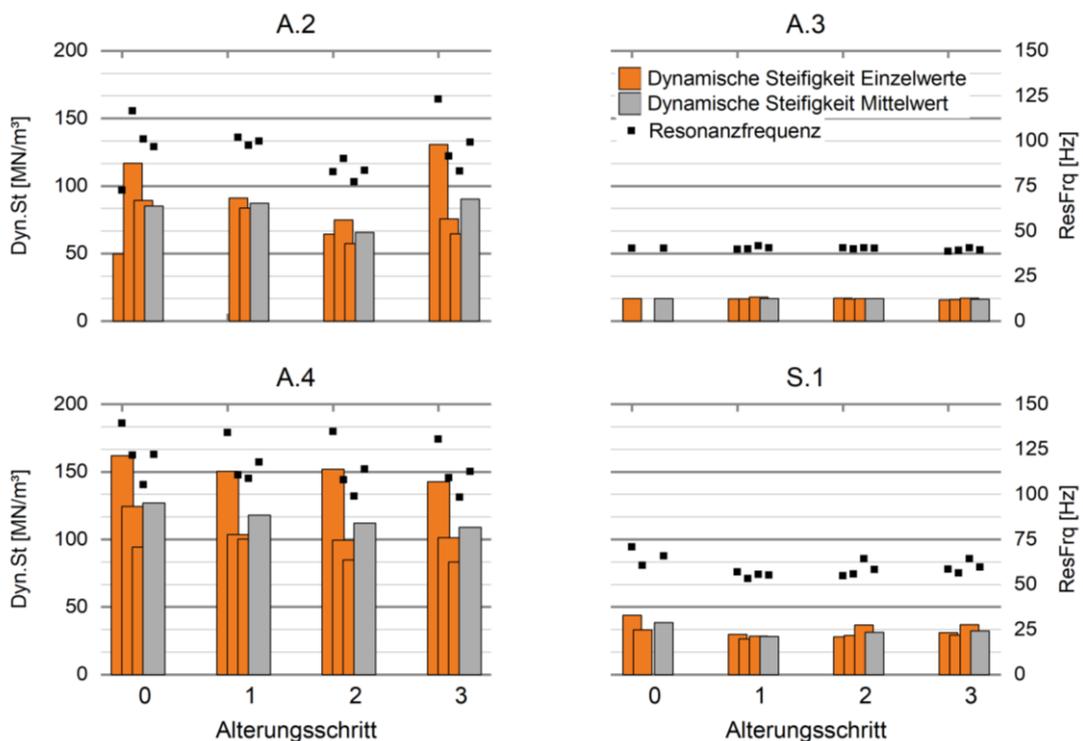
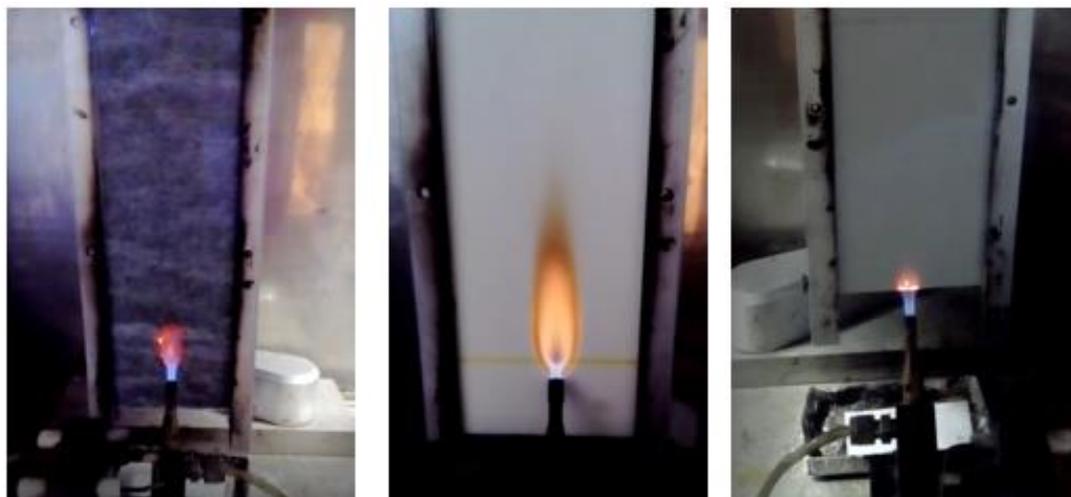


Abbildung 47 Messwerte der Dynamischen Steifigkeit unter Angabe der einzelnen Messwerte (orange) und des Mittelwerts (grau). Auf der Sekundärachse sind die zugehörigen Resonanzfrequenzen aufgetragen

### Ergebnisse aus der Brandprüfung

Bei der Brandprüfung werden drei Arten der Beflammung unterschieden. Diese sind in Abbildung 48 dargestellt und werden wie folgt gekennzeichnet:

- A = Flächenbeflammung nach EN 11925-2:2011 (7.3.3.1)
- B = Kantenbeflammung nach EN 11925-2:2011 (7.3.3.2.2)
- C = Kante 90° gedreht nach EN 11925-2:2011 (7.3.3.2.3)



**Abbildung 48 Brandprüfung mit unterschiedlichen Arten der Beflammung: links Flächenbeflammung Typ A, Mitte: Flächenbeflammung Typ A mit erkennbarer Markierung der Flammenposition, rechts: Kantenbeflammung Typ B**

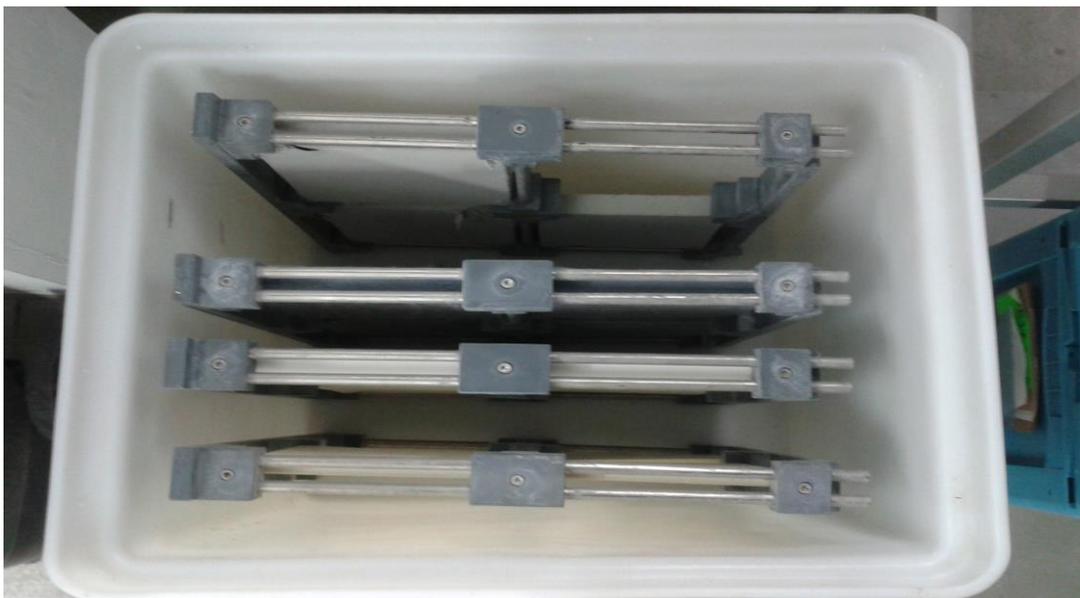
Die Ergebnisse der zu untersuchenden Größen sind in Tabelle 26 in der Reihenfolge der Art der Beflammung dargestellt und zeigen jeweils die Maximalwerte von fünf geprüften Probekörpern je Alterungsschritt. Alle Produkte erfüllen mindestens die Anforderungen an Euroklasse E und weisen keine Anzeichen auf, dass die Alterung durch Klimalagerung einen Einfluss auf das Brandverhalten hat.

**Tabelle 26 Ergebnisse aus der Bestimmung des Brandverhaltens**

Probe - Alterungsschritt	Art der Beflamung	max. Entzündung [s]	Selbstverlöschen der Flamme [s]	Größte Höhe der Flamme	Filterpapier entzündet	Euroklasse
A.2 - 0	-	-	-	-	-	-
A.2 - 1	A; B	2;<1	15;17	7;9	-	E
A.2 - 2	A; B	1;<1	15;13	9;13	-	E
A.2 - 3	A; B	1;<1	16; Nein	9;11	-	E
A.3 - 0	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
A.3 - 1	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
A.3 - 2	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
A.3 - 3	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
A.4 - 0	A; B; C	9;1;1	15;26;20	3;6;3	-	E
A.4 - 1	A; B; C	9;1;<1	15;24;17	4;5;6	-	E
A.4 - 2	A; B; C	10;1;<1	15;15;15	4;4;5	-	E
A.4 - 3	A; B; C	9;1;<1	15;20;20	4;6;5	-	E
S.1 - 0	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
S.1 - 1	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
S.1 - 2	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E
S.1 - 3	A; B	Nein; Nein	-	2	-	E

### Ergebnisse aus der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung

Bereits nach der Entnahme der Proben aus dem Klimaschrank konnte optisch eine Beanspruchung der Proben festgestellt werden (siehe Abbildung 51). Die Ergebnisse der Druckprüfungen sind in Abbildung 50 dargestellt. Die Hälfte der Probekörper wurde für 24 Stunden bei 60°C getrocknet, um neben dem Druckverhalten der feuchten Proben auch das Druckverhalten der trockenen Proben untersuchen zu können.



**Abbildung 49 Probeneinbau für den Frost-Tauwechsel**

Das Material A.2 weist nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung vor allem im feuchten Zustand eine deutlich geringere Druckfestigkeit auf als im Ausgangszustand. Die Dichte im feuchten und trockenen Zustand unterscheidet sich hingegen kaum. Bei Probe A.3 stimmt die Druckfestigkeit des getrockneten Zustands sehr gut mit den Werten der Klimalagerung überein. Der feuchte Wert liegt lediglich 8 kPa höher. Während der Druckprüfung ist sehr viel Wasser aus der Probe ausgetreten, das hohe Gewicht der Proben zeigt die große Menge an aufgenommenem Wasser. A.4 weist eine etwas niedrigere Druckfestigkeit nach Frost-Tau-Wechselbeanspruchung auf als im Ausgangszustand. Jedoch besteht kaum ein Unterschied zwischen der feuchten und der trockenen Probe hinsichtlich der Druckfestigkeit. Die Dichte der trockenen Probe ist hingegen wesentlich geringer als die der feuchten. Für das Material S.1 lässt sich keine Veränderung des Verhaltens bei Druck feststellen. Sowohl der Frischwert als auch der trockene und feuchte Wert nach Beanspruchung sind beinahe gleichgroß. Auch eine Änderung der Dichte mit dem Feuchtegehalt ist nicht feststellbar.

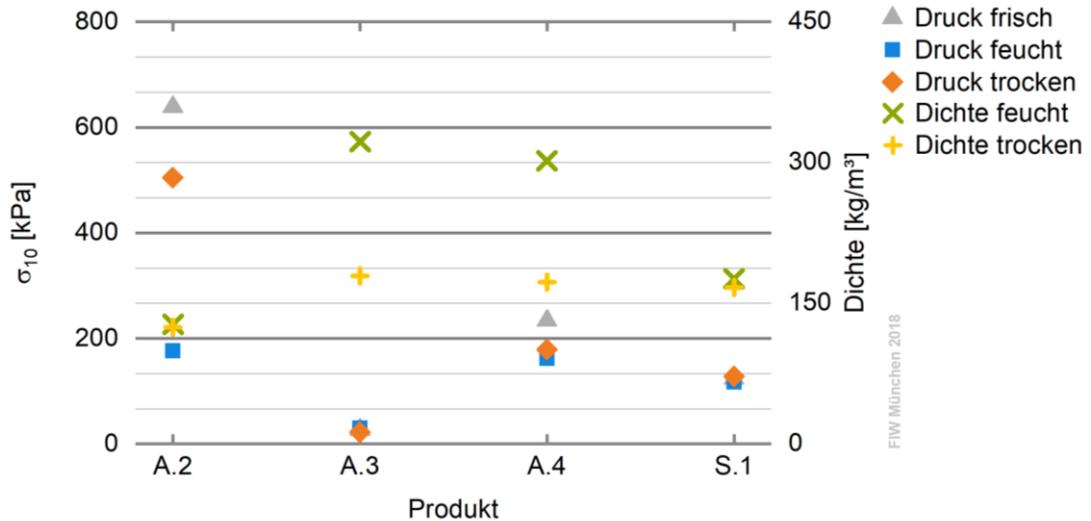


Abbildung 50 Messwerte der Ergebnisse der Druckprüfung für feuchte und trockene Proben.

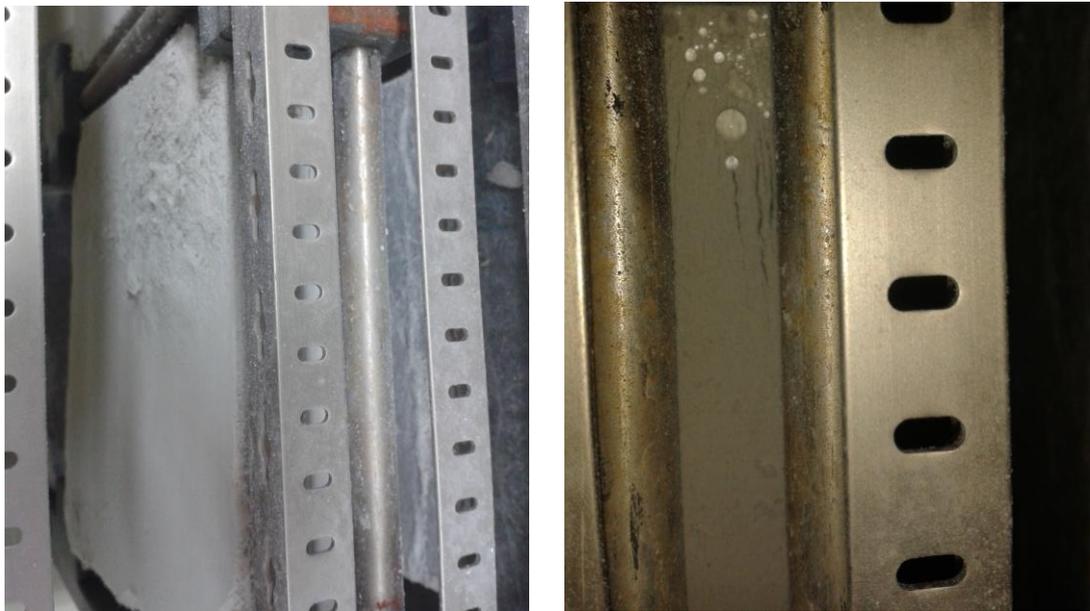


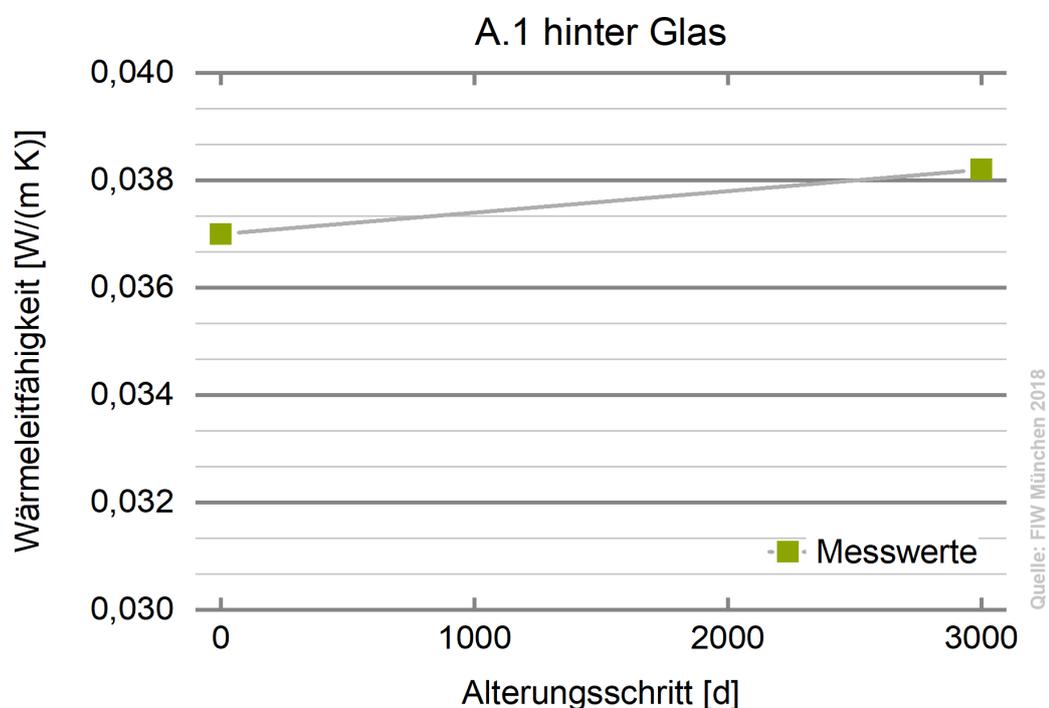
Abbildung 51 optische Beurteilung des Einflusses aus der Frost-Tauwechselbeanspruchung

Die Aufnahmen aus Abbildung 51 direkt nach der Entnahme der Proben aus dem Versuchsaufbau zeigen, dass die hydrophobe Wirkung nach wie vor vorhanden ist: Im oberen Teil der rechten Abbildung ist zu erkennen, dass nach wie vor ein sehr deutliches Abperlen der Wassertropfen stattfindet, obwohl an der Oberfläche des Materials eindeutige Einflüsse durch die Alterung zu erkennen sind (z.B. Rissbildung). Die Stabilität des Produkts ist schlechter geworden, die Druckfestigkeit hat gemäß den Messwerten aber nicht nennenswert unter der Beanspruchung gelitten.

## Ergebnisse zur UV-Beständigkeit

Als drittes Verfahren zur künstlichen Alterung wurde eine erhöhte UV-Beanspruchung durch Bestrahlung mit UVA 340 Lampen durchgeführt. Die künstliche Alterung durch UV-Beanspruchung wurde lediglich für das lose Material A.1 durchgeführt. Neben der Charakterisierung des Materials durch Analyse der Strukturveränderungen wurden im Zweiplattengerät an zwei Proben mit Aerogel im Scheibenzwischenraum von Fensterglas die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Abmessungen der Probekörper innerhalb der Abstandshalter aus XPS betragen 300 mm x 300 mm x 14 mm. Die Messfläche beträgt ebenfalls 300 mm x 300 mm. Die Messungen wurden nach Probekörperherstellung und nach Ablauf der Alterung von 3000 Stunden durchgeführt. Der Anfangswert von 0,0370 W/(m K) verschlechtert sich im Laufe des Versuchs auf 0,0382 W/(m K) (siehe Abbildung 52).

Neben der Degradation infolge der UV-Bestrahlung ist auch das Setzungsverhalten ein möglicher Einflussfaktor zum Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus der UV-Alterung und der Klimalagerung ist nicht möglich, da hier auch die Glasscheiben mitgemessen wurden und die geringe Dicke ein gleichmäßiges Befüllen des Scheibenzwischenraumes erschweren. Durch die räumliche Beschränkung im QUV-Ofen war jedoch keine größere Probekörperabmessung möglich.



**Abbildung 52** Wärmeleitfähigkeit von Material A.1 im Scheibenzwischenraum von Fensterglas vor und nach UV-Bestrahlung von 3000 Stunden

## Ergebnisse aus der Strukturanalyse

### Mikroskopie

Um die Oberflächenveränderungen an den Produkten erkennbar zu machen, ist selbst ein hochauflösendes Lichtmikroskop nicht geeignet. Aus diesem Grund wurden REM-Aufnahmen (Rasterelektronenmikroskop) mit hoher Schärfentiefe der Produkte aus den verschiedenen Alterungsbeanspruchungen angefertigt.

In den folgenden Abbildungen sind für alle fünf Produkte REM-Aufnahmen in drei Vergrößerungsstufen für die drei bzw. vier Materialzustände (durch Alterungsverfahren und Neuzustand) zusammengefasst (© TUM Holzforschung München, A. Vierter). Die verwendete Beschleunigungsspannung des Elektronenstrahls liegt im Bereich von acht bis 20 kV. Es handelt sich bei den betrachteten Proben um Fraktionen der Proben, die zuvor die Sorptionsanalyse durchlaufen haben.

Selbst die größtmögliche Vergrößerung (rechte Spalte der Aufnahmen, bis zu 3000-fach) lässt keine Porenstruktur der Materialien erkennen. Granulatpartikel, Schäume und gepresste Pulver scheinen Festkörper zu sein, jedoch sind Faserzusätze oder die abweichende Struktur der Deckschichten gut zu erkennen. Für die einzelnen Produkte können aus den Aufnahmen folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Die zusätzliche Methode der UV-Alterung zeigt bei der Probe A.1 die deutlichsten Kennzeichen eines Einflusses. Die freie Exposition der Partikel unter den UVA-Lampen führt zu dunklen Flecken an der Oberfläche, die bereits mit geringer Vergrößerung zu erkennen sind. Im Vergleich zum frischen, nicht gealterten Granulat sind nach Klimalagerung die Ränder an Rissen ausgebleicht und heller, Furchen erscheinen tiefer und ausgeprägter und ihre Anzahl und Größe hat zugenommen. Die Oberfläche des gesamten Partikels wirkt matter. Durch die Frost-Tau-Alterung erhielt das Produkt eine sehr glatte und klar strukturierte Oberfläche, wirkt aber dennoch verwittert.

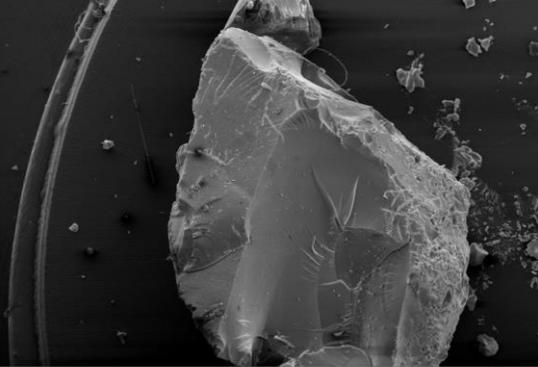
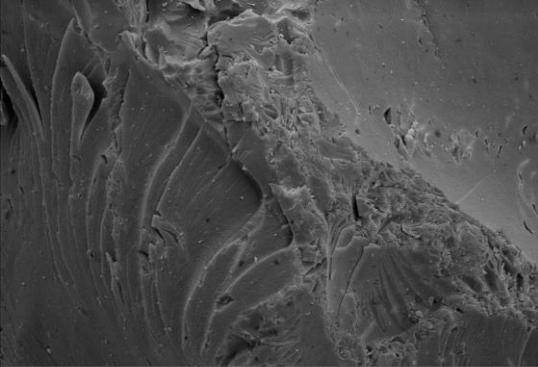
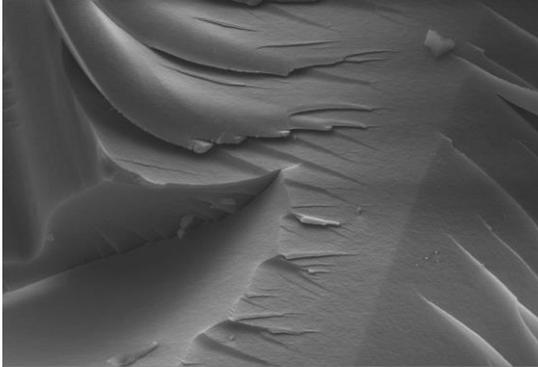
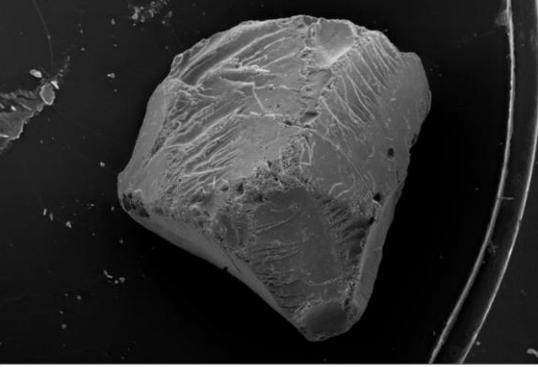
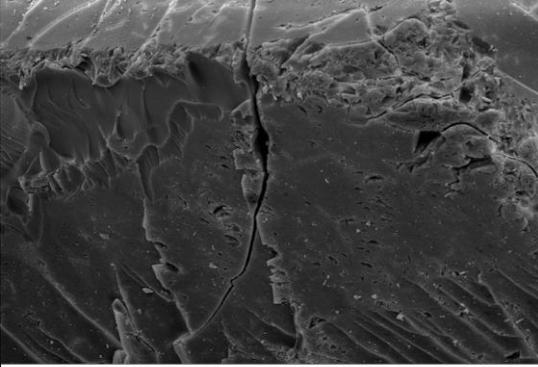
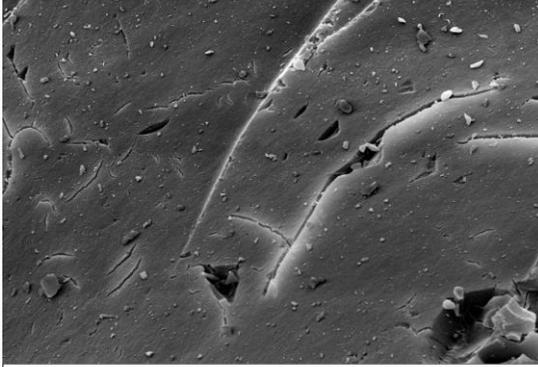
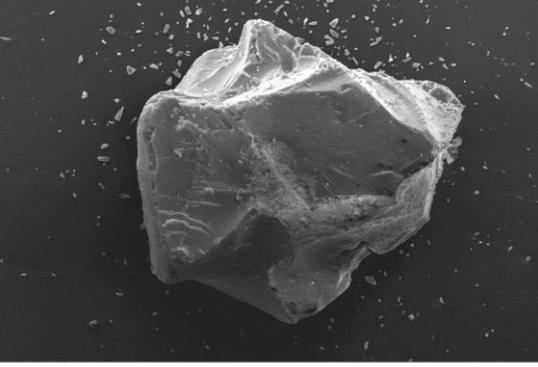
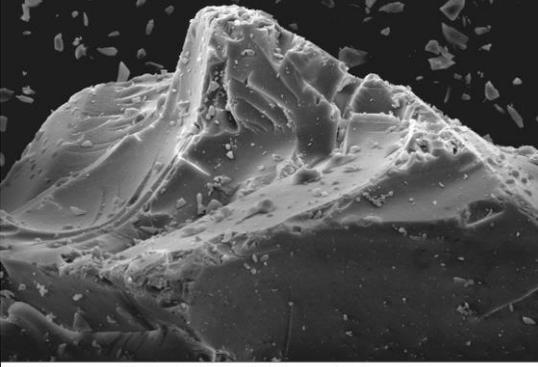
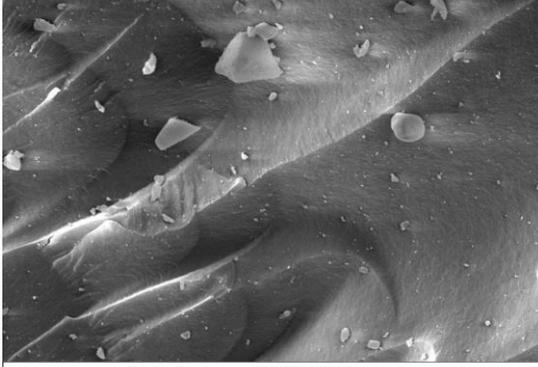
Die Probenvorbereitung von A.2 stellte sich als sehr schwierig heraus, da das Material bei jedem Schnitt ausfranst und Schnittspuren zu erkennen sind. Innerhalb der abstehenden Schnittteile sind schaumartige Strukturen zu erkennen, jedoch keine Anzeichen einer Alterung.

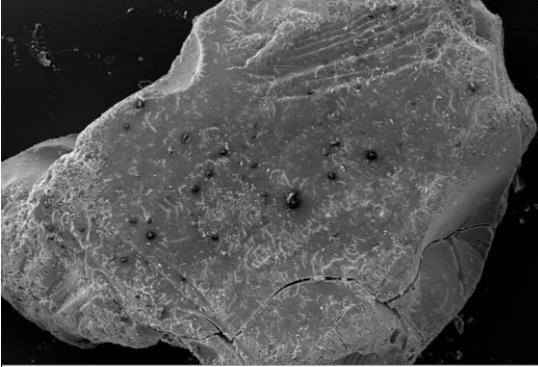
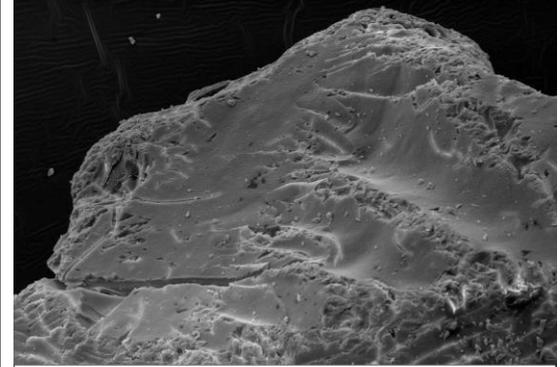
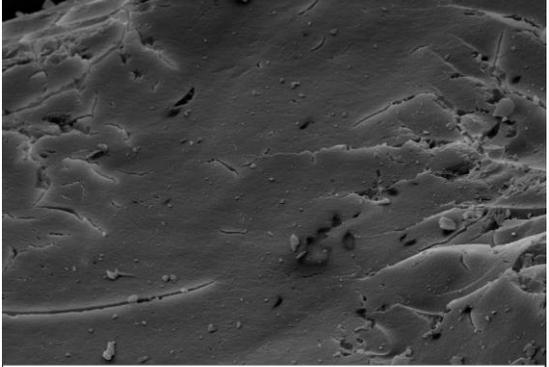
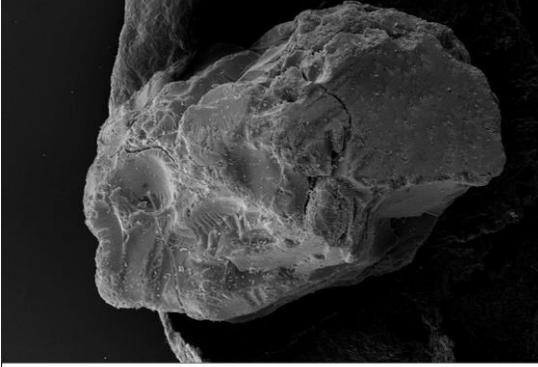
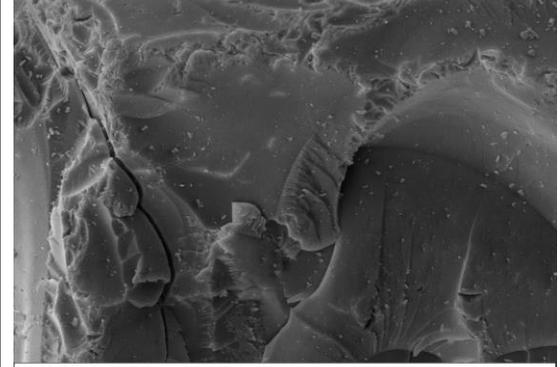
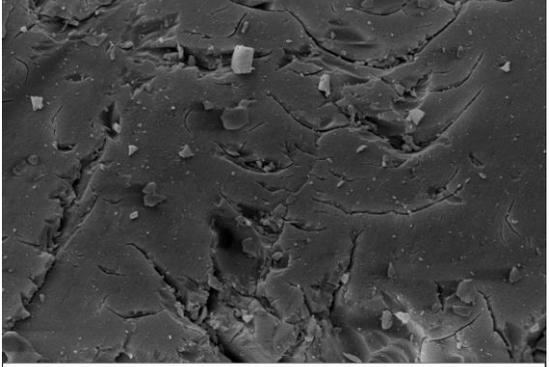
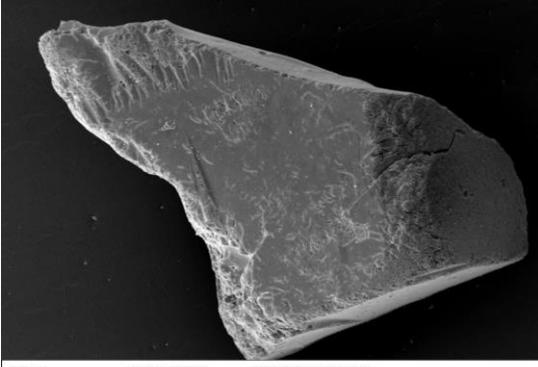
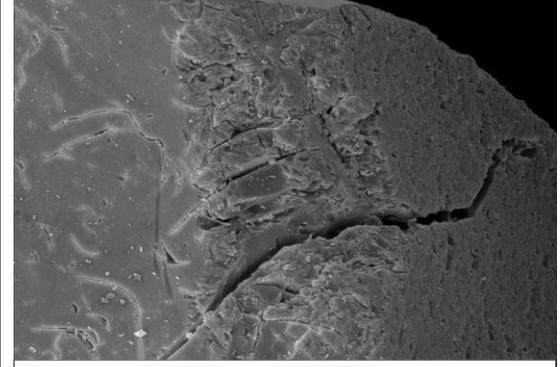
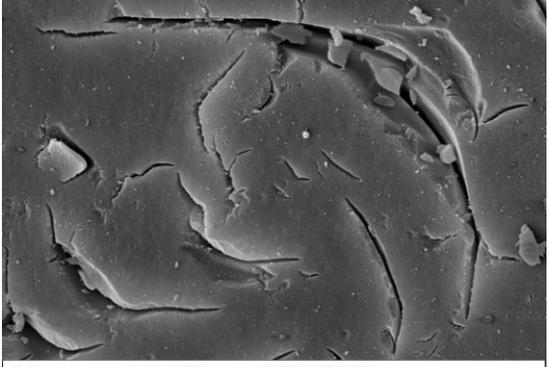
Auch bei A.3 spielt die Probenvorbereitung eine große Rolle und beeinflusst den Anteil der anhaftenden Aerogel-Partikel am Vliesgewebe. Gerade an den Schnittkanten ist die Aerogeldichte viel geringer als im Inneren des Produkts. Der Einfluss der Alterung ist deshalb schwierig zu beurteilen.

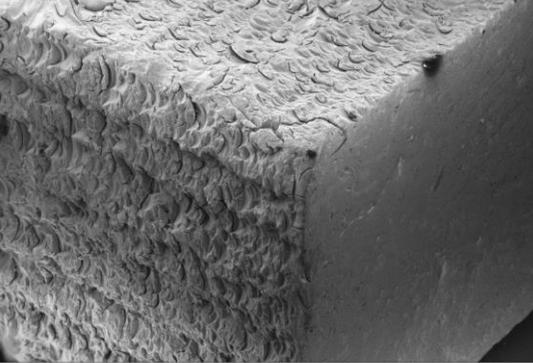
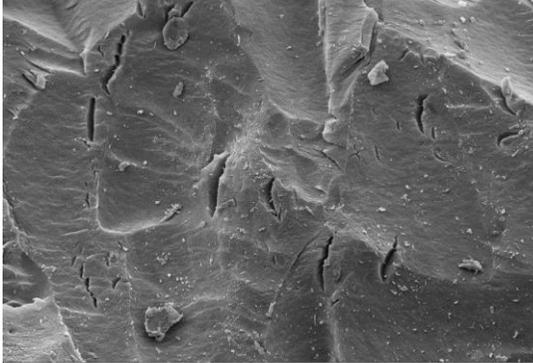
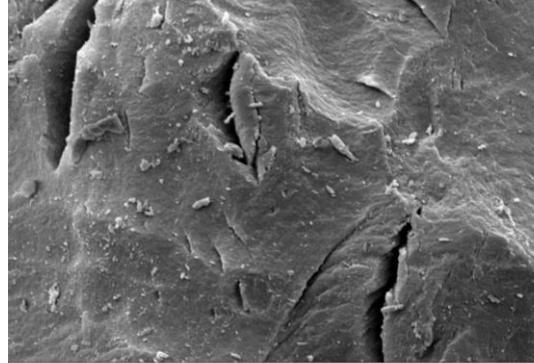
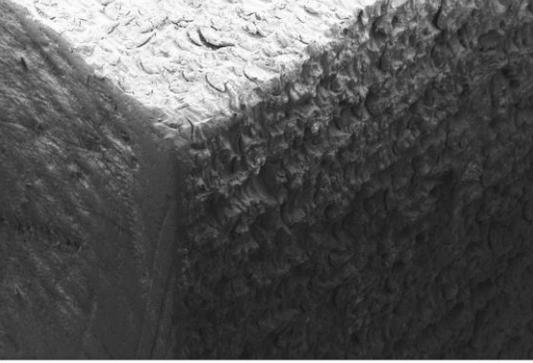
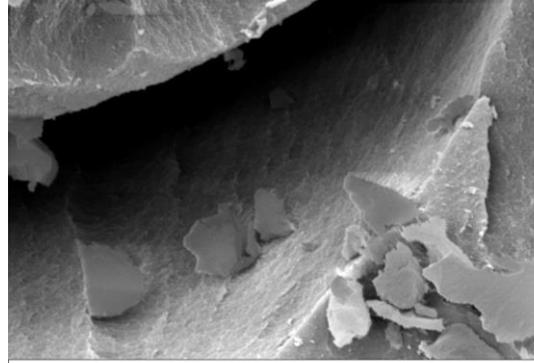
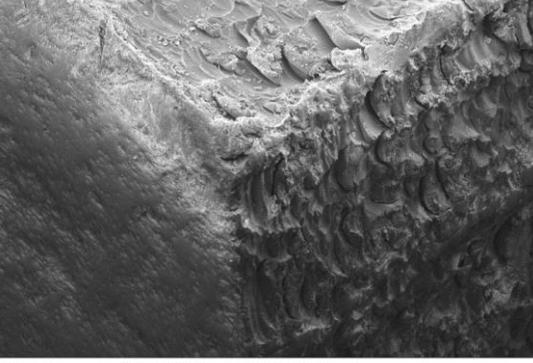
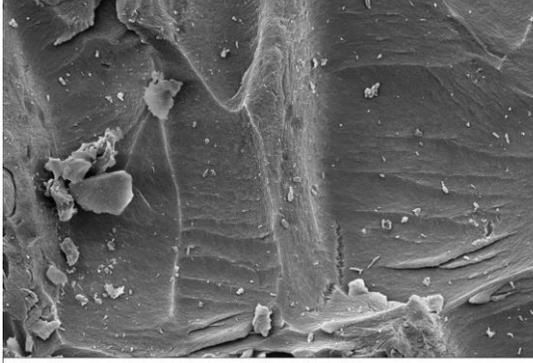
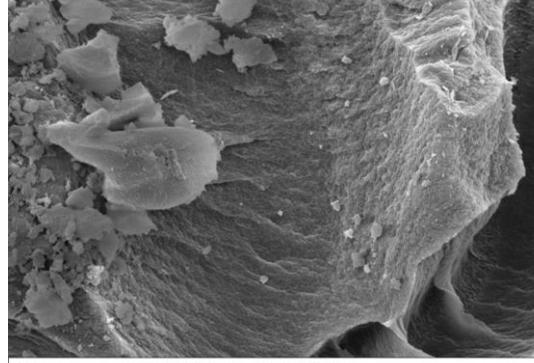
Die Bilder von Produkt A.4 zeigen eine grobe Struktur bei allen drei Probenzuständen. Nach der Frost-Tau-Alterung sind die Partikel etwas stärker ausgeprägt zu sehen und die Oberfläche ist matter.

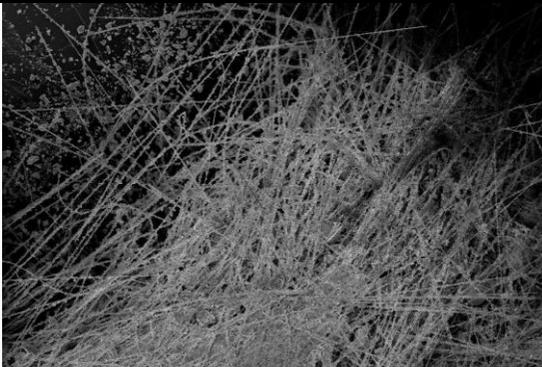
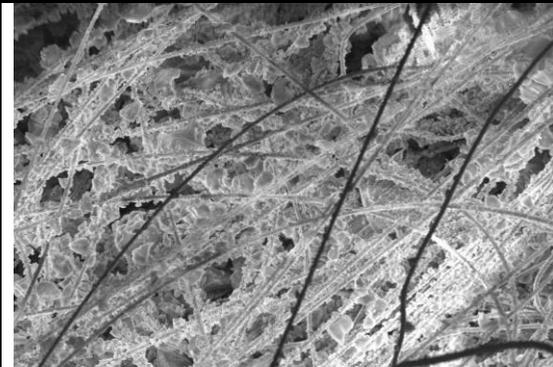
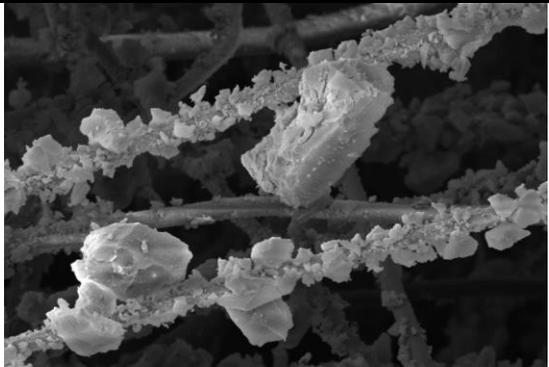
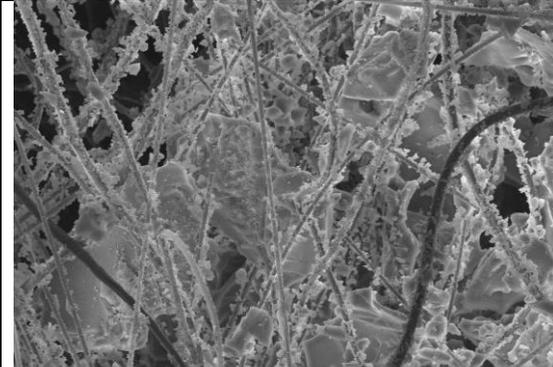
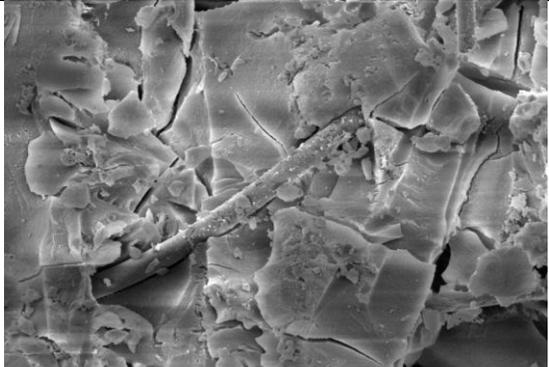
Leichte Ausblühungen sind beim Vergleich von Klimalagerung und Frost-Tau-Beanspruchung zum frischen Material von S.1 erkennbar. Unebenheiten in der Oberfläche und eine „lockerere“ Struktur sind nach Frost-Tau stärker ausgeprägt.

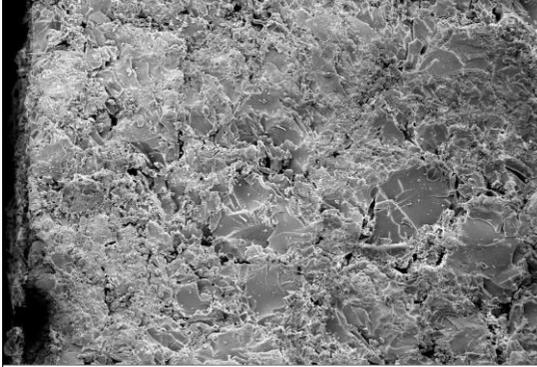
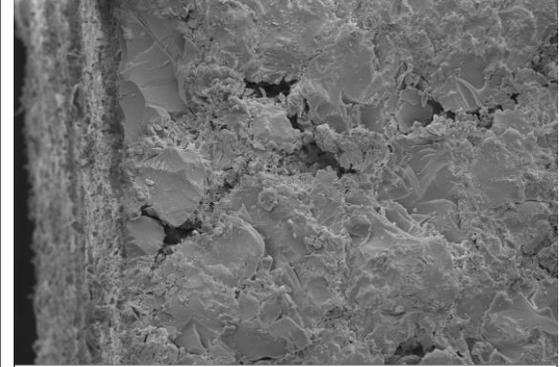
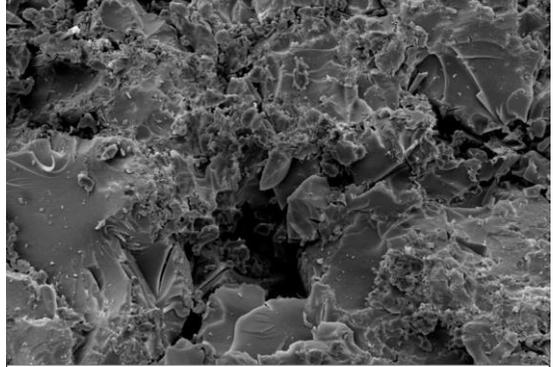
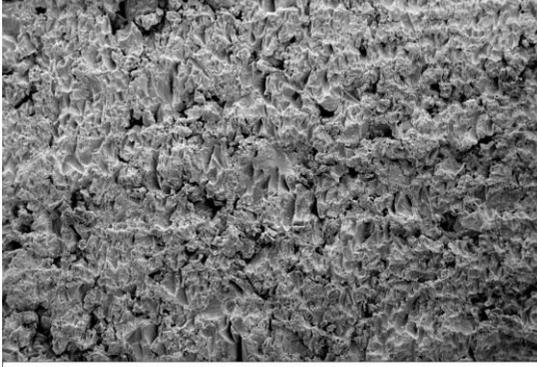
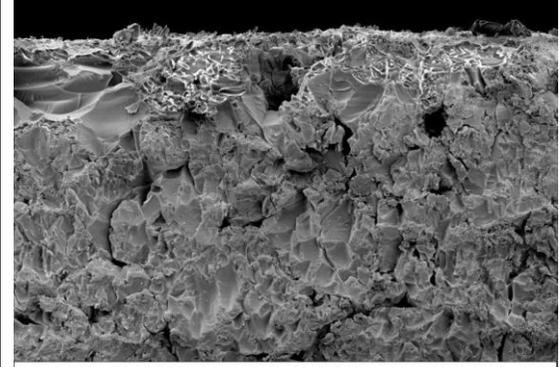
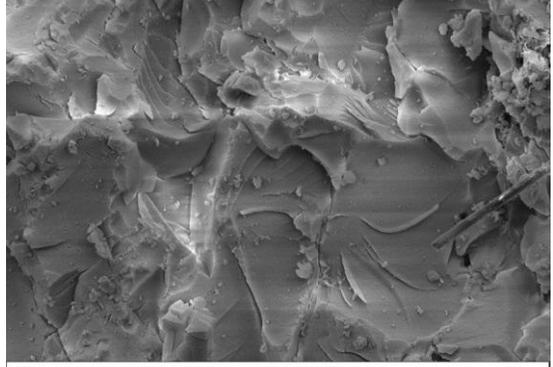
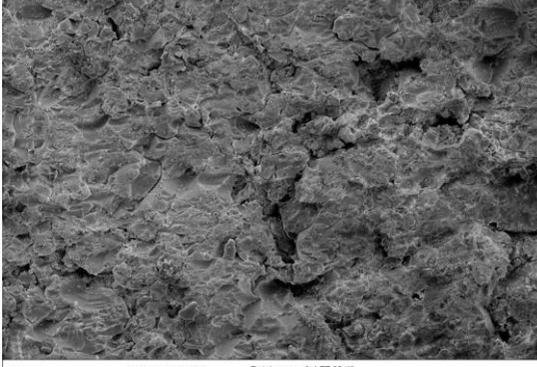
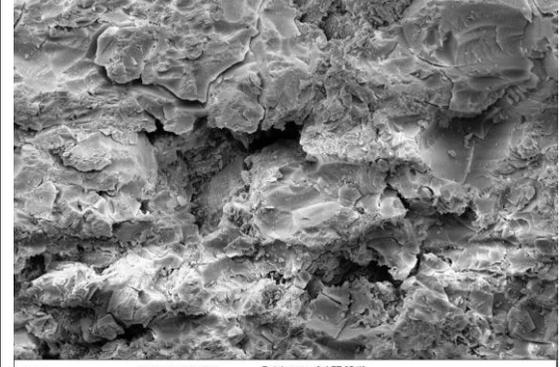
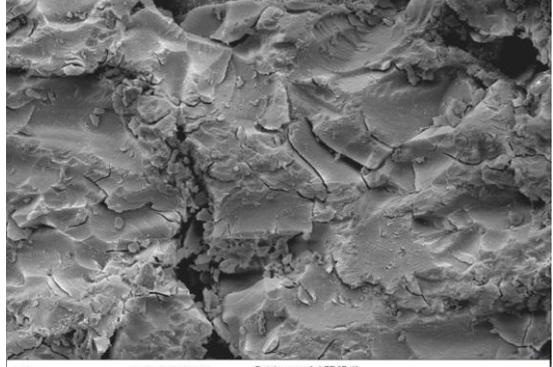
Zusammenfassend bleibt zu sagen, dass selbst mit REM-Aufnahmen nur eine Abschätzung der mittleren Partikelgröße möglich ist, die eine grobe Vorstellung über die Verteilung der Bestandteile (wenn mehr als ein Festkörperbestandteil vorhanden ist) geben. Die maximale Auflösung von REM liegt im Bereich von 1 nm. Für detaillierte Untersuchungen der Feinstruktur sind TEM (Transmissionselektronenmikroskopie) zu verwenden, die für diese Untersuchungen aber nicht zur Verfügung standen.

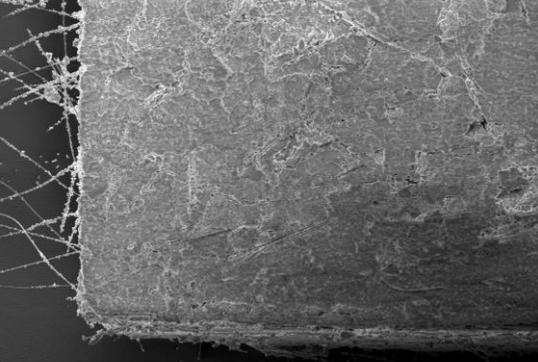
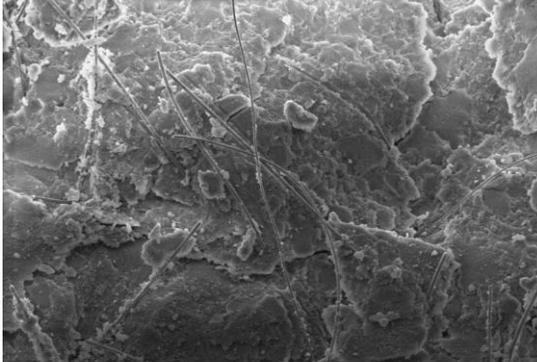
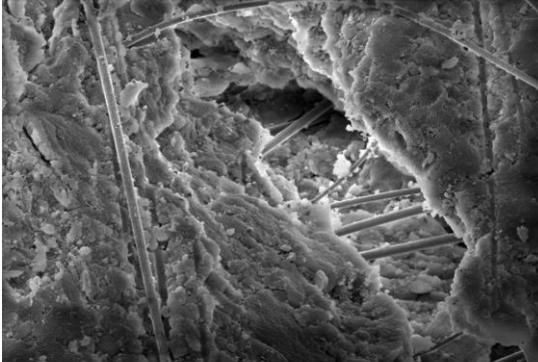
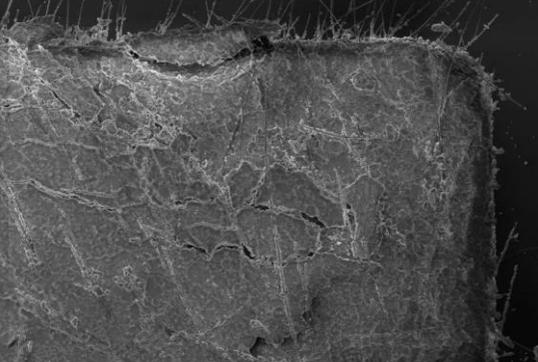
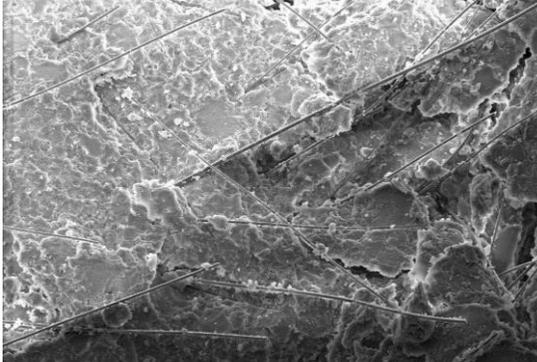
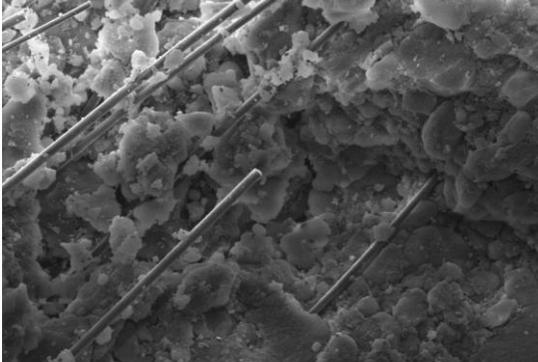
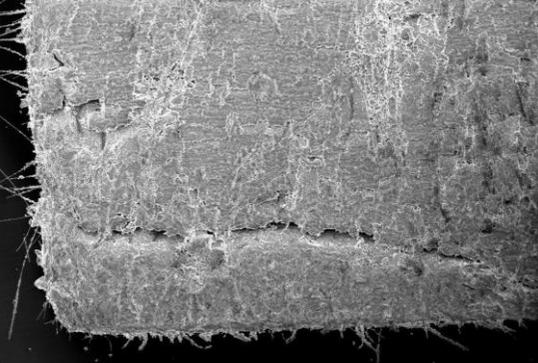
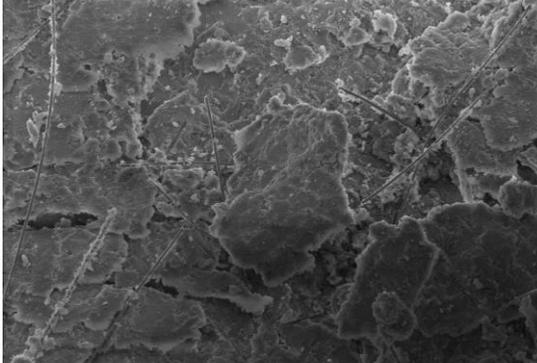
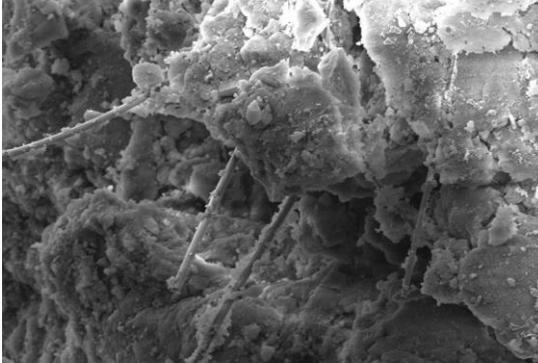
	50 x	150 x	500 – 1000 x
Frisch	 <p>200 µm Hochsp. = 12.03 kV Dateiname = A.1.06.tif Arbeitsabstand = 14.0 mm Vergrößerung = 62 X HFM</p>	 <p>200 µm Hochsp. = 12.03 kV Dateiname = A.1.07.tif Arbeitsabstand = 13.0 mm Vergrößerung = 163 X HFM</p>	 <p>20 µm Hochsp. = 12.50 kV Dateiname = A.1.014.tif Arbeitsabstand = 13.0 mm Vergrößerung = 501 X HFM</p>
Klima	 <p>200 µm Hochsp. = 12.50 kV Dateiname = A.1K.01.tif Arbeitsabstand = 9.5 mm Vergrößerung = 48 X HFM</p>	 <p>200 µm Hochsp. = 12.50 kV Dateiname = A.1K.02.tif Arbeitsabstand = 14.0 mm Vergrößerung = 160 X HFM</p>	 <p>20 µm Hochsp. = 14.50 kV Dateiname = A.1K.09.tif Arbeitsabstand = 16.5 mm Vergrößerung = 610 X HFM</p>
Frost-Tau	 <p>200 µm Hochsp. = 14.50 kV Dateiname = A.1FT.01.tif Arbeitsabstand = 14.5 mm Vergrößerung = 61 X HFM</p>	 <p>200 µm Hochsp. = 14.01 kV Dateiname = A.1FT.02.tif Arbeitsabstand = 14.0 mm Vergrößerung = 161 X HFM</p>	 <p>20 µm Hochsp. = 12.01 kV Dateiname = A.1FT.010.tif Arbeitsabstand = 12.5 mm Vergrößerung = 1.01 K X HFM</p>

A.1 UV	50 x	150 x	500 – 1000 x
<p>UV freie Exposition</p>	 <p>200 µm    Hochsp. = 12.01 kV    Dateiname = A.1UV.01.tif Arbeitsabstand = 32.0 mm    Vergrößerung = 50 X    HFM</p>	 <p>200 µm    Hochsp. = 12.01 kV    Dateiname = A.1UV.03.tif Arbeitsabstand = 13.5 mm    Vergrößerung = 150 X    HFM</p>	 <p>20 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UV.05.tif Arbeitsabstand = 12.0 mm    Vergrößerung = 499 X    HFM</p>
<p>Hinter Glas</p>	 <p>200 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UVGlas.01.tif Arbeitsabstand = 16.0 mm    Vergrößerung = 49 X    HFM</p>	 <p>200 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UVGlas.013.tif Arbeitsabstand = 16.5 mm    Vergrößerung = 152 X    HFM</p>	 <p>20 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UVGlas.07.tif Arbeitsabstand = 14.5 mm    Vergrößerung = 510 X    HFM</p>
<p>Stegplatte</p>	 <p>200 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UVSteg.02.tif Arbeitsabstand = 14.5 mm    Vergrößerung = 52 X    HFM</p>	 <p>200 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UVSteg.03.tif Arbeitsabstand = 20.5 mm    Vergrößerung = 153 X    HFM</p>	 <p>20 µm    Hochsp. = 12.50 kV    Dateiname = A.1UVSteg.04.tif Arbeitsabstand = 18.5 mm    Vergrößerung = 1.02 K X    HFM</p>

A.2	50 x	150 x	500 – 1000 x
Frisch	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.019.tif Arbeitsabstand = 20.5 mm    Vergrößerung = 30 X</p> <p>1 mm</p> <p>HFM</p>	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.013.tif Arbeitsabstand = 16.5 mm    Vergrößerung = 512 X</p> <p>20 µm</p> <p>HFM</p>	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.011.tif Arbeitsabstand = 18.0 mm    Vergrößerung = 1.50 K X</p> <p>20 µm</p> <p>HFM</p>
Klima	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.K.015.tif Arbeitsabstand = 16.5 mm    Vergrößerung = 33 X</p> <p>1 mm</p> <p>HFM</p>	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.K.016.tif Arbeitsabstand = 17.0 mm    Vergrößerung = 250 X</p> <p>100 µm</p> <p>HFM</p>	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.K.08.tif Arbeitsabstand = 19.0 mm    Vergrößerung = 3.06 K X</p> <p>10 µm</p> <p>HFM</p>
Frost-Tau	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.FT.013.tif Arbeitsabstand = 23.5 mm    Vergrößerung = 50 X</p> <p>200 µm</p> <p>HFM</p>	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.FT.010.tif Arbeitsabstand = 14.0 mm    Vergrößerung = 519 X</p> <p>20 µm</p> <p>HFM</p>	 <p>Hochsp. = 10.00 kV    Dateiname = A.2.FT.06.tif Arbeitsabstand = 19.5 mm    Vergrößerung = 1.52 K X</p> <p>20 µm</p> <p>HFM</p>

A.3	50 x	150 x	500 – 1000 x
Frisch	 <p>1 mm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.3.01.tif Arbeitsabstand = 27.0 mm   Vergrößerung = 28 X   HFM</p>	 <p>200 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.3.02.tif Arbeitsabstand = 21.0 mm   Vergrößerung = 165 X   HFM</p>	 <p>20 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.3.07.tif Arbeitsabstand = 19.5 mm   Vergrößerung = 708 X   HFM</p>
Klima	 <p>1 mm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.3.K.017.tif Arbeitsabstand = 12.6 mm   Vergrößerung = 35 X   HFM</p>	 <p>100 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.3.K.07.tif Arbeitsabstand = 10.0 mm   Vergrößerung = 249 X   HFM</p>	 <p>20 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.3.K.012.tif Arbeitsabstand = 12.0 mm   Vergrößerung = 891 X   HFM</p>

A.4	50 x	150 x	500 – 1000 x
Frisch	 <p data-bbox="327 568 864 608">           200 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.05.tif            Arbeitsabstand = 25.6 mm   Vergrößerung = 66 X   HFM         </p>	 <p data-bbox="887 568 1447 608">           200 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.02.tif            Arbeitsabstand = 20.0 mm   Vergrößerung = 101 X   HFM         </p>	 <p data-bbox="1469 568 2022 608">           100 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.04.tif            Arbeitsabstand = 23.6 mm   Vergrößerung = 167 X   HFM         </p>
Klima	 <p data-bbox="327 983 864 1023">           200 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.K.08.tif            Arbeitsabstand = 12.0 mm   Vergrößerung = 61 X   HFM         </p>	 <p data-bbox="887 983 1447 1023">           200 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.K.03.tif            Arbeitsabstand = 21.6 mm   Vergrößerung = 105 X   HFM         </p>	 <p data-bbox="1469 983 2022 1023">           20 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.K.013.tif            Arbeitsabstand = 14.6 mm   Vergrößerung = 503 X   HFM         </p>
Frost-Tau	 <p data-bbox="327 1398 864 1437">           200 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.FT.02.tif            Arbeitsabstand = 19.6 mm   Vergrößerung = 103 X   HFM         </p>	 <p data-bbox="887 1398 1447 1437">           100 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.FT.05.tif            Arbeitsabstand = 18.6 mm   Vergrößerung = 249 X   HFM         </p>	 <p data-bbox="1469 1398 2022 1437">           20 µm   Hochsp. = 10.00 kV   Dateiname = A.4.FT.07.tif            Arbeitsabstand = 18.6 mm   Vergrößerung = 501 X   HFM         </p>

S.1	50 x	150 x	500 – 1000 x
Frisch	 <p>200 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1.01.tif Arbeitsabstand = 31.0 mm Vergrößerung = 62 X HFM</p>	 <p>100 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1.06.tif Arbeitsabstand = 19.6 mm Vergrößerung = 210 X HFM</p>	 <p>20 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1.013.tif Arbeitsabstand = 20.5 mm Vergrößerung = 467 X HFM</p>
Klima	 <p>200 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1K.013.tif Arbeitsabstand = 37.0 mm Vergrößerung = 60 X HFM</p>	 <p>100 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1K.05.tif Arbeitsabstand = 23.6 mm Vergrößerung = 167 X HFM</p>	 <p>20 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1K.07.tif Arbeitsabstand = 23.6 mm Vergrößerung = 623 X HFM</p>
Frost-Tau	 <p>1 mm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1FT.02.tif Arbeitsabstand = 30.0 mm Vergrößerung = 31 X HFM</p>	 <p>100 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1FT.012.tif Arbeitsabstand = 19.0 mm Vergrößerung = 201 X HFM</p>	 <p>100 µm Hochsp. = 10.00 kV Dateiname = S.1FT.04.tif Arbeitsabstand = 13.0 mm Vergrößerung = 446 X HFM</p>

## Sorptionsverhalten

Proben aus allen drei Alterungsverfahren sowie die nicht gealterten Materialien wurden mit folgenden Randbedingungen in das Sorptionsanalysegerät eingebaut:

- Schrittweise Erhöhung der relativen Feuchte um 10 % im Bereich zwischen 0 % r.F. und 95 % r.F.
- Konstante Temperatur im Analysegerät (23°C) bei allen Feuchtestufen
- Wägeabstände von 30 Minuten
- Minimale Dauer je Klimaschritt von 144 Minuten und maximale Dauer von 336 Minuten um den Gleichgewichtszustand mit 0,010 % zu erreichen.

Nach dem Durchlaufen der Desorption wurden die Proben bei 60 °C und 0 % r.F. getrocknet, um die Masse der absolut trockenen Probe zu erhalten. In Abbildung 53 sind die vom Sorptionsanalysegerät aufgezeichneten Masseänderungen in Abhängigkeit der relativen Feuchte über den Versuchszeitraum abgebildet. Die Auswertung der Messdaten erfolgt durch die Eintragung des Gleichgewichtswerts jeder Feuchtestufe über die relative Feuchte. Daraus ergeben sich die Sorptionsisothermen, die entsprechend der Porengrößenverteilung und spezifischen Oberfläche der Probe sehr unterschiedliche Kurvenverläufe aufweisen können.

Die Sorptionsisothermen sind für die Produkte A.1 bis A.4 und S.1 im Frischzustand (orange), nach Klimalagerung (blau) und nach dem Frost-Tauwechsel (rot) in Abbildung 55 abgebildet. In Abbildung 56 sind die Isothermen der Proben A.1 nach UV-Alterung in den drei Lagerungsvarianten der freien Bewitterung, im Scheibenzwischenraum von Glas und in Stegplatten abgebildet.

Eine Klassifizierung der Isothermen erfolgt anhand der sechs Typen der IUPAC Klassifizierung aus Abbildung 54. Die Typen I bis III sind reversible Typen, während die Typen IV, V und VI mit Hysteresen aufgrund von Kapillarkondensation in den Mesoporen oder der verzögerten Aufnahme in bestimmten Druck- bzw. Feuchtebereichen durch abweichende Verläufe der Adsorption und Desorption charakterisiert sind. Dabei bezieht sich Typ IV auf Typ II und der eher ungewöhnliche Typ V auf Typ III (Sing 1985).

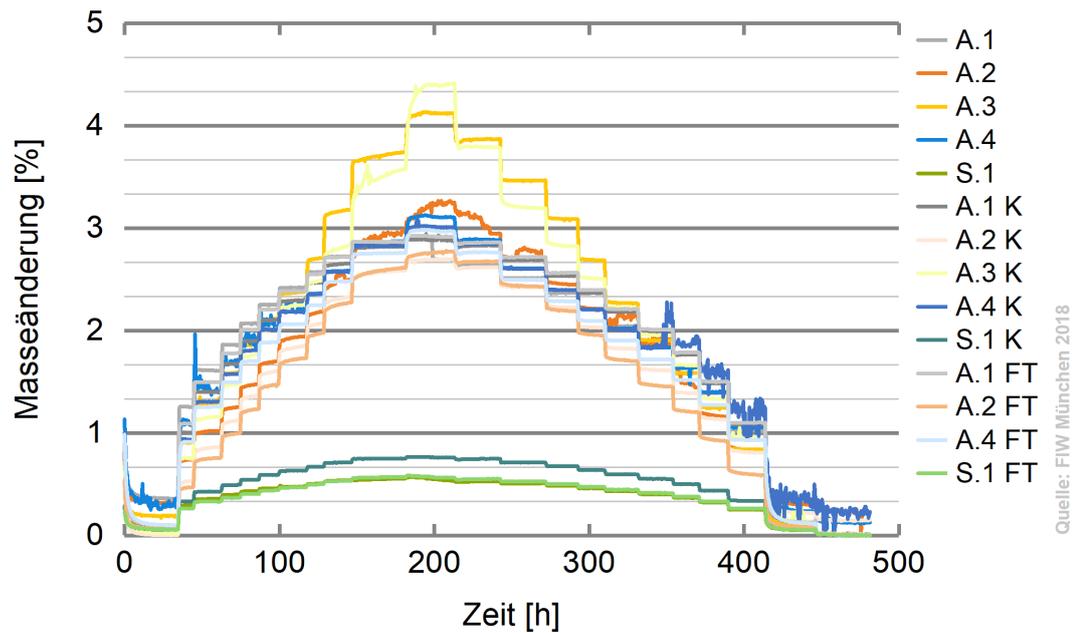


Abbildung 53 Masseänderung im Verlauf der Zeit während der Feuchttestufen zur Ermittlung der Sorptionsisothermen

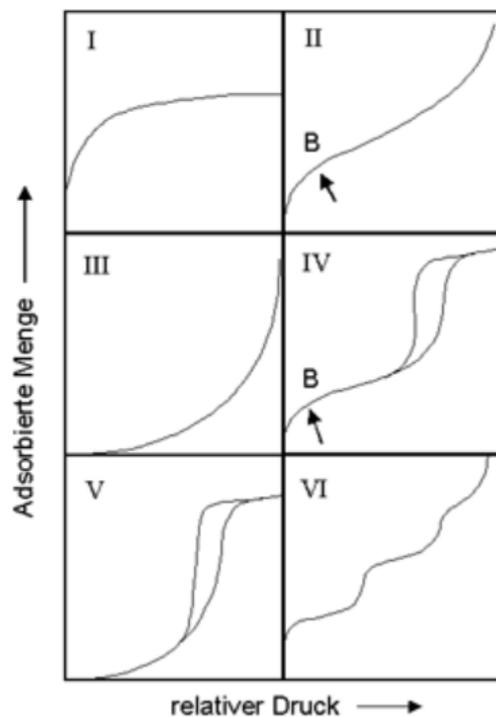


Abbildung 54 Typen zur Klassifizierung von Sorptionsisothermen (Sing 1985)

Alle sechs Sorptionsisothermen für A.1 aus Abbildung 55 und Abbildung 56 folgen dem Typenmuster von Typ I, wobei die Kurve der nicht gealterten Probe eine sehr deutliche Hysterese aufweist, die sich durch eine plötzliche negative Masseänderung während der höchsten Feuchttestufe von 95 % r.F. erklären lässt (zu erkennen in Abbildung 53). Die Werte der Desorptionskurve liegen im darauffolgenden Verlauf

unter den Werten der Adsorption. Die Weiteren Proben zeigen einen identischen Kurvenverlauf während der Adsorption und Desorption.

Die Probe A.2 zeigt ein relativ lineares Verhalten, nur der nicht gealterte Zustand ähnelt Typ II. Die Desorptionskurve der ungealterten Probe (orange Kurve) zeigt im Feuchtebereich zwischen 40 % - 60 % r. F. eine Abweichung die sich so in den Werten der gealterten Proben nicht mehr wiederfindet. Ob dieser Effekt einer ausgeprägteren Hysterese eine messtechnische Unschärfe darstellt oder signifikant ist, kann nicht bewertet werden.

Sorptionsisothermen des Typ II sind charakteristisch für die Proben A.3 und A.4, wobei A.4 eine sehr abgeschwächte Form des s-förmigen Kurvenverlaufs aufweist. Auch hier zeigen sich teilweise Hystereseeffekte die nur in bestimmten Bereichen der relativen Feuchte auftreten und nicht über alle Alterungsstufen konstant auftreten.

S.1 zeigt die mit Abstand geringste Wasseraufnahme und damit einen sehr flachen Verlauf der Sorptionsisothermen. Die verschiedenen Produktzustände zeigen nur minimale Anzeichen eines Einflusses durch die Alterungsverfahren, wobei nach der Klimalagerung der höchste Wassergehalt aufgezeichnet wurde (0,75 % vs. 0,53 % an der ungealterten Probe). Unter vergrößerter Skalierung liegt auch hier eine Unschärfe im Kurvenverlauf der Massezunahme in den höheren Feuchtebereichen vor (Abbildung 53).

Aus der Übersicht der Sorptionsisothermen kann erkannt werden, dass die Masseänderung durch Feuchteaufnahme bei allen untersuchten Proben relativ gering ist. Bei einem Zelluloseplättchen, das als Referenzprobe ebenfalls in dem Sorptionsanalysegerät gemessen wurde, wurde ein Maximalwert von  $d_m = 19,7\%$  erreicht, während der höchste Wert der untersuchten APMs bei  $d_m = 4,41\%$  (Probe A.3 K) liegt. Dennoch kann ein produktspezifisches Verhalten bei Adsorption und Desorption festgestellt werden und auch ein Einfluss durch unterschiedliche Beanspruchungen aus den Alterungsverfahren ist teilweise erkennbar.

Nach Sing 1985 ist es bei einigen mikroporösen Stoffen möglich, dass erst nach mehreren Adsorptions- und Desorptionszyklen reproduzierbare Sorptionsisothermen erhalten werden. Auftretende Schwankungen in einigen Feuchtschritten könnten durch längere Zeitspannen zum Erreichen des Gleichgewichtszustands verschwinden und zu einer geringeren Hysterese zwischen Adsorptions- und Desorptionsisotherme beitragen.

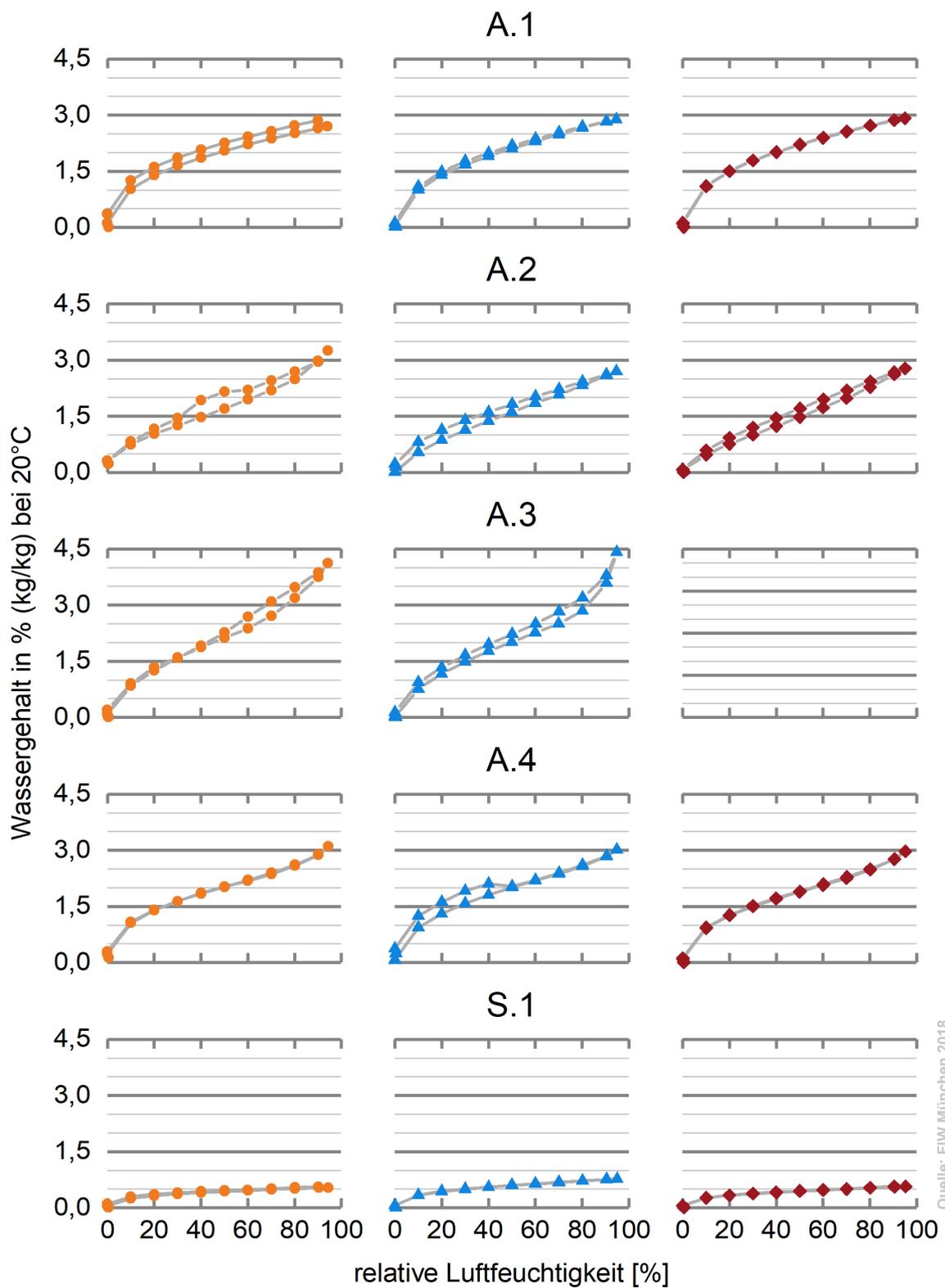
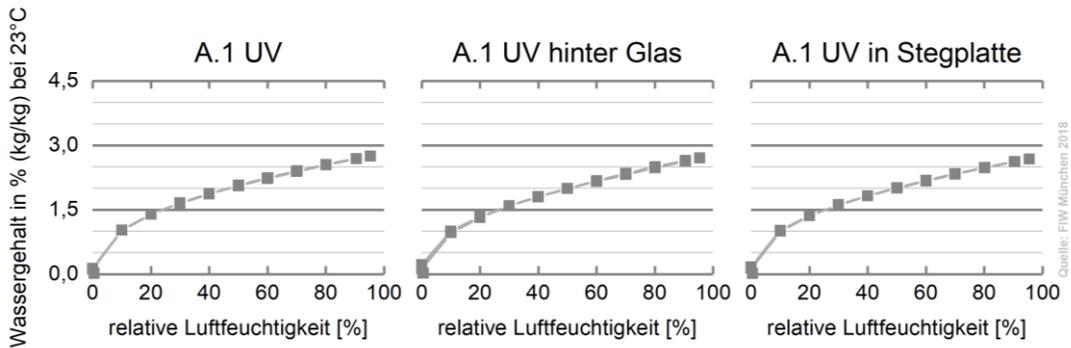


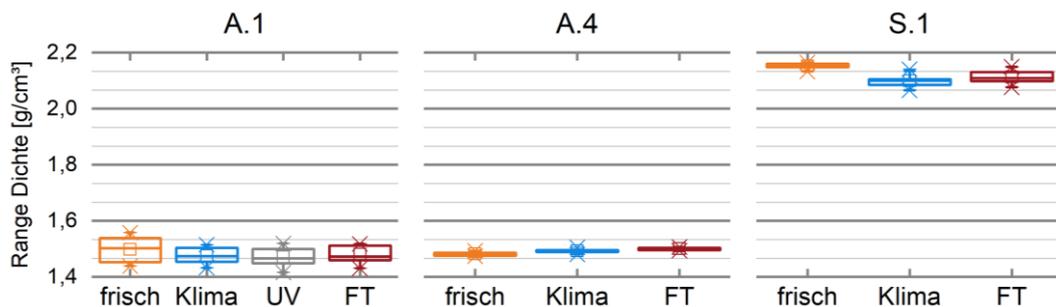
Abbildung 55 Sorptionsisothermen der fünf untersuchten APM-Dämmstoffe in verschiedenen Zuständen. Links: neues Material; Mitte: nach 270 Tagen Klimalagerung; rechts: nach 400 Zyklen Frost-Tau-Wechselbeanspruchung



**Abbildung 56 Sorptionsisothermen des Produkts A.1 nach 3000 h UV-Alterung nach Einbausituation. Links: freie UV-Bestrahlung; Mitte: im Scheibenzwischenraum von Fensterglas; Rechts: in den Zwischenräumen von Stegplatten**

### Dichte- und Volumenbestimmung

Die Messungen im Helium-Pyknometer liefern für die nano-porösen Stoffe keine reproduzierbaren Ergebnisse und weisen je nach Einstellung der Zeitdauer bis zum Druckausgleich sehr unterschiedliche Werte auf. Die Ergebnisse der Messreihen von jeweils 16 Einzelmessungen wurden deshalb in Box-Plot-Diagrammen aufbereitet. Exemplarisch stellt Abbildung 57 die in einer Messreihe ermittelte Dichte für Probe A.1 dar.



**Abbildung 57 Ergebnisse aus der Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometer**

Die Proben müssen entgast und frei von adsorbierten Molekülen sein, da sonst Abweichungen von bis zu 50 % möglich sind. Weitere Faktoren sind Poren mit sehr engen Zugängen, welche die Einstellung eines Gleichgewichtsdrucks in der gesamten Probe verzögern. In der Literatur werden für  $\text{SiO}_2$ -Aerogele mit einem Porenvolumen von über 90 % eine Skelettdichte von  $2 \text{ g/cm}^3$  und für amorphes Silika von  $2,2 \text{ g/cm}^3$  angegeben. In diesem Bereich befinden sich auch die hier ermittelten Werte. Extrem leichte und poröse Aerogele können in einem zweistufigen Prozess sogar mit einer Dichte von lediglich  $0,003 \text{ g/cm}^3$  hergestellt werden (Aegerter et al. 2011). In diesem Bereich befinden sich auch die hier ermittelten Werte.

## Setzungsverhalten

Die Stampfdichte der Probe A.1 wird als Vergleichswert ermittelt, um den Einfluss aus den Alterungsverfahren zu ermitteln. Durchgeführt werden die Versuche ebenfalls an der Siebrüttelmaschine, wie in Abbildung 70 abgebildet. In Tabelle 27 sind die am antistatischen Messzylinder abgelesenen Werte und die daraus berechnete Dichte zusammengefasst. Je Material wurden mehrere Rütteltests durchgeführt, aber nur einer der Werte wurde für die Berechnung verwendet. Bei allen Proben hat sich bereits nach 5 Minuten Rütteldauer eine konstante Stampfdichte eingestellt, mit einem zweiten Intervall konnte keine höhere Verdichtung erreicht werden. Es wurde keine Entmischung der unterschiedlichen Korngrößen festgestellt, sondern eine gleichmäßige Verdichtung des Granulats.



Abbildung 58 Probengefäße zur Durchführung der Tests zur Ermittlung der Stampfdichte

Tabelle 27 Ermittlung der Stampfdichte der Probe A.1 an gealtertem und neuem Material

Material	Volumen ca. [ml]	Volumen V nach Laufzeit [ml]		Volumenänderung		Masse Becher + Material m1 [g]	Stampfvolumen vt [ml/100g]	Stampfdichte pt [g/ml]
		5 min	10 min	[ml]	[%]			
Neu	250	230	230	20	8,0	/	/	/
Neu	250	225	225	25	10,0	/	/	/
Neu	250	230	230	20	8,0	56,49	1287,073	0,078
Klimalagerung	250	225	225	25	10,0	/	/	/
Klimalagerung	250	230	230	20	8,0	56,07	1318,052	0,076
Frost-Tau	250	235	235	15	6,0	/	/	/
Frost-Tau	250	230	230	20	8,0	55,83	1336,432	0,075
Neu	250	230	230	20	8,0	55,90	1331,019	0,075
UV freie Exp.	175	165	165	10	5,7	51,20	1311,606	0,076
UV hinter Glas	250	235	235	15	6,0	56,54	1311,384	0,076
UV in Stegpl.	250	230	230	20	8	56,03	1321,080	0,076

Die Stampfdichte der unterschiedlich beanspruchten Proben zeigt keine nennenswerten Unterschiede, die auf eine Materialdegradation durch ein Alterungsverfahren zurückzuführen sind.

## **Zusammenfassung der Ergebnisse aus Forschungsbereich A**

Die soeben vorgestellten Ergebnisse aus Forschungsbereich A hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Aerogelen und APM-Dämmstoffen sind in Tabelle 28 noch einmal übersichtlich zusammengefasst. Die in den verschiedenen Alterungsverfahren untersuchten Kenngrößen werden für die fünf Materialien bewertet. Dabei ist anzumerken, dass sowohl einige der Alterungsmechanismen wie auch Beanspruchungen der Prüfmethode für einige der Produkte in ihrer vorgesehenen Anwendung nicht relevant sind. Ein Frost-Tau-Wechsel wird beispielsweise nie Bestandteil des Prüfprogramms für ein Innendämmprodukt sein. Dennoch wurde hier bewusst ein sehr großer Umfang an Alterungsverfahren und Prüfungen gewählt, um die Eigenschaften der Produktgruppe Aerogele und APM besser kennen zu lernen.

In der Bewertung der Ergebnisse in Tabelle 28 bedeutet das Symbol „+“, dass in der jeweiligen Prüfung eine eindeutige Vergrößerung der Kenngröße über die Dauer der künstlichen Alterung zu erkennen war. Ein „-“ bedeutet im Umkehrschluss, dass die Kenngröße mit der Versuchsdauer kleiner wurde. Des Weiteren bedeutet „0“, dass die Kenngröße über die Dauer der künstlichen Alterung konstant blieb oder dass die Kenngröße sich zwar änderte, allerdings kein eindeutiger positiver oder negativer Trend erkennbar war. Für die grau hinterlegten Felder wurde die Prüfung für das jeweilige Material nicht durchgeführt.

Den wohl deutlichsten Einfluss hatte die künstliche Alterung auf die Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen: Sowohl bei der Klimalagerung (alle Materialien) als auch unter UV-Beanspruchung (nur A.1) kommt es zu einem leichten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Versuchsdauer. Lediglich für S.1 konnte eine sehr geringe Abnahme der Wärmeleitfähigkeit festgestellt werden. Für die Materialien A.2 und A.4 konnte zudem eine deutliche Abnahme der Druckbelastbarkeit nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung erkannt werden. Für alle übrigen mechanischen Eigenschaften und das Brandverhalten konnten keine eindeutigen Anzeichen dafür festgestellt werden, dass die Alterung Einfluss auf die einzelnen Kenngrößen hat. Auch die Strukturanalyse (Mikroskopie, Sorptionsverhalten sowie für Material A.1 zusätzlich Dichte- und Volumenbestimmung sowie Bestimmung der Stampfdichte) ergab keine eindeutigen Trends hinsichtlich der Degradation der Materialien mit zunehmender Anwendungsdauer.

**Tabelle 28 Zusammenfassung der Ergebnisse der hinsichtlich des Langzeitverhaltens. "+" = Vergrößerung der Kenngröße; "-" = Verkleinerung der Kenngröße; "0" = kein Einfluss/ kein eindeutiger Trend erkennbar**

Alterungsverfahren + Kenngröße	A.1	A.2	A.3	A.4	S.1
<b>Klimalagerung</b>					
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	+	+	+	+	-
Mechanische Eigenschaften		0	0	0	0
Brandprüfung		0	0	0	0
Mikroskopie	-	0	0	0	0
Sorptionsverhalten	0	0	0	0	0
<b>Frost-Tauwechsel-Beanspruchung</b>					
Druckfestigkeit		-	0	-	0
Mikroskopie	0	0		0	-
Sorptionsverhalten	0	0		0	0
<b>UV-Beständigkeit</b>					
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	+				
Mikroskopie	-				
Sorptionsverhalten	0				
Dichte- + Volumenbestimmung	0				
Stampfdichte	0				

Rückschlüsse auf die Anforderungen an Materialeigenschaften können durch hygrothermische Simulationen mit vorhandenen Feuchte- und Temperaturlasten in den einzelnen Bauteilschichten gezogen werden. Ein Vergleich der gemessenen Sorptionsisothermen mit den konstruktionsspezifischen Bedingungen, dargestellt in den Box-Plot-Diagrammen (Abbildung 38 bis Abbildung 40), zeigt die zu erwartende Bauteilfeuchte je nach Art der Konstruktion. Da Temperatur und Feuchte auf Außen und Innenseite der Dämmschicht bei jedem Anwendungsfall in bestimmten Bereichen schwanken ist auch die Eignung eines Dämmstoffs für einen Anwendungsfall auf diese Art zu beurteilen. Für die untersuchten Materialien konnte kein relevanter Einfluss der Feuchteeinwirkung auf die untersuchten Eigenschaften festgestellt werden.

## 5 Forschungsbereich B „Untersuchungen zur Rezyklierfähigkeit“

Bei der Entwicklung eines Recyclingverfahrens sind zahlreiche Einflussfaktoren und Einschränkungen zu berücksichtigen, die sich aus der Materialzusammensetzung und der Anwendungsform ergeben. Im Folgenden werden die Methoden zur Untersuchung der Rezyklierfähigkeit unterschiedlicher Materialien beschrieben mit dem Ziel, eine möglichst sortenreine Trennung der Materialkomponenten zu erhalten, um zur Abfallvermeidung beizutragen und eine möglichst hochrangige Wiederverwertung zu ermöglichen.

### 5.1 Einfluss der Zusammensetzung der Materialien auf die Trennbarkeit

Da Aerogel- und APM-Produkte in sehr verschiedenartigen Lieferformen und mit unterschiedlichsten Eigenschaften verfügbar sind, unterscheidet sich die Art und Weise wie diese Produkte verbaut, getrennt und schließlich recycelt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsformen und deren Einsatzgebiete detaillierter betrachtet.

#### **Wärmedämmverbundsysteme**

Wie schon aus dem Namen des Multikomponentensystems hervorgeht, sind bei Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) alle Komponenten untereinander und mit der zu dämmenden Wand fest verbunden. Klebemörtel, Putze, Armierungsschichten sowie ein geeigneter Dämmstoff bilden das System. Einige der Aerogel- und APM-Dämmstoffe eignen sich ebenfalls für die Verwendung als schlanke WDVS-Komponente sowohl als Innen- und Laibungsdämmung als auch als Außendämmung. Gerade bei Verbundwerkstoffen ist häufig ein Brechen und Zerkleinern des Materials notwendig, um die einzelnen Komponenten voneinander trennen zu können. Die Materialvielfalt, die beim Rückbau von WDVS zum Vorschein kommen kann, zeigt Abbildung 59, wobei hier neuartige Hochleistungsdämmstoffe noch nicht berücksichtigt wurden.

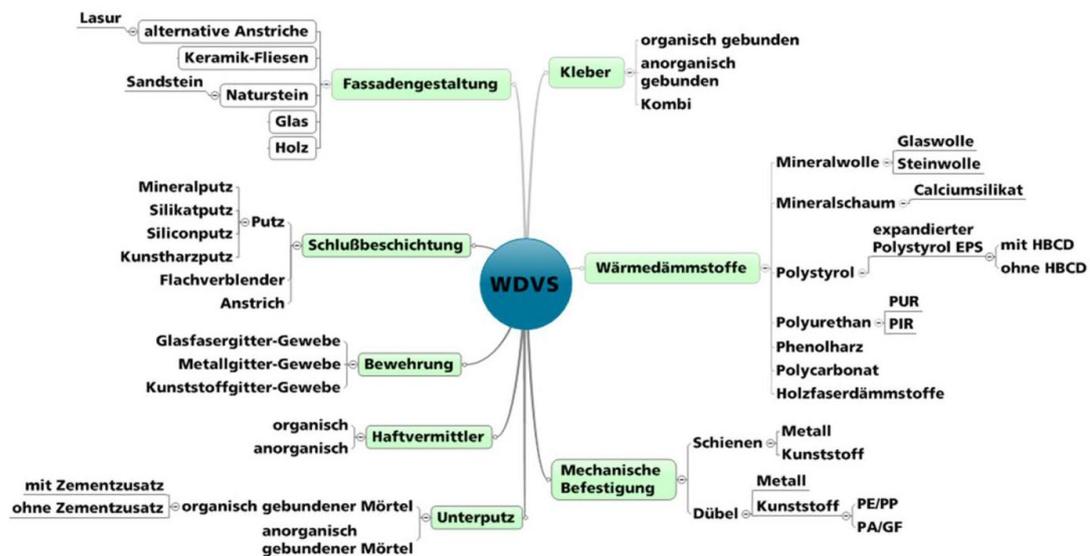


Abbildung 59 Mögliche Systemkomponenten für reguläres WDV (Schwitalla und Albrecht 2014)

Es zeigt sich also sehr schnell, dass jedes Produkt ein angepasstes Verfahren zur Rückgewinnung und erneuten Verwendung seiner Rohstoffe benötigt. Bei den Rückbauverfahren wird generell zwischen teilselktiven, selektiven und konventionellen Verfahren unterschieden. Ersteres beschreibt die vollständige Ablösung des Materialverbunds während beim selektiven Rückbau jede Lage separat abgelöst und sortiert wird. Ein hoher Grad an Handarbeit ist dafür noch aufzubringen. Im Gegensatz dazu steht der konventionelle Rückbau für die unkontrollierte Vermischung aller Baustofffraktionen unter geringerem Arbeitsaufwand. Eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von selektivem und konventionellem Verfahren ist in Tabelle 29 aufgelistet.

Für den selektiven Rückbau können folgende Trennverfahren angewandt werden, um eine bestmögliche Trennung der Systemkomponenten zu erreichen:

- Abtrennen von Hand (manuell)
- Abschälen mit dem Bagger (maschinell)
- Fräse zum Trennen
- Bohrhammer mit Meisel

**Tabelle 29 Vor- und Nachteile der Rückbauverfahren bezogen auf WDVS (Schwitalla und Albrecht 2014)**

	<b>Konventioneller Rückbau</b>	<b>Selektiver Rückbau</b>
Vorteile	Arbeitsaufwand wird durch den Einsatz von schweren Maschinen erleichtert Schnelles Verfahren Arbeitsaufwand ist proportional zum Gebäude-Volumen	Vermischung der einzelnen Fraktionen wird vermieden Vermischung mit gefährlichen Stoffen wird vermieden (Vor-)Trennung der einzelnen Fraktionen erfolgt bereits beim Rückbau auf der Baustelle Favorisierte Vorgehensweise
Nachteile	Vermischung der einzelnen Fraktionen Trennung und Rückgewinnung von wertbaren Fraktionen muss in separaten Anlagen erfolgen Ungeeignet, wenn gefährliche Stoffe verbaut wurden	Hoher Anteil an manueller Vorarbeit notwendig Hoher zeitlicher Aufwand Arbeitsaufwand ist proportional zur Gebäude-Fläche und steigt mit der Anzahl der miteinander verbundenen Lagen oder Schichten

### Systeme mit rein mechanischer Befestigung

Aerogeldämmplatten können hingegen auch als einlagige Dämmschicht mit rein mechanischer Befestigung angebracht werden, was einen sehr einfachen Rückbau des Systems gewährleistet. Hauptanwendungsgebiete sind dafür die Innendämmung, Steildachdämmung oder bei hinterlüfteten Fassaden. Die mechanische Trennung von Polyester-Glasfaser-Vlies und dem Aerogel ist möglich, wobei die Aerogel-Partikel in vielfacher Weise wiederverwendet werden können: entweder als loser Dämmstoff oder als Zuschlag für Mörtel, Putze oder Farben. Für die Vliese ist meist die Entsorgung vorgesehen. (Renueables 2015)

Des Weiteren besteht auch bei Fassadenelementen eine rein mechanische Befestigung des Dämmstoffs innerhalb der Elementhülle aus z.B. Aluminium.

### Kerndämmung

Loses Material passt sich gut an Unebenheiten an und füllt kleine Zwischenräume, weshalb es sich sehr gut als Kerndämmung eignet. Zur Rückgewinnung dieses Materials ist das Absaugen eine geeignete Methode. Im Anschluss sind für loses Aerogel-Granulat mögliche Verunreinigungen aus der Umgebung ausfindig zu machen und dafür entsprechende Reinigungsmöglichkeiten. Ablagerungen wie Staub, Fett oder die Anlagerung von Gasmolekülen haben einen Einfluss auf die Struktur und sollten vor einem weiteren Einsatz entfernt werden. Andernfalls ist das rückgewonnene Material einer Anwendung mit geringeren Anforderungen an die herausragenden Eigenschaften zuzuführen.

## 5.2 Versuchsplanung zu Forschungsbereich B

Nach einer Recherche von Herstellerangaben in z.B. Ökobilanzen, um einen Überblick über Empfehlungen für das Produkt nach der Nutzungsphase zu erhalten, werden verschiedene Versuche zur Trennung und Sortierung der Materialkomponenten unternommen. Dazu ist eine Anlehnung an allgemein praktizierte Rückbau- und Trennverfahren vorgesehen. Die bereits im Forschungsbereich A untersuchten Produkte sollen auch hinsichtlich ihrer Rezyklierfähigkeit untersucht werden. In den beiden unten aufgeführten Tabellen (Tabelle 30 für die Aerogele,

Tabelle 31 für die APM-Produkte) sind die vorgesehenen Befestigungsverfahren angegeben, die den Recyclingprozess maßgeblich beeinflussen und die mit dem Produkt durchzuführenden Versuche zur Trennung und Sortierung.

Für plattenförmige Dämmstoffe mit Faseranteil als Stützkomponente oder die Vliesmatten stellt das Shreddern der Produkte und anschließendes Sieben zur Sortierung in unterschiedliche Korngrößen ein geeignetes Trennverfahren dar. An den gealterten Probekörpern kann festgestellt werden, ob sich die Dimensionen verändert haben und ob Verwerfungen auftreten. In diesem Fall ist eine Zerkleinerung das einzige plausible Verfahren.

**Tabelle 30 Verwendete Materialien zur Untersuchung der Rezyklierfähigkeit von aerogelbasierten Dämmstoffen**

Produktkennzeichnung	Rohstoff	Lieferform	Befestigung	Durchgeführte Versuche
A.1	SiO <sub>2</sub>	Lose	Ohne bzw. als Zuschlag gebunden	
A.2	PU	Platte	geklebt	Schichtenweiser Rückbau Sedimentationsanalyse
A.3	SiO <sub>2</sub>	Matte	mechanisch	Schichtenweiser Rückbau Siebanalyse
A.4	SiO <sub>2</sub>	Platte	Geklebt bzw. geklebt und gedübelt	Schichtenweiser Rückbau Sedimentationsanalyse

**Tabelle 31 Verwendete Materialien zur Untersuchung der Rezyklierfähigkeit von APM-Produkten**

Produktkennzeichnung	Rohstoff	Lieferform	Befestigung	Durchgeführte Versuche
S.1	SiO <sub>2</sub>	Platte	Dübel und Kleber, ohne Befestigung in Fassadenelementen, Flachdach etc.	Siebanalyse

Zu untersuchen ist ebenfalls die bei einem Rückbau zum Recycling anfallende Menge an Aerogel-Dämmstoff. Die Durchführung eines Trennverfahrens zur erneuten Nutzung des APM muss auch wirtschaftlich rentabel sein, um Anwendung zu finden. Dafür werden die platten- und mattenförmigen Produkte systemkonform auf einen bestehenden Wandabschnitt aus Ziegelmauerwerk appliziert. Nach ausreichender Trocknungszeit wird versucht, die Systemkomponenten wieder schichtenweise rückzubauen und zu trennen. Das verwendete Material wird vor dem Einbau und nach dem Rückbau gewogen, um den Verlust von sortenreinem Material quantifizieren zu können. Bei Mischgut werden nach der Zerkleinerung Verfahren wie Sedimentation oder Windsichtung als geeignet angesehen und getestet. Das sehr ge-

ringe Gewicht und die Hydrophobierung stellen die größten Unterschiede zu Putzen oder Klebern dar, die bei diesen Verfahren ausgenutzt werden können.

### 5.3 Ergebnisse zu Forschungsbereich B

Basierend auf den oben beschriebenen Besonderheiten der verschiedenen Dämmsysteme und deren Befestigungsarten werden im Folgenden die praktischen Versuche zu Rückbau und Trennung sowie grundsätzliche Fakten zum Recycling von APM erläutert.

#### Ergebnisse aus der Literaturrecherche

Häufig werden von potentiellen Anwendern nanoporöser Materialien zunächst Bedenken geäußert, es handele sich eventuell um gesundheitsschädliche Stoffe. In diesem Fall wäre die Handhabung bei Installation und Rückbau, aber auch das Recycling problematisch und nur unter strengen Sicherheitsvorkehrungen möglich.

In der Europäischen Union regelt die REACH-Verordnung (EG Nr. 1907/2006) die Registrierung und Einstufung aller chemischen Stoffe zum Schutz vor Gefährdung von Mensch und Umwelt. Gemäß dieser Verordnung müssen für gefährliche Produkte Sicherheitsdatenblätter mit Angabe der REACH-Gefahrenklasse und Registrierungsnummer erstellt werden, falls die Einstufungskriterien der Verordnung 1272/2008 zutreffen. Des Weiteren wird über die Kennzeichnung von Produkten mit dem sogenannten GISCODE das Produkt bestimmten Gruppen zugeordnet, die eine vergleichbare Gesundheitsgefährdung aufweisen. Aus diesen Codes können so leichter Schutzmaßnahmen und Verhaltensweisen abgeleitet werden. Die Durchsicht der Sicherheitsdatenblätter sämtlicher aerogelbasierter Produkte führt zu folgenden Erkenntnissen:

- GISCODE: keine Daten verfügbar
- REACH: kein gefährlicher Stoff/Gemisch
- Kein lungengängiger Fasergehalt

Die potentiellen Gesundheitsgefahren beschränken sich auf Irritation und Austrocknung der Haut oder der oberen Atemwege durch die oleophile Eigenschaft der Aerogele. Augenreizungen resultieren aus einer mechanischen Reizung und können durch angemessene Schutzausrüstung vermieden werden.

Wie bei der Handhabung der Produkte bedeutet dies für mögliche Recyclingkonzepte, dass die Eindämmung der Staubentwicklung der kritische Faktor ist, um die Personen im Umfeld zu schützen.

Für den Transport der Abbruchabfälle zu einer Aufbereitungsanlage sind keine besonderen Vorschriften zu beachten. Die Produkte sind kein Gefahrgut im Sinne der Transportvorschriften.

Da die Produkte nicht löslich und hydrophobiert sind, ist zu beachten, dass sie weder in den natürlichen Gewässerkreislauf gelangen noch in die Kanalisation. Die Entsorgung auf einer zugelassenen Deponie ist die empfohlene Art der Beseitigung von Seiten der Hersteller, da es sich um einen nicht als gefährlichen Abfall registrierten Stoff handelt. In Abwasserreinigungsanlagen ist das mechanische Abscheiden von Produktresten möglich.

Der derzeitige Wissenstand bescheinigt keine Gefahren für den Umgang mit den Materialien, wobei noch keine Langzeitwirkungen aus dem direkten Kontakt mit den betreffenden Materialien oder auch im verbauten Zustand auf das Wohnraumklima bekannt sind. Für mögliche Recyclingverfahren resultieren demnach keine einschränkenden Vorschriften.

In Herstellerangaben wird mit einer hohen Recyclingfähigkeit geworben, wobei genauere Anweisungen oder der Prozess nicht angegeben werden. Zwei der im Forschungsbereich A untersuchten Produkte verfügen über ein „Cradle to Cradle“-Zertifikat in Silber bzw. Gold. Auch damit ist nur bekannt, dass das Material an sich die Kreislaufanforderungen erfüllt, eine Rezyklierfähigkeit der Bauanwendung wurde nicht untersucht. Projekte, in welchen die noch recht neuen Produkte in größerem Maßstab zum Einsatz gekommen sind, sind noch nicht alt genug, um aussagekräftige Erfahrungswerte abzuleiten.

Als mögliche Option für loses Aerogelgranulat aus Tageslichtanwendungen ist eine Wiederverwendung des „alten“ Aerogels in anderen Anwendungen denkbar. Möglicherweise ist ein aussieben von feinen Partikeln erforderlich. Falls keine Verunreinigungen erkennbar sind, wäre auch die Verwendung in neuen Paneelen aus z.B. Polycarbonat möglich. Die Beimischung von Granulat in weniger anspruchsvolle Anwendungen wie Dämmputze oder Mörtel ist mit Granulat aller Güteklassen ohne größeren Aufwand möglich. Dies stellt dann allerdings den letzten Schritt der Verwertung dar. Der Einsatz von günstigerem, recyceltem Aerogelgranulat ist sicher interessant, eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur kommerziellen Umsetzung wurde nach Auskunft des Herstellers noch nicht vorgenommen.

Die mechanische Aufbereitung zur Trennung der beiden Produktkomponenten Polyester/Glasfaser und Aerogel ist das empfohlene Verfahren für A.3. Für den Faseranteil ist die Entsorgung vorgesehen während die Partikel als lose Dämmung in Mörtel, Putzen, Farben etc. weitere Anwendung finden können. Alternativ ist die Deponierung des Materialverbunds vorgesehen.

Das Produkt A.4 mit den Anwendungsgebieten Innendämmung und Leibungsdämmung in der Fassade muss aus bauphysikalischen Gesichtspunkten geklebt wer-

den. Zusätzlich wird bei höheren Lasten gedübelt und je nach verwendeter Plattenstärke ist die Vlies-Deckschicht zu entfernen. Die Deckschicht erleichtert das Rückbauen, aber auch für dieses noch sehr junge Produkt gibt es noch keine Erfahrungen mit Rückbaumaßnahmen. Auch die Verwendung als Zuschlag in Putzen oder Beton sind denkbare Möglichkeiten nach der Zerkleinerung des abgelösten Produkts.

Hauteinsatzgebiet von APM S.1 sind vorgefertigte Fassadenelemente. Darin werden verschiedene Materialien schichtenweise verpackt und somit leicht trennbar fixiert. Bei weiteren Anwendungen wird die mechanische Befestigung aufgrund der geringen Zugfestigkeit bevorzugt und ein relativ einfaches Trennen sollte somit gewährleistet sein.

Weiterer Einflussfaktor, ob die Komponenten rückgebauter Dämmsysteme im Stoffkreislauf zirkulieren können, ist die anfallende Menge. Damit ein Verfahren wirtschaftlich rentabel betrieben werden kann ist eine gewisse regional verfügbare Menge für die Aufbereitungsanlage erforderlich. Die derzeit verbaute Menge an APM-Produkten bestimmt die potentielle zukünftig anfallende Menge, die für Recyclingprozesse zur Verfügung steht. Getrieben von strenger werdenden Energieeinsparvorschriften könnte es zu einem starken Anstieg in der Verbreitung von Hochleistungsdämmstoffen kommen. Derzeit liegt der Anteil von Aerogeldämmstoffen am weltweiten Dämmstoffmarkt bei ca. 0,5 % mit einem prognostizierten Wachstum auf bis zu 10 % im Jahr 2025. Schon in den Jahren 2004 bis 2008 wurde ein Umsatzwachstum von 50 – 75 % erzielt, das auch durch den Bau neuer Produktionsanlagen weiter anhalten soll. Während der momentane Richtwert pro m<sup>3</sup> SiO<sub>2</sub>-Aerogelen bei 4000 US\$ liegt, soll der Preis durch höhere Produktionskapazität auf unter 1500 US\$ sinken. Alternative Verfahren zur überkritischen Trocknung bei der Herstellung von Aerogelen werden als Kriterium zur Konkurrenzfähigkeit am Dämmstoffmarkt gehandelt (Aegerter et al. 2011).

## **Versuche zur Trennung und Sortierung**

Die Rückbaumöglichkeiten der untersuchten Dämmstoffe in der Anwendung WDVS bzw. Innendämmung wurden an einem Wandelement erprobt. Zusätzlich wurde die Trennung von Produkt mit Mörtelresten sowie den einzelnen Produktbestandteilen untersucht. Die Versuchsabläufe und die Ergebnisse sind im Folgenden aufgeführt.

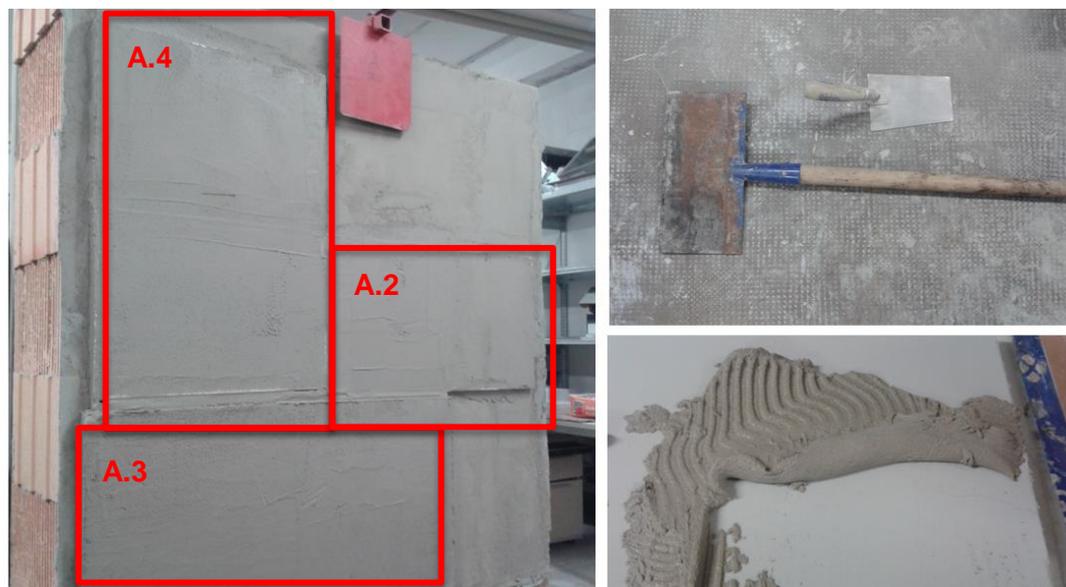
### Schichtenweiser Rückbau

Bestehende Mauerwerks-Probekörper dienen als Grundlage für den Versuchsaufbau zum schichtweisen Rückbau. Die Materialien A.2, A.3, A.4 und S.1 werden wie in den Anwendungshinweisen der Hersteller beschrieben auf die Wand aufgebracht. Mit einem Klebe- und Armierungsputz wurden dann die Platten auf das Mauerwerk geklebt und mit einer Deckschicht versehen, auf Armierungsgewebe und Oberputz wurde verzichtet. In Abbildung 60 links ist dieser mit Dämmstoff und Armierungs-

mörtel für die Rückbaumaßnahmen vorbereitete Probekörper abgebildet. Von Produkt A.4 wurde je eine Platte mit Deckschicht und eine Platte ohne Deckschicht verwendet, da die Verarbeitungshinweise je nach verwendeter Plattenstärke abweichende Installationsverfahren vorsehen.

**Aufgrund des extrem hydrophoben Verhaltens und der besonderen Oberflächeneigenschaften war das Auftragen des Armierungspuzzes auf die Probe S.1 nicht möglich, wie in Abbildung 60 rechts unten zu erkennen ist. Die für dieses Produkt empfohlene Verwendung von 2K Acrylharzkleber wurde wegen des etwas unebenen Untergrundes nicht durchgeführt, da die vertikale Anwendung mit ausschließlich geklebter Befestigung für dieses Produkt ohnehin nicht vorgesehen ist (vgl.**

Tabelle 31). Nach einer Trocknungsdauer von einer Woche wurde ein händischer selektiver Rückbau der einzelnen Schichten mit einer Maurerkelle bzw. einer Stoßscharre (Abbildung 60 oben rechts) durchgeführt. Der Verbund des Klebe- und Armierungsmörtels mit den Produkten unterscheidet sich und damit auch die Anforderungen an die Trennung.



**Abbildung 60 links: Mauerwerks-Probekörper mit jeweils zwei aufgeklebten Dämmstoffplatten der Produkte A.2, A.3 und A.4, rechts: das verwendete Werkzeug zum Rückbau und der Versuch das Produkt S.1 aufzukleben**

Die entscheidenden Merkmale des selektiven Rückbaus der drei verbleibenden Produkte wurden dokumentiert und werden im Folgenden dargestellt. Die Verbindung zwischen Dämmstoff und Mörtel ist bei Produkt A.2 sehr gut und ein ablösen der Decklage nicht möglich. Das Abstoßen des gesamten Aufbaus erfordert einen gewissen Kraftaufwand und das Material zerspringt in unterschiedlich große Partikel. An der Wandseite löste sich der Dämmstoff teilweise ohne Mörtelschicht von der Wand ab (siehe Abbildung 61 rechts, oberer Partikel). Das liegt vermutlich am variierendem Anpressdruck und an der Mörtelmenge beim Aufkleben der Platten and der jeweiligen Stelle.

## A.2



**Abbildung 61** Merkmale des selektiven Rückbaus für Material A.2. Links: Versuch die Mörtel-Deckschicht abzulösen mit hohem Materialverlust, Ansicht von vorne auf die Wand. Mitte: Rückstandsfreier Untergrund und Ansicht des Materialquerschnitts nach Abspringen von Materialpartikeln in unterschiedlicher Größe. Rechts: oberer Partikel mit einseitiger Mörtelschicht nach Wandablösung vs. Beidseitige Mörtelschicht am unteren Partikel nach identischem Verfahren, Ansicht von der Seite auf zwei Bruchstücke.

In die Fasermatte A.3 kann der Mörtel tief eindringen und bei Ablöseversuchen wird die gesamte Fasermatte unter sehr hoher Staubentwicklung fransig auseinandergezogen, wie in Abbildung 62 rechts beim Ablöseversuch der oberen Mörtelschicht gut zu erkennen ist. Der Ablösevorgang der gesamten Matte hat im Randbereich entlang der Maueroberfläche zu erfolgen, bis man die Matte greifen kann, um sie per Hand abzuziehen. Die gebundenen Aerogelpartikel lösen sich dabei aus der Matte und verursachen eine große Staubwolke. Bis auf wenige Faserrückstände, die in der Mörtelschicht an der Wand verbleiben, lässt sich auf diese Weise der Dämmstoff Matten für Matte von der Wand lösen. Die der Wand zugewandten Seite kann relativ rückstandsfrei zurückgewonnen werden. Selbst ein vorsichtiges Abschaben führt zu keinem besseren Ergebnis, die Staubbildung ist dabei unkontrollierter und stärker und das Verfilzen an der Oberfläche noch stärker.

## A.3



**Abbildung 62** Merkmale des selektiven Rückbaus für Material A.3. Links: Ablöseversuch der oberen Mörtelschicht an einer Ecke führt zu zerfransen des Produkts. Mitte: Ablösen bis zum hier dargestellten Wandabstand mit Schaber, anschließend per Hand abziehen. Rechts: Rückseite der abgelösten Elemente; oben wurde bis zur Mitte mit dem Schaber abgelöst, es sind Auswirkungen am Material zu erkennen. Die untere Matte wurde nach Randablösung per Hand abgezogen.

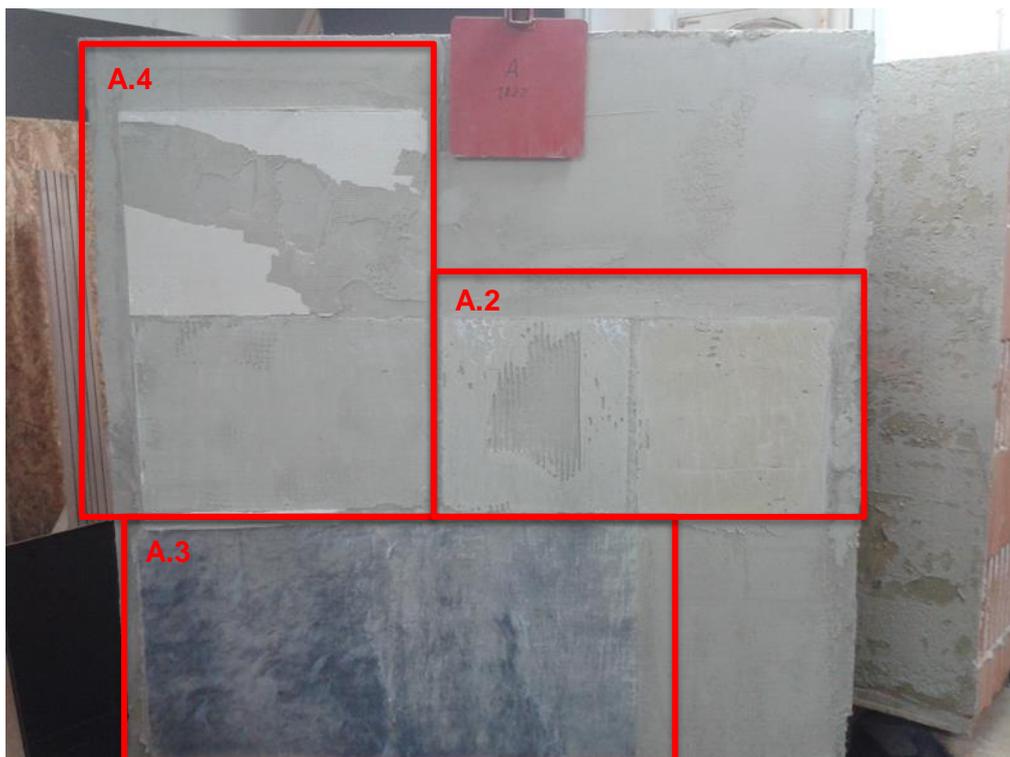
Der Verbund zwischen Material A.4 und Mörtel ist wesentlich geringer als bei den beiden anderen Materialien. Bei der Dämmstoffplatte mit Vliesdeckschicht ist ein Ablösen der oberen Putzlage nicht möglich, ohne dabei nicht auch den Dämmstoff zu beschädigen. Relativ einfach kann die Deckschicht abgezogen werden. Ein Ablösen der porösen Dämmstoffschicht von der wandseitigen Vliesschicht ist aber wiederum nicht so einfach möglich. Der Abtrag erfolgt zwar entlang der Deckschicht, allerdings stückweise, da das Material leicht bricht. Die Trennung kann daher aber ziemlich sortenrein erfolgen. Bei der Platte, die ohne Deckschicht aufgebracht wurde, kann die obere Putzlage auch entfernt werden, jedoch eher durch vorsichtiges Abschaben oder Schleifen. Geringe Mengen des Materials gehen dabei verloren. Das Ablösen von der Wand funktionierte problemlos und ohne größere Materialverluste wieder in Stücken.

Das Wandelement nach den oben beschriebenen Rückbauverfahren zeigt Abbildung 64. Die verbliebenen Dämmstoffreste sind äußerst gering und sind hauptsächlich Material A.3 zuzuordnen bzw. der Deckschicht von A.4. Der Anteil, der nach diesem Schritt des selektiven Rückbaus entsorgt wird und keine weitere Aufbereitung zur erneuten Verwendung durchläuft, ist in Abbildung 65 dargestellt und beinhaltet nur sehr kleine Dämmstoffpartikel.

## A.4



**Abbildung 63** Merkmale des selektiven Rückbaus für Material A.4. Links: Ablöseversuch der oberen Mörtelschicht vom der Vlies-Deckschicht mit Materialverlust, Ansicht von vorne auf die Wand. Mitte: Abziehen der Deckschicht mit oberer Mörtelschicht. Rechts: stückweises Abstoßen des Materials nach abgelöster Deckschicht und Verbleiben der unteren Deckschicht an der Wand.



**Abbildung 64** Wandelement nach dem Rückbau der Dämmstoffproben: A.4 oben links: geringer Rückstand der Deckschicht. A.2 mittig rechts: sehr geringer Rückstand des Materials an Ecke oben links, teilweise Abtrag des Armierungsmörtels. A.3 unten: Vliesfasern sind noch deutlich am Wandelement zu erkennen.



**Abbildung 65** Restmaterial aus Armierungsmörtel und Dämmstoff der drei verwendeten Produkte, das keinen weiteren Trenn- und Aufbereitungsverfahren unterzogen wird.

Mit den erhaltenen Mengen an rückgewonnenem Dämmstoff wurden verschiedene Trennverfahren erprobt, um Mörtelreste abzulösen und sortenreines Material zu gewinnen. Die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Mörtel oder Putzen gegenüber APM- und Aerogeldämmstoffen sollen dafür genutzt werden. Insbesondere das geringe Gewicht, die hohe Porosität und die Hydrophobie können in diesem Zusammenhang genutzt werden. Grundsätzlich ist dafür eine weitere Zerkleinerung nötig. Das Ausgangsmaterial für die weiteren Schritte ist in Abbildung 56 dokumentiert.



**Abbildung 66** Materialfraktionen nach dem selektiven Rückbau. Links: A.4. Mitte: A.2. Rechts: A.3.

### Sedimentationsanalyse

Für die Sedimentationsanalyse werden die beim schichtenweisen Rückbau abgeschlagenen Bruchstücke mit einem Gummihammer und mit einem Multizerkleinerer

weiter zerkleinert. Anschließend wird das Material in eine mit Wasser gefüllte Wanne gegeben und mit einem Mixer kräftig durchgerührt, um die Oberflächenspannung zu brechen und schwerere Teilchen zu lösen.

Die Abfolge der oben genannten Schritte ist für A.2 in Abbildung 67 dargestellt. Bei der Zerkleinerung entstehen kleinere Stückchen, bei welchen sich die Putzschicht teilweise löst und teilweise verbleibt. Auf dem Wasser sinken die Teilchen mit zu großem Putzanteil ab. Aus diesem Grund ist es wichtig die groben Stücke ausreichend zu zerkleinern. Das Abschöpfen der schwimmenden Schicht ist problemlos möglich. Da das Material vom Wasser benetzt und tatsächlich nass wird ist ein Trocknen nach dem Abschöpfen erforderlich.



**Abbildung 67 Zerkleinerung und Sedimentation der Bruchstücke von A.2. Oben links: Bruchstücke im Multizerkleinerer vor Zerkleinerung. Oben rechts: Zerkleinerte Bruchstücke. Unten links: Zerkleinerte Bruchstücke auf Wasserbad. Unten rechts: nach durchmischen des schwimmenden Materials sind am Boden der Wanne sedimentierte Partikel sichtbar.**

Für Produkt A.4 (siehe Abbildung 68) führt das Zerkleinern zu einem sehr feinen Pulver, das auf dem Wasser in Clustern schwimmt. Nach einer Verwirbelung mit einem Mixer haben sich schwerere Partikel mit Mörtelresten abgesetzt. Das feine Material schwimmt weiter an der Oberfläche und lässt sich nicht vom Wasser benetzen. Mit feinmaschigen Sieben lässt sich das weiterhin staubende Material sehr gut abschöpfen. Da der Verunreinigungsgrad sehr gering war, ist hier eine fast vollständige Rückgewinnung möglich.



**Abbildung 68** Zerkleinerung und Sedimentation der Bruchstücke von A.4. Oben links: Bruchstücke im Multizerkleinerer vor Zerkleinerung. Oben rechts: Zerkleinerte Bruchstücke. Unten links: Zerkleinertes Material auf Wasserbad. Unten rechts: nach durchmischen des schwimmenden Materials ist keine Benetzung vorhanden, Abschöpfen mit Sieb funktioniert sehr gut.

Bei Produkt A.3 ist ein Zerkleinern nur durch zerschneiden der Fasern möglich. Die Mörtelreste lösen sich dabei oder bleiben in den Fasern hängen. Auf dem Wasser schwimmen dann die Aerogel-Partikel heraus und sondern sich ab. Fasern wie Aerogel-Partikel benetzen sich nicht mit Wasser und es besteht immer eine klare Trennung.



**Abbildung 69** Sedimentation der Bestandteile von A.3. Aerogelpartikel und Faseranteil schwimmen auf dem Wasser und benetzen sich nicht

Nach dem Abschöpfen der Proben nach der Sedimentationsanalyse ist zur Trennung der Materialfraktionen weiterhin eine Siebanalyse sinnvoll. Bei Produkt A.3 ist mit den gleichen Ergebnissen, wie am frischen Material zu rechnen und die Siebanalyse kann auch ohne Sedimentationsanalyse durchgeführt werden. Das Verfahren und die Ergebnisse sind im nächsten Abschnitt aufgeführt.

Bei den beiden anderen Produkten ist eine Kombination beider Trennverfahren sinnvoll, durch die Siebanalyse können weitere Mörtelbestandteile aussortiert werden.

### Siebanalyse

Die Siebanalyse mittels Siebrüttelmaschine dient zur Trennung von Materialbestandteilen mit unterschiedlicher Partikelgröße. Eine Auswahl von stapelbaren Sieben mit nach unten abnehmender Maschenweite wird hierfür verwendet, der Versuchsaufbau ist in Abbildung 70 dargestellt.

Die Versuche wurden nur an den beiden Proben A.3 und S.1, die aus einem Materialgemisch aus Fasern und APM bestehen, durchgeführt. Es handelte sich dabei um frisches Material, das nicht für den selektiven Rückbau oder die Sedimentationsanalyse verwendet wurde. Durch Shreddern des Materials in einem Multi-Zerkleinerer wurde die Struktur aufgebrochen und loses Material erzeugt. Dieses wurde in die oberste Sieblage einer Siebrüttelmaschine eingebracht und in mehreren Zyklen gerüttelt. Die einzelnen Fraktionen wurden anschließend gewogen. Verwendet wurden Siebe mit Maschenweiten von 112  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  und 63  $\mu\text{m}$ , um die Trennung von Aerogelpartikeln bzw. Kieselsäurepulver von den Faserbestandteilen durchzuführen.



**Abbildung 70 Versuchsaufbau der Siebanalyse zur Trennung der Fasern von den nanoporösen Partikeln**

Die Rückstände in den Sieben sind in Tabelle 32 und

Tabelle 33 aufgelistet, Abbildung 71 und Abbildung 72 zeigen die getrennten Fraktionen in den Sieben mit abnehmender Maschenweite von links nach rechts nach einer Rütteldauer von 10 Minuten. Die kleinsten Rückstände werden in der untersten Schale aufgefangen (im Bild ganz rechts). Die prozentualen Anteile in den Sieben wurden durch Wiegen ermittelt. Bei Probe S.1 wurden bei den beiden letzten Rüttelzyklen kleine Kugeln aus Hartgummi mit einem Durchmesser von 20 mm mit in das oberste Sieb gelegt. Eine wesentlich höhere Trennung konnte dadurch erzielt werden.

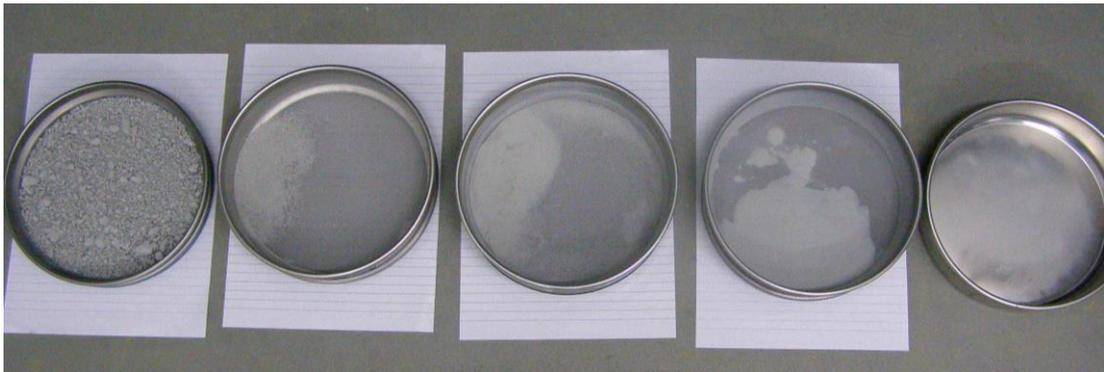
**Tabelle 32 Ergebnisse des Trennverfahrens durch Siebanalyse an Probe A.3**

Sieb	A.3 Rückstand nach Rütteldauer [Minuten]				Beschreibung des Rückstands
	10	20	30	40	
112	61,83%	59,18%	55,15%	54,47%	Fasern
0,5	1,67%	0,79%	1,28%	0,88%	Kleinere Fasern
0,2	3,63%	2,75%	2,36%	1,96%	Kleinere Fasern + grobe Kügelchen
0,063	18,35%	17,08%	18,06%	17,17%	Kügelchen + kleine Fasern
Schale	14,52%	16,29%	18,35%	18,74%	Sehr kleine Kügelchen + vereinzelte Fasern
Summe	100,00%	96,07%	95,19%	93,23%	

**Tabelle 33 Ergebnisse des Trennverfahrens durch Siebanalyse an Probe S.1**

Sieb	S.1 Rückstand nach Rütteldauer [Minuten]					Beschreibung des Rückstands
	10	20	30	40	50	

				+3Kugeln	+3Kugeln	
1,12	58,49%	51,43%	48,92%	40,76%	19,44%	Fasern + Staub / Kügelchen
0,5	7,75%	9,06%	9,86%	11,92%	17,33%	Größere Kügelchen + Faserknäul
0,2	15,85%	18,30%	18,76%	20,87%	27,25%	Kleinere Kügelchen + Faserknäul
0,063	14,77%	18,24%	19,10%	22,98%	31,58%	Staub + kleinere Kügelchen + Faserbündel
Schale	0,51%	0,34%	0,34%	0,34%	0,97%	Staub / sehr kleine Kügelchen
Summe	97,38%	97,38%	96,98%	96,86%	96,58%	



**Abbildung 71 Siebrückstände der Probe S.1 nach Rütteldauer von 10 Minuten: Abnehmende Maschenweite der Siebe von links nach rechts, ganz rechts Auffangschale**



**Abbildung 72 Siebrückstände der Probe A.3 nach Rütteldauer von 10 Minuten: Abnehmende Maschenweite der Siebe von links nach rechts, ganz rechts Auffangschale**

### Mengenermittlung der rückgewonnenen Materialfraktionen

Vor Beginn der Installation der Probekörper auf das Mauerwerk wurden die Dämmstoffmatten gewogen. Die Werte des Materialeinsatzes sind der ersten Zeile von Tabelle 34 zu entnehmen.

Weitere Wägeschritte wurden mit dem abgeschöpften Material direkt nach der Sedimentationsanalyse sowie nach dem Rücktrocknen dieser Materialfraktion durchgeführt. Anhand der Ergebnisse aus der Mengenermittlung in Tabelle 34 ist bei Produkt A.2 ist die Notwendigkeit des Trocknens deutlich erkennbar. Das zerkleinerte Material wurde deshalb im Trockenofen rückgetrocknet und anschließend gewogen. Obwohl die Mörtelreste erfolgreich abgeschieden wurden, bleibt ein geringer Anteil

an den Dämmstoffpartikeln haften. Das geringe Gewicht des Materials führt zu einer Zunahme der Materialfraktion um 56 %. Eine ausgeprägtere mechanische Vorbehandlung und eine gründlichere Zerkleinerung stellen mögliche Lösungsansätze für eine bessere Trennbarkeit dar.

Die Aerogel-Vliesmatte A.3 lässt sich nur in eine Vlies-Mörtel-Fraktion und den Aerogelanteil trennen, da der feuchte Mörtel tief in das Vliesgewebe eingedrungen ist. Sehr leistungsfähige Schneidemühlen oder Schredder, die einen vollständigen Aufschluss des Gewebes gewährleisten, könnten ein Absieben des Mörtels ermöglichen. Die ermittelte Zunahme von 17 % beinhaltet neben dem Aerogelanteil auch das Vlies-Mörtelgemisch, der Rückstand an der Wand ist vernachlässigbar gering.

Das extrem hydrophobe Verhalten der Partikel von A.4 bleibt auch für das gemahlene Pulver erhalten. Vorhandene Wassertropfen, die im Materialgemisch eingeschlossen sind, lassen sich am effektivsten durch rütteln entfernen. Der geringe Materialverlust durch den Trennprozess von 9 % ist Großteils der Staubbildung zuzuschreiben. Jedes Abschöpfen und Umfüllen ist mit Materialverlust verbunden. Darüber hinaus ist die Deckschicht einer Platte nur noch teilweise im Materialgemisch vorhanden (vgl. Abbildung 64).

**Tabelle 34 Mengenermittlung des recycelbaren Materialanteils**

[g]	A.2	A.3	A.4
Ausgangprodukte	484,90	2469,5	1545,0
Feucht nach Sedimentationsanalyse	1350,2	3268,3	1490,0
Trocken	758,4	3171,0	1411,3
Differenz	+ 56 %	+17 %	- 9 %

## Zusammenfassung der Ergebnisse aus Forschungsbereich B

Die Anforderungen an Dämmstoffe hinsichtlich Funktionalität, Dauerhaftigkeit und Rezyklierfähigkeit sind hoch. Durch die gute Performance von Hochleistungsdämmstoffen wie Aerogelen und APM ist die Materialstärke gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen deutlich reduziert. Dazu ist die Befestigung ein entscheidender Faktor, um die Gesamtpformance durch Wärmebrücken nicht zu sehr zu verschlechtern, die häufig Teil des Dämmsystems ist. Dieser geringe Materialeinsatz und die sehr gute Verbindung der Elemente untereinander erschweren in der Regel den Recyclingprozess und erhöhen den Aufwand zur Aufbereitung. Ein rückgewonnenes Material mit vorher definierten Eigenschaften zu gewinnen ist sehr schwierig, aber notwendig, um daraus wieder ein zugelassenes Bauprodukt herstellen zu können. Denn auch für das Recycling-Produkt müssen alle Parameter bekannt sein. Somit ergibt sich ein Konflikt zwischen Kreislaufwirtschaftsgesetz und der Bauproduktenverordnung.



## 6 Zusammenfassende Diskussion

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Aerogele und APM-Baustoffe hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens und ihrer Rezyklierfähigkeit eingehend zu untersuchen. Für diese neuartigen Dämmstoffe soll so die Basis an verfügbaren Informationen sowie das Vertrauen von Planern und Anwendern vergrößert und damit der Weg in die Breitenanwendung erleichtert werden.

Ausgehend von einer Marktrecherche zu Rohstoffen, Herstellung, Nachhaltigkeit, bauphysikalischen Eigenschaften, verfügbaren Produkten und Alterungsmechanismen von Aerogelen und APMs wurden fünf Materialien für die Untersuchung ausgewählt. Da auf eine gute Marktabdeckung geachtet wurde, ist davon auszugehen, dass die hier durchgeführten Untersuchungen als repräsentativ für den Bereich der Aerogel- und APM-Dämmstoffe in der Bauanwendung angesehen werden können. Anschließend wurden zwei Forschungsbereiche A (Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Feuchte – und Temperatureinfluss) und B (Untersuchungen der Rezyklierfähigkeit) untersucht.

In Forschungsbereich A wurden folgende Methoden zur künstlichen Alterung der Aerogel- und APM-Dämmstoffe eingesetzt:

- **Künstliche Klimalagerung bei 50°C und 70% r.F.**
  - Dauerlagerung über 270 Tage unter Testbedingungen
  - Untersuchte Eigenschaften: Wärmeleitfähigkeit, Mechanische Eigenschaften, Brandprüfung, Mikroskopie, Sorptionsverhalten
- **Forst-Tau-Wechselbeanspruchung**
  - Anwendung von 400 Zyklen in einem Zeitraum von insgesamt 67 Tagen
  - Untersuchte Eigenschaften: Druckprüfung, Mikroskopie, Sorptionsverhalten
- **UV-Beanspruchung (nur für Material A.1)**
  - Versuchsdauer von 3000 Stunden
  - Untersuchte Eigenschaften: Wärmeleitfähigkeit, Mikroskopie, Sorptionsverhalten, Dichte- und Volumenbestimmung, Stampfdichte

Von allen in den drei Alterungsverfahren untersuchten Kenngrößen konnte am ehesten ein negativer Effekt der künstlichen Alterung auf die Wärmeleitfähigkeit der Materialien festgestellt werden: So war sowohl unter Klimalagerung als auch unter UV-Beanspruchung (nur Material A.1) für alle Materialien ein ansteigender Trend der Wärmeleitfähigkeit über die Versuchsdauer zu erkennen. Lediglich das Material S.1 verhält sich über die Zeit beinahe konstant. Ein sehr leichtes Abfallen der Wärmeleitfähigkeit mit der Zeit kann über die Messungenauigkeit und das Fehlen einer Neuvermessung der Materialien mit der Alterung erklärt werden.

Neben dem Langzeitverhalten der Wärmeleitfähigkeit wurden für die vorliegenden Materialien noch zahlreiche weitere Untersuchungen durchgeführt. Für die Materialien A.2 und A.4 konnte eine deutlich geringere Druckbelastbarkeit nach Frost-Tau-Wechseln festgestellt werden. Die übrigen Versuche zur mechanischen Belastbarkeit und zum Brandverhalten sowie die Strukturanalyse ergaben keine eindeutigen Hinweise darauf, dass mit fortschreitender Alterung eine maßgebliche Degradation der jeweiligen Eigenschaft stattfindet.

Da für keine der anderen Kenngrößen eindeutige Trends über die Versuchsdauer festgestellt werden konnten, wird die Wärmeleitfähigkeit als die maßgebliche Kenngröße für die Alterung von Aerogelen und APMs angesehen. Aufgrund der äußerst geringen Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit sind APMs auch im gealterten Zustand noch sehr leistungsfähige Dämmstoffe. Dies soll in Tabelle 35 noch einmal veranschaulicht werden: Für die fünf in diesem Projekt behandelten Beispielkonstruktionen (zweischaliges Mauerwerk, zwei Innendämmungen, zwei Steildächer) ist hier dargestellt, um wieviel Prozent sich der U-Wert der Konstruktionen durch die Alterung der Aerogel- und APM-Dämmstoffe verschlechtert.

Die Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeiten liegt im Bereich von 1-3 % (Ausnahme Material S.1 in K.5, hier leichte Verbesserung von 1%). Die Verschlechterung der U-Werte korreliert mit diesen Werten und liegt ebenfalls im sehr geringen Bereich von 1-3 % (Ausnahme wiederum K.5, hier leichte Verbesserung von etwa 1%). Es ist also davon auszugehen, dass sich der Wärmeschutz in Konstruktionen mit Aerogel- oder APM-Dämmstoffen auch nach mehreren Jahrzehnten nur marginal verschlechtert.

**Tabelle 35 Verschlechterung des U-Werts in Beispielkonstruktionen bedingt durch die Alterung der APM-Dämmstoffe**

Konstruktion	$\lambda_{\text{APM,frisch}}$ [W/mK]	$\lambda_{\text{APM,gealtert}}$ [W/mK]	Abwei- chung	U-Wert <sub>frisch</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	U-Wert <sub>gealtert</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	Abwei- chung
K.1 Zweischaliges MW	0,0196	0,0202	3%	0,223	0,229	3%
K.2 Innendämmung 1	0,0186	0,0188	1%	0,274	0,277	1%
K.3 Steildach 1	0,0182	0,0188	3%	0,211	0,216	2%
K.4 Innendämmung 2	0,0157	0,0162	3%	0,236	0,242	3%
K.5 Steildach 2	0,0185	0,0183	-1%	0,174	0,172	-1%

Im Forschungsbereich B „Untersuchungen zur Rezyklierfähigkeit“ wurden verschiedene Versuche zur Trennung und Sortierung der gewählten Aerogel- und APM-Dämmstoffe durchgeführt.

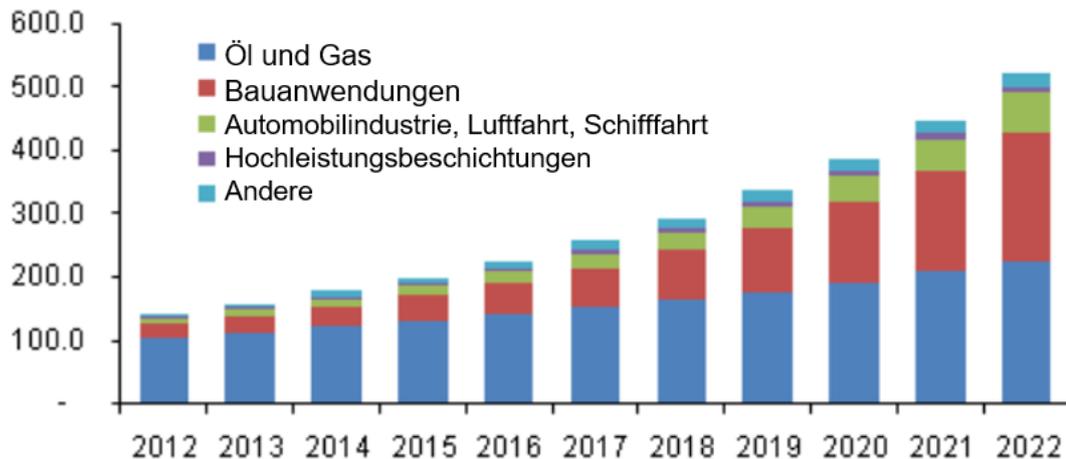
Für die Materialien A.3 und S.1 wurde zunächst eine Siebanalyse durchgeführt. Dieser ergab eine gute Trennbarkeit der einzelnen Bestandteile der Materialien.

Anschließend wurden für die Materialien A.2, A.3 und A.4 Versuche zum schichtweisen Rückbau der Dämmstoffe von einem bestehenden Mauerwerks-Probekörper durchgeführt. Es ergab sich, dass für einen Großteil der Proben die auf dem Wandelement verbliebenen Dämmstoffreste sehr gering sind. Ein schichtweiser Rückbau der verklebten Dämmmaterialien ist demnach möglich. Mit den erhaltenen Mengen an rückgebautem Dämmstoff wurde anschließend in weiteren Versuchen erprobt, ob eine Entfernung von Mörtelresten und ein Erhalt von sortenreinem Material möglich ist. Mithilfe von Sedimentations- und Siebverfahren konnte demnach für alle untersuchten Materialien eine mehr oder weniger vollständige Rückgewinnung des reinen Aerogels bzw. APMs erreicht werden.

Daraus ist zu schließen, dass für AeroGel- und APM-Dämmstoffe prinzipiell Möglichkeiten für Rückbau und Recycling der Materialien bestehen. Allerdings wird nicht die theoretische Machbarkeit, sondern vielmehr der Aufwand der Trennverfahren sowie die anfallenden Materialmengen als Hindernis für die Rezyklierfähigkeit der hier untersuchten Dämmstoffe angesehen. Wie bereits erwähnt ist eine ausreichend große, regional verfügbare Menge Voraussetzung für die wirtschaftliche Rentabilität von Rückbau- und Recycling-Maßnahmen. Es ist davon auszugehen, dass eine Rentabilität für den derzeitigen Anteil von Aerogelen am globalen Dämmstoffmarkt (< 0,5 %) nicht gegeben ist. Erst mit einem deutlichen Anstieg der verbauten Mengen kann ein wirtschaftliches Recycling der Stoffe betrieben werden.

Folgt man jedoch den Wachstumsprognosen für Aerogel Dämmstoffe, so wird der Anteil an recyclefähigem Material in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. In Abbildung 73 sind beispielhaft die Anteile der wichtigsten Sektoren am Umsatz des amerikanischen Aerogel-Marktes in US-Dollar dargestellt. Die Schätzung stammen aus dem Jahr 2015, eine aktuellere Studie konnte nicht ausfindig gemacht werden. Der Umsatz von Aerogelen in der Bauanwendung (rot) kann nach der vorliegenden Schätzung bis zum Jahr 2022 gegenüber dem Jahr 2018 mehr als verdoppelt werden. Damit steigt in Zukunft auch die verfügbare Menge an recyclefähigem Material.

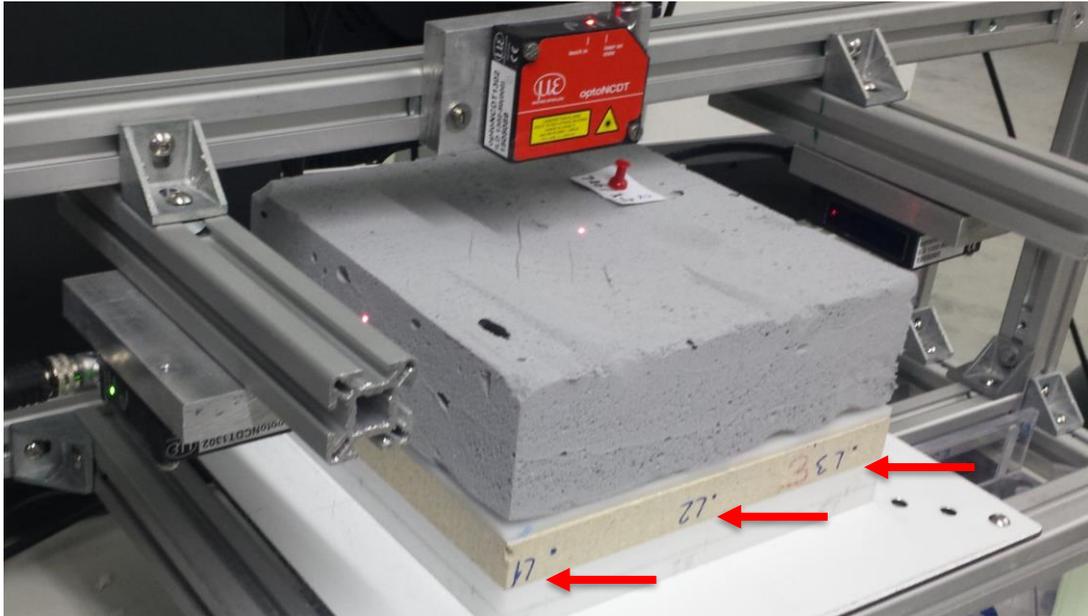
Alles in allem kann nach den hier vorliegenden Ergebnissen gefolgert werden, dass Aerogel- und APM-Dämmstoffe gute Eigenschaften hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit aufweisen (Grand View Research 2016). Die bauphysikalischen und wärmedämmenden Eigenschaften der Produkte verschlechtern sich über lange Zeiträume hinweg nur gering. Eine hohe Dauerhaftigkeit ist auch als positiv im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) zu erachten: Eine möglichst hohe Langlebigkeit der Materialien wirkt sich bereits auf die oberste Hierarchieebene, nämlich die Vermeidung von Abfall, positiv aus. Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein Rückbau bzw. eine Rückgewinnung von sortenreinem Material theoretisch machbar sind. Somit könnten auch die nächsten beiden Hierarchieebenen des KrWG, nämlich die Wiederverwendung bzw. das Recycling, bedient werden. Um hierbei eine wirtschaftliche Rentabilität zu erreichen, muss der Marktanteil von Aerogel-Dämmstoffen allerdings noch um ein Vielfaches wachsen.



**Abbildung 73 Umsatz des US-amerikanischen Aerogel-Marktes nach Endverbrauch, 2012 - 2022 in Millionen US\$ (Grand View Research 2016)**

Hinsichtlich der Durchführbarkeit von normativ festgelegten Verfahren zur Messung von Produkteigenschaften kann aufgrund des großen Prüfumfanges ebenfalls eine Beurteilung stattfinden. Neben der Definition des Prüfverfahrens in Prüfnormen sind Umfang und produktspezifische Besonderheiten üblicherweise in einer Produktnorm geregelt, die für die neuartigen Aerogel- und APM-Dämmstoffe aber noch nicht existiert. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollen deshalb auch zur besseren Charakterisierung der Produkte beitragen.

Grundlegend für nahezu jede Prüfung der mechanischen Eigenschaften oder der Wärmeleitfähigkeit ist die exakte Vermessung der Probekörper. Dies geschieht in der Regel mit einem digitalen Höhenmessgerät, das sehr staubempfindlich ist und mit einem gewissen Anpressdruck arbeitet. Für die Vermessung aller drei Dimensionen ist jeder Probekörper sehr oft zu drehen und zu verschieben, was für instabile Produkte nicht ideal ist. Eine berührungslose Vermessung mit Laser-Sensoren bietet hierbei viele Vorteile. Ein im Rahmen dieses Projekts entwickeltes Messverfahren wurde parallel zum Normverfahren angewandt. Abbildung 74 zeigt den Aufbau bei der Vermessung eines sehr fragilen Schaumes mit vier Laser-Sensoren auf einer Referenzprobe mit Kennzeichnung der normativ festgelegten Messpunkte (rote Pfeile zeigen auf blaue Beschriftung auf Kunststoffschicht).



**Abbildung 74** berührungslose Probekörpervermessung mit Laser-Distanz-Sensoren am Beispiel eines Schaumes. Kennzeichnung der Vermessungspunkte für Länge und Breite durch rote Pfeile.

Die Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung hat bei der Vliesmatte zu keinen Ergebnissen geführt. Da diese Gruppe das größte Segment des Aerogel-Dämmstoffmarkts darstellt und hier auch die größte Anzahl an Produkten existiert, ist eine Anpassung des Prüfverfahrens an diese Produkte nötig. Eine Möglichkeit wäre die Kaschierung mit Gips in Anlehnung an die VIP-Produktnorm.

Des Weiteren sind die Labore für die Prüfung konventioneller Dämmstoffe in der Regel nicht an das Staubbildungspotential angepasst und nicht mit einer entsprechenden Luftabsaugung ausgestattet. Eine Anpassung für die Prüfung von APM-Dämmstoffen ist empfehlenswert.

Für die weiteren Prüfungen wurden keine Probleme bei der normgerechten Durchführung ermittelt, vorausgesetzt die Probekörpervorbereitung wird gemäß den in Kapitel 4.2 und 4.4 beschriebenen Methoden durchgeführt (z. B. Einpacken in Folie).

## 7 Ausblick

Aerogel- und APM-Dämmstoffe weisen durch ihre hochdämmenden Eigenschaften enormes Potential für die Zukunft auf. Dass bis dato nur sehr geringe Mengen verbaut werden, liegt zum einen an den hohen Produktionskosten, zum anderen auch an der Unsicherheit, die nach wie vor bei Planern und Anwendern hinsichtlich der „Unbekannten“ Dämmstoffe besteht. Auch die eingangs zu den Ergebnissen aus Forschungsbereich A erwähnte Problematik der Staubbildung bei Zuschnitt und Handling der Materialien im Labor kann auf jeden industriellen Herstellungsprozess übertragen werden. Feine und bewegliche Maschinenbauteile müssen vor dem Staub geschützt werden und somit an die Verarbeitung des Materials angepasst werden, was wiederum eine Hemmschwelle darstellt, die nur mit Innovationen und höheren Investitionskosten überwunden werden kann.

Ein wichtiger Schritt, um die Verunsicherung zu mindern, den Marktanteil zu vergrößern und damit vermutlich auch die Produktionskosten zu senken, wäre ohne Zweifel die Einführung einer Produktnorm für Aerogel- und APM-Dämmstoffe in der Bauanwendung. Diese könnte in Anlehnung an die Produktnorm für Vakuum-Isolations-Paneele entworfen werden und sollte u.a. folgende produktspezifische Testmethoden und Randbedingungen festlegen:

- Vereinheitlichung der Messverfahren, insbesondere für die Wärmeleitfähigkeit
- Festlegung eines einheitlichen Klimas für die künstliche Alterung
- Bestimmung der Aufschläge für die Alterung der Materialien auf den Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse dieses Forschungsberichts können dazu beitragen, den Entwurf einer Produktnorm voranzutreiben und noch ungeklärte Fragen zum Alterungsverhalten von Aerogelen und APMs zu beantworten. Auch kann abgeschätzt werden, inwiefern herkömmliche Messverfahren auch für hochdämmende Aerogele und APMs angewendet und übernommen werden können. Die hier durchgeführten Untersuchungen können außerdem dazu beitragen, Bedenken hinsichtlich ökologischer Aspekte und der Rezyklierfähigkeit der Materialien aufzuklären. Erste Rückschlüsse auf mögliche Rückbau- und Recyclingverfahren können gezogen werden.

## Literaturverzeichnis

Aegerter, Michel A.; Leventis, Nicholas; Koebel, Matthias M. (Hg.) (2011): *Aerogels Handbook*. 1. Aufl. New York, NY: Springer Science+Business Media LLC (Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7589-8>.

Berardi, Umberto; Nosrati, Roya Hamideh (2018): Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions. In: *Energy* 147, S. 1188–1202. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.053.

2007-07: DIN EN 15026:2007.

EPEA Internationale Umweltforschung GmbH (2018): *EPEA - The Cradle of Cradle to Cradle*. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.epea.com/>, zuletzt geprüft am 21.06.2018.

Fricke, Jochen; Emmerling, Andreas (1991): Aerogels. In: *Advanced Materials* (10).

Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG (24.02.2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 29.06.2017.

Grand View Research (2016): *Aerogel Market By Form (Blanket, Particle, Panel, Monolith), By Product (Silica, Carbon, Polymers), By End-use (Oil & Gas, Building & Construction, Automotive, Aerospace & Marine, Performance Coatings) And Segment Forecasts To 2022*. Grand View Reserach Inc. Online verfügbar unter <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/aerogel-market>, zuletzt geprüft am 29.06.2018.

Hall, Matthew R. (2010): *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings*. Boca Raton, Fla., Oxford: CRC Press; Woodhead Pub (Woodhead Publishing series in energy, no. 14).

Holm, Andreas; Sprengard, Christoph (Hg.) (2017): *EBC Annex 65: Long-Term Performance of Super-Insulation Materials in Building Components and Systems. Reort of Subtask 2: Charakterisation of materials & components - Laboratory Scale*. CSTB. France.

Hüsing, Nicola; Schubert, Ulrich (1998): Aerogele - luftige Materialien: Chemie, Struktur und Eigenschaften. In: *Angewandte Chemie* (110).

International Energy Agency: *Long-Term Performance of Super-Insulating-materials in Building Components & Systems (Annex 65). Subtask 4: Life Cycle Assessment, Embodied energy and Life Cycle Cost Assessment*. Energy in Buildings and Communities Programme to be published soon, zuletzt geprüft am 19.06.2018.

Q-Lab: *Using the QUV to Simulate Behind Glass Exposures*. Technical Bulletin LU-8007. Online verfügbar unter <http://www.q-lab.com/documents/public/9a27c24b-bfe8-4152-b0c2-4bc43440454c.pdf>, zuletzt geprüft am 26.10.2017.

Renuables (2015): EPD - Spaceloft Aerogel Insulation. Online verfügbar unter <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/11160/epd725%20Spaceloft%20Aerogel%20Insulation.pdf>.

Rexroth, Susanne; May, Friedrich; Zink, Ulrich (Hg.) (2014): Wärmedämmung von Gebäuden. Zeitgemäß und wandlungsfähig. Berlin: VDE Verlag GmbH.

roda Licht- und Lufttechnik GmbH (2018): Lumira Aerogel. Online verfügbar unter [https://roda.de/lumira\\_aerogel](https://roda.de/lumira_aerogel), zuletzt geprüft am 19.06.2018.

Schwitalla, Christoph; Albrecht, Wolfgang (2014): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. IBP-Bericht BBHB 019/2014/281. In: *Fraunhofer IBP*, zuletzt geprüft am 21.11.2017.

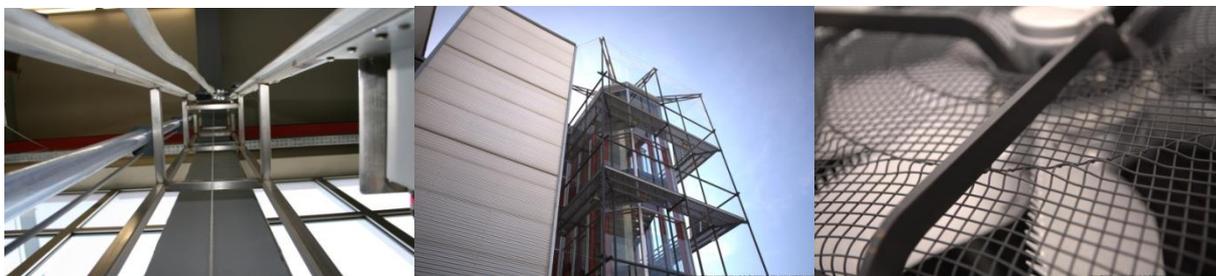
Sing, K. S. W. (1985): Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). In: *Pure and Applied Chemistry* 57 (4), S. 603–619. DOI: 10.1351/pac198557040603.

Spregard, Christoph; Tremel, Sebastian; Engelhardt, Max; Simon, Holger; Kagerer, Florian (2017): Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) in der Bauanwendung: vom Dämmstoff zum Dämmsystem. Verarbeitung, Befestigung, Dauerhaftigkeit. In: *Forschungsinitiative Zukunft Bau* (Band F 3036), zuletzt geprüft am 09.05.2018.

TA-Swiss (2013): Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Unter Mitarbeit von Martin Möller, Andreas Hermann, Mark-Oliver Diesner, Rita Groß und Peter Küppers. Zürich: vdf (TA-Swiss, 60).

Yrieix, B.; Duforestel, T.; Pons, E.; Batard, A.; Colmet Daâge, M. (2015): VIP and APM. Ageing Mechanisms And Modelling. IEA-EBC Annex 65. EDF R&D, 2015.

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen.  
Forschung, Entwicklung sowie Beratung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes.



**Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München** T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40  
Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing [info@fiw-muenchen.de](mailto:info@fiw-muenchen.de) | [www.fiw-muenchen.de](http://www.fiw-muenchen.de)