

Entwicklung biobasierter Superdämmstoffe

Abschlussbericht über ein unter dem Aktenzeichen 35505-45 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördertes Vorhaben im Rahmen des Green-Startup-Programms

Bewilligungsempfängerin: aerogel-it GmbH

Projektzeitraum: 19.12.22 – 18.12.24

Verfasser: Dr. Dirk Weinrich

16.12.24, Osnabrück

Inhaltsverzeichnis

1.	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
2.	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	6
3.	Zusammenfassung	7
4.	Einleitung.....	8
4.1	Überblick.....	8
4.1.1	Aerogele und VIPs als Wärmedämmung.....	8
4.1.2	CO ₂ -Fußabdruck von Dämmstoffen.....	9
4.1.3	aerogel-it GmbH	9
4.2	Zielsetzung des Projekts	10
4.3	Vorarbeiten.....	10
4.3.1	Vorarbeiten Aerogele	10
4.3.2	Vorarbeiten prinzipielles Herstellungskonzept	11
5.	Hauptteil.....	12
5.1	Biobasierte Aerogele für Bauanwendungen	12
5.1.1	Arbeitsstränge	12
5.1.2	Zielvorgaben Materialentwicklung.....	12
5.1.3	Verbesserung der Feuerbeständigkeit von Bioaerogelen	12
5.1.3.1	Allgemeines	12
5.1.3.2	Kommerzielle Flammenschutzmittel	13
5.1.3.3	Additive.....	14
5.1.4	Verbesserung der Wasser- und Feuchtigkeitsbeständigkeit von Bioaerogelen	14
5.1.4.1	Allgemeines	14
5.1.4.2	Funktionalisierung mit reaktiven Additiven	15
5.1.4.3	Funktionalisierung mit Plasmaaktivierung	15
5.1.4.4	Technische Ansätze aus der Zellstoff- und Papierindustrie	16
5.1.4.5	Wachsbeschichtungen.....	17
5.1.4.6	Additive und Optimierung der Aerogelformulierung	17
5.1.5	Zusammenfassung und Ausblick	18
5.2	Silica-Biopolymer-Hybridaerogele für das Bauwesen	18
5.2.1	Allgemeines	18
5.2.2	Einstellung der Duktilität, Partikelkomposite	18
5.2.3	Zusammenfassung und Ausblick	19
5.3	Bioaerogele als Kernmaterial für Vakuumdämmung.....	19
5.3.1	Allgemeines	19
5.3.2	Erste Pilotmengen Ligninaerogel – schwankende Eigenschaften und Optimierung der Nachrocknung.....	19

5.3.3	Zelluloseaerogel als VIP-Kernmaterial	20
5.4	Abschätzungen zur Nachhaltigkeit.....	20
5.4.1	Vergleich mit anderen Aerogelmaterialien	21
5.5	Produktionsprozess für biobasierte Aerogele	21
5.5.1	Allgemeines	21
5.5.2	Basic Engineering Produktionsprozess / Demoanlage	22
5.5.3	Pilotanlage	22
5.6	Bekanntmachung und Bemusterung	23
6.	Fazit	24
7.	Literaturverzeichnis	26
8.	Anhänge	27

1. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Tabelle T1. Übersicht Aerogelmaterialien.

Tabelle T2. CO₂-Fußabdruck verschiedener Wärmedämmmaterialien.

Tabelle T3. Überblick über Lignin- Hybridaerogele.

Abb. A1. Lignin-Aerogelpartikel.

Abb. A2. Lignin-Aerogelplatte aus gepresstem Pulver.

Abb. A3. Verpresste Aerogelpulverprobe nach orientierendem Brandtest.

Abb. A4. Lignin-Hybridaerogel mit Additiv.

Abb. A5. Wasseraufnahmetest für Aerogelpartikel.

Abb. A6. Ligninaerogel mit Wassertropfen nach plasmagestützter Gasphasenhydrophobierung.

Abb. A7. Ligninaerogel mit Wassertropfen nach nicht erfolgreicher plasmagestützter Gasphasenhydrophobierung.

Abb. A8. Versuchsaufbau für Wachsbeschichtung biobasierter Aerogele.

Abb. A9. Silica-Biopolymer-Hybridaerogelpartikel und zugehörige Eigenschaften (*einstellbar; ** bei 10°C in der Schüttung).

Abb. A10. Formkörper aus Silica-Biopolymerhybridaerogelpartikeln.

Abb. A11. Zelluloseaerogel-Pulver.

Abb. A12. VIPs auf Basis des Zelluloseaerogels.

Abb. A13. Abschätzung CO₂-Fußabdruck Silica-Biopolymer-Hybridaerogel – Stand heute (links) und mit Verbesserungen Prozess aerogel-it GmbH sowie Rohstoffe (rechts).

Abb. A14. Abschätzung CO₂-Fußabdruck Zelluloseaerogel – Stand heute (links) und mit Verbesserungen Prozess aerogel-it GmbH sowie Rohstoffe (rechts).

Abb. A15. Pilotanlage am TVT der TUHH.

Abb. A16. Einweihung der Pilotanlage am TVT der TUHH im April 2025. Von links nach rechts: Dr. Marc Fricke (Geschäftsführer aerogel-it GmbH), Prof. Dr. Irina Smirnova (Leiterin TVT, Vizepräsidentin TUHH), Prof. Dr. Alexander Penn (Dekan), Dr. Pavel Gurikov, Alberto Bueno (beide aerogel-it GmbH).

Abb. A17. Weltweit größte hergestellte Mengen Zellulose- und Ligninaerogel in 100l-Fässern (soweit bekannt).

Abb. A18. Überblick über die Kommunikationsaktivitäten der aerogel-it GmbH.

2. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

CO ₂	Kohlendioxid
EPD	Environmental Product Declaration
EPS	Expandiertes Polystyrol
Gew.-%	Gewichtsprozent
ggf.	gegebenenfalls
HMDSO	Hexamethyldisiloxan
HMDZ	Hexamethyldisilazan
K	Grad Kelvin
kgCO ₂ eq/m ³	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente pro Kubikmeter
m	Meter
m ³	Kubikmeter
mW	Milliwatt
TEOS	Tetra(ethoxy)orthosilan
TUHH	Technische Universität Hamburg
TVT	Institut für Thermische Verfahrenstechnik
W	Watt
u.A.	unter Anderem
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VIP	Vakuumdämmpaneel, vacuum insulation panel
z.B.	zum Beispiel

3. Zusammenfassung

Innerhalb des geförderten Projekts im Rahmen des Green-Startup-Programms der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Aktenzeichen 35505-45) wurde die Weiterentwicklung biobasierter Aerogele in Richtung einsetzbarer Wärmedämmung für Bauanwendungen sowie als Kernmaterialien für Vakuumdämmung untersucht. Es wurden dabei insbesondere technische Ansätze untersucht, um Biopolymeraerogele wasser-, luftfeuchtigkeits- und brandresistent auszustatten. Während diese Ansätze für reine Bioaerogele nicht ausreichend erfolgreich waren, wurden Silica-Biopolymer-Hybridaerogelmaterialien entwickelt, die verglichen mit aktuellen Silicaaerogelmaterialien ähnlich herausragende Wärmedämmeigenschaften bei verbesserter mechanischer Beständigkeit, verbesserter Verarbeitbarkeit und reduzierten CO₂-Fußabdruck zeigten. Ferner wurden Zelluloseaerogelmaterialien als Kernmaterialien für Vakuumdämmpaneele (VIPs) entwickelt, die verglichen mit VIPs auf Basis pyrogener Kieselsäure ähnlich herausragende Wärmedämmeigenschaften bei deutlich geringerem Gewicht und reduzierten CO₂-Fußabdruck aufweisen. Ferner wurde ein neuartiger Herstellungsprozess für biobasierte Aerogele weiterentwickelt sowie eine Pilotanlage zur Validierung der Herstellungsprozesse und Bemusterung im Pilotmaßstab aufgebaut und in Betrieb genommen. Neu entwickelte Materialien wurden im Rahmen von Messen, Konferenzen und Veröffentlichungen präsentiert und auf diese Weise Partner für anwendungsrelevante Tests und Optimierungsprojekte gewonnen. Künftige Arbeiten werden sich auf Optimierung von Silica-Biopolymer-Hybridaerogel und Zelluloseaerogel sowie auf Ausarbeitung des Produktionsprozesses im Hinblick auf großtechnische industrielle Produktionsvolumina fokussieren.

4. Einleitung

4.1 Überblick

4.1.1 Aerogele und VIPs als Wärmedämmung

Für die dringend erforderliche energetische Sanierung des deutschen und europäischen Gebäudebestands von ca. 131 Millionen Gebäuden [L1], in dem mehr als 75% Gebäude unzureichende Energieeffizienz aufweisen [L2], werden im Markt dringend neue Lösungen gesucht, da bei einem Teil der Gebäude der verfügbare Bauraum nicht ausreicht, um mit konventionellen Wärmedämmstoffen wie Mineralwolle, expandiertem Polystyrol (EPS) oder Polymerschäumen die geforderte Energieeffizienz zu erreichen. Mit Aerogelen und Vakuumdämmpaneelen als Hochleistungswärmedämmung sind besonders schlanke und energieeffiziente Wärmedämm Lösungen im Innen- und Außenbereich möglich. Entsprechend können auch bei geringem verfügbarem Bauraum die Energieeffizienz von Gebäuden verbessert und so CO₂-Emissionen reduziert werden.

Aerogelmaterialien sind seit den 90er-Jahren kommerziell verfügbar (insbesondere Aspen Aerogels und Cabot) und werden in Form von Silicaaerogelmatten und -granulat vor allem in der Öl&Gas-Industrie, in geringem Maße in der Bauindustrie sowie seit ca. 2020 umfangreich in der Elektrofahrzeugindustrie eingesetzt. Aerogele zeichnen sich durch besonders gute Wärmedämmeigenschaften aus, die nur durch Vakuumdämmung übertroffen werden. Aufgrund ihrer Wärmedämmeigenschaften können Aerogelmaterialien einen wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz und der Absenkung von CO₂-Emissionen leisten. Nachteilig sind bislang hohe Kosten durch ineffiziente Prozesstechnologie und teure Rohstoffe, ein schlechtes Nachhaltigkeitsprofil mit hohem CO₂-Fußabdruck und Energieeinsatz sowie schwierige Handhabung und Integration durch Freisetzung von Stäuben und mechanische Empfindlichkeit. Diese Nachteile begrenzen die Marktakzeptanz von Aerogelen stark und beschränken ihre Anwendung auf einzelne Nischen, für die keine Alternativlösungen existieren. Eine Übersicht über Aerogelmaterialien, -hersteller und Anwendungsbereiche zeigt Tabelle T1.

Tabelle T1. Übersicht Aerogelmaterialien.

Aerogelmaterial	Hersteller	Anwendungsbereich
Silicaaerogelmatten	Aspen Aerogels (USA), viele chinesische Hersteller (Nanotech, Alison Guangdong, IBIH), Bronx/Beerenberg/Altrad (Singapur, Norwegen)	<ul style="list-style-type: none"> • Rohrleitungs-Wärmedämmung Öl&Gas, LNG, Chemie • Havarieschutz Elektrofahrzeugbatterien • Platzsparende Gebäude-Wärmedämmung • Wärmedämmung für Bekleidung
Silicaaerogelgranulat	Cabot (USA, Werk in Deutschland), IBIH	<ul style="list-style-type: none"> • Havarieschutz Elektrofahrzeugbatterien • Wärmedämmende Coatings • Aerogeldämmputz für energetische Sanierung von Gebäuden
Silicaaerogelpulver	Svenska Aerogel, JIOS	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmedämmende Coatings • Rheologieadditiv • Havarieschutz Elektrofahrzeugbatterien
Polyurethanaerogelplatten	Ehemals BASF / aerogel-it	<ul style="list-style-type: none"> • Innendämmung für energetische Sanierung
Polyimidaerogelfolien, -fasern	Blueshift, IBIH, Aerogel Technologies	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmedämmung für Elektronik • Dielektrika für Antennen • Bekleidung •

Vakuumdämmpaneele (VIPs) sind die leistungsfähigsten Wärmedämmstoffe überhaupt, so dass dünnste oder energieeffizienteste Wärmedämmschichten umsetzbar sind. Nachteilig sind insbesondere die Empfindlichkeit der VIPs gegenüber Beschädigungen der Barrierefolie bei Einbau und Nutzung, der damit einhergehende Verlust des Vakuums und der Wärmedämmeigenschaften sowie die Notwendigkeit für vordefinierte Geometrien und der hohe Preis. VIPs für das Bauwesen basieren üblicherweise auf pyrogener Kieselsäure, die hohe Leistungsfähigkeit kombiniert mit langer Lebensdauer bietet. [L3]

4.1.2 CO₂-Fußabdruck von Dämmstoffen

Der CO₂-Fußabdruck von aktuellen Silicaaerogelmaterialien und VIPs auf Basis pyrogener Kieselsäure ist verglichen mit anderen Wärmedämmstoffen hoch. Tabelle T2 zeigt eine Übersicht auf Basis der in EPD (Environmental Product Declaration) veröffentlichten Informationen. Silicaaerogelmatten haben verglichen mit Mineral-/Steinwolle einen sechs- bis dreißigfach höheren CO₂-Fußabdruck bei gegebenem U-Wert der Dämmschicht, während Vakuumdämmpaneele einen zwei- bis vierfachen CO₂-Fußabdruck aufweisen. Somit können aktuelle Hochleistungswärmedämmstoffe wie Silicaaerogele und VIPs auf Basis pyrogener Kieselsäure zwar Energie und im Fall fossiler Energiequellen entsprechende CO₂-Emissionen z.B. in der Nutzungsphase von Gebäuden einsparen, jedoch erhöht sich gleichzeitig der Gesamt-CO₂-Fußabdruck der eingesetzten Materialien.

Tabelle T2. CO₂-Fußabdruck verschiedener Wärmedämmmaterialien.

Wärmedämmstoff	CO ₂ -Fußabdruck A1-A3, ca. [kgCO ₂ eq/m ³]	CO ₂ -Fußabdruck A1-A3 für Wandaufbau mit U-Wert 0,2 W/(m ² *K), ca. [kgCO ₂ eq/m ²]	Referenz
EPS	50	9	L4A
Mineral-/Steinwolle	50-100	8-16	L4B
Silicaaerogelmatte	1200-2700	90-270	L4C
Aerogeldämmputz	900	125	L4D
Vakuumdämmpaneel (pyrogene Kieselsäure)	900	27	L4E

4.1.3 aerogel-it GmbH

Die aerogel-it GmbH (im Folgenden „aerogel-it“) erforscht und entwickelt seit ihrer Gründung im Jahr 2021 verschiedene neuartige Aerogelmaterialien auf Basis von Biopolymeren sowie Hybridaerogele auf Basis von Biopolymeren und anderen Bestandteilen. Ferner entwickelt das Unternehmen effizientere und günstigere Herstellungsprozesse für diese Materialien. Zielsetzung sind neuartige Hochleistungswärmedämmmaterialien mit verbessertem Nachhaltigkeitsprofil wie z.B. geringerem CO₂-Fußabdruck und niedrigeren Kosten, um die Marktakzeptanz und -durchdringung zu erhöhen, damit mehr Lösungsansätze in relevanten Anwendungen zu bieten und die Gesamt-Nachhaltigkeit positiv zu beeinflussen. Der Einsatz biobasierter Rohstoffe sowie Recycling sind dabei wichtige Aspekte. Es gelang dem Team 2022 erstmalig, ein Aerogel auf Basis von Kraft-Lignin zu entwickeln, das vergleichbare Wärmedämmeigenschaften aufweist wie konventionelle Silicaaerogele (siehe Abschnitt Vorarbeiten). Kraft-Lignin ist ein Nebenstrom der Zellstoffindustrie, der bislang größtenteils zur Energieerzeugung verbrannt wird. Somit konnte gezeigt werden, dass Hochleistungswärmedämmung auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Prinzip möglich ist. Jedoch wies das Ligninaerogel unzureichende Brand- und Feuchtigkeitsresistenz auf. Es gab erste Ansätze zu Hybridaerogelen aus Biopolymeren mit Additiven. Ferner gab es keine

industriellen Herstellungsverfahren für biobasierte Aerogele. Die aerogel-it GmbH entwickelte bis zum Projektstart erste Prozesskonzepte zusammen mit Anlagen-Lieferanten. Weiteres Engineering und der Aufbau einer Pilotproduktion zur Validierung des Prozesses waren jedoch notwendig. Ferner war Marktfeedback von Partnern und potentiellen Kunden erforderlich, um die Aerogelmaterialien entsprechend der Anwendungsanforderungen weiterentwickeln zu können.

4.2 Zielsetzung des Projekts

Ziel des geförderten Vorhabens war die Weiterentwicklung biobasierter Aerogele in Richtung einsetzbarer Wärmedämmung für Bauanwendungen sowie als Kernmaterialien für Vakuumdämmung. Zudem sollte der Herstellungsprozess für biobasierte Aerogele in Richtung Skalierung weiterentwickelt werden. Neu entwickelte Materialien sollten auf Konferenzen und Messen vorgestellt werden, um den Bekanntheitsgrad für die neue Materialklasse zu erhöhen. Partnern und potentiellen Kunden sollten Materialmuster für Tests zur Verfügung gestellt werden, um Feedback für die weitere Optimierung zu erhalten.

4.3 Vorarbeiten

4.3.1 Vorarbeiten Aerogele

Seit der Gründung 2021 bis zum Projektstart untersuchte die aerogel-it GmbH verschiedene biobasierte Rohstoffsysteme und entsprechende Aerogelmaterialien auf mögliche Einsetzbarkeit als Wärmedämmung im Bauwesen sowie deren Herstellbarkeit mittels neuer Produktionstechnologie, darunter:

- Polysaccharide
- Proteine
- Lignin

Verschiedenste Gelierungs- und Formgebungsverfahren wurden getestet und darauf aufbauend verschiedenste biobasierte Aerogele hergestellt. Die besten Wärmedämmeigenschaften wurden mit einem Aerogel enthaltend Lignin erzielt. Das Aerogel wies in Form einer gepressten Platte eine Wärmeleitfähigkeit von $17 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei 10°C auf (Abb. A1 und A2).



Abb. A1. Lignin-Aerogelpartikel.



Abb. A2. Lignin-Aerogelplatte aus gepresstem Pulver.

Es zeigte sich jedoch, dass Brand- und Wasserempfindlichkeit des Ligninaerogels Herausforderungen insbesondere für Bauanwendungen darstellten. Die hochporösen biobasierten Aerogele neigten je nach Formulierung nach dem Entzünden zum Brand oder zum Glimmen nach Verlöschen der Flamme. Ferner nahmen alle biobasierten Aerogele bei Kontakt mit Wasser sofort Wasser auf und verloren die für Wärmedämmung erforderliche Porosität. In Vorarbeiten hatte die aerogel-it GmbH bereits erste Aerogelformulierungen auf Basis von Biopolymeren und Additiven untersucht, um Wasser- und Feuerbeständigkeit zu erzielen.

4.3.2 Vorarbeiten prinzipielles Herstellungskonzept

Ausgehend von verschiedenen Biopolymeren und Additiven werden wässrige Vorstufenlösungen hergestellt, die in vernetzte Hydrogelpartikel überführt werden. Das Wasser in den Hydrogelpartikeln wird in einem Lösungsmittelaustauschschritt in Ethanol überführt und so Alkogelpartikel erhalten. Es folgt die Extraktion mit überkritischem CO_2 (überkritische Trocknung), um luftgefüllte Aerogelpartikel zu erhalten. Der überkritische Trocknungsschritt ist erforderlich, um die feinen Poren des Alkogels in das trockene Aerogel zu überführen. Konventionelle Trocknungsprozesse führen bei Verdampfen der Porenflüssigkeit aufgrund starker Kapillarkräfte zu Beschädigung der Porenstruktur. Die überkritische Trocknung mit CO_2 kann nicht direkt aus Wasser erfolgen, da Wasser und überkritisches CO_2 nicht mischbar sind. Die aus der überkritischen Trocknung erhaltenen Aerogelpartikel enthalten Restmengen Ethanol, die in einem konventionellen Nachtrockschritt entfernt werden. Eine mögliche Freisetzung von Lösungsmitteldämpfen aus den Aerogelpartikeln, die zu Gesundheits- oder Explosionsgefährdungen führen kann, wird so verhindert. Innerhalb des Nachtrockschritts ist eine nachgeschaltete Hydrophobierung möglich. Der Herstellungsprozess der aerogel-it GmbH war vor Projektbeginn bereits weitestgehend im Labormaßstab implementiert. Ein Pilotprozess wurde im Projektverlauf um eine bestehende überkritische Trocknungseinheit aufgebaut.

5. Hauptteil

5.1 Biobasierte Aerogele für Bauanwendungen

5.1.1 Arbeitsstränge

Im Projekt wurden folgende parallele Arbeitsstränge bearbeitet, die im Folgenden näher beleuchtet werden:

- Verbesserung der Feuerbeständigkeit von Bioaerogelen
- Verbesserung der Wasser- und Feuchtigkeitsbeständigkeit von Bioaerogelen
- Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses
- Bekanntmachung und Bemusterung der neuen Bioaerogele im Markt

5.1.2 Zielvorgaben Materialentwicklung

Folgende Zielvorgaben wurden für die zu entwickelnden Materialien gesetzt:

- Bauanwendungen nicht-VIP:
 - Wärmeleitfähigkeit $< 25 \text{ mW}/(\text{m}^*\text{K})$ bei 10°C
 - Wasser- und Luftfeuchtigkeitsbeständigkeit
 - Feuerbeständigkeit mindestens Brandklasse E (EN13501-1)
- VIP:
 - Wärmeleitfähigkeit $< 10 \text{ mW}/(\text{m}^*\text{K})$ bei 20°C und 10 mbar
 - Herstellung und Handhabung von Presslingen als VIP-Kerne
 - Langlebigkeit
- Vorteilhafte Nachhaltigkeitseigenschaften, insbesondere niedriger CO_2 -Fußabdruck
- Gelmechanik ausreichend für Handhabung im Herstellungsprozess

Ferner wurden folgende Wunschvorgaben angesetzt:

- Kostengünstige und gute verfügbare Rohstoffe
- Biobasierte Rohstoffe
- Keine kovalente Chemie
- Modifizierbarkeit der Oberflächenchemie sofern notwendig

5.1.3 Verbesserung der Feuerbeständigkeit von Bioaerogelen

5.1.3.1 Allgemeines

Es existierten zu Projektbeginn keine Erkenntnisse darüber, wie die für Bauanwendungen erforderliche Feuerbeständigkeit biobasierter Aerogele verbessert werden kann. Das zuvor entwickelte Ligninaerogel (siehe Vorarbeiten) diente als Ausgangspunkt für die Untersuchungen in Richtung Feuerbeständigkeit, da Lignin aufgrund seines hohen aromatischen Anteils intrinsisch reduziertes Brandverhalten aufweist [L5]. Es sollten zunächst kommerzielle Flammenschutzmittel getestet werden, wobei halogenierte Flammenschutzmittel, die standardmäßig für Polymerschäume eingesetzt werden, nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Ferner sollten unterschiedliche Formulierungsbestandteile getestet werden.

5.1.3.2 Kommerzielle Flammschutzmittel

Kommerziell verfügbare Flammschutzmittel nutzen einen oder mehrere der folgenden Wirkmechanismen [L6]:

- Gasphasenaktivität: Abreaktion von Radikalen aus der Verbrennung zur Unterbrechung der Kettenreaktion (z.B. Halogene)
- Festphasenaktivität: Bildung schützender Krusten (z.B. Phosphate)
- Reduzierung der Sauerstoffkonzentration: Stickstoff- oder Wasserdampfbildung (z.B. Melamin, Metallhydroxide)
- Aufnahme der Wärmeenergie (z.B. anorganische Bestandteile)

Im Projektverlauf wurden kommerziell verfügbare Flammschutzmittel sowie andere Formulierungsbestandteile in Aerogelformulierungen eingebracht und getestet, ob sich Entzünden und Glimmen Aerogelmaterialien bremsen oder verhindern ließ. Aufgrund des Herstellungsverfahrens der Bioaerogele waren nur feste und in den Prozessmedien Wasser, Ethanol und überkritisches CO₂ unlösliche Flammschutzmittel einsetzbar.

Die Flammschutzmittel wurden in den wässrigen Vorstufenlösungen dispergiert und durch die Gelbildungsreaktion in den erhaltenen Hydrogelpartikeln gebunden. In einer alternativen Herangehensweise wurden feste Flammschutzmittel zu Aerogelpulver hinzugefügt und homogenisiert, um Aerogel/Flammschutzmittel-Mischungen zu erhalten. Aus den erhaltenen Aerogelpulvern wurden unter Nutzung einer Pressform und Werkstattpresse Presslinge in Plattenform hergestellt. Um orientierende Testergebnisse analog zum Kleinbrennertest für Brandklasse E nach EN13501-1 (früher Brandklasse B2 nach DIN 4102) zu erhalten, wurden die Aerogelplatten an einer Kante mit einer kleinen Bunsenbrennerflamme in Kontakt gebracht und das Entzündungs- und Brandverhalten beobachtet. Ein Beispiel für eine Aerogelprobe nach Beflammung zeigt Abb. A3. Die Brandtests wurden als positiv bewertet, wenn das Material sich innerhalb von ca. 15 s nicht entzündete oder nach Entfernen der Bunsenbrennerflamme von selbst verlöschte. Mit einem Zusatz eines Flammschutzmittels konnte selbstverlöschendes Verhalten des Ligninaerogels erzielt werden.



Abb. A3. Verpresste Aerogelpulverprobe nach orientierendem Brandtest.

5.1.3.3 Additive

Um den Einsatz synthetischer Flammenschutzmittel zu vermeiden, wurde das Einbringen von Additiven in biobasierte Aerogele getestet. Ein Beispiel für ein auf diese Weise hergestelltes Ligninaerogel ist in Abb. A4 gezeigt. Die braune Färbung des Lignins hellt sich durch das Additiv auf. In einer weiteren Herangehensweise wurden Aerogelpulvern Additive zugesetzt und die Mischungen homogenisiert.



Abb. A4. Ligninaerogel mit Additiv.

Ab einem Mindestanteil Additiv in der Aerogelformulierung konnte das Glimm- und Brandverhalten erfolgreich unterdrückt werden. Additive in Hybridaerogelen erwiesen sich neben der Verbesserung des Brandverhaltens als vorteilhaft für die Verbesserung der Wasser- und Feuchtigkeitsbeständigkeit (siehe dort). Für die weitere Entwicklung wurde somit auf synthetische Flammenschutzmittel in Bioaerogelen verzichtet.

5.1.4 Verbesserung der Wasser- und Feuchtigkeitsbeständigkeit von Bioaerogelen

5.1.4.1 Allgemeines

Zu Projektbeginn existierten keine Erkenntnisse darüber, wie eine für Bauanwendungen ausreichende Wasserbeständigkeit von Biopolymer-Aerogelen erreicht werden konnte. Aerogelmaterialien sind besonders empfindlich gegenüber Wasser und Luftfeuchtigkeit, da beim Eindringen von Flüssigkeiten in die Porenstruktur starke Kapillarkräfte auftreten, die die Porenstruktur des Aerogels zerstören. Neben der Mindestfeuerbeständigkeit, die eine wichtige Anforderung für Baumaterialien darstellt, ist die Beständigkeit gegenüber Wasser und Luftfeuchtigkeit ein entscheidendes Entwicklungsziel für den Einsatz in Bauanwendungen. Im Fall konventioneller Silicaaerogelmaterialien wird Wasser- und Feuchtigkeitsbeständigkeit über Hydrophobierung mit Silanadditiven erreicht. Typische Silanadditive, die für Aerogele im kommerziellen Maßstab genutzt werden, sind Hexamethyldisiloxan (HMDSO) und Hexamethyldisilazan (HMDZ). Die Silanadditive können in verschiedenen Prozessschritten im Aerogelherstellungsprozess eingebracht werden. Auf der Stufe des Organogels kann über die flüssige Lösungsmittelphase funktionalisiert werden, während dies auf der Stufe Aerogel über die Gasphase geschehen kann [L7]. Zur Untersuchung der Wasserbeständigkeit wurden zu testende Aerogelmaterialien 24 Stunden unter Wasser aufbewahrt und im Nachgang Gewichtszunahme und Volumenschumpf bestimmt. Das Testergebnis wurde als positiv eingestuft, wenn der Volumenschumpf weniger als 5% betrug. Dieser Labortest hatte sich in

Vorarbeiten als Screeningmethode bewährt. Ein einfacher Test unter Nutzung von Zentrifugationsröhrchen ist in Abb. A5 gezeigt.



Abb. A5. Wasseraufnahmetest für Aerogelpartikel.

Die Beständigkeit gegenüber Luftfeuchtigkeit wurde getestet, indem zu testende Aerogelmaterialien in geschlossenen Gefäßen mit eingestellter Luftfeuchtigkeit aufbewahrt wurden. Die Luftfeuchtigkeit wurde durch Salzlösungen in den geschlossenen Gefäßen eingestellt. Nach Abschluss der Aufbewahrungszeit wurden Gewichtszunahme und Volumenschrumpf bestimmt.

5.1.4.2 Funktionalisierung mit reaktiven Additiven

Zur Einbringung hydrophober Funktionalitäten in Ligninaerogel wurde Funktionalisierung über reaktive Additive getestet. Reaktionen von Hydro- oder Alkogelen in der Flüssigphase führten zu starkem Volumenschrumpf und waren somit nicht einsetzbar. Gasphasenreaktion auf der Aerogelstufe führten ebenfalls zu starkem Volumenschrumpf. Wasserbeständigkeit der biobasierten Aerogele konnte über diesen technischen Ansatz nicht verbessert werden. Dieser Ansatz wurde im Rahmen des Projekts somit nicht weiterverfolgt.

5.1.4.3 Funktionalisierung mit Plasmaaktivierung

Gasphasen-Plasmatechnologie eines externen Partners wurde untersucht, um Hydrophobierungsadditive an der Aerogeloberfläche lokal gezielt zu aktivieren und umzusetzen. Nutzung von Plasmatechnologie zur Hydrophobierung von Oberflächen ist prinzipiell bekannt [L8]. Ein weiteres Ziel der Plasmaaktivierung war der sparsame Einsatz von Hydrophobierungsadditiven. Presslinge biobasierter Aerogelpulver ließen sich mit dem Plasmaverfahren im Fall einiger Formulierungen erfolgreich an der Oberfläche hydrophobieren, so dass sie wasserabweisendes Verhalten zeigten (siehe Abb. A6 und Abb. A7).

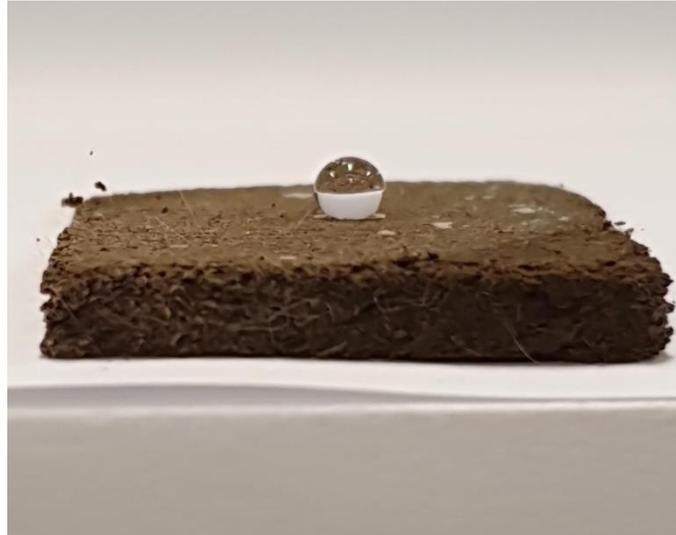


Abb. A6. Ligninaerogel mit Wassertropfen nach plasmagestützter Gasphasenhydrophobierung.



Abb. A7. Ligninaerogel mit Wassertropfen nach nicht erfolgreicher plasmagestützter Gasphasenhydrophobierung.

Weitergehende Tests zur analogen Funktionalisierung von Ligninaerogelpartikeln im Fluidized-Bed-Reaktor mit Plasma-Funktionalisierungseinheit zeigten jedoch keine ausreichende Hydrophobierung. Es wird vermutet, dass die durch das Plasma aktivierten Additive nicht ausreichend in die Porenstruktur der fluidisierten Aerogelpartikel eindringen konnten. Verschiedene Optionen zur weiteren Verbesserung des Ansatzes wurden identifiziert u.a. weitere Additive sowie modifizierte Prozessbedingungen.

Parallel hatte sich in einem parallelen Arbeitsstrang ergeben, dass die Integration von Additiven in biobasierte Aerogele sowohl hydrophobes Verhalten als auch verbesserte Brandresistenz ermöglicht, so dass die Plasmatechnologie im Projekt nicht weiterverfolgt wurde.

5.1.4.4 Technische Ansätze aus der Zellstoff- und Papierindustrie

Aus der Zellstoff- und Papierindustrie sowie der Textilindustrie sind verschiedene chemische Ansätze bekannt und etabliert, um Zellulose und Papier wasserabweisend auszurüsten, z.B. [L9]. Verschiedene Additive wurden gemäß Literatur und Herstellerinformationen getestet. Biobasierte Hydrogele wurden dazu mit Additiven funktionalisiert. Die Wasserbeständigkeit der getesteten Aerogele konnte durch den Ansatz verbessert werden, war jedoch für Bauanforderungen nicht ausreichend, so dass dieser Ansatz im Projekt nicht weiterverfolgt wurde.

5.1.4.5 Wachsbeschichtungen

Neben der chemischen Funktionalisierung mit Additiven wurden Sprühversuche mit Wachsdispersionen durchgeführt, um wasserabweisende Wachsschichten auf der Aerogeloberfläche zu erhalten. Es wurde ein entsprechender Testaufbau mit einer beheizbaren, rotierenden Trommel konstruiert, in die Bioaerogelpartikel gefüllt und mittels Sprühpistole mit einer Wachsdispersion beschichtet werden konnten (Abb. A8).



Abb. A8. Versuchsaufbau für Wachsbeschichtung biobasierter Aerogele.

Verschiedene kommerzielle Wachsdispersionen und Prozessparameter wurden getestet. Der Wasseranteil in den Dispersionen führte zu einem starken Schrumpfung der Aerogelpartikel, bevor eine wasserabweisende Schicht erzeugt werden konnte. Es gelang somit keine Hydrophobierung mit dauerhaft wasserabweisendem Verhalten, und dieser Ansatz wurde im Rahmen des Projekts nicht weiterverfolgt.

5.1.4.6 Additive und Optimierung der Aerogelformulierung

Im Rahmen der Untersuchungen zu Feuerbeständigkeit (siehe dort) wurde festgestellt, dass Einbringung von Additiven in biobasierte Aerogele zu Verbesserungen der Feuerbeständigkeit führte. Wie bereits beschrieben ist Hydrophobierung von Silicaaerogelen mit Silanadditiven Stand der Technik, um wasserabweisende Eigenschaften zu erreichen, die Bauanforderungen erfüllen. Es wurde festgestellt, dass wie im Fall der Brandresistenz ein Mindestanteil Additiv notwendig ist, um wasserabweisendes Verhalten zu erzielen. Ferner ließ sich durch Optimierung der Aerogelformulierung das wasserabweisende Verhalten so einstellen, dass Materialien erhalten wurden, die bei Wasserkontakt über 24 Stunden ein ausreichend geringes Schrumpfverhalten zeigten. Die Veränderung der Aerogelformulierung führte jedoch in gleichem Maße zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Eine Optimierung führte zu verschiedenen Lignin-Hybridaerogelen mit einstellbaren Eigenschaften (siehe Tabelle T3).

Tabelle T3. Überblick über Lignin-Hybridaerogele.

Material	Schüttdichte g/l	Wärmeleitfähigkeit Partikelbett bei 10°C mW/(m*K)	Volumenschrumpfung nach 24 Stunden in Wasser
Lignin-Hybridaerogel 1	60-70	26	<5%
Lignin-Hybridaerogel 2	80-90	24	8%
Lignin-Hybridaerogel 3	80-90	23	30%

5.1.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zielanforderungen im Hinblick auf Brand- und Wasserresistenz konnten durch Einbringung von Additiven in Ligninaerogel-formulierungen erreicht werden. Die Wärmeleitfähigkeit der erhaltenen Lignin-Hybridaerogele war mit 23-26 mW/(m*K) jedoch zu hoch, um ein vorteilhaftes Kosten/Nutzen-Verhältnis als Superwärmmedämmstoffe für Bauanwendungen zu erzielen. Daher wurden im Rahmen des Projekts keine weiteren Arbeiten mit Lignin-Hybridaerogelen durchgeführt. Andere technische Ansätze wurden ebenfalls nicht weiterverfolgt, da sie kein ausreichendes Erfolgspotential in Aussicht stellten oder in der Umsetzung als zu aufwändig eingestuft wurden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den verschiedenen Arbeitssträngen flossen in die nachfolgende Weiterentwicklung von Silica-Biopolymer-Hybridaerogelen ein (siehe dort).

5.2 Silica-Biopolymer-Hybridaerogele für das Bauwesen

5.2.1 Allgemeines

Kommerzielle Silicaerogele basieren auf Wasserglas oder Tetra(ethoxy)orthosilan (TEOS) als Ausgangsmaterialien. Während im Fall von Wasserglas vor der überkritischen Trocknung mit CO₂ eine Überführung des Hydrogels in ein Organogel (meist ein Alkogel auf Basis von Ethanol) notwendig ist, da sich Wasser und überkritisches CO₂ nicht mischen, kann im Fall von TEOS in organischen Lösungsmitteln gearbeitet und ein Lösungsmittelaustausch vermieden werden. Systeme auf Basis verschiedener Silicavorstufen wie Wasserglas, kolloidales Silica und TEOS wurden im Rahmen des Projekts untersucht. Die Herausforderung bestand zunächst darin, wässrige Biopolymerlösungen mit Silicavorstufen zu kombinieren.

Silica-Biopolymer-Hybridaerogele wurden in Partikelform hergestellt und im Nachgang über die Gasphase modifiziert, um hydrophobe Silica-Biopolymer-Hybridaerogelpartikel zu erhalten (siehe Abb. A9). Nach Optimierung wurden niedrige Wärmeleitfähigkeit von <20 mW/(m*K) erzielt. Gleichzeitig wurden die für Bauanwendungen erforderliche Brand- und Wasserresistenz erreicht. Die entwickelten Hybridaerogele zeigten deutlich reduzierte Staubfreisetzung. Die hohe Sprödigkeit aktueller, kommerzieller Silicaerogele führt zu starker Staubfreisetzung, die ihre Einsetzbarkeit und Akzeptanz vor allem im Bauwesen erschwert.



Abb. A9. Silica-Biopolymer-Hybridaerogelpartikel und zugehörige Eigenschaften (*einstellbar; ** bei 10°C in der Schüttung).

5.2.2 Einstellung der Duktilität, Partikelkomposite

Durch den Biopolymeranteil ließ sich die Duktilität oder Flexibilität der Silica-Biopolymer-Hybridaerogelpartikel einstellen. Optimierung der Formulierung in dieser Richtung ergab Silica-Biopolymer-Hybridaerogelmaterialien, die die Überführung in Formkörper wie z.B. neuartige

Aerogelplatten ermöglichen (siehe Abb. A10). Mit kommerziellen Silicaaerogelpartikeln sind stabile, handhabbare Formkörper nicht herstellbar, da diese zu spröde und mechanisch empfindlich sind.

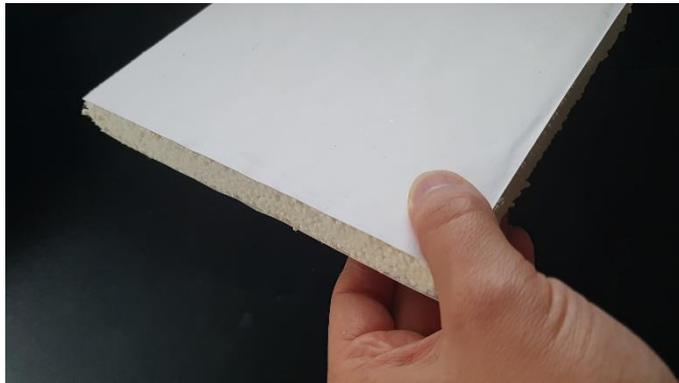


Abb. A10. Formkörper aus Silica-Biopolymer-Hybridaerogelpartikeln.

5.2.3 Zusammenfassung und Ausblick

Es gelang im Verlauf des Projekts trotz verschiedener technischer Ansatzpunkte nicht, die vor Projektstart entwickelten Ligninaerogele in Richtung feuchte- und feuerresistenter Varianten weiterzuentwickeln. Ausgehend von Vorarbeiten und von Erkenntnissen aus den Arbeiten zu Ligninaerogel konnten jedoch Aerogelhybridmaterialien mit neuartigen Eigenschaftsprofilen hergestellt werden, die für einen Einsatz im Bauwesen ausreichend feuchte- und feuerresistent sind und niedrige Wärmeleitfähigkeiten von $<20 \text{ mW}/(\text{m}^*\text{K})$ aufweisen. Die Kombination von gezielt ausgewählter Rohstoffbasis mit dem neuartigen Aerogelpartikel-Herstellungsprozesses (siehe dort) ermöglichen kostengünstigere Aerogele verglichen mit aktuell im Markt verfügbaren Materialien. Ferner sind erste Abschätzungen zu Nachhaltigkeitseigenschaften positiv (siehe dort). Die entwickelten Silica-Biopolymer-Hybridaerogelmaterialien werden im Nachgang des Projekts mit Partnern für verschiedene Anwendungen vor allem im Bauwesen getestet und sukzessive weiter verbessert.

5.3 Bioaerogele als Kernmaterial für Vakuumdämmung

5.3.1 Allgemeines

In Vorarbeiten waren durch den Partner va-Q-tec ab Anfang 2022 bereits verschiedene Aerogelmaterialien der aerogel-it GmbH als Kernmaterialien für Vakuumdämmpaneele (VIPs) untersucht worden. Ligninaerogele zeigten vielversprechende Ergebnisse mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit im Vakuum von $<10 \text{ mW}/(\text{m}^*\text{K})$ bei 10 mbar und 10°C und dienten als Ausgangspunkt für Pilottests im Rahmen des Projekts.

5.3.2 Erste Pilotmengen Ligninaerogel – schwankende Eigenschaften und Optimierung der Nachtrocknung

Innerhalb des Projekts wurden Pilotmengen (ca. 100 l) des Ligninaerogels im Labormaßstab von aerogel-it hergestellt und von va-Q-tec getestet. Das Ligninaerogel zeigte auch im Maßstab von ca. 100 Litern prinzipiell gute, aber schwankende Eigenschaften: Die Wärmeleitfähigkeit der hergestellten VIPs im Vakuum war nicht konstant.

5.3.3 Zelluloseaerogel als VIP-Kernmaterial

Weitere Untersuchungen zu Ligninaerogelen als VIP-Kernmaterial ergaben, dass der Ligninanteil keinen positiven Beitrag zur Wärmeleitfähigkeit im Vakuum leistete. Der Ligninanteil wurde daher aus der Aerogelformulierung entfernt. Nach Screening und Optimierung wurde eine Aerogelformulierung auf Basis von modifizierter Zellulose identifiziert, mit der eine niedrige Wärmeleitfähigkeit im Vakuum von $<10 \text{ mW}/(\text{m}^2\text{K})$ bei 10 mbar und 20°C im Bereich des Markt-Standards pyrogener Kieselsäure bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit erreicht wurde (siehe Abb. A11).



Abb. A11. Zelluloseaerogel-Pulver.

Evakuierte Presslinge des Zelluloseaerogelpulvers zeigten geringe Dichten von $100\text{-}120 \text{ kg}/\text{m}^3$ im Vergleich zum Standard pyrogener Kieselsäure von ca. $180 \text{ kg}/\text{m}^3$. VIPs auf Basis des Zelluloseaerogels wurden auf der Messe BAU 2025 erstmals der Öffentlichkeit präsentiert (siehe Abb. A12).



Abb. A12. VIPs auf Basis des Zelluloseaerogels.

5.4 Abschätzungen zur Nachhaltigkeit

Wichtiges Ziel der Materialentwicklung der aerogel-it GmbH sind im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik verbesserte Nachhaltigkeitsprofile, insbesondere ein niedrigerer CO_2 -Fußabdruck. Es wurde bislang keine externe Lebenszyklusanalyse der verschiedenen entwickelten Aerogelmaterialien durchgeführt, jedoch hat die aerogel-it GmbH auf Basis öffentlich verfügbarer Informationen sowie auf Basis einer Massen- und Energiebilanz des Produktionsprozesses erste Abschätzungen durchführen können. Für das Silica-Biopolymer-Hybridaerogel sowie das Zelluloseaerogel sind diese Abschätzungen für den aktuellen Status sowie für zukünftige Verbesserungen in den Abb. A13 und A14 gezeigt (Lebensphase Herstellung A1-A3). Sowohl Rohstoffe als auch Prozess haben signifikanten Einfluss auf den CO_2 -Fußabdruck. Auf der Rohstoffseite ist durch Optimierung der Rohstoffauswahl sowie durch Verbesserungen der Produktionsprozesse der Rohstoffe, die durch die Lieferanten bislang kaum erfolgt ist, Absenkungen zu erwarten. Die Prozessseite der aerogel-it GmbH ist

auf Basis des Basic Engineerings für eine erste Demo-Produktionsanlage mit geringer Produktionskapazität abgeschätzt. Signifikanten Einfluss haben die Rückgewinnung von CO₂- und Ethanolströmen, die im Fall größerer Produktionsanlagen verbessert werden. Es resultieren folgende Werte:

- Silica-Biopolymer-Hybridaerogel: heute 313 und künftig 86 kgCO₂eq/m³
- Zelluloseaerogel: heute 226 und künftig 45 kgCO₂eq/m³

	Heute		Mit Verbesserungen			
	GWP	GWP	Reduktion	Reduktion	GWP	GWP
	kgCO ₂ /m ³		Menge	GWP Rohst	kgCO ₂ /m ³	
Rohstoff 1	111,16	35,5%	100%	50%	55,58	64,4%
Rohstoff 2	18,72	6,0%	100%	25%	4,68	5,4%
Rohstoff 3	36,72	11,7%	10%	100%	3,67	4,3%
Rohstoff 4	14,24	4,6%	10%	100%	1,42	1,7%
Rohstoff 5	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%
Rohstoff 6	51,27	16,4%	10%	100%	5,13	5,9%
Rohstoff 7	61,51	19,7%	10%	100%	6,15	7,1%
Rohstoff 8	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%
Rohstoff 9	19,25	6,2%	50%	100%	9,63	11,2%
Abwasser	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%
Grüner Strom	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%

Abb. A13. Abschätzung CO₂-Fußabdruck Silica-Biopolymer-Hybridaerogel – Stand heute (links) und mit Verbesserungen Prozess aerogel-it GmbH sowie Rohstoffe (rechts).

	Heute		Mit Verbesserungen			
	GWP	GWP	Reduktion	Reduktion	GWP	GWP
	kgCO ₂ /m ³		Menge	GWP Rohstoff	kgCO ₂ /m ³	
Rohstoff 1	39,40	17,4%	100%	50%	19,70	44,2%
Rohstoff 2	40,72	18,0%	100%	25%	10,18	22,9%
Rohstoff 3	30,05	13,3%	10%	100%	3,00	6,7%
Rohstoff 4	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%
Rohstoff 5	52,40	23,1%	10%	100%	5,24	11,8%
Rohstoff 6	64,07	28,3%	10%	100%	6,41	14,4%
Rohstoff 7	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%
Abwasser	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%
Grüner Strom	0,00	0,0%	100%	100%	0,00	0,0%

Abb. A14. Abschätzung CO₂-Fußabdruck Zelluloseaerogel – Stand heute (links) und mit Verbesserungen Prozess aerogel-it GmbH sowie Rohstoffe (rechts).

5.4.1 Vergleich mit anderen Aerogelmaterialien

Bei vergleichbaren Wärmedämmeigenschaften wird für Silica-Biopolymer-Hybridaerogel und Zelluloseaerogel-VIPs gegenüber heutigen Silicaaerogelmaterialien und VIPs eine potentielle Absenkung des CO₂-Fußabdrucks um 85-90% abgeschätzt. Bei gleichzeitig erwarteten Kostensenkungen durch Rohstoffauswahl und verbessertem Produktionsprozess wird eine verbesserte Marktakzeptanz bei gleichzeitig vorteilhaftem Nachhaltigkeitsprofil erwartet.

5.5 Produktionsprozess für biobasierte Aerogele

5.5.1 Allgemeines

Die aerogel-it GmbH fokussiert sich auf die Herstellung von Aerogelen in Partikelform aus folgenden Gründen:

- Höchste Raum-Zeit-Ausbeute aufgrund höchster Volumenausnutzung und kürzester Diffusionswege; niedrigere Kosten
- Geschlossene Prozesse möglich (keine Emissionen von Lösungsmitteln)
- Flexible Einsatzmöglichkeiten von Partikeln

5.5.2 Basic Engineering Produktionsprozess / Demoanlage

Innerhalb des Projekts führte die aerogel-it GmbH Projekte zum Basic Engineering einer ersten, wirtschaftlich tragfähigen Demonstrations-Produktionsanlage („Demoanlage) durch:

- Nasschemischer Teil
- Überkritischer Trocknungsteil
- Nachtrocknungsteil

Wichtige Ergebnisse der Verfahrensentwicklung und des Basic Engineerings der Demoanlage wurden gewonnen.

Weitere Arbeiten zum Produktionsprozess fokussieren sich auf die Auslegung der sekundären Units der Demoanlage wie Wasser- und Abgasnachbehandlung. Ferner werden Konzepte zu verschiedenen Anlagengrößen ausgearbeitet.

5.5.3 Pilotanlage

Innerhalb der Projektlaufzeit plante und errichtete die aerogel-it GmbH eine neue Pilotanlage am Institut für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) an der Technischen Universität Hamburg (TUHH), die die bereits vorhandene Anlagentechnik zur überkritischen Trocknung um folgende Module ergänzt (siehe Abb. A15).



Abb. A15. Pilotanlage am TVT der TUHH.

Die Pilotanlage ermöglicht eine Herstellung von bis zu 200 l Aerogelpartikel pro Tag. Die Anlage wurde 04/25 eingeweiht (siehe Abb. A16) und produziert seit Q4/2025 Pilotmengen für Partner der aerogel-it GmbH. Mit der Pilotanlage konnten folgende Prozessschritte validiert und Fortschritte erzielt werden (verglichen mit bestehenden Aerogelproduktionsanlagen, soweit bekannt):

- Bis zu 380% höhere Raum-Zeit-Ausbeute
- Bis zu 90% weniger Energieeinsatz

- Mindestens 92% weniger Ethanolverbrauch
- Zudem konnten die soweit bekannt weltweit größten Mengen Lignin- und Zelluloseaerogel von ca. 100 l hergestellt werden (siehe Abb. A17).

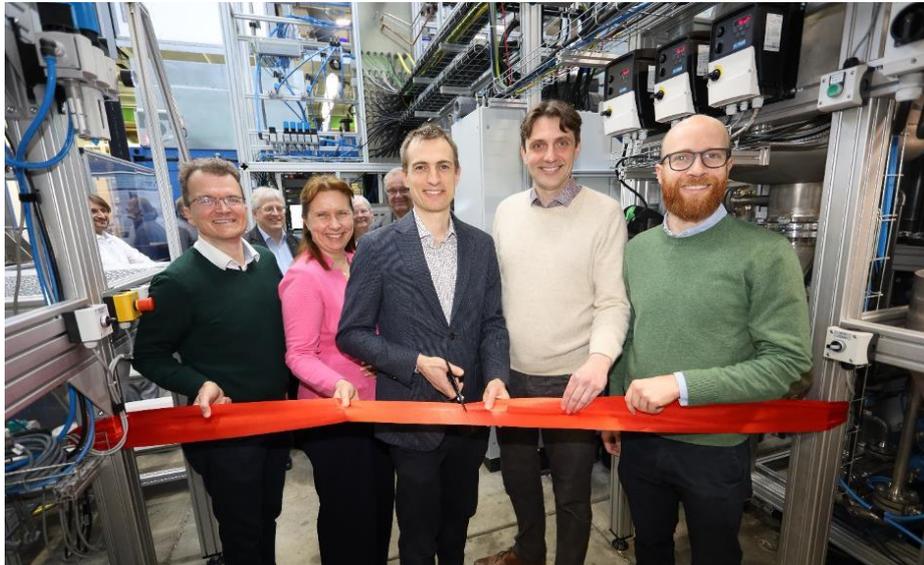


Abb. A16. Einweihung der Pilotanlage am TVT der TUHH im April 2025. Von links nach rechts: Dr. Marc Fricke (Geschäftsführer aerogel-it GmbH), Prof. Dr. Irina Smirnova (Leiterin TVT, Vizepräsidentin TUHH), Prof. Dr. Alexander Penn (Dekan), Dr. Pavel Gurikov, Alberto Bueno (beide aerogel-it GmbH).



Abb. A17. Weltweit größte hergestellte Mengen Zellulose- und Ligninaerogel in 100l-Fässern (soweit bekannt).

5.6 Bekanntmachung und Bemusterung

Über die Projektlaufzeit wurden die neu entwickelten Aerogelmaterialien auf verschiedenen Konferenzen und Messen im Rahmen von Vorträgen oder Standauftritten öffentlich präsentiert. Ferner wurden verschiedene Artikel und Posts auf LinkedIn, über die Website der aerogel-it GmbH sowie über die Website der TUHH veröffentlicht. Auf dieser Basis wurden zudem verschiedene Presseberichte verfasst. Ziel war, über die Kommunikationsaktivitäten das Interesse potentieller Partner zu wecken, um die neu entwickelten Aerogelmaterialien für verschiedene Anwendungen und Industrien zu testen und sukzessive zu verbessern. Dazu wurden Labor- und Pilotmuster hergestellt und weltweit versandt. Die verschiedenen Kommunikationsaktivitäten sind in Abb. A18 zusammengefasst.

Presse	Konferenzen und Messen
2023: Cradle Magazine 01/23: Klimaforum Bau 02/23: Chemistry Views 03/23: Architekturblatt.de 03/23: fr.de 03/23: klimareporter.de 04/23: Die Wirtschaft 05/23: Wohnen 05/23: Focus 05/23: Bauwelt Fassaden 05/23: WIGOS Wirtschaft Regional 06/23: Eco Urban Hub 06/23: Handelsblatt Beilage 07/23: Technische Isolierung 07/23: Heinze Journal Architektur 07/23: Wiwo online 08/23: nbau 08/23: NOZ 09/23: Baunetzwissen 10/23: Aerogel Handbook 11/23: Göttinger Tageblatt 11/23: Ingenieur.de 11/23: NOZ	05/22: Hamburg Innovation Summit 09/22: Aerogel-Konferenz TUHH 11/22: Greener Manufacturing 05/23: EMPA 2nd AIA Zürich 06/23: DGNB Sustainability Challenge 06/23: Eurominds 09/23: Innovationspreis NDS 10/23: dena Energiesprung Convention 11/23: Greener Manufacturing Show 11/23: Klima-Innovationspreis NDS 11/23: Klimafestival für die Bauwende 11/23: Mobility Startup Day OS 11/23: Materials Day HS OS
04/24: Chemistry Views 05/24: Window and Facade 06/24: Wir sind der Wandel.de 07/24: Die Linde.de 08/24: Ammerländer Nachrichten 08/24: NWZ Online 12/24: Ingenieur.de 12/24: Secret of Success	04/24: Batterietag NRW 04/24: Hannover-Messe 04/24: CEO Dinner 05/24: Bau-Wende gewünscht DBU 06/24: Traweba-Kongress 06/25: Energiesprung Innovation Day 07/24: Eurominds 08/24: Jubiläum ICO 08/24: STEP USA Greentech 09/24: Aerogel-Konferenz 09/24: Klimaberg Summit Kärnten 09/24: Vonovia Construction Contest 10/24: Baunetzwerk Zukunft 24 11/24: Fassadenbautagung 2024 Wien 11/24: Tech Tour Wuppertal 11/24: Klimafestival für die Bauwende
01/25: Chemistry Views	01/25: Baukongress DBU 01/25: BAU 04/25: EXPO Osaka

Abb. A18. Überblick über die Kommunikationsaktivitäten der aerogel-it GmbH.

6. Fazit

Innerhalb des Projekts gelang es, neuartige Biopolymer- und Silica-Biopolymerhybridaerogelmaterialien zu entwickeln, die als Hochleistungswärmedämmstoffe in Form von Aerogelpartikeln oder Vakuumdämmpaneelen (VIPs) z.B. in der Bauindustrie, der Logistik oder dem Kühlwesen eingesetzt werden können. Es wurden verschiedene technische Ansätze identifiziert und untersucht, um Biopolymeraerogele wasser-, luftfeuchtigkeits- und brandresistent auszustatten. Es gelang nicht, reine Biopolymeraerogele ausreichend brand- und feuchteresistent auszustatten. Durch Zusatz von Additiven zur Aerogelstruktur wurden Lignin-Hybridaerogelmaterialien entwickelt, die für Bauanwendungen ausreichend brand- und wasserstabil waren und die eine Wärmeleitfähigkeit von 24-26 mW/(m*K) (10°C, Partikelbett) innerhalb der Projektzielsetzung aufwiesen, deren Kosten-Nutzen-Verhältnis jedoch als unzureichend eingeschätzt wurde. Erkenntnisse aus diesen Arbeiten resultierten im weiteren Verlauf in der Entwicklung von Silica-Biopolymer-Hybridaerogelmaterialien. Diese zeigen im Vergleich zu aktuellen Silicaaerogelmaterialien vergleichbare Wärmeleitfähigkeiten von weniger als 20 mW/(m*K) und weisen zusätzlich vorteilhafte Eigenschaften wie verbesserte mechanische Beständigkeit, verbesserte Verarbeitbarkeit und potentiell um bis zu 90% reduzierten CO₂-Fußabdruck auf. Aufbauend auf Ergebnissen zu Ligninaerogelen als biobasierte Kernmaterialien für VIPs wurden zudem Zelluloseaerogele entwickelt, die im VIP verglichen mit pyrogener Kieselsäure vergleichbare Wärmedämmeigenschaften zeigen, aber deutlich geringeres Gewicht und um bis zu 85% reduzierten CO₂-Fußabdruck aufweisen. Parallel wurde die Entwicklung neuartiger Prozesstechnologie für diese neuartigen Aerogelmaterialien vorangetrieben, und es wurde eine Pilotanlage für Validierung der Prozesskonzepte und Bemusterung im Pilotmaßstab aufgebaut und in Betrieb genommen. Die technischen Arbeiten wurden durch Kommunikationsaktivitäten im Markt flankiert, indem die neu entwickelten Materialien auf Messen und Konferenzen sowie in Veröffentlichung

präsentiert wurden, um potentielle Partner für anwendungsrelevante Tests und Optimierung zu gewinnen. Künftige Arbeiten werden sich auf Optimierung der Rohstoffbasis von Silica-Biopolymer-Hybridaerogel und Zelluloseaerogel sowie auf Ausarbeitung des Produktionsprozesses im Hinblick auf großtechnische, industrielle Produktionsvolumina fokussieren.

7. Literaturverzeichnis

[L1] <https://www.rics.org/news-insights/energy-efficiency-of-the-building-stock-in-the-eu>

[L2] https://germany.representation.ec.europa.eu/news/energieeffizienz-von-gebauten-rat-und-parlament-einigen-sich-auf-neue-vorgaben-2023-12-08_de

[L3] S. Brunner, K. G. Wakili, T. Stahl, B. Binde, Energy and Buildings 2014, 85, 592-596.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.016>

[L4A] EPD-EUM-20160269-IBG1-EN

[L4B] S-P-01754, EPD-KNI-20150327-CBB1-EN, EPD-KNI-20170218-CBD1-EN

[L4C] S-P-00725, S-P-12831

[L4D] EPD-FIX-20210051-ICD2-DE

[L4E] EPD-ETE-20230095-IBA2-EN

[L5] Iswanto A. H. et al., International Journal of Biological Macromolecules 2024, 283, 3, 137714

[L6] Siehe z.B. <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/flame-retardants>

[L7] Siehe z.B. WO2020193554 BASF SE / aerogel-it GmbH

[L8] Siehe z.B. Prado, M. et al., Journal of Material Research and Technology 2022, 17, 913-914

[L9] Siehe z.B. US2635055A

8. Anhänge

Keine