

BMU-Umweltinnovationsprogramm

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

„Ressourcenschonende Produktion eines nanozellularen Polystyrol-Hochleistungsdämmstoffs, hergestellt mittels überkritischem CO₂“

KfW-Aktenzeichen: NKa3 - 003376

Fördernehmer/-in:

SUMTEQ GmbH

Laufzeit des Vorhabens:

30.03.2020 – 30.06.2023

Ansprechpartner:

Michael Hoffmann

Datum der Erstellung

14.11.2023

Berichts-Kennblatt

KfW-Aktenzeichen: NKa3 - 003376	
Titel des Vorhabens: Ressourcenschonende Produktion eines nanozellularen Polystyrol-Hochleistungsdämmstoffs, hergestellt mittels überkritischem CO ₂	
Autoren: Michael Hoffmann, Dr. Alexander Müller	Vorhabenbeginn: 30.03.2020 Vorhabenende: 30.06.2023
Zuwendungsempfänger: SUMTEQ GmbH Isolastr. 2 52353 Düren	Veröffentlichungsdatum: 14.11.2023 Seitenzahl: 30
Gefördert im Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz.	
Kurzfassung: Die SUMTEQ GmbH realisierte ein ressourceneffizientes und innovatives Verfahren zur Herstellung eines neuen Polymer-Nanoschaum-Dämmstoffs, welcher eine kosten- und ressourcensparende Alternative zu Aerogelen darstellt und neue Anwendungen im Bereich der Hochleistungsdämmung erschließt. Die innovative Anlage besteht grundsätzlich aus Extrakteuren, mit denen mittels überkritischem CO₂, Aceton aus Polymeren extrahiert wird und eine kontrollierte Schäumung des Polymers mit nanoskaligen Poren erfolgt. Erforderlich sind hierzu komplexe Steuer- und Regelungssysteme für eine exakte Druck- und Temperaturregelung sowie eine exakte Steuerung der verschiedenen Materialströme. Der Prozess ist insgesamt auf einen möglichst geschlossenen Verfahrensablauf ausgelegt, um den Großteil des eingesetzten Acetons und CO₂ wiederverwenden zu können. Dies erforderte die Einbindung mehrerer Kondensatoren und Kompressoren in das Anlagenkonzept. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden über eine Erfolgskontrolle ermittelt und zeichnen sich gegenüber Aerogelen als vergleichbare Hochleistungsdämmstoffe durch die Verringerung der THG-Emissionen um 55 % aus.	
Schlagwörter: Polymerschaum, Hochleistungsdämmung	
Anzahl der gelieferten Berichte: 1	Sonstige Medien: http://www.sumteq.com

Report-Coversheet

KfW-Reference-No.: NKa3 - 003376	
Report Title: Resource-efficient production of a nanocellular polystyrene high-performance insulation material manufactured using supercritical CO ₂	
Authors: Michael Hoffmann, Dr. Alexander Müller	Start of project: 30.03.2020 End of project: 31.06.2023
Grant recipient: SUMTEQ GmbH Isolastr. 2 52353 Düren	Publication Date: 14.11.2023 N of Pages: 30
Funded in the Environmental Innovation Program of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection	
Summary: SUMTEQ GmbH realized a resource-efficient and innovative process for the production of a new polymer nanofoam insulation material, which represents a cost- and resource-saving alternative to aerogels and opens up new applications in the field of high-performance insulation. The innovative system basically consists of extractors which extract acetone from polymers by means of supercritical CO₂ and by that a controlled foaming of the polymers with nanoscale pores takes place. This requires complex control and regulation systems for precise pressure and temperature control as well as exact control of the various material flows. The process as a whole is designed to be as closed as possible so that the majority of the acetone and CO₂ used can be reused. This required the integration of several condensers and compressors into the plant concept. The results of the project were determined by means of a performance review and are characterized by the following positive effects and environmental impacts: 55 % reduction in GHG emissions per mass compared with aerogels as a comparable high-performance insulation material	
Keywords: Polymer foam, high-performance insulation	
Number of reports delivered: 1	Other Media: http://www.sumteq.com

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens	6
1.2. Ausgangssituation	6
2. Vorhabenumsetzung	8
2.1. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	8
2.2. Umsetzung des Vorhabens	9
2.3. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	12
2.4. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten / Erfolgskontrolle	13
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	13
3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung	13
3.2. Messung der Wärmeleitfähigkeit	14
3.3. Messung des Brandverhaltens nach UL 94 V	18
3.4. Stoff- und Energiebilanz	20
3.4.1. Referenz-THG-Potenzial - Produktion von Aerogel	20
3.4.2. Erreichtes-THG-Potenzial - Produktion von Sumfoam	21
3.4.3. Umweltbilanz	22
3.5. Wirtschaftlichkeitsanalyse	23
3.6. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	24
4. Übertragbarkeit	25
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	25
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit	26
5. Zusammenfassung	28
6. Summary	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sumfoam in verschiedenen Formen	7
Abbildung 2: Prozessschema der Anlage	8
Abbildung 3: Demonstrationsanlage im Stadium der erfolgreichen Inbetriebnahme	12
Abbildung 4: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Sumfoam Flakes in der Schüttung	15
Abbildung 5: Messgerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit HFM 446 der Fa. Netzsch	15
Abbildung 6: Bestimmung des Brandverhalten nach UL 94 (links runde Proben aus Sumfoam Flakes, rechts Putzproben).....	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gemessene Schüttdichten	14
Tabelle 2: Gesamtwärmeleitfähigkeit der Vergleichsmaterialien	16
Tabelle 3: Externe Messungen - Zuordnung der Proben typen.....	17
Tabelle 4: Messungen an Putzproben mit 80 Volumenprozent Sumfoam	17
Tabelle 5: Messungen an Formteilen aus Flakes.....	17
Tabelle 6: Brandverhalten Formteile aus Flakes.....	19
Tabelle 7: Brandverhalten im Einsatzbereich von Dämmputzen	19
Tabelle 8: Ergebnisse der voraussichtlichen Verbrauchsmessung	21
Tabelle 9: Material und Energieeinsatz - THG Emissionen.....	22

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die SUMTEQ GmbH hat ihren Sitz in Düren und wurde im November 2014 als Spin-off aus der Universität zu Köln von den heutigen Geschäftsführern Dr. Alexander Müller, Dr. Roland Oberhoffer, Michael Hoffmann und Herr Prof. Reinhard Strey gegründet. Zum Jahresabschluss 2022 waren neben den Gründern auch die va-Q-tec AG, die maubach.icp GmbH, die CCFJ Vermögensverwaltung GmbH, die HeLiFra Beteiligungs GmbH und Hopfenveredlung St. Johann GmbH Gesellschafter von SUMTEQ (s. u.). Mitbegründer Herr Prof. Reinhard Strey schied im Frühjahr 2019 aus. Die SUMTEQ GmbH ist ein KMU, entsprechend der Definition der kleinen und mittleren Unternehmen durch die EU-Kommission.

Der Geschäftsgegenstand der SUMTEQ GmbH liegt in der Erforschung und Entwicklung von hochporösen Technologien, der Entwicklung, Herstellung und Vermarktung darauf basierender und vergleichbarer Werkstoffe sowie Nebenerzeugnissen wie Schäume für thermische Isolationsanwendungen oder für alternative technische Anwendungen. Die Gesellschaft ist zudem in der Vermarktung von forschungsintensiven und verfahrenstechnischen Beratungsdienstleistungen innerhalb der Werkstoffbranche für die zuvor genannten Technologien, Produkte und Anwendungen tätig.

1.2. Ausgangssituation

Durch die Demonstrationsanlage sollte ein neues und innovatives Produkt wirtschaftlich angeboten werden. Das hergestellte Granulat, im Weiteren als Polymer-Nanoschaum bezeichnet, kann z. B. als Füllmaterial für sogenannte Vakuumisulationspaneele und für dämmende Spritzputze eingesetzt werden und macht diese Produkte zur Temperaturdämmung effektiver und zugleich kosteneffizienter. Diese Anwendungsbereiche bilden den geplanten ersten Absatzmarkt für das mit der neuen und innovativen Verfahrenstechnologie erzeugte Produkt. Durch die erstmalige großtechnische Umsetzung des Verfahrens entsteht zudem weiteres Entwicklungspotenzial im Bereich der Optimierung der technischen Prozesse und des Polymer-Nanoschaums sowie der Weiterverarbeitung des Polymer-Nanoschaums. Letztlich entsteht so das Potenzial, auch gänzlich neue Anwendungsgebiete zu erschließen.

Das Produktionsverfahren geht mit deutlichen Umweltvorteilen einher – Ziel des Projekts war daher ebenfalls der Nachweis dieser ökologischen Vorteile. Verglichen mit der Produktion von Aerogelen entstehen nur etwa 55 % des GWP, bezogen auf das erzeugte Volumen. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Emissionsfaktoren und der Effizienzgewinne bietet die eine Demonstrationsanlage alleine schon das Potenzial rd. 7.200 t CO₂-Äquivalent pro Jahr durch ein umweltschonenderes und effizienteres Fertigungsverfahren einzusparen.

Die Ausgangssituation der Produktseite und Verfahrenstechnik stellte sich so dar, dass technisch gesehen der mit dem neuen Verfahren hergestellte Dämmstoff eine Variante der weit verbreiteten Polystyrol-Dämmstoffe ist. Auf dem Markt erhältlich waren EPS (expandiertes Polystyrol) und XPS (extrudiertes Polystyrol), wobei EPS deutlich höhere Marktanteile besitzt. Die beiden Produkte werden durch unterschiedliche Verfahren hergestellt – EPS wird mit dem einpolymerisierten Treibmittel Pentan zunächst vorgeschäumt und anschließend ein weiteres Mal mit Wasserdampf auf das insgesamt 20- bis 50-fache Volumen aufgeschäumt, XPS wird aus Polystyrolgranulat und einem Treibmittel, i. d. R. CO₂ sowie unter Zugabe von Additiven

in einem Extruder aufgeschmolzen und bläht sich nach dem Austritt aus der Extruderdüse stark auf. Beide haben gemeinsam, dass ihre Zellen verhältnismäßig groß sind und daher ein Wärmetransport über das in diesen Zellen eingeschlossene Gas erfolgen kann.

Hochleistungsdämmstoffe sind nicht eindeutig definiert. In der Schweiz gelten Dämmstoffe zum Beispiel mit einer Wärmeleitfähigkeit λ unter $0,030 \text{ W/(m K)}$ schon als Hochleistungsdämmstoffe. An anderen Stellen werden erst Dämmstoffe mit einem drei- bis zehnfach geringeren λ -Wert als herkömmliche Dämmmaterialien als Hochleistungsdämmstoff bezeichnet. Deutlich unterschreiten Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) mit $0,010 \text{ W/(m K)}$ und Aerogele mit $0,026 \text{ W/(m K)}$ den Schwellenwert zur Benennung als Hochleistungsdämmstoff, ebenso der neu entwickelte Polymer-Nanoschaum, der mit dem Demonstrationsverfahren hergestellt werden soll. Dieser weist für sich betrachtet eine Wärmeleitfähigkeit von rund $0,030 \text{ W/(m K)}$ auf (vgl. Tabelle 2). Abhängig von der späteren Anwendung und unter Zugabe weiterer Additiven wie beispielsweise IR-Blockern liegt die Wärmeleitfähigkeit in einem Bereich von $0,020 \text{ W/(m K)}$ bis $0,025 \text{ W/(m K)}$. Der mit dem neuen Verfahren herzustellende Polymer-Nanoschaum kann daher mit diesen Dämmstoffen verglichen werden, um Vorteile in der Anwendung ableiten zu können. Insbesondere das Produktionsverfahren von Aerogel wurde zudem als Referenz betrachtet, um die Umweltvorteile des Prozesses zu bewerten.

Das junge Unternehmen SUMTEQ (im Weiteren SMT) hatte zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht die räumlichen und personellen Kapazitäten, die geplante großtechnische Produktionsanlage komplett eigenständig zu errichten und zu betreiben. Die großtechnische Produktionsanlage wurde daher in den Räumlichkeiten eines Technologie- und Produktionspartners (im Weiteren TP-Partner) errichtet, steht allerdings im Eigentum von SMT und wird auch von SMT betrieben. Hierzu hat SMT eigenes Personal vor Ort aufgebaut und während der Errichtung technisches Personal des TP-Partners einbezogen. Es wird zudem die dort vorhandene Infrastruktur des TP-Partners im Rahmen einer langfristigen Kooperation genutzt.



Abbildung 1: Sumfoam in verschiedenen Produktvariationen

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Die Demonstrationsanlage ist auf eine Jahresproduktion von $> 10.000 \text{ m}^3$ Hochleistungs-Polymer-Dämmstoff-Schüttgut ausgelegt. Dieses Schüttgut wird anschließend für verschiedene Anwendungen durch SMT an anderen Standorten weiterverarbeitet. Nach einer Anlaufzeit im Anschluss an das Demonstrationsprojekt soll diese Kapazität möglichst zügig ausgeschöpft werden.

Abbildung 2 zeigt das Prozessschema der ursprünglich geplanten Produktionsanlage. Der Prozessablauf war wie folgt geplant: Ein Lösemittel und ein Polymer (Acryl Copolymere) werden in CO_2 -Extrakteure gegeben. Diese werden mit überkritischem CO_2 ($p_c = 74 \text{ bar}$, $T_c = 31^\circ\text{C}$) aufgedrückt und die Prozessparameter werden mittels CO_2 -Hochdruckpumpe angefahren. Das überkritische CO_2 durchströmt den Extrakteur und dringt in das Polymer ein. Am Ende der Extraktion wird der Druck in den Extrakteuren kontrolliert auf Atmosphärendruck abgesenkt. Dabei erfolgt die Schäumung der Polymerkugeln in den Extrakteuren. Die Steuerung und Regelung des Drucks, der Temperatur und der Prozesszeiten sind dabei von essentieller Bedeutung für das Ergebnis des Schäumungsprozesses. Der nun fertige Polymer-Nanoschaum wird aus den Extrakteuren in Silos abgefüllt und der Weiterverarbeitung bzw. dem Transport zugeführt.

Der Prozess ist insgesamt auf einen möglichst geschlossenen Verfahrensablauf ausgelegt, um die Betriebsmittel wiederzuverwenden. Das ausgeklügelte Rückgewinnungssystem trennt in mehreren Stufen das Lösemittel vom CO_2 . Beide Betriebsstoffe werden aktuell zu über 90 %

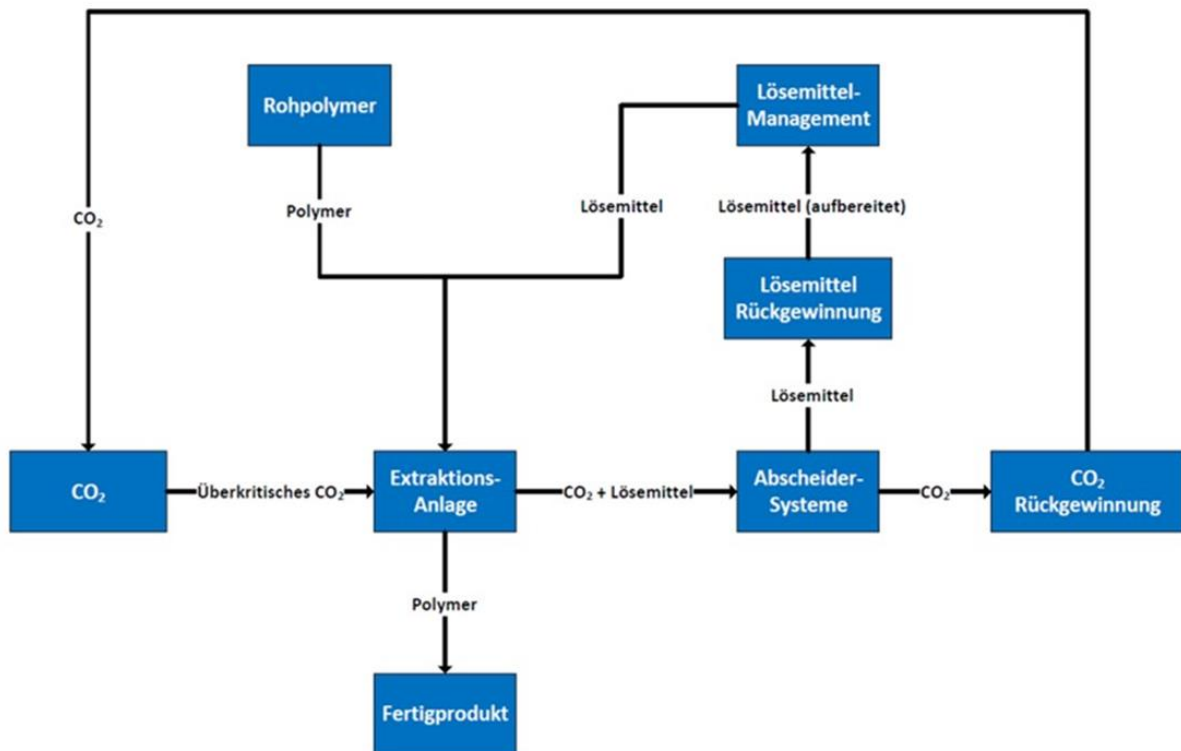


Abbildung 2: Prozessschema der Anlage

zurückgewonnen und wiederverwendet. Das CO₂ wird hierbei bis auf Atmosphärendruck entspannt und muss daher wieder rekomprimiert werden.

2.2. Umsetzung des Vorhabens

Nach Bewilligung wurden zunächst die Arbeiten für das Pre-Engineering mit einem Hochdruckanlagenbauer zur Ausgestaltung der CO₂-Extraktionsanlage aufgenommen. Neben den initialen Gesprächen wurden die verschiedenen Anlagenkomponenten und deren Zusammenführung als Gesamtkonzept zusammen mit dem Hochdruckanlagenbauer und dem TP-Partner in Form einer Anforderungsliste genauer beschrieben. Abgeleitet daraus hat der Hochdruckanlagenbauer zum Abschluss des Pre-Engineerings eine Vielzahl von technischen Unterlagen erstellt, welche als Grundlage für die Beauftragung der CO₂-Extraktionsanlage dienen.

Entscheidende Erkenntnisse aus dem Pre-Engineering führten dazu, dass verschiedene Anlagenkomponenten im Bereich der Beschickung und Entleerung direkt über SMT beschafft werden sollten. Hierzu wurde die Gesamtanlage in unterschiedliche Anlagenbereiche unterteilt und mit Konzepten und Angeboten hinterlegt.

Um die Kooperation mit dem TP-Partner umsetzen zu können, wurden verschiedene Abkommen innerhalb der Zusammenarbeit beider Parteien vertraglich festgehalten und unterzeichnet. Der abgeschlossene Nutzungsvertrag sieht neben der Produktion vor, dass SMT als Eigentümer und Betreiber der Anlagenkomponenten, sämtliche Rechte für die Nutzung und Aufstellung der Anlage in der Produktionsinfrastruktur des TP-Partners zugesprochen wurden.

Als übergreifender Projektbaustein wurde die Gesamtfinanzierung des Projektes mit den Investoren, Kapitalgebern und Banken abschließend sichergestellt. Vorbereitend zum Kaufvertrag wurde 2020 ein Term Sheet unterzeichnet, welches die Absichtserklärung der Gesamtbestellung vorsah und der Hochdruckanlagenbauer mit der Auftragsbearbeitung der Lead-Komponenten vorzeitig autorisierte, um den zeitlichen Projektverlauf nicht weiter zu verzögern.

Nach Beauftragung des Hochdruckanlagenbauers Ende 2020 zur Lieferung der CO₂-Extraktionsanlage, folgte ein initiales Kick-Off-Meeting, in dem alle organisatorischen Projektstrukturen und Verantwortlichkeiten durch SMT, dem TP-Partner und dem Hochdruckanlagenbauer festgelegt wurden. Im Fokus standen die erste Abstimmung zum Detailed-Engineering, wobei eine zentrale Liste der zu tätigen Aufgaben erzeugt wurde, die alle relevanten Erkenntnisse und Aufgabenpakete inkl. Fragestellungen sammelte. Im Projektteil der CO₂-Extraktionsanlage wurden alle Apparate festgelegt und in Form eines 3D-Gebäudelayout räumlich geplant. Es sind dort auch Teile der Rohrleitungsisometrie berücksichtigt worden.

Parallel dazu wurden die von SMT übernommenen Anlagenteile (Beschickung und Entleerung) genauer spezifiziert und mit diversen Angeboten potenzieller Zulieferer technisch und kommerziell verifiziert. Bis zum März 2021 wurden erste Komponenten bis zur Bestellreife ausgearbeitet und bestellt. Hierzu zählte beispielsweise eine Lösemittelaufbereitungsanlage, die zur Aufarbeitung des eingesetzten Lösemittels dient.

In Zusammenarbeit mit dem Hochdruckanlagenbauer und dem TP-Partner und einem Architekturbüro wurden Anfang 2021 auch die nötigen Umbauarbeiten und Ertüchtigungen am Gebäude erarbeitet und mit weiteren Angeboten hinterlegt.

Außerhalb des technischen Engineerings wurde mit zuständigen Behörden tiefer in die Auflagensituation und die Genehmigungsverfahren eingestiegen. Zu diesem Zweck sind mehrere Online-Meetings und Telefonate mit Mitarbeitern der zuständigen Behörden durchgeführt worden. Weiterhin wurden Gutachter mit der Ausarbeitung von Sicherheitskonzepten, wie Brandschutz-, Explosionsschutzkonzept und HAZOP-Analyse (Hazard and Operability-Analyse) beauftragt.

Im Umfeld der Kooperation mit dem TP-Partner sind Personalstellen für die Produktionsanlage ausgearbeitet worden. Darunter fallen zum Beispiel Anlagenfahrer oder Produktionsleiter, die vor Ort in Wolnzach beschäftigt werden. Mit dem Rekrutierungsprozess wurde in Q2 2021 begonnen und in Kooperation mit dem TP-Partner wurde dieser für die benötigten Personalstellen angestoßen. Erste Gespräche mit potenziellen Kandidaten wurden bereits in Q1 2021 geführt.

Weiterhin wurde in Q1 2021 für die Montage aller benötigten Anlagenkomponenten eine Montageversicherung abgeschlossen, die die Arbeiten von Einbringung bis hin zur Inbetriebnahme und finalen Abnahme finanziell absichert.

Von zentraler Bedeutung war die Mitte 2021 erfolgte Beauftragung der Hauptkomponenten der von SMT übernommenen Anlagenteile (Beschickung und Entleerung) sowie die damit verbundenen technischen und kommerziellen Verhandlungen mit den Zulieferern. Hierzu zählten unter anderem ein Behälterbauer als Hauptlieferant der Stahlbehälter und ein Kälteaggregathersteller als Lieferant für die Prozesskältemaschinen.

Um tiefer in das technische Engineering einzusteigen, wurde Mitte 2021 von Seiten SMT ein Planungs- und Ingenieurbüro damit beauftragt, die Planung der Beschickung und Entleerung zu übernehmen. Das beinhaltete sowohl die räumliche Planung der Apparate und Rohrleitungen in einem 3D-Modell als auch die verfahrenstechnische Ausgestaltung von R&I-Fließbildern.

Parallel wurde in Zusammenarbeit mit einem Ingenieur- und Architekturbüro die Ertüchtigung der Produktionshalle ausgearbeitet. Dazu zählen bspw. Beton- und Fundamentarbeiten, statische und geometrische Anpassungen des Gebäudestahlbaus und Vorkehrungen zu anlagenspezifischen Brandschutzvorkehrungen. Diese Beton- und Fundamentarbeiten sowie Stahlbauanpassungen konnten schon im 3. Quartal 2021 abgeschlossen werden.

In Zusammenarbeit mit dem Hochdruckanlagenbauer und dem TP-Partner wurde Mitte 2021 ein Konzept entwickelt, das die Einbringung der Hauptkomponenten in die Halle abbildet. Als zentrale Herausforderung stand hier die Koordination verschiedener Gewerke und Lieferanten sowie die zeitliche und räumliche Abfolge der Einbringung in die Halle. Zu diesem Zweck wurde weiterführend eine erfahrene Montagefirma beauftragt, die das nötige Equipment (Kräne) und Montagepersonal stellte.

Die Definition und Auswahl der Fördertechnologien konnten in 2021 mit Hilfe einer spezialisierten Firma ebenfalls weiter vorangetrieben werden. Im Zuge dessen wurden diverse Fördertests durchgeführt, die Aufschluss über die technische Machbarkeit geliefert haben.

Im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen wurden Mitte 2021 Explosionsschutzkonzepte seitens Hochdruckanlagenbauer und SMT (über den Gutachter) erstellt. Außerdem wurde in Absprache mit dem Planungs- und Ingenieurbüro ein weiterer Gutachter mit der Ausarbeitung einer HAZOP-Analyse für die Beschickung und Entleerung beauftragt.

Nachdem Mitte 2021 die Komponenten der Anlage planerisch in der Halle entsprechend der Aufstellungspläne platziert wurden, stand als nächster Schritt die Verrohrung an. Hierzu wurden zunächst die benötigten Ausschreibungsunterlagen in Zusammenarbeit mit dem Planungs- und Ingenieurbüro aufgesetzt und an diverse Firmen für Rohrleitungsbau weitergegeben. Nach mehreren Verhandlungsrunden und Vor-Ort-Besichtigungen hat sich SUMTEQ mit einem Rohrleitungsbauer einigen können, die Rohrleitungen der Anlage entsprechend der Fließschemata anzufertigen, zu montieren und schließlich zu prüfen. Hierzu gehörten ebenfalls der Einkauf des Rohrleitungsmaterials und der Armaturen.

Im Anschluss an die Beauftragung der Verrohrung der Anlage wurden die Ausschreibungsunterlagen für den Bau der Schaltschränke/Steuerung und Programmierung der Automatisierung inkl. Visualisierung erarbeitet. Dies fand ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem Planungs- und Ingenieurbüro statt. Danach konnte sich SUMTEQ mit einem Elektro-Anlagenbauer auf die Lieferung dieser Leistung einigen.

Parallel zur Verrohrung durch den Rohrleitungsbauer wurden die Elektroarbeiten begonnen. Hierbei wurden die Kabeltrassen verlegt und anschließend die Verkabelung der Gesamtanlage vorbereitet. Die Rohrleitungen wurden in Q4 2021 fertiggestellt.

Für die Verladung des Fertigprodukts (Sumfoam) wurde ein weiterer Silobehälterbauer mit der Lieferung und Montage eines Verladesilos für den Außenbereich beauftragt. Dies dient der Verladung des Produkts in Tanklastzüge. Die Fördertechnik bis hin zum Verladesilo wurde, äquivalent zur Förderung des Rohpolymers in die Anlage, errichtet. Hierzu wurden ebenfalls Versuche mit einem Unternehmen aus der Fördertechnologie gefahren, um die technische Auslegung zu verifizieren.

Ende 2021 erfolgte die tatsächliche Einbringung der Hauptkomponenten aller Anlagenteile, was einen wesentlichen Meilenstein darstellte. Dazu zählten Behälter, Kältemaschinen, Kompressoren und diverse andere Aggregate. In Summe wurden ca. 35 Elemente eingesetzt und teilweise montiert. Zu diesem Zweck musste das Dach in Teilen geöffnet und die einzelnen Elemente von oben mittels Krans gesetzt werden. Da die Halle im finalen Layout drei Etagen haben wird, mussten parallel die Ebenen aus Stahlbau und Beton errichtet werden, da diese auch für das Platzieren einiger Teile der Ausrüstung erforderlich waren.

Im Anschluss an die Einbringung dieser Komponenten startete der Hochdruckanlagenbauer mit der Montage der Rohrleitungen, die Mitte 2022 abgeschlossen werden konnte. Zu diesem Zweck mussten benötigte Hilfsmittel wie Gerüste, Schweißplätze, Werkzeug, aber auch die Unterkunft der beteiligten Mitarbeiter organisiert werden.

Parallel dazu konnte Ende 2021 die Fördertechnik des fertigen Polymers aus der Extraktionsanlage in die Lagersilos final definiert und beauftragt werden. In Zusammenarbeit mit einem weiteren Anlagen- und Montageunternehmen konnte eine technische Lösung erarbeitet werden, die das Produkt adäquat fördert, ohne die benötigten Eigenschaften des Materials zu beeinflussen.

In Zusammenarbeit mit dem Planungs- und Ingenieurbüro wurden sämtliche für die Ausschreibung der Verrohrung relevanten Unterlagen erstellt, die nicht Teil des Lieferumfangs des Hochdruckanlagenbauers waren. Dabei wurden die benötigten Rohrklassen und Halterungen mit einem Mengengerüst versehen, das den Planungsstand des 3D-Modells widerspiegelt. Gleichzeitig wurde der Kontakt zu verschiedenen Anbietern für Rohrleitungen im industriellen Bereich aufgebaut, um Lieferzeiten, Preise und Kapazitäten vergleichen zu können.

Zusätzlich wurden die für die Automatisierung der Produktionsanlage notwendige Mess- und Regelungstechnik spezifiziert und bei verschiedenen Lieferanten angefragt. Im Zuge dessen wurden die Fließbilder der Beschickung und Entleerung sowie der Hilfsmedien zusammen mit dem Planungs- und Ingenieurbüro und dem TP-Partner in Q2 2022 finalisiert.

Im Umfeld der Kooperation mit dem TP-Partner wurde Anfang 2022 der Rekrutierungsprozess für die benötigten Personalstellen weiter vorangetrieben. In diesem Zusammenhang wurde bspw. die Stelle des zukünftigen Betriebsleiters mit einer erfahrenen Person besetzt. Weiterhin wurden zukünftige Anlagenfahrer rekrutiert.

Ende 2022 waren die meisten Gewerke abgeschlossen, so dass Anfang 2023 mit der stückweisen Inbetriebnahme der Anlagenteile und in den darauffolgenden Monaten auch mit der Inbetriebnahme der Gesamtanlage begonnen und Anfang Juni 2023 abgenommen wurde. Anschließend wurde das Messkonzept durchgeführt, um die Verbrauchs- und Emissionseigenschaften der Anlage festzustellen. Abbildung 3 zeigt die Anlage zur Herstellung von Sumfoam zu einem Zeitpunkt bei dem die Gewerke abgeschlossen waren und die Inbetriebnahme erfolgte.



Abbildung 3: Demonstrationsanlage im Stadium der erfolgreichen Inbetriebnahme

2.3. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Neben dem technischen Engineering wurden Ende 2020 auch die relevanten behördlichen Genehmigungsstellen kontaktiert und ein Fachgutachten durch einen Gutachter erstellt, um notwendige Maßnahmen sowie Auflagen früh in die Konzeptionsphase einzubinden.

Im Sommer 2021 wurde im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen und behördlichen Genehmigungen die Stellungnahme einer zugelassenen Stelle für den benötigten Erlaubnisantrag nach BetrSichV durch eine technische Prüforganisation erstellt und bei der Gewerbeaufsicht

in München eingereicht. Weiterhin wurden die im Entwurfsstadium befindlichen Sicherheitskonzepte zum Explosions- und Brandschutz finalisiert und zusammen mit dem Gutachter in die jeweiligen Dokumente überführt.

Mit den Fachleuten der technischen Prüforganisation für die einzelnen Bereiche wie WHG (Wasserhaushaltsgesetz), Brand- und Explosionsschutz wurden im Laufe der Jahre 2021 und 2022 die relevanten Informationen zum Konzept der Anlage ausgetauscht und besprochen, welche sicherheitsrelevanten Unterlagen für Genehmigungen zusammengestellt werden müssen. Diese Unterlagen wurden dann vollständig eingereicht und die Genehmigung wurde erteilt.

2.4. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten / Erfolgskontrolle

Der Erfolg des Vorhabens wurde im Rahmen der Demonstrationsphase Anfang 2023 anhand der erreichbaren Schüttgutproduktion (Ziel >10.000 m³/Jahr) und der angestrebten Material- bzw. Energieeinsätze zum Erreichen dieser Produktionskapazität bewertet.

In einem Produktionszyklus sollten als Zielsetzung 150 - 200 kg Polymer-Nanoschaum Schüttgut mit einer Dichte von 70 - 130 kg/m³ produziert werden. Für einen solchen Produktionszyklus werden durchschnittlich folgende Einsatzstoffe verbraucht:

- | | |
|---|------------------|
| • Schäumbares Polymer | 150,0 - 200,0 kg |
| • CO ₂ (Verluste, die im geschäumten Produkt verbleiben) | 2,0 kg |
| • Aceton (Verluste, die im geschäumten Produkt verbleiben) | 0,5 kg |

Ziel war zudem, dass die Anlage einen elektrischen Energieverbrauch von rd. 400 kWh sowie 1.040 kWh Bedarf an Wärmeenergie pro Produktionszyklus aufweist. Dadurch ergaben sich geplante Jahresverbräuche von 3,1 Mio. kWh elektrische Energie und 6,8 Mio. kWh Wärmeenergie pro Jahr.

Im Endeffekt wurden durch den Materialeinsatz und den Energieverbrauch THG-Emissionen von rund 250 kg CO₂-Äquiv./m³ Polymer-Nanoschaum Schüttgut angestrebt.

Die erreichten Betriebsdaten werden in Tabelle 8 im Abschnitt 3.4 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Extrapolation auf Basis der bisher gemessenen Daten im Rahmen der Inbetriebnahme. Aktuell geht man auf Basis einer vorgenommenen Extrapolation davon aus, die geplante Produktionsmengen von 10.000 m³ pro Jahr erreichen zu können. Rechnerisch könnten auf Basis der vorgenommenen Extrapolation rd. 10.400 m³ erreicht werden

Die Zielsetzungen im Energieverbrauch wurden mit nur 2,5 Mio. kWh elektrischer Energie und 4,4 Mio. kWh Wärmeenergie ebenfalls unterschritten.

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Das Vorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen und die erzielten Umwelteffekte entsprechen den Erwartungen. Die neuen Materialeigenschaften als auch die voraussichtlichen Produktionskosten entsprechen den Erwartungen und setzen neue Maßstäbe im Bereich der industriellen Hochleistungsdämmstoffe. Die durchgeführte Erfolgskontrolle nach Inbetriebnahme der

Anlage war sehr hilfreich, da weitere Erkenntnisse für technische Optimierungen gewonnen wurden.

Im Folgenden werden die durchgeführten Messmethoden zur Charakterisierung des Sumfoam Materials und zur Überprüfung der Erfolgskontrolle dargestellt.

Zur Sicherung der Qualität sollte in der Pilotphase des Dauerbetriebs die Wärmeleitfähigkeit der Produkte geprüft werden. Im Zuge der Projektphase wurden Tests durchgeführt um das Material aus der Pilotanlage dem aus der Technikumsanlage gegenüber zu stellen. Bewertet wurde die Wärmeleitfähigkeit mittels Wärmeflussmessplattenapparatur nach ASTM C 518, ISO 8301, DIN EN 12667, DIN EN 13163 and JIS A 1412.

In der Bewilligung wurde zudem festgelegt, dass Tests zur Brennbarkeit von geschäumten Kunststoffen nach UL 94 bzw. DIN EN 60695-11-10:2014-10 oder auch VDE 0471-11-10:2014-10 durchgeführt werden sollten. Im Fall, dass auch Anwendungen im Hochbau vorgesehen sein sollten, wurden gegebenenfalls auch Tests nach EN 13501 gefordert. Da Produkte mit Sumfoam allerdings vorerst mit Fokus auf Sanierungsprojekte vorgesehen sind, wurden ausschließlich Tests nach UL 94 durchgeführt. In diesem Zusammenhang war ebenfalls eine Auseinandersetzung mit anwendungsbezogenen Brandschutzanforderungen und den nötigen Flammenschutzmitteln zum Erreichen dieser Eigenschaften erforderlich.

Bei den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen wurden die geltenden Normen und Standards berücksichtigt, um eine einfache Vergleichbarkeit und den Einsatz von gängigen Analyseverfahren zu gewährleisten.

3.2. Messung der Wärmeleitfähigkeit

3.2.1 Materialcharakterisierung Intern (Durchführung von Ende Mai bis Mitte Juni 2023)

Im Rahmen des Messkonzepts wurde das Material, welches in der Technikumsanlage im Labor produziert wurde, dem aus der industriellen Pilotanlage gegenübergestellt und charakterisiert. Damit kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Übertragung der Produktion von Sumfoam vom Labor/Technikum in eine großtechnische Produktion erfolgreich war. Die Messung erfolgte sowohl intern durch SUMTEQ als auch extern durch die Neue Materialien Bayreuth GmbH, um die Ergebnisse zu verifizieren. Die internen Ergebnisse dieser Materialcharakterisierung sind im Folgenden ausführlich dargestellt.

Im ersten Schritt wurde die Schüttdichte des im Labor erzeugten Produkts (Technikum) mit dem Produkt aus der großtechnischen Anlage (Pilotanlage) verglichen.

Tabelle 1: Gemessene Schüttdichten

	Technikum	Pilotanlage
Schüttdichte Granulat	75 kg/m ³	70 kg/m ³
Schüttdichte Flakes	108 kg/m ³	110 kg/m ³
Restfeuchte Flakes	1,07%	1,05%

Gut zu erkennen ist, dass die Eigenschaften des jeweiligen Schüttguts sehr nahe beieinander liegen. Damit wurde in dieser Kategorie die Übertragung aus dem Labor in die großtechnische Produktion, in den beiden Schüttgutformen Granulat und Flakes, erfolgreich umgesetzt.

Für die Messung der Gesamt-Wärmeleitfähigkeit (Lambdawert) der Schüttungen von Sumfoam Flakes, welche standardisiert von der SMT durchgeführt wird, wurden die Proben wie in Abbildung 4 dargestellt präpariert.

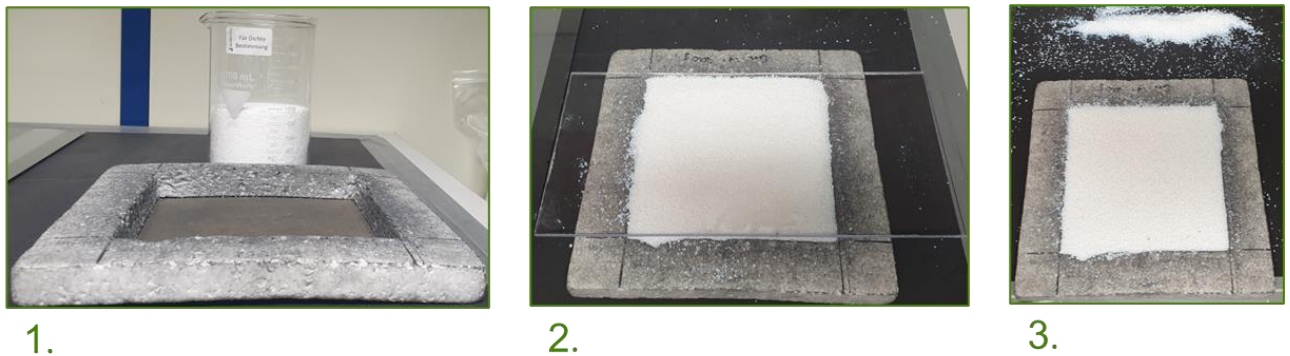


Abbildung 4: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Sumfoam Flakes in der Schüttung

Für die Charakterisierung des Lambdawertes in der Schüttung wurde im Vorfeld die Schüttdichte des Materials bezogen auf 1 L in einem Becherglas bestimmt (siehe Panel 1. in Abbildung 4). Anschließend wurde in Abhängigkeit der Dichte die Probe in die Form überführt. Das Volumen der Form betrug 1,2 L, das des Materials lag typischerweise in einem Bereich von 1,2 L – 1,5 L. Durch Rütteln, leichtes Andrücken und anschließendes Abziehen des Materials erfolgt die Verteilung und Verdichtung der Probe in der Schablone (siehe Panels 2. und 3. in Abbildung 4). Vor der Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde die finale Packungsdichte der Probe bestimmt.

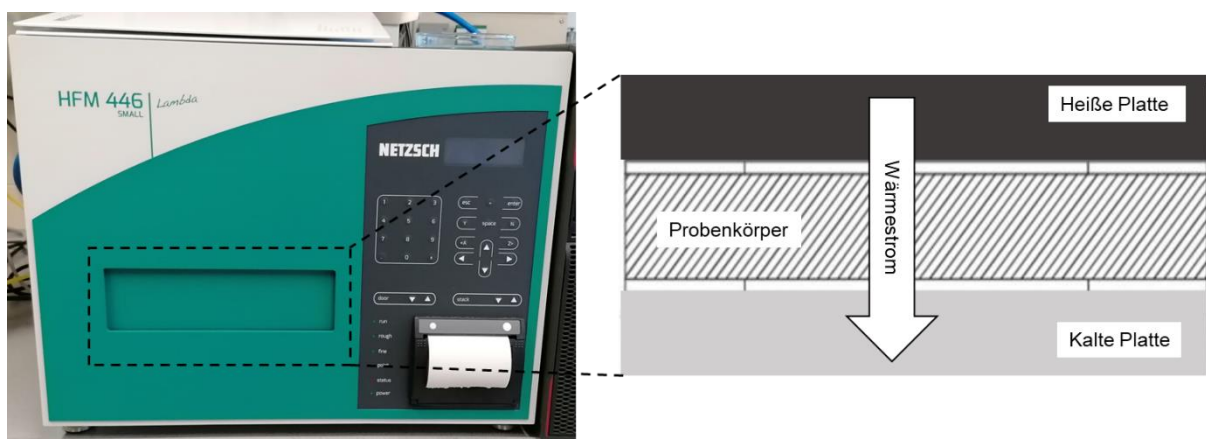


Abbildung 5: Messgerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit HFM 446 der Fa. Netzsch

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte dann mit der Wärmeflussmessplattenapparatur HFM 446 (s. Abbildung 5). Die mit dem Gerät durchgeführte Messmethode ist ein

genormtes Verfahren¹ zur Messung der Wärmeleitfähigkeit, die sowohl Anwendung in der Forschung und Entwicklung als auch der Qualitätssicherung findet.

Das Messsystem besteht aus zwei temperierten Platten, zwischen denen die zu untersuchende Probe eingelegt wird. Dabei kontaktieren die beiden Platten die Probe und stellen den entsprechenden Temperaturgradienten ein. Wodurch es nach kurzer Zeit zu einem stationären Wärmestrom durch das Material kommt, der mit zwei hochgenauen Wärmeflussensoren gemessen wird. Ist der stationäre Zustand erreicht und damit der Wärmefluss konstant, wird unter Kenntnis der Messfläche und der Dicke der Probe die Wärmeleitfähigkeit von der Gerätesoftware berechnet und ausgegeben. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgezeigt.

Tabelle 2: Gesamtwärmeleitfähigkeit der Vergleichsmaterialien – jeweils Mittelwerte aus mehreren Messungen unterschiedlicher Proben

Messdatum	Proben-Nr.	10°C Mitteltemperatur mW/(m·K)	30°C Mitteltemperatur mW/(m·K)	Probenart
07.06.2023	1.074	30,90	32,46	Pilotanlage
07.06.2023	1.075	30,81	32,42	Technikum
	Differenz*	-0,09	-0,04	

Differenz* = Technikum - Pilotanlage

Gemessen wurden hier einzelne ungetrübte Proben der zu vergleichenden Proben hergestellt mittels Pilotanlage bzw. Technikumsanlage. Aus den Messungen wurde deutlich, dass sich die Produkte aus Labor und Großanlage unmerklich unterscheiden. Insgesamt wurde nachgewiesen, dass das unbehandelte Produkt aus der großtechnischen Anlage grundsätzlich die angestrebte Wärmeleitfähigkeit erreicht. Die gemessenen Werte sind typische Messgrößen für unbehandelte und ungetrübte Sumfoam Flakes, welche den Median für alle Messungen darstellen.

3.2.2 Materialcharakterisierung Extern (Durchführung Mitte bis Ende Juni 2023)

Ergänzend zu den bei der SUMTEQ durchgeführten Messungen zur Charakterisierung des Grundmaterials wurde auch externe Materialcharakterisierung durch die Neue Materialien Bayreuth GmbH (NMB) durchgeführt.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde ebenfalls mit einem Wärmestrommessgerät (Modell HFM436 Lambda) der Firma Netzsch bestimmt. Die Messmethode entspricht dem standardisierten Verfahren, welches bereits bei der SUMTEQ angewendet wurde.

Im Gegensatz zu den einzelnen Schüttungen (Standardverfahren bei der SUMTEQ), die im Vorfeld bei der SUMTEQ charakterisiert wurden, sind für die weiteren externen Messungen unterschiedliche Proben aus dem beiden ursprünglichen Batches hergestellt worden.

Da bei der NMB im Vergleich zur SUMTEQ zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit keine Schüttungen gemessen wurden, sind hierfür Plattenmuster angefertigt worden. Dies erforderte die Zugabe von Additiven (Latexbinder), was den Lambdawert beeinflusst. Außerdem wurde

¹ Standardisiertes Verfahren: ASTM C 518, ISO 8301, DIN EN 12667, DIN EN 13163 & JIS A 1412.

eine Anwendung aus dem Dämmputz vermessen. Die folgende Tabelle gibt zunächst eine Übersicht über die Probenbenennung:

Tabelle 3: Externe Messungen - Zuordnung der Probentypen

Kennung	Grundmaterial	Messmethode	Charge
WWx	Flakes	Wärmeleitfähigkeit	Pilotanlage
DWx	Flakes	Wärmeleitfähigkeit	Technikum
WBx	Flakes	Brandschutz	Pilotanlage
DBx	Flakes	Brandschutz	Technikum
WPWx	Putz	Wärmeleitfähigkeit	Pilotanlage
DPWx	Putz	Wärmeleitfähigkeit	Technikum
WPBx	Putz	Brandschutz	Pilotanlage
DPBx	Putz	Brandschutz	Technikum

Es wurden standardisierte Messungen der Wärmeleitfähigkeit an Plattenmustern durchgeführt. Dabei betrug die Anzahl der charakterisierten Proben 12:

- 4 Proben: Putz (Putzmischung mit 80 Volumenprozent Sumfoam Flakes – Dichte des Putz 630 kg/m³). Probenplatten: 200 x 200 x 30 mm.
- 6 Proben: Formteile aus modifizierten Flakes. Probenplatten: 200 x 200 x 20 mm

Tabelle 4: Messungen an Putzproben mit 80 Volumenprozent Sumfoam

Kennung	Charge	10°C Mitteltemperatur mW/(m·K) ²	23°C Mitteltemperatur mW/(m·K)	30°C Mitteltemperatur mW/(m·K)
DPW1	Technikum	50,03	50,94	51,42
DPW2	Technikum	50,78	51,46	52,04
WPW1	Pilotanlage	50,39	51,02	51,58
WPW2	Pilotanlage	50,22	51,20	51,64

Die charakterisierten Dämmputzproben wurden aus unbehandelten Flakes hergestellt und speziell nach SMT internen QS-Standards präpariert. Abhängig vom späteren Anwendungsgebiet und der jeweiligen Putzmischung des Kunden können allerdings Putzproben mit einer Wärmeleitfähigkeit von unter 40 mW/(m·K) hergestellt werden, was einem Hochleistungs-dämmputz gleichkommt.

Tabelle 5: Messungen an Formteilen aus Flakes

Kennung	Charge	10°C Mitteltemperatur mW/(m·K)	23°C Mitteltemperatur mW/(m·K)	30°C Mitteltemperatur mW/(m·K)
DW1	Technikum	29,52	30,47	30,94
DW3	Technikum	32,48	33,16	33,56
DW4	Technikum	33,35	33,89	34,18
WW1	Pilotanlage	29,87	30,72	31,22
WW3	Pilotanlage	32,90	33,60	33,84
WW4	Pilotanlage	33,39	34,00	34,34

² mW/(m·K) = Milliwatt pro Meter und Kelvin

Im Fazit hat die Neue Materialien Bayreuth GmbH festgestellt, dass die Messergebnisse in einer vergleichbaren Toleranz zwischen den verschiedenen Batches liegen. Die Ergebnisse stimmen mit vorherigen Ergebnissen des Probenotyps (Schüttdichte, Korngröße etc.) überein. Generell ist die Messung der Wärmeleitfähigkeit des unbehandelten Materials bei SMT ein allgemeiner Indikator zur Bestimmung der Qualität.

Die Performance eines Hochleistungsdämmstoffes mit einer Wärmeleitfähigkeit von weniger als $25 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wird erst im Rahmen der finalen Verarbeitung bei den Kunden durch die Zugabe von IR-Trübungsmitteln erzielt. Dies liegt nach ersten Erkenntnissen daran, dass Trübungsmittel den Isolationseffekt durch die Diffusion der Wärmestrahlung unterstützen. Da die entsprechenden Messungen in Zusammenarbeit mit ersten Anwendern und deren Produkten erfolgten, unterliegen diese Daten der Geheimhaltung und können hier nicht dargestellt werden.

Aktuelle Anwendungen konzentrieren sich auf den Einsatz im Bereich der Sanierung, bei dem eine flexible Verarbeitung z. B. als Putz besonders wichtig ist. Zudem ist bei der Sanierung der verfügbare Raum zur Installation von Dämm Lösungen oft sehr eingeschränkt und eine geringe Materialstärke bei hoher Isolationswirkung damit von besonderer Bedeutung. Anwendungen im Hochbau sind aktuell noch nicht in der Entwicklung, hier werden jedoch auch keine anderen Hochleistungsdämmstoffe wie Aerogele eingesetzt. Dementsprechend wurde bisher auf Tests nach EN 13501 (Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten) verzichtet.

3.3. Messung des Brandverhaltens nach UL 94 V

Dieses Prüfverfahren (DIN EN 60695-11-10B) wird zur Bestimmung der Brennbarkeitsklassen UL 94 V-0, V-1 und V-2 verwendet. Bei der Prüfung werden sowohl die Brenn- und Nachglühzeit als auch das brennende Abtropfen des Prüfkörpers bewertet. Es wurden für diese Messungen Proben aus den bereits erwähnten zwei Sumfoam Batches hergestellt (s. Tabelle 2):

1. Runde Messproben aus Sumfoam Flakes (4 Stück), jeweils 4 Messungen pro Probe
2. Putzproben (4 Stück), jeweils 4 Messungen pro Probe

Intern wurden vorab verschiedene flüssige Flammschutzmittel getestet. Auf Basis dieser Voruntersuchungen hat SMT sich auf die verwendeten halogenfreien und phosphorhaltigen Flammschutzmittel festgelegt und den optimalen Anteil der benötigten Konzentration untersucht. Der getestete Bereich lag zwischen 2,5 % und 20 % der jeweiligen Flammschutzadditive. Die finalen Proben weisen in den Messungen alle 10 % des Flammschutzmittels auf.

Die Flakes wurden für die Messungen mit Flammschutzmittel ausgerüstet und dann zu den jeweiligen Formteilen verarbeitet. Die Messungen wurden in Anlehnung an die Norm UL 94 V durchgeführt. Dabei wurde die Messmethode exakt nach Norm durchgeführt, Abweichungen gab es nur in der Probenform.

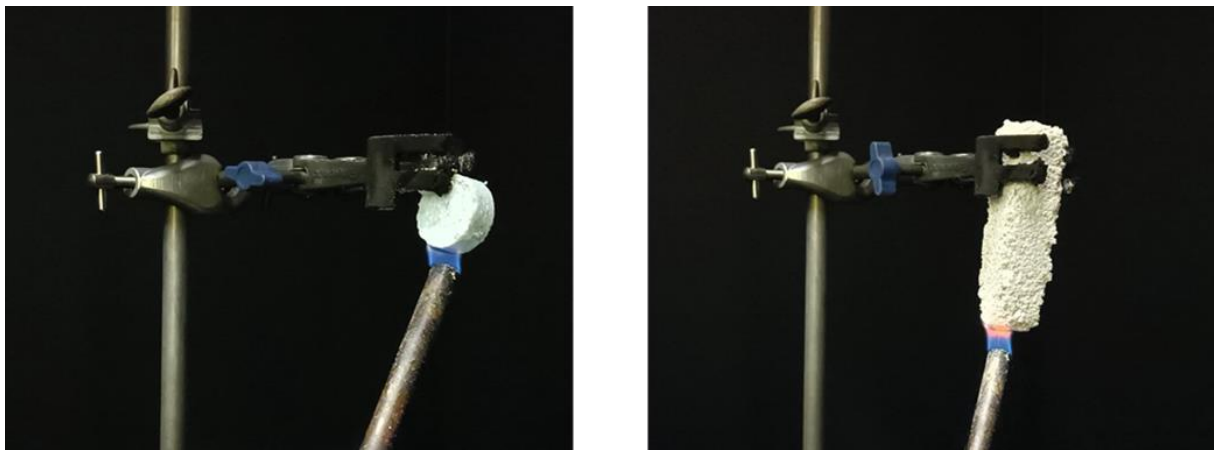


Abbildung 6: Bestimmung des Brandverhalten nach UL 94 (links runde Proben aus Sumfoam Flakes, rechts Putzproben)

Je Probenart wurden vier Einzelmessungen durchgeführt und bewertet. Dargestellt in Tabelle 6 und Tabelle 7 ist der errechnete Mittelwert, der untersuchten Proben.

Tabelle 6: Brandverhalten Formteile aus Flakes

Probe	Charge	Nachbrenndauer t_1	Nachbrenndauer t_2	Nachglühen t_2	Abbrand an Halteklammer	Abtropfen	Klassifikation
DB2	Technikum	0,00	1,25	0,00	Nein	Nein	V-0
DB3	Technikum	0,00	22,50	0,00	Nein	Nein	Fail
DB4	Technikum	1,50	1,00	0,00	Nein	Nein	V-0
WB2	Pilotanlage	0,00	0,5	0,00	Nein	Nein	V-0
WB3	Pilotanlage	0,00	0,75	0,00	Nein	Nein	V-0
WB4	Pilotanlage	0,00	3,75	0,00	Nein	Nein	V-0

Tabelle 7: Brandverhalten im Einsatzbereich von Dämmputzen

Probe	Charge	Nachbrenndauer t_1	Nachbrenndauer t_2	Nachglühen t_2	Abbrand an Halteklammer	Abtropfen	Klassifikation
DPB1	Technikum	0,00	0,00	1,00	Nein	Nein	V-0
DPB3	Technikum	0,00	0,00	0,00	Nein	Nein	V-0
WPB1	Pilotanlage	0,00	0,00	1,50	Nein	Nein	V-0
WPB3	Pilotanlage	0,00	1,00	2,00	Nein	Nein	V-0

Die Proben erreichten somit im Durchschnitt die Brennbarkeitsklasse V-0 und damit die bestmögliche Klassifikation nach UL 94 V. Die einzige Ausnahme stellt hierbei die Probe DB3 (siehe Tabelle 6) dar. Drei der vier gemessenen Proben weisen eine längere Nachglühzeit t_2 auf als in der Norm für eine Klassifizierung V-0 festgelegt ist. Da allerdings die Referenzmessung WB3 und eine der gemessenen DB3 Proben eine nach UL 94 geprüfte V-0 Klassifikation

erreicht, kann hier von einer unzureichenden Probenpräparation ausgegangen werden. Damit stehen prinzipiell alle angestrebten Anwendungen offen.

Beide Anforderungen wurden erfüllt und damit die Projektziele hinsichtlich der Produkteigenschaften voll erreicht.

3.4. Stoff- und Energiebilanz

Die Demonstrationsanlage zur Fertigung von Polymer-Nanoschaum muss zur Produktion eines vergleichbaren Produkts in Relation gesetzt werden. Als Referenz wird die Produktion von Aerogelen herangezogen.

3.4.1. Referenz-THG-Potenzial - Produktion von Aerogel

Für Aerogele gibt es verschiedenste Angaben über die THG-Emissionen zu deren Herstellung. Diese schwanken stark, was daran liegt, dass unterschiedlichste Rohstoffe eingesetzt werden, verschiedene Energiequellen einbezogen werden und die Eigenschaften der jeweils betrachteten Aerogele (Wärmeleitfähigkeit, Dichte etc.) stark schwanken. Zudem beziehen sich die meisten Quellen auf Produkte die mit Aerogelen hergestellt werden und damit nicht auf das pure Aerogel. Um zwei Beispiele zu nennen:

- In „Programm zur wissenschaftlichen Begleitung der Produktentwicklung und Markteinführung von Dämmstoffen auf Basis von Aerogelen und Advanced Porous Materials (APM)“³ des Bundesinstituts für Bau- Stadt- und Raumforschung aus dem Jahr 2019 wird ein durchschnittliches GWP von „fast 20 kg CO₂-Äq.“ bezogen auf das Erreichen eines R-Werts von 1,0 (m² KW) benannt (Seite 20 der Quelle). In dieser Quelle wird von einer typischen Wärmeleitfähigkeit (λ) von 0,02 W/(m K) ausgegangen (Seite 15 der Quelle). Eine 1 m² „Platte“ müsste somit eine Stärke von 0,02 m aufweisen um den R-Wert von 1,0 zu erreichen und hätte damit ein Volumen von 0,02 m³. Dementsprechend würde sich ein GWP von 1,0 kg CO₂-Äq. pro m³ Aerogel ergeben.
- In „Ökobilanzbetrachtung im Lebenszyklus von Dämmstoffen“⁴ der Fachschule für Technik und Gestaltung, Flensburg aus dem Jahr 2015 wird ein GWP der Herstellung von Aerogelen von 24,69 kg CO₂-Äq./m² bei einer Schichtdicke von 0,06 m genannt. (Seite 44 der Quelle). Umgerechnet ergibt sich ein Wert von 1,48 t CO₂-Äq./m³.

Wir hatten schon zu Beginn des Projekts eine EPD Umweltproduktdeklaration als Literaturquelle⁵ für die Referenzbetrachtung ausgewählt. In „Environmental Product Declaration Spaceloft Aerogel Insulation“, wird das GWP auf Basis von ISO 14025⁶ und EN 15804⁷ berechnet, welches eine höchst mögliche Sicherheit für die Vergleichbarkeit mit anderen

³ <https://www.irbnet.de/daten/rswb/19099014064.pdf>

⁴ https://www.eckener-schule.de/fstug/fileadmin/user_upload/redaktionsmaterial/GST/Bericht_OEkobilanzen.pdf

⁵ Hill, C. (2015). Environmental Product Declaration Spaceloft Aerogel Insulation. Northborough: Aspen Aerogels, Inc.

⁶ Internationale Norm für Umweltkennzeichnungen nach Typ III / Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren

⁷ Europäische Norm für: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte

Produkten ermöglicht. Hier wird das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP) des Produktionsprozesses inklusive der Vorketten beschrieben. Laut dieser Quelle wird für die Produktion eines Quadratmeters von 10 mm starkem Aerogel je nach Variante ein GWP von 12,3 bis 12,8 kg CO₂-Äquivalent/m² angegeben, im Durchschnitt somit 12,55 kg CO₂-Äquivalent/m² bzw. 1.255 kg CO₂-Äquivalent pro m³ (12,55 kg/m² / 0,01 m) oder 1,26 t CO₂-Äq. pro m³. Damit liegt diese Quelle immer noch im unteren Mittelfeld der verfügbaren Angaben. Zudem gab es im Bereich der Aerogele seit der Antragstellung keine wesentlichen technischen Weiterentwicklungen im Markt, weswegen die gewählte Quelle insgesamt weiterhin als relevant eingestuft werden kann. Allerdings ist auch zu sagen, dass sich die Branche bemüht den Prozess zu novellieren und umweltfreundlicher zu gestalten, wie z. B. ein laufendes Projekt des Fraunhofer UMSICHT zeigt⁸.

3.4.2. Erreichtes-THG-Potenzial - Produktion von Sumfoam

Zur Berechnung des THG-Potenzials der neuen Demonstrationsanlage bzw. des damit erzeugten Produkts wurden die Betriebscharakteristika ermittelt. In der folgenden Tabelle sind die ursprünglich zur Antragstellung geplanten Daten verglichen mit denen des Stands zur Inbetriebnahme im Juni 2023 und den Daten nach einer Extrapolation auf eine Jahresproduktion nach Durchführung des Messkonzepts.

Tabelle 8: Ergebnisse der voraussichtlichen Verbrauchsmessung

	19.11.2019 Plan	Extrapolation auf Basis Betriebsdatenerfassung aus der lfd. Inbetriebnahmephase
Outputmenge	10.000 m ³ /a	10.4000 m ³ /a
Jahresstromverbrauch	3.100 MWh/a	2.500 MWh/a
Jahresverbrauch Dampfergie	6.800 MWh/a	4.400 MWh/a
Jahres CO ₂ -Verbrauch	1.166 t/a	552 t/a

Im Vergleich zu den im Antrag ausgewiesenen CO₂-Jahresverbrauchsdaten, wurden im Laufe der Anlagenauslegung Optimierungen in der CO₂-Rückgewinnung implementiert und Verbesserungen in Bezug auf die Energieverbräuche erreicht. Dies hat zur Folge, dass die aktuellen Daten aus der Betriebsdatenerfassung der Inbetriebnahme geringer sind als in der ursprünglichen Prognose. Im Fall des CO₂-Verbrauchs sogar schon um mehr als die Hälfte tiefer liegen als seinerzeit prognostiziert. Aktuell wird davon ausgegangen, dass diese CO₂-Verbrauchsdaten nochmals um mehr als die Hälfte reduziert werden können, wenn die Anlage optimal eingestellt und eingefahren ist. Die „CO₂-Verluste“ entstehen im Produktionsprozess selbst, im Produkt verbleibt kein CO₂, daher gibt es auch keine Ausgasung von Treibhausgasen in der Anwendung.

Es zeigt sich somit, dass die zur Antragstellung absichtlich konservativ angesetzten Planungswerte in allen Bereichen unterschritten werden konnten.

⁸ <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/aerogel-daemmstoff-neuer-herstellungsprozess.html>

3.4.3. Umweltbilanz

Um die THG-Emissionen pro Masse Produkt zu berechnen, ist eine durchschnittliche Dichte des Schaum-Granulats und der Schaum-Flakes von 100 kg/cbm unterstellt. Die Bilanz bezieht sich auf einen allgemeinen, standortunabhängigen Einsatz des Verfahrens. Daher wurden hier nicht die tatsächlich mit der Demonstrationsanlage verbundenen CO₂-Faktoren angesetzt. So wird z. B. im Realbetrieb der Demonstrationsanlage CO₂ eingesetzt, welches eine wesentlich geringere THG-Belastung verursacht als z. B. CO₂ aus Quellsäure. Zur Berechnung der entstehenden CO₂-Äquivalente wurden die von dem BAFA veröffentlichten Faktoren verwendet⁹. Der nach den Verbräuchen gewichtete Faktor für den Gesamtenergiebedarf beträgt danach 0,286 t CO₂-Äq./MWh.

Für die Herleitung der THG-Emissionen des Materialverbrauchs wurden Faktoren aus der Pro-Bas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme) Datenbank des Umweltbundesamtes verwendet. Jedoch wird dort kein Faktor für technisches, flüssiges CO₂ angegeben. Daher musste hier auf eine andere Quelle zurück gegriffen werden¹⁰. Die eingesetzten Faktoren sind:

- Polymer (Quelle ¹¹) 2,87 t CO₂-Äq/t
- Flüssiges CO₂ (Quelle ¹⁰) 0,78 t CO₂-Äq/t
- Lösungsmittel (am Beispiel von Aceton ⁹) 4,1 t CO₂-Äq/t

Tabelle 9: Material und Energieeinsatz - THG Emissionen

	Wert	CO ₂ -Faktor	THG Emission in CO ₂ -Äq.
Jahresproduktion	10.400 m ³ /a		
Energieaufwand absolut	6.900 MWh/a	0,286 t CO ₂ -Äq./MWh	1.971,9 t
Energieaufwand relativ	0,663 MWh/m ³	0,286 t CO ₂ -Äq./MWh	0,190 t/m ³
<i>Polymer absolut</i>	<i>1.041 t/a</i>	<i>2,87 t CO₂-Äq/t</i>	<i>2.987,7 t</i>
<i>Flüssig CO₂ absolut</i>	<i>552 t/a</i>	<i>0,78 t CO₂-Äq/t</i>	<i>430,6 t</i>
<i>Lösungsmittel absolut</i>	<i>121 t/a</i>	<i>4,1 t CO₂-Äq/t</i>	<i>496,1 t</i>
Material absolut (D1 _{P+C+L})	1.714 t/a		3.914,3 t
Materialverbrauch relativ	1,65 t/m ³		0,376 t/m ³
Gesamt CO ₂ -Äquivalent absolut			5.886,2 t
Gesamt CO₂-Äquivalent relativ			0,566 t/m³

⁹ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle Informationsblatt CO₂-Faktoren Stand 01.05.2023

¹⁰ ecoinvent. (22. November 2017). ecoinvent LCI database. Version 3.1 . Zurich, Schweiz: ecoinvent Association.

¹¹ <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BA153D5B6-F0CF-4BB6-B0CB-DB95A16B4EFD%7D>

Im Vergleich zu den 1,26 t CO₂-Äq./m³ der Aerogele wurde somit eine Einsparung um rund 55 % (0,69 t CO₂-Äq./m³) auf 0,57 t CO₂-Äq./m³ erreicht. Bei der aktuell mit der Demonstrationsanlage erreichbaren Kapazität von 10.400 m³ Sumfoam pro Jahr bedeute dies eine Einsparung von 7.176 t CO₂/a im Vergleich zu einer Aerogelproduktion von gleicher Kapazität.

3.5. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Aufgrund der geringen Porengrößen, die im Bereich von weniger als 50 Nanometern liegen, kann der hochinnovative und leistungsstarke Dämmstoff Sumfoam in der Anwendung eine Wärmeleitfähigkeit von < 25 mW/mK erreichen. Das ist mehr als 1.000-mal kleiner als bisher handelsübliche Schäume wie bspw. EPS. Sumfoam isoliert nicht durch Luft (wie EPS), sondern durch Nutzung des Knudsen-Effekts: Durch die Nanostruktur entstehen viele einzelne Zellnetze. Dadurch wird die Kollision der eingeschlossenen Moleküle erschwert, wodurch die Energieübertragung durch die Luft gestört wird (genauere Erläuterung s. Infokasten). Dadurch ist Sumfoam nicht nur sehr stabil, sondern im Vergleich zu anderen Dämmstoffen auch äußerst platzsparend.

Je nach Anwendung kann der Schaum individuell angepasst werden. Granulat kann ohne Verlust der Isoliereigenschaften zu Flakes oder sehr feinem Pulver vermahlen und schließlich je nach Anwendung als Isolierzuschlagstoff verwendet werden. Damit ist es ein hervorragender Werkstoff im Baugewerbe, beispielsweise in den Anwendungsbereichen Dämmputze oder Einblasdämmung.

Es gibt viele alternative Isolierungslösungen. Doch wenn es um Hochleistungsdämmung geht, stoßen viele Produkte an ihre Grenzen. Für Standardanwendungen eignen sich vor allem herkömmliche Dämmstoffe wie EPS. Sie sind weit verbreitet und kostengünstig erhältlich, allerdings weisen sie im Vergleich zu Sumfoam eine deutlich geringere Wärmedämmung (Wärmeleitfähigkeit > 30 mW/mK) und eine reduzierte Stabilität auf. Auch für Sonderanwendungen wie Einblasdämmungen oder flexible Dämmputze sind diese Materialien in der Regel nicht geeignet.

Eine vergleichbar effiziente Wärmedämmung kann mit Aerogelen erreicht werden, die eine ähnliche Wärmedämmeigenschaft wie Sumfoam aufweisen. Allerdings weisen sie eine ebenfalls geringere Stabilität auf und sind in der Herstellung deutlich kosten- und energieintensiver. Im Gegensatz dazu bietet Sumfoam eine deutlich kostengünstigere (Faktor 2 – 4 günstiger), umweltfreundlichere (u. a. nur 70 % der THG-Emissionen im Vergleich zu Aerogelen) und energieeffizientere Lösung sowohl für die Sanierung bestehender Gebäude als auch für Neubauten.

Infokasten - Knudsen-Effekt

Dieser besagt, dass in Poren unterhalb einer sehr geringen Größe von 10³ nm (zum Vergleich: die Dicke eines menschlichen Haars beträgt etwa 10⁵ nm) Gasmoleküle seltener untereinander zusammenstoßen als an die Porenwände und somit kein gerichteter Wärmetransport von warm nach kalt in der Gasphase stattfindet. Dadurch tritt der Effekt einer stark verringerten Wärmeleitfähigkeit in nanoporösen Materialien auf, der darauf zurückzuführen ist, dass bei einem Porendurchmesser in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle diese nicht mehr miteinander interagieren.

Darüber hinaus handelt es sich bei der vorliegenden Technologie um eine einzigartige, patentgeschützte Innovation. SUMTEQ ist nachweislich das einzige Unternehmen weltweit, das wirtschaftlich skalierbare nanoporöse Polymerschäume herstellen kann und schafft damit einen einzigartigen Technologievorsprung für den Wirtschaftsstandort Deutschland und die EU. Aufgrund der oben genannten physikalischen Eigenschaften bildet Sumfoam eine neue Materialklasse, die über ein hohes Anwendungspotenzial auch für andere Verwendungszwecke über die Isolierung hinaus verfügt, z. B. hat Sumfoam aufgrund seines hervorragenden Aufnahmevermögens hohes Potenzial in den Anwendungsgebieten von Trägermaterialien und Mikroverkapselung oder Leichtfüllzuschlagstoffen.

Aufgrund seiner Eigenschaftskombination hebt sich Sumfoam von den heute marktverfügbaren Dämmstoffen signifikant ab. So verfügt die neue Materialklasse nicht nur über enorme Dämmeigenschaften, sondern ist besonders umweltschonend für seine Dämmleistung. Dies wird durch den reduzierten Energiebedarf erreicht und den Einsatz von CO₂ als Treibmittel für den Schäumprozess, anstelle des klimaschädlichen Pentans, dass bei herkömmlichen Schäumen verwendet wird. Zudem ist der Prozess so ausgelegt, dass Treibmittel und Lösungsmittel zu über 90 % zurückgewonnen werden können. Im Fall der Demonstrationsanlage wird grünes CO₂ aus einer SOL-Kohlensäureproduktion eingesetzt, wodurch die in Abschnitt 3.4.3 berechnete Klimabilanz noch geringer ausfällt.

3.6. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Generell ist anzumerken, dass das im Projekt demonstrierten Verfahren zur Herstellung des Polymer-Nanoschaums, technisch nicht mehr mit den bisher etablierten Verfahren zur Herstellung von EPS oder Aerogelen vergleichbar ist. Die Prozesstechnik ist vollkommen unterschiedlich und der dadurch erreichte Innovationssprung, in den erreichten Produkteigenschaften und Emissions- sowie Kostensenkungen, ist zu groß.

Der Vergleich zur Herstellung von Aerogelen fällt auf technischer Ebene eindeutig zu Gunsten von Sumfoam aus. Aerogele werden im Sol-Gel-Prozess mit anschließender überkritischer Trocknung erzeugt. Der Herstellungsprozess ist aktuell allerdings noch sehr kostenintensiv und nur im hochpreisigen Batchprozess möglich. Die Produktionskosten für monolithische Aerogele liegen beim Faktor 2 - 4-fachen der Herstellkosten von Sumfoam.

Technisch gesehen ist der mit dem neuen Verfahren hergestellte Dämmstoff eine Variante der weit verbreiteten Polymer-Dämmstoffe. Auf dem Markt erhältlich sind vor allem die Polymer-Dämmstoffe EPS (expandiertes Polystyrol) und XPS (extrudiertes Polystyrol), wobei EPS deutlich höhere Marktanteile besitzt. Die beiden Produkte werden durch unterschiedliche Verfahren hergestellt - EPS wird mit dem einpolymerisierten Treibmittel Pentan zunächst vorgeschäumt und anschließend ein weiteres Mal mit Wasserdampf auf das insgesamt 20- bis 50-fache Volumen aufgeschäumt. XPS wird aus Polystyrolgranulat und einem Treibmittel, i. d. R. CO₂, sowie unter Zugabe von Additiven in einem Extruder aufgeschmolzen und bläht sich nach dem Austritt aus der Extruderdüse stark auf. Diese Dämmstoffe haben allerdings vollständig andere Produktcharakteristika und damit überwiegend andere Anwendungsbereiche als Sumfoam. Sumfoam hat im Vergleich wesentlich größere Anwendungsüberschneidungen mit Aerogelen, ist aber auch nicht vollständig mit diesen austauschbar. Sumfoam kann grundsätzlich in den Bereichen eingesetzt werden in denen heute Aerogele eingesetzt werden hat aber auch weiterreichende Anwendungen in Gebieten in denen Aerogele heute nicht eingesetzt werden,

z. B. im Bereich der Gebäudesanierung. Auch mit Fertigungsprozessen von Aerogelen und EPS/XPS ist das Herstellungsverfahren von Sumfoam nicht vergleichbar, es stellt vielmehr einen neuen Weg Dämmstoffe zu erzeugen dar.

Das Sumfoam-Verfahren nach dem Extraktionsprinzip mit überkritischem CO₂ ist somit insgesamt eine erstmalige Entwicklung im Bereich der Dämmstoffe.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Von der Planung bis zur Installation der Anlagenkomponenten war es von entscheidender Bedeutung, dass die beteiligten Personen in sehr engem Kontakt standen und so schnell, sicher und effektiv die Dinge vorantreiben konnten. Die handelnden Personen agierten mit hoher Kompetenz und haben sich ergebende Schwierigkeiten direkt vor Ort diskutiert und bestmöglich gelöst.

Allerdings wurden durch die Auswirkungen der COVID19-Pandemie nicht nur interne Abläufe der SMT und der anderen Projektteams massiv beeinflusst. Die Zusammenarbeit und Kommunikation mit Zulieferern und anderen Stakeholdern war innerhalb des Gesamtprojektes nur eingeschränkt möglich. Die Umstellung der Kommunikationswege, die eingeschränkte Erreichbarkeit und die verminderten Kapazitäten der verschiedenen Partner haben dabei erheblichen Einfluss auf den Projektfortschritt und den Zeitplan des Projekts gehabt. Darüber hinaus ergaben sich durch die Auswirkungen der Pandemie auch weitreichende Einschränkungen innerhalb der Verhandlungsmöglichkeiten mit verschiedenen Zulieferern und Dienstleistern, die für eine zügige Umsetzung des Projekts ungünstig waren.

Insgesamt lässt sich als allgemeines Problem die Liefersituation verschiedenster Bauteile erwähnen, die aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Situation mehr als angespannt war. Sowohl massive Preissteigerungen als auch lange Lieferzeiten strapazierten fortlaufend das Projekt.

Eine zentrale Herausforderung während des Engineerings war die Definition und Auswahl der nötigen Fördertechniken. Ende 2020 wurde erkannt, dass die für die verschiedenen Produktionsstufen, die für die großtechnische Umsetzung ebenfalls eingeplanten Fördertechniken angepasst werden mussten, insbesondere um die materialspezifischen Anforderungen zu erfüllen bzw. die Materialeigenschaften nicht negativ zu beeinflussen. Zentral war die Förderaufgabe der zur Extraktion vorbereiteten Suspension innerhalb geschlossener Leitungen. Die ursprüngliche Idee, die Suspension aus Feststoff und Flüssigkeit per Überdruck zu fördern, wurde auf Grund der komplexen Anlagentechnologie und -steuerung verworfen. Als Lösung bot sich eine Schlauchpumpe an, die bspw. in der Baubranche zur Beton-Förderung eingesetzt wird. Eine Problemstellung die sich hierdurch ergab war, dass die möglichen Fördertechnologien zwar grundsätzlich am Markt verfügbar waren, aber teilweise in einem technisch vergleichbaren Gebiet (Polymerschäum/CO₂-Extraktion) noch nicht zum Einsatz gekommen waren. Daher mussten diese für den Produktionsprozess der SMT im industriellen Maßstab mit erhöhtem Engineeringaufwand in das Gesamtverfahren eingebunden werden. Bspw. wurde die Förderaufgabe des Fertigprodukts mit diversen Lieferanten verschiedener Branchen besprochen und in internen Tests untersucht. Schließlich lag die Lösung in einer Kombination verschiedener Technologien aus unterschiedlichen Branchen. Hierunter zählen zum Beispiel pneumatische Fördereinrichtungen, wie Vakuumförderer oder Fördergebläse, die auch im

EPS-Bereich oder im Getreidehandling verwendet werden. Dadurch wurde das Vorhaben in dieser Phase zeitlich um einige Wochen verzögert und der Engineering-/Anlagenaufwand erhöhte sich. Letztlich gelang es, Fördertechniken einzubinden, welche die Produkteigenschaften so wenig wie möglich beeinflussen

Weitere Problemstellungen resultierten aus der internen Bestrebung, den Grad der Rückgewinnung aller eingesetzten Betriebs- und Hilfsstoffe zu maximieren. Dieses Planungsprinzip sorgte zum Jahreswechsel 2020/2021 nicht nur für eine höhere Komplexität der einzelnen Anlagenkomponenten als ursprünglich vermutet, sondern auch für eine komplexere Verschaltung der einzelnen Anlagenteile untereinander. Daraufhin waren Neuberechnungen von Mengenströmen durch den Hochdruckanlagenbauer erforderlich und einzelne Anlagenkomponenten mussten neu ausgelegt werden. Diese Neuauslegung einzelner Anlagenteile führte auf Seiten des Hochdruckanlagenbauers zu erhöhten Kosten für die bei Unterlieferanten zugekauften Teile. Auch Aggregate, die der Hochdruckanlagenbauer selbst in eigener Hand plante und fertigte, haben an dieser Stelle zu erhöhten Kosten geführt.

4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit

Durch die disruptive Natur des neuen Werkstoffs Sumfoam und des jetzt dafür verfügbaren industriellen Herstellungsverfahrens befassen sich aktuell verschiedenste Interessenten mit dem Produkt und dem Verfahren. Dies findet aktuell meist im Bereich der industriellen FuE zur Weiter-/Neuentwicklung von Produkten in den verschiedenen Anwendungsgebieten statt, welche unter strengster Geheimhaltung erfolgen. Leider können wir daher nur wenige Unternehmen direkt benennen.

Die Anlage stellt die erstmalige Umsetzung eines innovativen Verfahrens für die Herstellung eines neuen Hochleistungsdämmstoff dar. Wir erwarten, dass andere weltweite Dämmstoffhersteller diese Technologie lizenziert nutzen werden und stehen hierzu schon mit verschiedenen potenziellen Nutzern vor allem in Europa, aber auch weltweit im Kontakt. Mit zahlreichen potentiellen Anwendern wurden schon im Verlauf des Projekts erste Gespräche für Lizenzverträge über das Fertigungsverfahren und Tests für mögliche Anwendungen des Materials durchgeführt. Die Resonanz ist in vielen Bereichen sehr positiv und daher können in den nächsten Jahren erste Produkte mit Sumfoam erwartet werden.

Die ersten Einsatzgebiete werden voraussichtlich robuste Estriche mit Einschüttdämmung, Dämmputz und der Einsatz in der Kühlkettenlogistik sein. Ein Beispiel hierfür sind Kerndämmungen der AGITEC AG¹².

Neben der Funktion als sehr flexibler und robuster Hochleistungsdämmstoff wird Sumfoam auch in anderen Einsatzbereichen erprobt. Aufgrund seiner Offenporigkeit kann das neue Material auch sehr effizient als Trägermaterial für unpolare Flüssigkeiten wie Öle oder Wachse verwendet werden. Erprobt wird in diesem Kontext z. B. ein Einsatz als Trägerwerkstoff zum Kunststoffrecycling. In 2022 konnte in einem Pilotprojekt mit der APD Schlauchtechnik GmbH nachgewiesen werden, dass gemischte Hart- und Weich-PVC-Reste direkt vor Ort recycelt werden können. Heute ist hierfür zunächst eine aufwendige externe Aufarbeitung der Mischreste erforderlich. Indem der bisher schon eingesetzte Weichmacher fest in den Nanoporen

¹² <https://www.agitec.ch/anwendungen/hohlraumdaemmung/index.php>

gebunden wird, kann er einfach und flexibel einem Extrusionsprozess hinzugefügt werden. Dadurch kann der gewünschte Härtegrad des Schlauches trotz der Verwendung von Mischresten exakt definiert werden, ohne dass ein externes Recycling notwendig ist.

In der Funktion als Mikrokapsel kann Sumfoam außerdem gezielt Düfte binden, diese über einen langen Zeitraum wieder freisetzen und anschließend erneut aufnehmen. Zusammen mit der niederländischen Unternehmen AV-Chemistry ist es in einem Pilotprojekt gelungen, Düfte in den Mikrokapseln zu binden und auf Kleidungsstücke zu drucken.

Diese Beispiele zeigen, wie vielfältig die Einsatzmöglichkeiten des neuen Materials sind, das mit dem jetzt demonstrierten Verfahren hergestellt werden kann. Der Großteil der zukünftigen Sumfoam-Anwender plant mittelfristig zudem den Aufbau einer eigenen Produktion, wodurch die mit dem Förderprojekt demonstrierte Anlagentechnik weite Verbreitung finden wird.

Nicht zuletzt können auch die traditionellen Anwender von Extraktionsverfahren mit überkritischem CO₂ durch die erreichten Erkenntnisse einen Nutzen generieren. Einer dieser Bereiche ist die Naturstoffextraktion, wie sie z. B. von der Hopfenveredlung St. Johann GmbH durchgeführt wird. Im Projekt wurden u. a. signifikante Fortschritte zur Steigerung der Energieeffizienz des Verfahrens erreicht, die nun auf die etablierten Prozesse übertragen werden.

Auch das rege Medieninteresse unterstreicht das Interesse und Potenzial in vielen Bereichen. Beispiele hierfür sind:

- Neue Materialien Bayreuth: <https://www.nmbgmbh.de/news/nanozellulaere-partikel-schaumperlen-erstmals-in-form-gebracht-ein-forschungsprojekt-zeigt-wies-geht/>
- Chemie Cluster Bayern: <https://chemiecluster-bayern.de/news/sumteg-setzt-neue-massstaebe-im-kunststoff-recycling-und-der-mikroverkapselung/>
- Hühthig Medien / Plastverarbeiter: <https://www.plastverarbeiter.de/roh-und-zusatzstoffe/wie-ein-nanozellulaerer-partikelschaum-isoliert-792.html>
- K-AKTUELL: <https://www.k-aktuell.de/technologie/sumteg-nanoschaum-fuer-pvc-recycling-91328/>
- K-ZEITUNG: <https://www.k-zeitung.de/schlauchproduktion-auf-neuem-nachhaltigkeitsniveau>
- Kunststoffmagazin: <https://www.kunststoff-magazin.de/formenbau/nanozellulaere-partikelschaumperlen-in-form-gebracht.htm>
- Plasticker: https://plasticker.de/Kunststoff_News_42042_Special_k22_Sumteg_Poly-merschaum_im_Einsatz_beim_Kunststoff_Recycling_und_in_der_Mikroverkapselung?special=k22
- Deutsche Umwelthilfe e. V.: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Infobrosch%C3%BCre_Innovationen_in_der_W%C3%A4rmed%C3%A4mmung.pdf
- Aachen Building Experts: <https://aachenbuildingexperts.de/blog/2021/07/23/sumteg-tritt-den-aachen-building-experts-bei/>
- Kölner Stadt Anzeiger: <https://www.ksta.de/wirtschaft/wirtschaftsnacht-rheinland/wirtschaftsnacht-rheinland-auszeichnungen-und-austausch-in-koeln-363629>

- CHILLVENTA: <https://www.chillventa.de/de-de/events-programm/2022/fachforen/058-076-applications-education-regulations/076-a-nanoporous-polymer-foam-sumteg>
- SOLARIMPULSE: <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/sumfoam>
- Tapioview: <https://www.tapioview.com/reduction/919/>

5. Zusammenfassung

Titel:

Ressourcenschonende Produktion eines nanozellularen Polystyrol-Hochleistungsdämmstoffs, hergestellt mittels überkritischem CO₂

Untertitel:

Die erstmalige großtechnische Herstellung des innovativen Hochleistungsdämmstoffs Sumfoam eröffnet neue Anwendungsbereiche für effiziente und wirtschaftliche Dämm Lösungen und macht ein ökologisch vorteilhaftes Substitut für Aerogele verfügbar.

Zusammenfassung:

Die SUMTEQ GmbH mit Sitz in Düren ist Spezialist für die Erforschung, Entwicklung und Herstellung hochporöser Materialien und die Vermarktung darauf basierender und vergleichbarer Werkstoffe. Hierunter zählen Schäume für thermische Isolationsanwendungen oder für alternative technische Anwendungen. Die Gesellschaft ist zudem in der Vermarktung von forschungsintensiven und verfahrenstechnischen Beratungsdienstleistungen innerhalb der Werkstoffbranche für die zuvor genannten Technologien, Produkte und Anwendungen tätig.

Ziel des Projekts war die Errichtung eines innovativen Anlagenkomplexes zur erstmaligen, großtechnischen Fertigung des von SUMTEQ selbst entwickelten Polymer-Nanoschaum-Materials. Die innovative Anlage besteht im Prinzip aus Extraktoren in denen mittels überkritischem CO₂, Aceton aus Polymeren extrahiert wird und eine kontrollierte Schäumung eines Polymers erfolgt. Die Materialbesonderheit besteht darin, dass nanoskalige Poren erzielt werden, in denen kein Treib- oder Lösungsmittel verbleibt. Aufgrund der geringen Porengrößen, die im Bereich von weniger als 50 Nanometern liegen, kann der hochinnovative und leistungsstarke Dämmstoff Sumfoam in der Anwendung eine Wärmeleitfähigkeit von < 25 mW/mK erreichen. Das ist mehr als 1.000-mal kleiner als bisher handelsübliche Schäume wie bspw. EPS. Eine vergleichbar effiziente Wärmedämmung kann mit Aerogelen erreicht werden, die eine ähnliche Wärmedämmeigenschaft wie Sumfoam aufweisen. Allerdings weisen sie eine ebenfalls geringere Stabilität auf und sind in der Herstellung deutlich kosten- und energieintensiver. Im Gegensatz dazu bietet Sumfoam eine deutlich kostengünstigere (Faktor 2 – 4 günstiger), umweltfreundlichere und energieeffizientere Lösung für anspruchsvolle thermische Isolationsanwendungen.

Die Maßnahme hat die Vorhabenziele erreicht: Die neue Materialklasse kann kosten- und emissionseffizient hergestellt werden. Dadurch können im Vergleich zu Aerogelen, als in der Anwendung vergleichbare Hochleistungsdämmstoffe, die THG-Emissionen um 55 % verringert. Mit der Demonstrationsanlage konnte eine Jahresproduktion von > 10.000 m³

Hochleistungs-Polymer-Dämmstoff-Schüttgut erreicht werden, wodurch eine jährliche Einsparung von rd. 7.200 t CO₂ pro Jahr und Anlage möglich wird. Dieses Schüttgut kann anschließend für verschiedene Anwendungen weiterverarbeitet werden.

Durch die disruptive Natur des neuen Werkstoffs Sumfoam und des jetzt dafür verfügbaren industriellen Herstellungsverfahrens eröffnen sich neue Produkte und Verfahren. Aktuell erfolgen mehrere Weiter-/Neuentwicklungen von Produkten in den verschiedenen Anwendungsgebieten. Die ersten Einsatzgebiete werden voraussichtlich robuste Estriche mit Einschüttdämmung, Dämmputze und der Einsatz in der Kühlkettenlogistik als platzsparender effizienter Dämmstoff sein. Aufgrund seiner Offenporigkeit kann das neue Material auch sehr effizient als Trägermaterial für unpolare Flüssigkeiten wie Öle oder Wachse verwendet werden. In der Funktion als Mikrokapsel kann Sumfoam außerdem gezielt Wirkstoffe/Agenzien binden, diese über einen langen Zeitraum wieder freisetzen und anschließend erneut aufnehmen.

Die Demonstration des Herstellungsverfahrens kann weltweit als Modell für alle Dämmstoffhersteller dienen aber auch für die Hersteller von Produkten in weiteren Anwendungsbereichen wie der Kunststoffindustrie (z. B. effizientere Extrusionsverfahren). Nicht zuletzt können auch die traditionellen Anwender von Extraktionsverfahren mit überkritischem CO₂ durch die erreichten Erkenntnisse einen Nutzen generieren, wie z. B. die Naturstoffextraktion. Im Projekt wurden u. a. signifikante Fortschritte zur Steigerung der Energieeffizienz des Verfahrens erreicht, die nun auf die etablierten Prozesse übertragen werden.

6. Summary

Title:

Resource-saving production of a nanocellular polystyrene high-performance insulation material using supercritical CO₂

Subtitle:

The first large-scale production of the innovative high-performance insulation material Sumfoam opens up new areas of application for efficient and economical insulation solutions and makes an ecologically advantageous substitute for aerogels available.

Summary:

SUMTEQ GmbH, based in Düren, Germany, specializes in the research, development and production of highly porous materials and the marketing of materials based on them and comparable materials. These include foams for thermal insulation applications or for alternative technical applications. The company is also active in the marketing of research-intensive and process engineering consulting services within the materials industry for the aforementioned technologies, products and applications.

The aim of the project was to set up an innovative plant complex for the first large-scale production of the polymer nanofoam material developed by SUMTEQ. In principle, the innovative plant consists of extractors in which acetone is extracted from polymers using supercritical CO₂

and controlled foaming of a polymer takes place. The special feature of the material is that nanoscale pores are achieved in which no foaming agent or solvent remains. Due to the small pore sizes, which are in the range of less than 50 nanometers, the highly innovative and high-performance insulating material Sumfoam can achieve a thermal conductivity of $< 25 \text{ mW/mK}$ in the application. This is more than 1,000 times lower than previous commercially available foams such as EPS. Comparably efficient thermal insulation can be achieved with aerogels, which have similar thermal insulation properties to Sumfoam. However, they are also less stable and are significantly more costly and energy-intensive to produce. In contrast, Sumfoam offers a significantly more cost-effective (factor 2 - 4 cheaper), more environmentally friendly and more energy-efficient solution for demanding thermal insulation applications.

The project has achieved the objectives: the new material class can be produced cost- and emission-efficiently. As a result, GHG emissions can be reduced by 55% compared to aerogels, which are comparable high-performance insulating materials in terms of application. With the demonstration plant, an annual production of $> 10,000 \text{ m}^3$ of high-performance polymer insulation bulk material has been achieved, resulting in an annual saving of approx. 7,200 tons of CO_2 per year and plant. This bulk material can then be further processed for various applications.

The disruptive nature of the new Sumfoam material and the industrial manufacturing process now available for it, open up new products and processes. Several new and further product developments are currently underway in the various application areas. The first areas of application are expected to be robust screeds with in-fill insulation, insulating plasters and use in cold chain logistics as a space-saving, efficient insulating material. Due to its open porosity, the new material can also be used very efficiently as a carrier material for non-polar liquids such as oils or waxes. In its function as a microcapsule, Sumfoam can also specifically bind active substances/agents, release them again over a long period of time and then reabsorb them.

The demonstration of the production process can serve as a model for all insulation manufacturers worldwide, but also for manufacturers of products in other application areas such as the plastics industry (e.g. more efficient extrusion processes). Last but not least, traditional users of extraction processes with supercritical CO_2 can also benefit from the knowledge gained, such as the extraction of natural substances. Among other things, significant progress was made in the project to increase the energy efficiency of the process, which is now being transferred to established processes.