



SUMTEQ GmbH

Luxemburger Str. 90

50939 Köln

**Entwicklung eines submikrozellularen
Hochleistungsdämmstoffs aus einem
Polystyrol-Nanoschaum**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33406 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Alexander Müller und Michael Hoffmann

September 2018

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	33406	Referat	22	Fördersumme	401.771 €
Antragstitel		Entwicklung eines submikrozellularen Hochleistungsdämmstoffs aus einem Polystyrol-Nanoschaum			
Stichworte		Polymer-Nanoschaum, Nanotechnologie, innovativer Werkstoff, Advanced Materials, Cleantech, Dämmung, Thermische Isolation, Energieeffizienz			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
1 Jahre und 11 Monate		01.07.2016		19.06.2018	
Projektphase(n)		1			
Zwischenbericht		Juli 2017 Januar 2018		Dr. Alexander Müller Michael Hoffmann	
Bewilligungsempfänger		SUMTEQ GmbH Luxemburger Str. 14 50939 Köln			Tel 49 (0) 221 93371340 Fax
					Projektleitung Dr. Alexander Müller
					Bearbeiter Dr. Alexander Müller
Kooperationspartner		va-Q-tec AG Hopfenveredlung St. Johann GmbH (NATECO ₂)			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Eine der wichtigsten ökologischen Aufgaben ist die Entlastung der Umwelt durch Einsparung von Heiz- oder Kühlenergie. Als passive Maßnahme kann maßgeblich Energie aus einer Verminderung von Transmissionswärmeverlusten eingespart werden, indem Werkstoffe mit niedrigen oder extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten verwendet werden. Zielsetzung in diesem Projekt war die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Polystyrol-Nanoschaum für den Einsatz als Hochleistungsdämmstoff auf Basis der selbst entwickelten innovativen Methoden.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Die Entwicklung des Verfahrens und des Werkstoffs wurde in zwei Stufen vollzogen. Zu Beginn war beabsichtigt, Funktionsmuster im Technikumsmaßstab herzustellen. Aufbauend auf diesen gewonnenen Kenntnissen und ersten Anwendungstests wurden in einer zweiten Stufe größere Mengen von Funktionsmustern erzeugt. Die Erkenntnisse aus den Anwendungsuntersuchungen wurden dabei in die jeweiligen Entwicklungsstufen rückgekoppelt. Die Entwicklungsstufen wurden dabei so lange durchlaufen, bis validierte Funktionsmuster für die jeweiligen Anwendungen vorlagen, damit zügig mit der Endentwicklung eines serienreifen industriellen Herstellverfahrens von Sumfoam begonnen werden konnte.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☒ An der Bornau 2 ☒ 49090 Osnabrück ☒ Tel 0541/9633-0 ☒ Fax 0541/9633-190 ☒ http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Durch die enge Kooperation mit den oben genannten Kooperationspartnern, war es möglich in sehr kurzen Intervallen Optimierungsschleifen hinsichtlich der Anwendungsvalidierung von Sumfoam durchzuführen. Dies hat maßgeblich zu den bisherigen Erfolgen in den Arbeitspaketen beigetragen. Diese Kooperationen werden auch nach dem Projektabschluss weiter intensiviert. Bezüglich der Anwendungen außerhalb von VIPs, hat sich ergeben, dass das Interesse des Marktes und der Dämmstoffhersteller sehr groß ist und weitere Kooperationen mit zusätzlichen Anwendungen möglich sind, welche in der Zukunft durch eine Vielzahl neuer Pilotierungen umgesetzt werden.

Das Ergebnis der ökologischen Bewertung in Bezug auf vergleichbare Produktbereiche bestätigt einen klaren Mehrwert von Sumfoam. Das GWP in Verbindung mit der Dämmperformance fällt klar zugunsten von Sumfoam aus und bietet ein großes Potenzial für die Akquise von neuen Partnern, Produktpilotierungen und Förderungen.

Auch die ökonomische Bewertung fällt dahingehend positiv aus, dass mit Sumfoam erstmals ein polymerbasierter Nanoschaum wirtschaftlich skalierbar ist und der voraussichtlich bereits in der ersten Industrialisierungsstufe wettbewerbsfähig gegenüber bestehenden Hochleistungsdämmstoffen wie bspw. den Aerogelen im Markt positioniert werden kann. Einhergehend mit weiterem Kostensenkungspotential im Rahmen weiterer Skalierungsstufen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Aufgrund der umfangreichen Öffentlichkeitsarbeit, die insbesondere in Form von Messen, Tagungen und Konferenzen durchgeführt wurde, konnte die Sichtbarkeit des Sumfoam-Projektes deutlich erhöht werden und es konnten weitere potenzielle Partner für die industrielle Produktion und Markteinführen identifiziert und akquiriert werden.

Fazit

Die für das gesamte Projekt gesetzten Ziele konnten erreicht und zum Teil sogar übertroffen werden. Zudem konnten insbesondere die positiven Umwelteinflüsse hinsichtlich der Einsparung von CO₂-Emissionennachweislich im Rahmen der durchgeführten Öko-Bilanzierung validiert werden, welche sich durch die zusätzlich gewonnen Erkenntnisse abermals verbessern werden.

Sumfoam besitzt aufgrund des effizienten und kostengünstigen Produktionsprozesses bereits messbare Vorteile gegenüber vergleichbaren Materialien. Damit besitzt er bei entsprechender Skalierungsstufe nicht nur ökonomische Vorteile für den Kunden, sondern ermöglichen auch Einsparpotenziale während der Herstellung und hat damit abermals positiven Einfluss auf die Umwelt.

Die Verbesserungen der Produktionsabläufe und die Skalierung der Technologie werden sowohl die Ökologische als auch die Ökonomische Bilanz zukünftig weiter positiv beeinflussen und bestätigen damit umso mehr die positiven Einflüsse von Sumfoam, nicht nur auf die Dämmstoffindustrie sondern auch auf anderen Gebieten rund um die Anwendbarkeit von nanoporösen Polymerschäumen.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
1. Zusammenfassung	10
2. Einleitung	12
3. Hauptteil	15
3.1 Arbeitspaket 1: Herstellung der PS-Rohware.....	16
3.2 Arbeitspaket 2: Herstellung von Sumfoam	20
3.3 Arbeitspaket 3: Anwendung in VIPs	24
3.4 Arbeitspaket 4: Herstellung von Sumfoam II	27
3.5 Arbeitspaket 5: Validierung der Anwendungsgebiete	30
3.6 Arbeitspaket 6: Ökologische und ökonomische Bilanz	31
3.7 Projektkosten und finanzielle Projektabwicklung.....	35
3.8 Außendarstellung und Öffentlichkeitsarbeit.....	37
4. Fazit.....	40
5. Literaturverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis

Nummer	Beschreibung	Seite
Abbildung 3-1	Übersicht über die einzelnen Arbeitspakete sowie deren Interaktion untereinander.	15
Abbildung 3-2	Links: SUMTEQ Polymerisationsreaktor. Mittels Suspensionspolymerisation wird das flüssige Monomer in Polymer-Granulat überführt. Rechts: Nach Abschluss der Polymerisation wird das fertige Granulat abfiltriert gewaschen und getrocknet.	17
Abbildung 3-3	Links: Polymerisationsreaktor. Mittels Suspensionspolymerisation wird das flüssige Monomer Polymer-Granulat überführt. Rechts: Nach Abschluss der Polymerisation wird das fertige Polymer-Granulat abfiltriert und im Anschluss gewaschen und getrocknet.	18
Abbildung 3-4	Links: Weißes Polymer-Granulat, dass bei Lohnfertigern hergestellt wurde. Rechts: Schwarzes Polymer-Granulat, dass während der Polymerisation mit einem kohlenstoffbasierten Infrarottrübungsmittel versetzt wurde.	19
Abbildung 3-5	Technische Zeichnung des Einsatzkorbes zur Schäumung von Sumfoam auf bestehenden CO ₂ -Anlagen	21
Abbildung 3-6	Links: Mit Polymer-Rohmaterial befüllter Sumfoam-Einsatzkorb vor der Schäumung. Rechts: Entnahme des Einsatzkorbes aus dem CO ₂ -Druckbehälter.	22

Nummer	Beschreibung	Seite
Abbildung 3-7	Auswahl an Sumfoam-Mustern, die während einer Schäumreihe hergestellt wurden. Hierfür wurden sowohl weiße als auch schwarze Polymere verwendet. Zudem wurde das Material sowohl in Form von Platten als auch Granulat hergestellt, um somit eine möglichst hohe Formflexibilität in der Anwendung zu gewährleisten.	22
Abbildung 3-8	Pilotanlage für Hochdruck-CO ₂ -Prozesse. Auf dieser Anlage können die für eine Anlagenkonstruktion relevanten Schäumparameter getestet werden.	23
Abbildung 3-9	Entwicklung der Dämmperformance im Vakuum über die bisherige Projektlaufzeit. Bereits nach 6 Monaten konnte die Zielperformance erreicht werden. Weswegen parallel zu einer weiteren Verbesserung bereits die Optimierung der Geometrie bearbeitet werden konnte.	24
Abbildung 3-10	Entwicklung der Dichtepformance im Vakuum (Einsatzgebiet VIP)	25
Abbildung 3-11	Links: Kantiges Platten-VIP mit Sumfoam als Füllkern. Die Geometrie wurde durch einen nachträglichen Zuschnitt und Schliff erzielt. Rechts: Mittels Druck- und Temperatureinwirkung wurde aus Sumfoam-Granulat eine Platte hergestellt. Vorteil dieser Methode ist die vollständige Formflexibilität unabhängig von der Geometrie des Einsatzkorbes zur Schäumung.	26

Nummer	Beschreibung	Seite
Abbildung 3-12	Aus dem Sumfoam-Granulat (links) wurde in einem weiteren Verarbeitungsschritt ein feines Pulver (Mitte) hergestellt, welches die Performance hinsichtlich der Evakuierbarkeit im VIP deutlich verbessert. Rechts abgebildet ist die vorgepresste Form des Pulvers in einem Fließ, welches als Vorbereitung zur finalen VIP-Herstellung dient.	27
Abbildung 3-13	Skalierungsstrategie innerhalb der Evaluierung der Prozessstabilität. Hinsichtlich der verschiedenen Experimenten konnte eine erfolgreiche Umsetzung im Technikumsmaßstab bestätigt werden. Die Skalierung wurde erfolgreich um den Faktor > 300 durchgeführt.	28
Abbildung 3-14	Vergleich der beiden Einsatzkörbe. Der rechte Einsatzkorb wurde bisher zur Schaumherstellung auf der Technikumsanlage verwendet. Der linke Schäumkorb wurde basierend auf den bisher erlangten Erfahrungen optimiert und wird für die weitere Skalierung verwendet.	28
Abbildung 3-15	Polymerisationsreaktor, für die nächste Skalierungsstufe. Links ist eine Außenansicht des Reaktors mit dem entsprechendem Rührwerk rechts abgebildet.	29
Abbildung 3-16	Sumfoam als additives Material bei Dämmputzen.	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Gesamttreibhauspotenzial von Sumfoam mit Anteilen der einzelnen Einflüsse	32
Tabelle 3-2	Vergleich der Dämmeigenschaften im Vakuum (Einsatz in VIPs)	33
Tabelle 3-3	Vergleich der Dämmeigenschaften in normaler Atmosphäre (Einsatz in z. B. Dämmplatten oder Dämmputzen)	33
Tabelle 3-4	Kosten- und Finanzplan des Gesamtprojektes	35

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung / Einheit	Bedeutung
λ	Wärmeleitfähigkeit von Materialien
λ_{vacuum}	Wärmeleitfähigkeit im Vakuum
Fa.	Firma
ISASF	International Society for Advancement of Supercritical Fluids
mW/m*K	Einheit der Wärmeleitfähigkeit in Milliwatt pro Meter und Kelvin
Sumfoam	Sub Microcellular Foam
VIP	Vakuum-Isolations-Paneel

1. Zusammenfassung

Die Projektarbeiten wurden gemäß der im Förderantrag (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen 33406) beschriebenen Arbeitspakete durchgeführt. Im Vergleich zur Planung haben sich lediglich folgende Änderungen ergeben:

- Die internen Polymerisationskapazitäten wurden deutlich erweitert, um eine schnellere und effizientere Konfektionierung der Polymer-Rohware zu gewährleisten (Arbeitspaket 1).
- Für die Schaumherstellung wurde neben der NATECO₂ zusätzlich auf einen anderen Lohnfertiger zurückgegriffen, da diese deutlich höhere Kapazitäten bereitstellen konnten sowie die gleichwertige Dienstleistung kostengünstiger anbieten konnten. Darüber hinaus wurde eine erste Testreihe im Technikum des Anlagenkonstruktors durchgeführt (AP2).
- Für die Vorbereitung der Anwendungsvalidierung in Arbeitspaket 5 weitere Dämmstoffhersteller als Partner für eine Pilotierung und mögliche anschließende Markteinführung gewonnen werden.

In Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden ausreichende Mengen an Rohmaterial für sämtliche Schäumexperimente und Anwendungsvalidierungen hergestellt. Darüber hinaus war es durch die internen Kapazitätserweiterungen möglich, zahlreiche Polymerzusammensetzungen und Polymerisationsparameter zu testen und somit die Konfektionierung sowohl hinsichtlich der Weiterverarbeitung zum Schaum als auch der Anforderungen in VIPs im Rahmen der geplanten Iterationsschleifen zu optimieren (s. Abschnitt 3.1). Im Zuge der Performanceoptimierung von Sumfoam in VIPs konnte ein deutlich besserer Wert erreicht werden als der gesetzte Zielwert, so dass bereits mit einer Optimierung der Form und der Handhabung begonnen werden konnte. Durch die Integration verschiedener Zwischenschritte war es möglich ein deutlich höheres Maß an Flexibilität zu erzielen (s. Abschnitt 3.3).

Sämtliche Meilensteine und Ziele in den nachfolgenden sechs Arbeitspaketen wurden innerhalb des Forschungsprojektes erreicht und teils übertroffen, sodass alle positiven Einflüsse hinsichtlich der im Förderantrag beschriebenen Umwelteffekte realisierbar sind. Vielmehr sollte die Verbesserung der Dämmperformance in VIPs über das gesetzte Ziel hinaus die CO₂-

Einsparung durch Verwendung von Sumfoam maximieren. Die umfassende ökologische Bilanzierung (Arbeitspaket 6) bestätigt die gesetzten Ziele. Dabei ist das volle Potenzial noch nicht eindeutig abzuschätzen, da die Technologie während der Markteinführung weiter optimiert werden kann und damit weitere positive Effekte zugunsten von Sumfoam eintreten können.

2. Einleitung

Eine der wichtigsten ökologischen Aufgaben ist die Entlastung der Umwelt durch Einsparung von Heiz- oder Kühlenergie. Als passive Maßnahme kann maßgeblich Energie aus einer Verminderung von Transmissionswärmeverlusten eingespart werden, indem Werkstoffe mit niedrigen oder extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten verwendet werden. Wärmedämmstoffe oder Materialkombinationen mit extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten werden allgemein als Hochleistungsdämmstoffe bezeichnet [Kar14]. Die bislang auf den Markt befindlichen Hochleistungsdämmstoffe sind Vakuum-Isolations-Paneele mit pyrogener Kieselsäure als Stützkern und Aerogele, die jedoch aufgrund der aufwendigen Herstellverfahren sehr kostenintensiv sind, so dass sie bisher nur als Nischenprodukte bei besonders anspruchsvollen Anwendungen eingesetzt werden.

Grundsätzlich können Polymerschaumdämmstoffe deutlich wirtschaftlicher hergestellt werden als Vakuum-Isolations-Paneele oder Aerogele. Um jedoch als Hochleistungsdämmstoff eingesetzt werden zu können, müssen sie über submikro(nano)skalige Zellgrößen verfügen, da nur mit nanozellularen Schäumen physikalisch extrem geringe Wärmeleitfähigkeiten erreichbar sind [Not15] [Cha12]. Daher wird weltweit an unterschiedlichen Polymeren und Verfahren experimentiert, um Methoden zur Herstellung stabiler nanoporöser Schaumdämmstoffe zu entwickeln [Jel10]. Die Problematik liegt dabei insbesondere in der dauerhaften Beibehaltung der Nanostruktur und der damit verbundenen Unterdrückung von Vergrößerungseffekten im Schaum [Mue13] [Mue14].

SUMTEQ ist es in Vorarbeiten [Str10] [Str13] gelungen innovative Methoden zu entwickeln, mit denen Polystyrol zu einem nanoporösen Schaum aufgeschäumt werden kann, der seine Struktur dauerhaft aufrecht erhält. Zudem ist es gelungen weitere Vorteile gegenüber bestehenden Ansätzen zu verwirklichen, wie die Verwendung von Kohlendioxid als Treibmittel und den Verzicht auf teure Additive. Zudem besteht ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Methoden zur Herstellung nanoporöser Schäume in der Einfachheit des Prozesses. Dieser innovative Prozess ermöglicht erstmalig eine theoretische Hochskalierbarkeit der Herstellmenen sowie eine damit einhergehende kostengünstige Produktion. Dies sind die Grundfaktoren für die wirtschaftliche Produktion eines Polystyrol-Nanoschaums (Sumfoam) sowie den flächendeckenden Einsatz als Hochleistungsdämmstoff.

Aufgabe dieses Projektes war die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Polystyrol-Nanoschaum für den Einsatz als Hochleistungs-Dämmstoff auf Basis der selbst entwickelten, innovativen Methoden. Die Entwicklung des Verfahrens und des Werkstoffs wurde in zwei Stufen vollzogen. Zunächst war beabsichtigt Funktionsmuster im Technikumsmaßstab herzustellen. Aufbauend auf diesen hier gewonnenen Kenntnissen und ersten Anwendungstests sollten in einer zweiten Stufe größere Mengen von Funktionsmustern erzeugt werden. Im Projekt ist die Verwendbarkeit der Funktionsmuster in mehreren Anwendungsbeispielen bei assoziierten Partnern nachgewiesen. Die Partnerunternehmen zählen zum klassischen Mittelstand und repräsentieren beispielhafte Anwender des innovativen Verfahrens und daraus resultierenden zukünftigen Produkten. Zum einen sollten Funktionsmuster in Vakuum-Isolations-Paneele als Stützkern anstelle von pyrogener Kieselsäure zur Eignungvalidierung eingesetzt werden. Pyrogene Kieselsäure wird mit einem hohen Energieaufwand produziert (Umsetzung von Siliziumtetrachlorid bei über 1500°C), was mit entsprechend hohen Umweltbelastungen und Kosten verbunden ist. Hinsichtlich der Anwendungsvalidierung von Sumfoam wurden, neben dem Einsatz als Kernmaterial von VIPs, weitere Nischenapplikationen bei Gebäudefassaden (bspw. Rolllädenkästen, Fensterleibungen, etc.) evaluiert. In diesen Anwendungsbereichen zielt die Dämmung aufgrund komplexer Geometrien auf den effizienten Einsatz von Dämmstoffen mit extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten ab.

Die Erkenntnisse aus den Anwendungsuntersuchungen wurden in die jeweiligen Entwicklungsstufen rückgekoppelt. Diese Entwicklungsstufen wurden solange durchlaufen bis validierte Funktionsmuster für die jeweiligen Anwendungen vorlagen, damit nach Projektende zügig mit der Endentwicklung eines serienreifen industriellen Herstellverfahrens von Sumfoam begonnen werden kann.

Gemäß der Berechnungen im Förderantrag können mit einer Anwendung von Sumfoam in VIPs jährlich mindestens 105 bis 273 t CO₂ und in den verschiedenen Dämmanwendungen zusätzlich zwischen 434 und 743 t CO₂ eingespart werden. Weiterhin besteht ein großes Übertragungspotenzial auf weitere Anwendungen. So kann - vorsichtig geschätzt - bei einer Anwendung von Sumfoam zur Gebäudedämmung von einem Einsparpotenzial von 12,5 GWh pro Jahr ausgegangen werden. Beim Transport von Kühlgütern auf der Straße oder zur See können Wärmemengen bis zu 50 MWh bzw. 155 MWh eingespart werden. Zusätzlich können weitere

positive Effekte neben der hervorragende und langlebige Isolierungseffizienz durch die wesentlich bessere Recyclingfähigkeit erzielt werden. Sumfoam als Granulat ist zu großen Teilen recycelbar und kann fast vollständig in den Produktionsprozess zurückgeführt werden ohne die Qualität zu beeinflussen. Neben den Wärmedämmapplikationen, welche auf die geringe Wärmeleitfähigkeit von Sumfoam abzielen, konnten weitere Anwendungsmöglichkeiten identifiziert werden. Aufgrund der sehr guten Kapillarität eignet sich das Material hervorragend im Bereich von hydrophoben Anwendung (z. B. als Bindemittel für unpolare Flüssigkeiten wie bspw. Öle und Diesel).

3. Hauptteil

Das Projekt wurde anlehnend an die im eingereichten Förderantrag definierten Arbeitspakete bearbeitet. Hierbei standen zunächst die Arbeitspakete 1 bis 3 im Fokus um die Produzierbarkeit und Anwendbarkeit von Sumfoam im Technikumsmaßstab zu validieren. Abbildung 3-1 gibt eine Übersicht über die einzelnen Arbeitspakete sowie deren Interaktion.

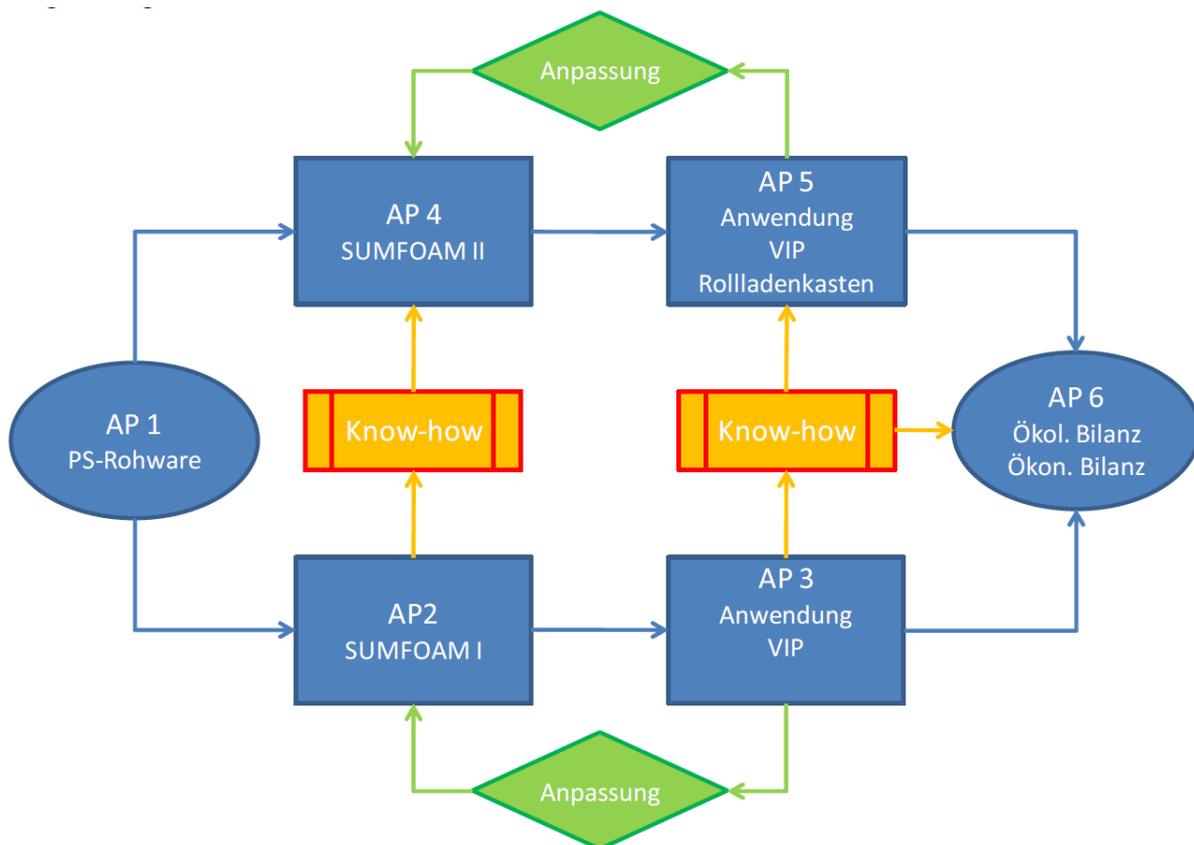


Abbildung 3-1: Übersicht über die einzelnen Arbeitspakete sowie deren Interaktion untereinander.

Im Arbeitspaket 1 wurde die Polymer-Rohware hergestellt, die für die Herstellung von Sumfoam in den Arbeitspaketen 2 und 4 benötigt wurde. Der in diesen Arbeitspaketen hergestellte Schaum wurde im Anschluss in den Arbeitspaketen 3 und 5 zu entsprechenden Produkten in den jeweiligen Anwendungen überführt. Abschließend wurde im Arbeitspaket 6 eine ökologische Bilanz von Sumfoam evaluiert.

3.1 Arbeitspaket 1: Herstellung der PS-Rohware

Wie ursprünglich in dem Förderantrag geplant wurde die Polymerisation der Polystyrol-Rohware sowohl im internen Technikum als auch bei externen Partnern durchgeführt.

Die Kapazitäten der internen Produktion wurden, abweichend von den Planungen im Projektantrag, deutlich erhöht. Diese Erweiterung der Produktionskapazitäten ermöglichte eine deutlich höhere Flexibilität innerhalb der Konfektionierung der Rohware, um eine Steigerung der Zyklusgeschwindigkeit innerhalb der Arbeitspakete 2 (Schaumherstellung) und 3 (Anwendung) ermöglichen zu können. Hierzu wurden die internen Kapazitäten zur Polymerherstellung durch den vermehrten Einsatz von Dr. Oberhoffer und Dr. Müller sowie durch die Einstellung von drei Mitarbeitern auf 450 EUR Basis deutlich erweitert. Die Inhouse-Polymerisation führte letztlich dazu, dass ein Engpass bei der Bereitstellung der Polymerrohware verhindert werden und gleichzeitig das eigene Know-how auf diesem Gebiet ausgebaut werden konnte. Daraus ergab sich aber auch eine Kostenverschiebung von Fremdleistungen zu Personalaufwand.

Dabei wurden die zunächst inhouse durchgeführten Versuche jeweils mit einem Volumen von 2 bis 6 Liter durchgeführt. Abbildung 3-2 zeigt ein typisches Polymerisationsexperiment in der internen Laborproduktion. Auf der linken Seite ist der Reaktionsansatz abgebildet, der sich in der Polymerisation befindet. Sobald die Polymerisationsreaktion beendet ist, wird das Polymer durch ein Sieb abgossen, wie in der rechten Abbildung zu sehen ist. Nach Trocknung des Polymerisats wird ein Polymer-Granulat erhalten, das als Rohware zur Sumfoam-Herstellung dient.

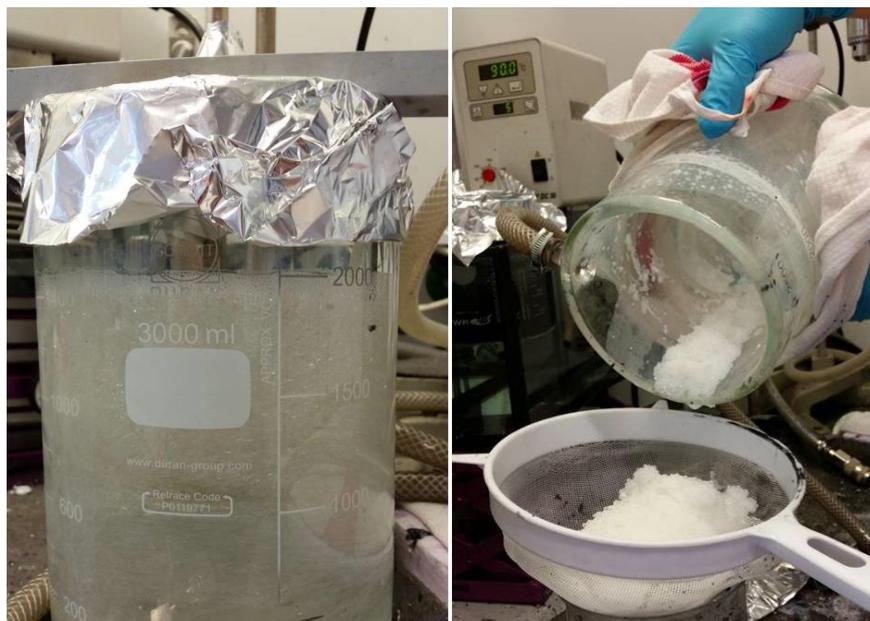


Abbildung 3-2: Links: SUMTEQ Polymerisationsreaktor. Mittels Suspensionspolymerisation wird das flüssige Monomer Polymer-Granulat überführt. Rechts: Nach Abschluss der Polymerisation wird das fertige Granulat abfiltriert gewaschen und getrocknet.

Der Polymerisationsprozess konnte anschließend von der internen Laborproduktion auf die Kleinproduktionsanlagen von Lohnfertigern übertragen werden. Innerhalb dieser Produktionsanlagen konnte der Polymerisationsprozess in einem ersten Schritt von einem 6 Liter Reaktor auf einen 60 L Reaktor übertragen werden. Aufgrund der Skalierung um den Faktor 10 wurden verschiedene Änderungen innerhalb der Prozessparameter vorgenommen. Die steigenden Gefäßvolumen verlangsamten den Wärmeübergang innerhalb der Polymerisation und mussten somit, gemäß der vorher entwickelten Reaktionsparameter, entsprechend angepasst werden.

In Abbildung 3-3 ist exemplarisch ein Schritt der Polymerisation abgebildet. Zu der vorgelegten wässrigen Stammlösung wird sukzessiv das Ausgangsmonomer unter Rühren zugegeben. Während der Reaktion trübt sich das Reaktionsgemisch durch das Voranschreiten der Polymerisation. Analog zu den Laborexperimenten wurde das fertige Polymer, wie in der Abbildung zu sehen, im Anschluss durch ein Sieb abfiltriert, gewaschen und getrocknet. Die Entleerung des Reaktors erfolgt hierbei über ein unten angebrachtes Ablaufsystem (Abbildung 3-3).



Abbildung 3-3: Links: Polymerisationsreaktor. Mittels Suspensionspolymerisation wird das flüssige Monomer in Polymer-Granulat überführt. Rechts: Nach Abschluss der Polymerisation wird das fertige Polymer-Granulat abfiltriert und im Anschluss gewaschen und getrocknet.

Nach dem Trocknen wird das Polymer-Granulat in entsprechende Gebinde abgefüllt und für die weitere Verarbeitung vorbereitet. In Abbildung 3-4 ist sowohl weißes (links) als auch schwarzes (rechts) Polymer-Granulat gezeigt. Die unterschiedliche Färbung entsteht durch Additive. Im Rahmen der Reduktion der Wärmeleitfähigkeit wurde mit beiden Materialien gearbeitet und verschiedene Tests durchgeführt. Als Resultat wurde während der Polymerisation das weiße Granulat als vielversprechendste Rohware evaluiert und findet daher in den weiteren Prozessschritten primär Anwendung. Hintergrund dieser Entscheidung ist die aufwendige Additivierung des Polymers vor der Polymerisation. Die Änderungen der Prozessparameter bewirken eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit, hindern aber dagegen die Flexibilität mit dem Umgang des Rohmaterials in den nachgelagerten Produktionsabfolgen. Die Additivierung nach der Vermahlung (Kapitel 2.5) bewirkt nochmals eine Steigerung der Performance Werte und wird daher bevorzugt als Pulver in den AP 3, AP 4 und AP 5 verwendet.



Abbildung 3-4: Links: Weißes Polymer-Granulat, das externhergestellt wurde. Rechts: Schwarzes Polymer-Granulat, das während der Polymerisation mit einem kohlenstoffbasierten Infrarottrübungsmittel versetzt wurde.

Sowohl bei externen Lohnfertigern als auch in der Inhouse-Produktion konnten ausreichend Polymere hergestellt werden, um sämtliche Entwicklungsschleifen in den Arbeitspaketen 2, 3 und 4 durchzuführen. Darüber hinaus war es bereits möglich, eine Polymerkonfektionierung zu identifizieren, die für die Anwendung in Vakuum-Isolations-Paneelen (VIPs) optimal ist und den gesetzten Anforderungen entspricht. Um den Mengenanforderungen während des AP 5 nachzukommen wird wie im Kapitel 2.4 erwähnt, eine größere Technikumsanlage entstehen, um weiteren Produktpilotierungen und Nachfragen in der Zukunft nachgehen zu können.

3.2 Arbeitspaket 2: Herstellung von Sumfoam

Abweichend zu dem ursprünglichen Antrag wurden die Schäumversuche nicht ausschließlich bei der Fa. NATECO₂ sondern zusätzlich bei einem weiteren Lohnfertiger im Bereich der Naturstoffextraktion durchgeführt. Grundlage hierfür waren zusätzliche Kapazitäten sowie ein günstigerer Angebotspreis für die Schäumversuche auf vergleichbaren Anlagen. Allerdings ist die Anlagenverfügbarkeit bei externen Produktionspartnern beschränkt, so dass mittlerweile auch wieder auf die NATECO₂ als Zulieferer zurück gegriffen wurde. Dies erhöht die Flexibilität und stellt zum anderen ausreichende Anlagenkapazitäten sicher. Bei beiden Unternehmen konnte die Skalierung dabei erfolgreich getestet und umgesetzt werden.

Abbildung 3-9 zeigt eine Schäumenanlage im Pilotmaßstab. Der Hochdruckbehälter mit dem Polymer-Granulat gefüllt und mit CO₂ bei Drücken von über 70 bar beaufschlagt. Nach einer bestimmten Zeit wird der Druck wieder auf Atmosphärendruck entspannt, wodurch es zur Schaumbildung im Polymer kommt. Der enorme Umweltvorteil durch die Schäumung mit CO₂ entsteht dadurch, dass das CO₂ aus der Luft gewonnen wird und somit keine direkten CO₂-Emissionen durch den Schäumprozess entstehen.

Für die Herstellung von Sumfoam wurde ein spezieller Schäumkorb entwickelt, um die bestehenden Anlagen der genannten Unternehmen nutzen zu können. Dabei wird das Polymer auf die unterschiedlichen Etagen des Schäumkorbs verteilt und die Ausbringungsmenge durch mehrere Etagen erhöht.

Abbildung 3-6 zeigt eine technische Darstellung des Aufbaus. Zwischen den einzelnen mit Polymer gefüllten Etagen sind zusätzlich Zwischenräume installiert, die Drückeinschlüsse während der Expansion verhindern. Die Zwischenböden bestehen aus Siebplatten, so dass ein konstanter und gleichmäßiger CO₂-Strom gewährleistet wird. Insgesamt besteht der Korb aus bis zu 15 solcher Etagen.

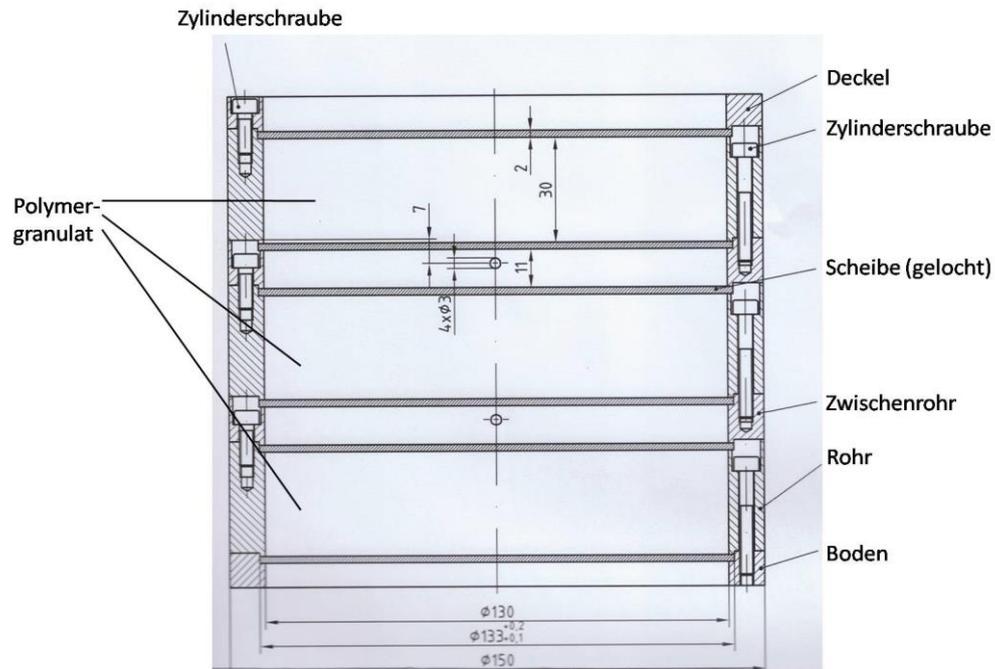


Abbildung 3-5: Technische Zeichnung des Einsatzkorbes zur Schäumung von Sumfoam auf bestehenden CO₂-Anlagen.

Wenn der Einsatzkorb vollständig mit Polymer befüllt und zusammengebaut ist, wird er in den Einsatz für die CO₂-Hochdruckanlage gebracht und anschließend in den Druckbehälter überführt. Abbildung 3-7 zeigt den mit Polymer befüllten Einsatzkorb vor der Schäumung. Auf der rechten Seite wird der Einsatzkorb nach erfolgreicher Schäumung aus der Anlage entnommen. Anschließend wird der Einsatzkorb wieder zu einzelnen Etagen zerlegt, das aufgeschäumte Polymer bzw. Schaumgranulat (Sumfoam) Polymerschaum entnommen und für den nächsten Schäumversuch befüllt.



Abbildung 3-6: Links: Mit Polymer-Rohmaterial befüllter Sumfoam-Einsatzkorb vor der Schäumung. Rechts: Entnahme des Einsatzkorbes aus dem CO₂-Druckbehälter.

In Abbildung 3-8 ist eine Auswahl an resultierenden Sumfoam-Proben gezeigt. Wie deutlich zu erkennen ist, konnten sowohl geschwärzte als auch Polymere ohne zusätzliche Additivierung gleichermaßen zum Schaum weiterverarbeitet werden.

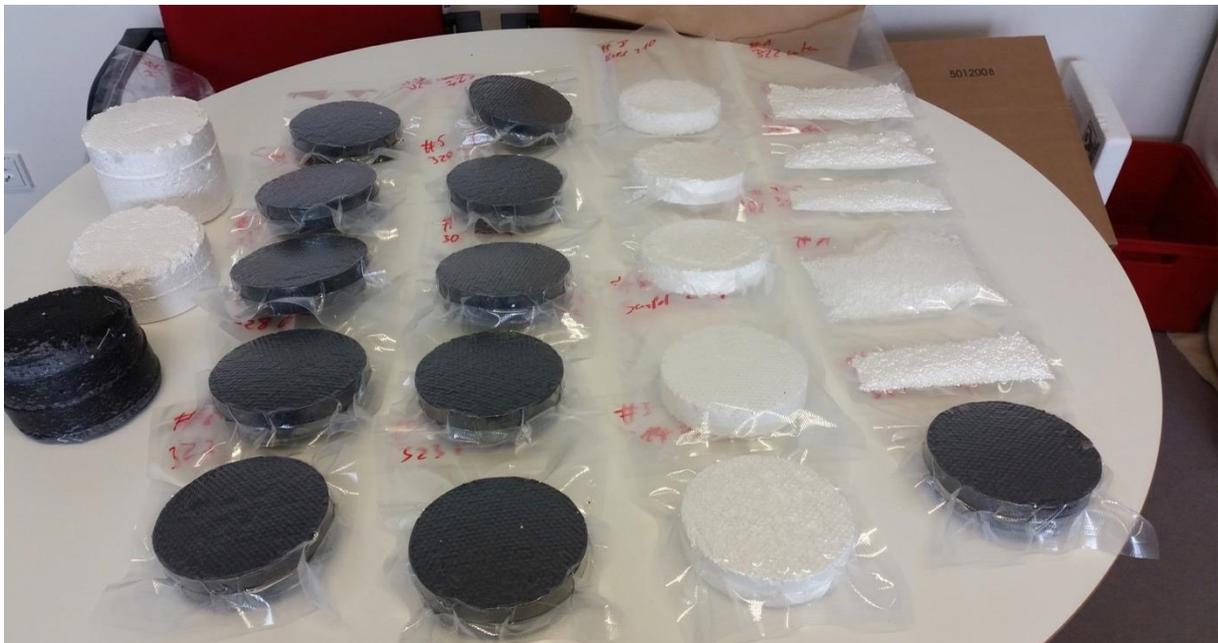


Abbildung 3-7: Auswahl an Sumfoam-Mustern, die während einer Schäumreihe hergestellt wurden. Hierfür wurden sowohl weiße als auch schwarze Polymere verwendet. Zudem wurde das Material sowohl in Form von Platten als auch Granulat hergestellt, um somit eine möglichst hohe Formflexibilität in der Anwendung zu gewährleisten.

Die in Abbildung 3-8 gezeigten Sumfoam-Muster können nun für Performance und Anwendungstests in Arbeitspaket 3 verwendet werden. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, verbessert die Additivierung durch ein kohlenstoffbasiertes Infrarot-Trübungsmittel zwar die Isolationsperformance, aber hemmt die Flexibilität innerhalb der Produktgestaltung. Parallel zu den Schäumreihen bei den Lohnfertigern wurden vertiefte Gespräche mit Firmen geführt, die entsprechende CO₂-Schäumenanlagen herstellen und/oder betreiben. Die Fa. ThyssenKrupp UHDE hat signalisiert, dass die Konstruktion einer Sumfoam-spezifischen Anlage nicht nur technisch möglich, sondern auch noch deutlich effizienter sein würde, als die bisher verwendeten Anlagen. Zusammen mit Produktionspartnern als auch der NATECO₂ konnten verschiedene Szenarien bzgl. der Anlagenkonstruktion durchgeführt werden, um spezifische Parameter und Aufbauten für die Planung einer eigenen Anlage evaluieren zu können.



Abbildung 3-8: Pilotanlage für Hochdruck-CO₂-Prozesse. Auf dieser Anlage können die für eine Anlagenkonstruktion relevanten Schäumparameter getestet werden.

Zusammen mit der Fa. ThyssenKrupp UHDE wurde im Verlauf der erfolgreichen Technologieskalierung eine eigene Anlage in Planung gegeben. Diese soll ein Reaktorvolumen von zwei mal 1000 Litern besitzen und befindet sich zum aktuellen Zeitpunkt in der Planung.

3.3 Arbeitspaket 3: Anwendung in VIPs

Die in Arbeitspaket 2 hergestellten Sumfoam Materialien wurden direkt zur Anwendungsvalidierung und für Performancetests in VIPs verwendet. Mit laufendem Projektfortschritt wurde die Dämmperformance kontinuierlich verbessert, so dass der anvisierte Zielwert von $\lambda = 7$ mW/m·K sogar deutlich unterschritten werden konnte. Abbildung 3-10 zeigt die aktuelle Entwicklung der Dämmperformance über die Zeit des bisherigen Projekts (Anm.: Kleinere λ -Werte bedeuten einen geringeren Wärmefluss und somit eine höhere Dämmperformance). Zum Vergleich: Eine herkömmliche Styropor-Platte hat einen λ -Wert von etwa 35 mW/m·K, was wiederum bedeutet, dass mit einem VIP aus Sumfoam mit $\lambda < 5$ mW/m·K auf ein Siebtel des Volumens dieselbe Isolationsleistung erzielt wird.

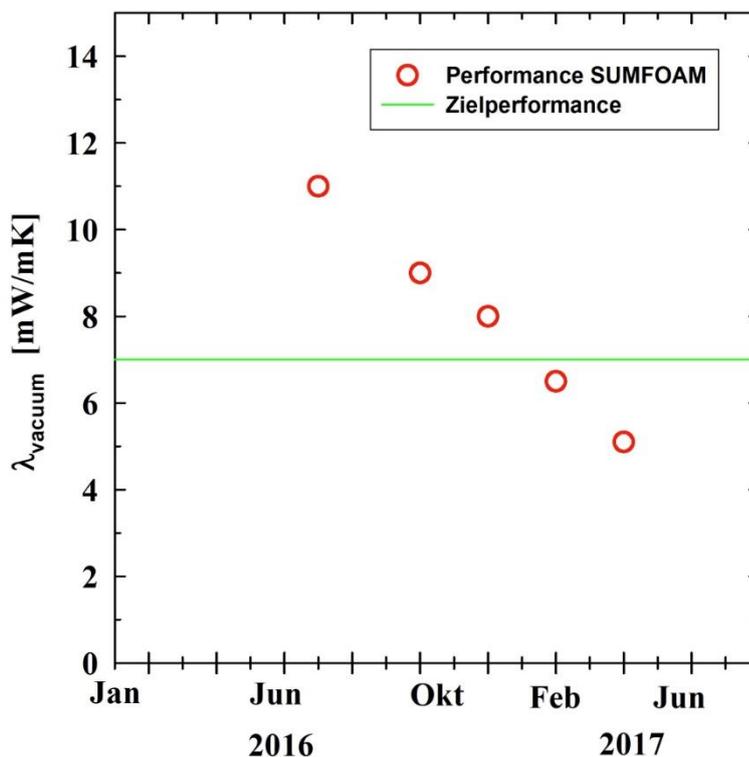


Abbildung 3-9: Entwicklung der Dämmperformance im Vakuum über die gesamte Projektlaufzeit. Bereits nach 6 Monaten konnte die Zielperformance erreicht werden.

Nach Erreichung der oben gezeigten Dämmperformance, wurde Sumfoam zusätzlich hinsichtlich der Dichte optimiert. Die Dichte ist nach der Dämmperformance ein zentraler Kennwert von VIPs, da insbesondere in Transportanwendungen eine Gewichtsreduzierung der Dämmung große Vorteile bringt. Die Dichte von dem Referenzmaterial Silica liegt bei etwa 200 kg/m³. Über mehrere Versuchsreihen war es möglich die Dichte von Sumfoam-VIPs sukzessive auf 115 kg/m³ zu reduzieren, so dass diese lediglich etwas mehr als die Hälfte wiegen im Vergleich zu Referenzprodukten.

SUMFOAM-VIP Performance

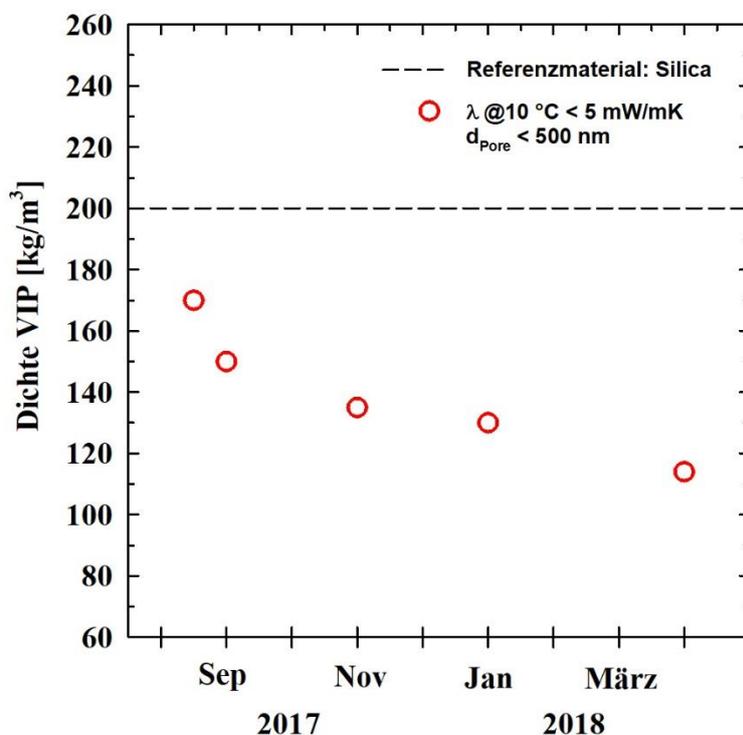


Abbildung 3-10: Aktuelle Entwicklung der Dichtepformance im Vakuum (Einsatzgebiet VIPs)

Aufgrund der positiven Entwicklung der Performance konnte bereits frühzeitig damit begonnen werden weitere Parameter zu optimieren. Hierbei stand insbesondere die Form der Panneele im Fokus. Zur Herstellung von kantige Platten-VIPs wurden zunächst zwei Strategien verfolgt.

Zum einen wurden die geschäumten Sumfoam-Platten mit herkömmlichem Schneide- und Schleifwerkzeug in plane und kantige Platten gebracht. Ein solches Muster ist in Abbildung

3-12 (links) gezeigt. Alternativ hierzu wurde zunächst freies Granulat geschäumt, das anschließend durch Druck- und Temperatureinwirkung in Form gepresst wurde (vgl. Abbildung 3-12, rechts).

Beide Verfahren liefern eine stabile und passgenaue Form des Sumfoam-Körpers. Ein anschließendes Verpressen hat jedoch den enormen Vorteil, dass die Geometrie des resultierenden Körpers frei von der Geometrie des Einsatzkorbes zur CO₂-Schäumung ist. Somit sind beliebige Plattenstärken oder auch komplexere Formteilgeometrien möglich.

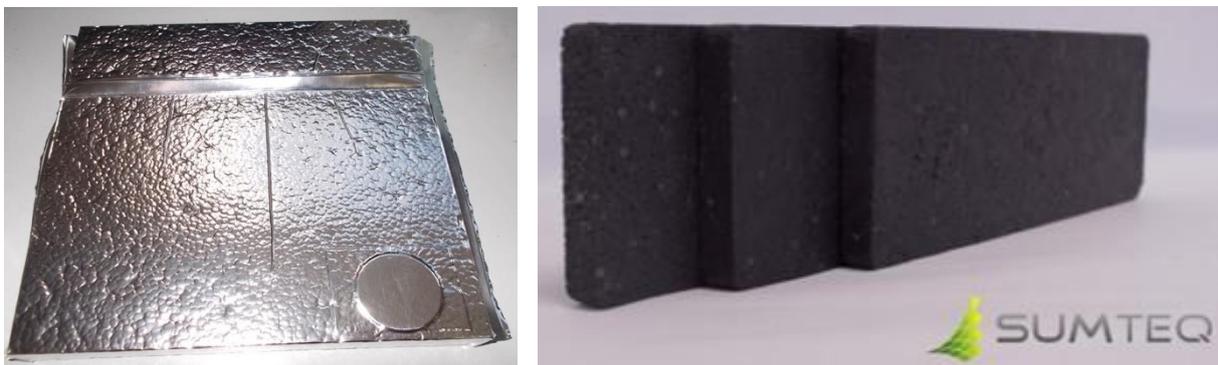


Abbildung 3-11: Links: Kantes Platten-VIP mit Sumfoam als Füllkern. Die Geometrie wurde durch einen nachträglichen Zuschnitt und Schliff erzielt. Rechts: Mittels Druck- und Temperatureinwirkung wurde aus Sumfoam-Granulat eine Platte hergestellt. Vorteil dieser Methode ist die vollständige Formflexibilität unabhängig von der Geometrie des Einsatzkorbes zur Schäumung.

Die endgültigen Ergebnisse haben allerdings gezeigt, dass es sinnvoll ist, das Material in einem Zwischenschritt fein zu vermahlen. Auf diese Weise kann der Evakuierungsprozess des Vakuumpaneels noch einmal deutlich beschleunigt werden. Darüber hinaus wird durch die Verwendung von Sumfoam als Pulver analog zum Granulat eine vollständige Formflexibilität ermöglicht.

Die Weiterverarbeitung zu einem Sumfoam Schaumpulver erfolgte in Zusammenarbeit mit einem Lohnvermähler, der über entsprechende Mühlen und Know-how auf diesem Gebiet verfügt. In Abbildung 3-13 ist sowohl das Ausgangsgranulat (links) als auch das gemahlene Schaumpulver (Mitte) gezeigt. Zudem wurde das Pulver, wie in Abbildung 3-13 (rechts) zu sehen ist, in einem Vlies auf eine rechteckige Form gepresst. Dieser Schritt dient als Vorbereitung zur Herstellung des fertigen VIPs.



Abbildung 3-12: Aus dem Sumfoam-Granulat (links) wurde in einem weiteren Verarbeitungsschritt ein feines Pulver (Mitte) hergestellt, welches die Performance hinsichtlich der Evakuierbarkeit im VIP deutlich verbessert. Rechts abgebildet ist die vorgepresste Form des Pulvers in einem Vlies, welches als Vorbereitung zur finalen VIP-Herstellung dient.

Entscheidend für die Weiterverarbeitungsmethode als Pulver waren die Versuchsreihen mit der va-Q-tec AG. Die verpressten Platten steigern die Performance nicht nur hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit, sondern zeichnen sich durch einen schnellen Evakuationsprozess aus und mindern somit die Durchlaufzeiten während der Herstellung der Paneele. Durch die im Arbeitspaket 1 entstandenen Erkenntnisse wurde die Einfärbung des Granulats in einen späteren Prozessschritt überführt und deshalb nach der kryogenen Vermahlung vorgenommen. Damit kann nochmals die Performance innerhalb der Wärmedämmleistung gesteigert und die Flexibilität auf Kundenanforderungen erhöht werden.

3.4 Arbeitspaket 4: Herstellung von Sumfoam II

Die erfolgreiche und vorzeitige Realisierung der Arbeitspakete 1 bis 3 ermöglichte eine intensivere Umsetzung innerhalb der Skalierungsstrategie. Die gewonnenen Kapazitäten konnten innerhalb umfangreicher Skalierungsexperimente eingesetzt werden, um sowohl produktionstechnische Einflüsse als auch anwendungsorientierte Erkenntnisse und Maßnahmen zu examinieren.

Bei verschiedenen Schäumversuchen in weiteren Schritten die Schäumung innerhalb verschiedener Reaktoren bis zu einem Faktor von 200 skaliert, um die Prozessstabilität während der Skalierung auf industrielle Maßstäbe zu evaluieren. Die gewonnenen Ergebnisse validieren das

Ziel der Prozessdurchführung auf Technikumsmaßstäbe und bestätigen damit die vorher beobachteten Prozesskenntnisse während des Laborbetriebs. Innerhalb der aktuellen Skalierungsphase wurden abschließend zudem auch Versuche auf einem 1000 Liter Reaktor erfolgreich durchgeführt, was wiederum einem industriellen Produktionsmaßstab gleich kommt. Somit konnte nicht nur eine erfolgreiche Übertragung auf Technikumsverhältnisse nachgewiesen werden, sondern auch ein erster Nachweise der industriellen Produzierbarkeit erbracht werden, was letztlich über das eigentliche Ziel dieses Förderprojektes hinausging. Für diese Skalierungsstufen der Sumfoam-Herstellung (Arbeitspaket 4) wurden angepasste Einsatzkörbe mit einem deutlich größeren Volumen konstruiert, der passgenau mit der nächst größeren CO₂-Hochdruckanlage ist.



Abbildung 3-13: Skalierungsstrategie innerhalb der Evaluierung der Prozessstabilität. Hinsichtlich der verschiedenen Experimenten konnte eine erfolgreiche Umsetzung im Technikumsmaßstab bestätigt werden. Die Skalierung wurde erfolgreich um den Faktor > 300 durchgeführt.

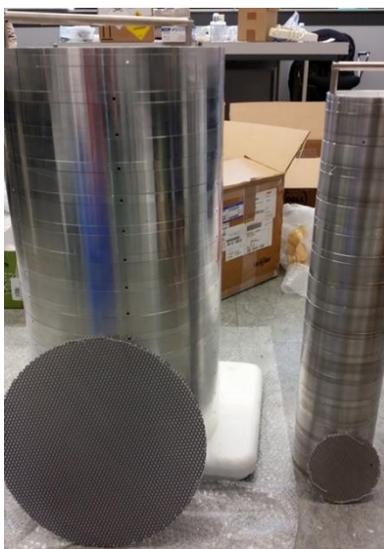


Abbildung 3-14: Vergleich der beiden Einsatzkörbe. Der rechte Einsatzkorb wurde bisher zur Schaumherstellung auf der Technikumsanlage verwendet. Der linke Schäumkorb wurde basierend auf den bisher erlangten Erfahrungen optimiert und wird für die weitere Skalierung verwendet.

Aufgrund der Skalierung um die aufgezeigten Größenordnungen, wurden verschiedene Änderungen innerhalb der Prozessparameter vorgenommen. Grundsätzlich zeichnete sich während dieser Skalierung kein abweichender Trend innerhalb der Herstellungsabläufe und Qualität des Schaums ab. Für die Umsetzung benötigt es die entsprechende Ausrüstung, welche mit zunehmender Schäumkapazität ansteigt. Die Aufgaben und Herausforderungen dieser Anlagen wurden bereits umfangreich erprobt und konnten alle zielführend umgesetzt werden. Die Zielsetzung dabei war es mit möglichst geringem Aufwand ausreichend Material für die Herstellung von Sumfoam der Stufe 2 im Arbeitspaket 5 bereitzustellen.



Abbildung 3-15: Polymerisationsreaktor, für die nächste Skalierungsstufe. Links ist eine Außenansicht des Reaktors mit dem entsprechendem Rührwerk rechts abgebildet.

Sämtliche Erkenntnisse, die auf der Technikums- als auch abschließend auf der Industrieanlage gesammelt werden konnten, sowie das fachliche Feedback, welches zusammen mit der Zusammenarbeit mit den Lohnfertigern und Fa. NATECO₂ entstanden ist, sind in die Konstruktion einer eigenen Anlage mit eingeflossen und bilden eine essenzielle Voraussetzung für die geplante Industrialisierung der SUMTEQ-Technologie.

3.5 Arbeitspaket 5: Validierung der Anwendungsgebiete

Grundsätzlich konnten die Meilensteine erreicht werden, um die Zielerreichung des Vorhabens zu gewährleisten. Im Teilbereich von AP 5, wurde der Fokus auf einen allgemeineren Ansatz zur Isolierung von Nischen in der Gebäudefassade gewählt. So haben die ersten Tests gezeigt, dass das Material insbesondere in weiterverarbeiteten Formen (Pulver, Platten oder Kombinationen) großes Potenzial hat. Zumal hier eine nachträgliche Additivierung des Schaums mit bspw. Flammenschutzmittel durchgeführt werden kann, was zurzeit mit herkömmlichen Dämmstoffen nicht möglich ist. Insbesondere sind hier die zusätzlichen Anwendungsgebiete Dämmputze, Montagezylinder und sämtliche Isolierungen rund um das Fenster zu nennen.

Für die weitere Anwendungsvalidierung ist insbesondere die nachträgliche Formgebung des Sumfoam-Schaumgranulats relevant, da sowohl für die Anwendung in VIPs als auch für die Anwendung ohne Vakuum in Nischen Dämmanwendungen eine flexible Formgestaltung enorm vorteilhaft ist. Zudem wurden neben dem im Förderantrag genannten Anwendungspartner weitere Firmen aus der Dämmstoffbranche kontaktiert, um einen schnellen und breiten Markteintritt weiter vorzubereiten. Mit diesen wurden verschiedene Produkte aus Formteilen entwickelt und getestet. Aufgrund der derzeitigen geringen Produktionskapazitäten werden weitere Pilotierungen nach der Einführung einer Technikumsanlage verfolgt. Darüber hinaus wurden weitere Produktanwendungen hinsichtlich der Gebäudedämmung mit verschiedenen Formteilen genauer evaluiert.

Mit einem großen deutschen Automobilzulieferer wurde zudem begonnen die Anwendungsmöglichkeiten von Sumfoam innerhalb der elektrifizierten Mobilität zu prüfen. In diesem Zusammenhang steht die SUMTEQ im engen Kontakt um zukünftig Dämm Lösungen für Batteriekomponenten zu entwickeln. Im Rahmen dieses Projektes wurden erste Materialien zur Verfügung gestellt, um zukünftige Dämm Lösungen für Batteriekomponenten zu entwickeln.

Im Rahmen weiterer Anwendungs-Evaluierungen wurden zusammen mit Partnern aus der Industrie ein Hochleistungsdämmputz mit Sumfoam hergestellt. Dieser weist im Rahmen ver-

schiedener Messungen ein großes Potenzial für zukünftige Anwendungen im Bereich der Gebäudedämmputze auf und dient als Grundlage für zukünftige Produktentwicklungen. Eine umfangreichere Pilotierung konnte aufgrund der aktuell nicht ausreichenden Produktionskapazitäten noch nicht weiter verfolgt werden und wird nach der erfolgreichen Umsetzung einer größeren Technikumsanlage wieder aufgenommen. Diese Anstrengungen sollen darüber hinaus vertieft und intensiviert werden, um möglichst schnelle ein umfangreiches Produktportfolio zu entwickeln.



Abbildung 3-16: Sumfoam als additives Material bei Dämmputzen.

3.6 Arbeitspaket 6: Ökologische und ökonomische Bilanz

Wie im Förderantrag vorgesehen wurde eine ökologische sowie eine ökonomische Bilanz für Sumfoam erstellt. Das Ergebnis ist eine vergleichende ökologische Bewertung für ausgewählte Anwendungsgebiete als Vorarbeit für eine ggf. nach Projektende zu erstellende EPD (Environmental Product Declaration). Die EPD-Erstellung selbst ist kein Bestandteil dieses Projektes. Innerhalb der Bilanz wird die ökologische Bewertung der Umweltwirkungen von Sumfoam auf Basis der Baustoff-Neuentwicklung mittels einer vergleichenden Ökobilanzstudie durchgeführt. Die ökologische Bewertung soll die Umweltauswirkungen der neu entwickelten Sumfoam-Technologie im Vergleich zum bestehenden Stand der Technik am Markt zusammenfassen. Für die Erfassung möglicher Auswirkungen, in Bezug auf die Einführung von Sumfoam als Wärmedämmmaterial, wurden möglichst ähnliche Anwendungsprodukte als Bezugssystem gewählt.

Materialeitig gesehen ist Sumfoam eine Variante der weitverbreiteten Polystyrol-Dämmstoffe. Auf dem Markt erhältlich sind vor allem EPS (expandiertes Polystyrol) und XPS (extrudiertes Polystyrol), wobei EPS einen deutlich höheren Marktanteil besitzt. Die beiden Produkte werden mit unterschiedlichen 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. Diese Dämmmaterialien erreichen i. d. R. eine Wärmeleitfähigkeit von 35 bis 40 mW/m·K und werden daher nicht zu den Hochleistungsdämmstoffen gezählt (ab ca. 30 mW/m·K).

Vor dem Hintergrund Sumfoam als zukünftiges Hochleistungsdämmmaterial zu vertreiben, wurde als zweites Bezugsprodukt Aerogele gewählt. Aerogel, auch Nanogel bezeichnet, gilt als marktreifer Hochleistungsdämmstoff. Je nach Anwendungsform (Schüttgut, Platten) liegt die Wärmeleitfähigkeit von Aerogel zwischen 14 und 21 mW/m·K. Im Vakuum (VIP) werden von Aerogel 8 mW/m·K erreicht. Da Aerogel hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit Sumfoam-Werten nahe kommt und für ein luftgefülltes Material hier den höchsten Stand der Technik definiert sowie hinsichtlich des Produktionswegs (Gel-Erzeugung und anschließende überkritische Trocknung) dem Verfahren von SUMTEQ am ähnlichsten ist, kann es als Referenztechnologie für die Ökobilanz herangezogen werden.

Einsatzstoff	Menge der Einsatzstoffe pro kg	Treibhauspotenzial der Einsatzrohstoffe (GWP)	GWP des Verbrauchs pro kg
Polystyrol (Granulat ohne Weichmacher)	1 kg/kg	2,97 kg CO ₂ /kg	2,97 kg CO ₂ /kg
CO ₂ (flüssig)	0,013 kg/kg	0,78 kg CO ₂ /kg	0,010 kg CO ₂ /kg
Aceton (flüssig)	0,0033 kg/kg	2,23 kg CO ₂ /kg	0,0074 kg CO ₂ /kg
Elektrische Energie (0,045 CO ₂ -Äquivalent pro kWh)	2,58 kWh/kg	0,045 kg CO ₂ /kg	0,116 kg CO ₂ /kg
Wärmeenergie	6,96 kWh/kg	0,027 kg CO ₂ /kg	0,188 kg CO ₂ /kg
SUMME	3,291 kg CO₂ Äquivalent pro kg Sumfoam		

Tabelle 3-1: Gesamttreibhauspotenzial von Sumfoam mit Anteilen der einzelnen Einflüsse

Die nachfolgenden Tabellen 3-2 und 3-3 geben die wichtigsten Werte für Sumfoam und die relevanten Vergleichsprodukte in Anwendungen im Vakuum bzw. in Normalatmosphäre an. Anzumerken ist, dass Aerogele auch in Zukunft nicht für Vakuum-Isolations-Paneele genutzt werden, da die Kostenstrukturen dies nicht zulassen. Zum Vergleich sind hier trotzdem theoretische Vergleichswerte angegeben. In VIPs kommt anstelle von Aerogel überwiegend pyrogenes Siliziumdioxid zum Einsatz, dieses ist aufgrund seiner sehr ausgeprägten Hygroskopie allerdings nicht dazu geeignet ohne Isolierung eingesetzt zu werden. Infolgedessen wird pyrogenes SiO₂ als Dämmmaterial ausschließlich in VIP verwendet und eine Angabe der Kennwerte unter normaler Atmosphäre ist nicht möglich. EPS hingegen ist für den Einsatz im Vakuum nicht geeignet, da die Zellstabilität hierfür nicht ausreicht, deshalb können keine Kennwerte für EPS im Vakuum genannt werden. Der Vergleich zeigt insgesamt die wichtigsten Materialunterschiede und das jeweilige GWP (Treibhauspotenzial/Global Warming Potenzial) in kg CO₂ pro Masse bzw. pro Volumen.

Eigenschaft im Vakuum	Sumfoam		SiO ₂		Aerogel	
	Wert	100%	Wert	%	Wert	%
Wärmeleitfähigkeit (λ)	5 mW/m·K	100%	4 mW/m·K	80 %	6 mW/m·K	120 %
Wärmewiderstand (R_{th})	0,2 K/mW	100%	0,25 K/mW	125%	0,167 K/mW	83 %
GWP pro Masse	3,37 kg/kg	100%	8,88 kg/kg	264%	7,17 kg/kg	212 %
Dichte	115 kg/m ³		190 kg/m ³		175 kg/m ³	
GWP pro Volumen	387,55 kg/m ³	100%	1.688 kg/m ³	436 %	1.255 kg/m ³	324 %

Tabelle 3-2: Vergleich der Dämmeigenschaften im Vakuum (Einsatz in VIPs)

Eigenschaft bei Normaldruck	Sumfoam		Aerogel		EPS	
	Wert	100 %	Wert	%	Wert	%
Wärmeleitfähigkeit (λ)	20 mW/m·K	100 %	18 mW/m·K	90 %	40 mW/m·K	200 %
Wärmewiderstand (R_{th})	0,05 K/mW	100 %	0,056 K/mW	112 %	0,025 K/mW	50 %
GWP pro Masse	3,37 kg/kg	100 %	7,17 kg/kg	212 %	2,73 kg/kg	81 %
Dichte	115 kg/m ³		175 kg/m ³		22,5 kg/m ³	
GWP pro Volumen	387,55 kg/m ³	100 %	1.255 kg/m ³	328 %	61,4 kg/m ³	16 %

Tabelle 3-3: Vergleich der Dämmeigenschaften in normaler Atmosphäre (Einsatz in z. B. Dämmplatten oder Dämmputzen)

Der Vergleich des GWP bei der Herstellung fällt somit deutlich pro dem neuen Dämmstoff Sumfoam aus. Sowohl auf die Masse als auch auf das Volumen bezogen ist das Treibhauspotenzial wesentlich geringer. Dabei wird eine vergleichbare bis bessere Wärmeleitfähigkeit erreicht, wodurch auch das Treibhauspotenzial bezogen auf die Dämmperformance deutlich zugunsten von Sumfoam ausfällt. Der Vergleich mit EPS zeigt zudem, dass zwar das Sechsfache an GWP bezogen auf das Volumen erzeugt, aber auch ein Vielfaches der Dämmleistung erreicht wird. Dabei ist aber anzumerken, dass die heute eingesetzten Verfahren zur Herstellung von EPS ca. 50 Jahre lang energetisch optimiert wurden. Es ist generell damit zu rechnen, dass mit steigender Erfahrung und technischer Weiterentwicklung das Produktionsverfahren von Sumfoam ebenfalls energetisch optimiert werden und damit das Treibhauspotenzial verringert werden kann.

Hinsichtlich der ökonomischen Bewertung konnte gemeinsam mit Produktionspartnern und Anlagenbauern validiert werden, dass Sumfoam ab einer jährlichen Produktionskapazität im mittleren fünfstelligen Kubikmeterbereich zu mehr als wettbewerbsfähigen Kosten gegenüber bereits im Hochleistungsdämmstoffbereich verwendete Vergleichsmaterialien hergestellt werden kann. Als Beispiel für die Kostenstruktur von Konkurrenzprodukten dienen u.a. die Aerogele. Dabei liegen auf Basis der aktuellen Kalkulationen die Herstellkosten von Sumfoam bei lediglich 35 – 45 % ggü. den Herstellkosten von Aerogelen [Asp16]. Die Gesamtherstellkosten von Sumfoam liegen somit noch unter den Einstandspreisen der Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Aerogelen. Mit Einbezug der geringeren Produktionszykluszeit bei vergleichbaren CO₂-Technologien und dem Vergleich mit den höheren Jahreskapazitäten von Aerogelen besitzt Sumfoam somit durch weitere Skaleneffekte enorme Potenziale und Wettbewerbsvorteile gegenüber den bereits etablierten Hochleistungsdämmstoffen.

Das geplante Produktionsvolumen bildet zugleich der Schwelle für die Wirtschaftlichkeit einer kompletten Produktion, und entspricht lediglich einem minimalen Bruchteil des europäischen Dämmstoffgesamtmarktes. Damit wird Potenzial weiterer Skalierungsstufen noch einmal verdeutlicht, vergleicht man das geplante Produktionsvolumen mit dem europäischen Gesamtmarkt von > 250 Mio. cbm/Jahr [Mar17].. Extrapolationen der Kostenkalkulationen haben ergeben, dass bei einer weiteren Skalierung um den Faktor 20-30 eine weitere Kostensenkung von bis zu 60 – 70 % erzielt werden können.

3.7 Projektkosten und finanzielle Projektabwicklung

Um die genannten Arbeitspakete, Ergebnisse und Ziele in messbaren Fakten darzulegen, werden in Tabelle 3-4 die Gesamtkosten des Projektes nochmals aufgeführt und die tatsächlich angefallenen Aufwendungen den bewilligten Zuschüssen gegenübergestellt und teils unvermeidliche Abweichungen erläutert.

Insgesamt summierten sich für den Zeitraum Juli 2016 bis März 2018 die Gesamtprojektkosten auf 490 TEUR. Dem Gegenüber stand ein ursprünglich budgetiertes Projektvolumen von 402 TEUR. Der Mehraufwand konnte wie der ursprünglich vorgesehene Eigenanteil durch Eigenmittel abgedeckt werden.

Kostenart	07/2016 – 03/2018	Bewilligt Gesamt
Bruttoarbeitsentgelte	175.467 €	120.564 €
Gemeinkosten	208.981 €	143.592 €
Sachkosten	21.395 €	10.000 €
Fremdleistungen	62.317 €	107.743 €
Reisekosten	21.737 €	19.872 €
Gesamtkosten	489.896 €	401.771 €
Abruf	180.756 €	180.395 €
Arbeitsstunden (h)	7.151	4.800

Tabelle 3-4: Kosten- und Finanzplan des Gesamtprojektes

Die Mehraufwendungen innerhalb der Arbeitsentgelte, Gemein- und Sachkosten resultieren aus den Änderungsmaßnahmen aus dem AP 1. Die Intensivierung der internen Produktion hatte zur Folge, dass die geplanten Fremdleistungen sukzessive auf andere Kostenarten umgeschichtet wurden, einhergehend mit dem daraus resultierenden erhöhten Aufkommen an Arbeitsstunden. Die Herstellung des Polymer-Ausgangsmaterials wurde nach externen Experimenten auf eine inhouse Herstellung bei SUMTEQ verlagert, um eine schnellere und effizientere Konfektionierung der Polymer-Rohware zu gewährleisten. Hierzu wurden die internen Kapazitäten zur Polymerherstellung durch den vermehrten Einsatz von Dr. Oberhoffer und Dr. Müller sowie durch die Einstellung von drei Mitarbeitern auf 450 EUR Basis deutlich erweitert. Die Inhouse-Polymerisation führte letztlich dazu, dass ein Engpass bei der Bereitstellung der

Polymerrohware verhindert werden konnte und gleichzeitig das eigene Know-how auf diesem Gebiet erweitert wurde. Daraus ergab sich aber auch, dass sich eine Kostenverschiebung von Fremdleistungen zu Personalaufwand ergeben hat. Die Bereitstellung von ausreichender Menge an PS-Rohware für die darauf aufbauenden Arbeitspakete konnte somit sicher gestellt werden. Zudem war ursprünglich geplant, dass eine weitere promovierte Diplom-Chemikerin auf dem Projekt arbeitet. Die Mitarbeiterin wurde allerdings intern in einem anderen Projekt eingesetzt, und durch erhöhten Projekteinsatz von Dr. Oberhoffer und Dr. Müller erhöht kompensiert. Innerhalb der weiteren Kostenarten konnte man sich weitestgehend in dem vorgesehenen Budget bewegen. Die höheren Gesamtprojektkosten liegen somit weitestgehend in dem gestiegenen Personalaufwand und einhergehend höher ausgefallenen Gemeinkosten begründet.

3.8 Außendarstellung und Öffentlichkeitsarbeit

Im Laufe des Förderprojektes hat SUMTEQ zahlreiche Veranstaltungen besucht und Vorträge gehalten, um die neuartige Technologie zur Herstellung von Hochleistungsdämmstoffen mit einem breiten Fachpublikum zu diskutieren und das Förderprojekt und dessen Inhalt vorzustellen. Hierzu wurden folgende Veranstaltungen besucht:



Die Tagung der "International Society for Advancement of Supercritical Fluids" (ISASF) ist eine Veranstaltung bei der sämtliche Anwendungsgebiete der CO₂-Hochdrucktechnologie im Fokus stehen. Im Rahmen der Tagung konnte SUMTEQ das neuartige Verfahren mit dem Fachpublikum diskutieren und weitere Potenziale im Herstellungsprozess evaluieren.



Die "Global Insulation Conference" ist die größte Fachtagung zu Entwicklungen in der internationalen Dämmstoffbranche. Aufgrund des disruptiven Charakters von Sumfoam konnte SUMTEQ im Rahmen eines Hauptvortrags das gesamte Projekt vorstellen und im Anschluss mit dem Auditorium diskutieren. Im Rahmen der Konferenz konnten zahlreiche Kontakte geknüpft werden, die für die weitere Marktentwicklung von Sumfoam sehr hilfreich sind. Zudem wurde die SUMTEQ mit dem Preis für den zweitbesten Konferenzbeitrag ausgezeichnet.



Die Kunststoffmesse "K" in Düsseldorf ist die weltweit größte Messe rund um Kunststoffe. Als Besucher konnte ein sehr guter Eindruck über die bestehende Produktlandschaft erhalten und interessante Fachgespräche mit zahlreichen Unternehmen aus der Branche geführt werden. Fazit war, dass Sumfoam mit sehr großem Interesse aufgenommen wurde, zumal es Stand heute kein vergleichbares Material auf dem Markt gibt

und die Chancen für eine großvolumige und flächendeckende Markteinführung von den Experten als hoch eingestuft wurde. SUMTEQ plant bei der nächsten "K" selbst mit einem Stand präsent zu sein.

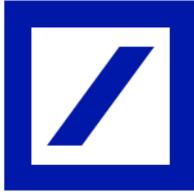


Das "1st European Chemistry Partnering" war die erste Veranstaltung, die als Plattform für ein Aufeinandertreffen von Wirtschaft und Forschung im Fokusbereich Chemie ausgelegt war. Schwerpunkt der Veranstaltung war insbesondere die Einbindung von Start-Ups und jungen Unternehmen in die bestehende Industrielandschaft. Auch hier konnten zahlreiche Kontakte geknüpft werden, die im weiteren Verlauf für die Geschäftsentwicklung von SUMTEQ sowohl produktions- als auch anwendungsseitig unterstützen.

Bis zu diesem Stand wurden die obig erwähnten Veranstaltungen schon vor dem Zwischenbericht des Projektes besucht. Für den Zeitraum ab dem 01.01.2018 präsentierte sich die SUMTEQ im Rahmen folgender Veranstaltungen:



Das „Green Innovation and Investment Forum 2018“ ist die europäische Veranstaltung für Start-ups im Bereich grüner Technologien. Innovationen aus ganz Europa werden vernetzt und ihre nachhaltigen Ideen international bekannt gemacht. Die von einer Jury Eingeladenen erhielten am Coaching-Tag intensive Unterstützung in den Bereichen Finanzierung, geistiges Eigentum, Präsentationstechniken und Geschäftsmodell. Die SUMTEQ wurde innerhalb dieses Wettbewerbs zu den TOP 20 Finalisten eingeladen und erlangte den 3. Platz für die Kategorie „Advanced Stage“.



Die „Deutsche Bank Innovation Technology Conference 2018“ richtet sich zum einen an strategische Entscheidungsträger, die sich mit der nachhaltigen Weiterentwicklung ihres Unternehmens vor dem Hintergrund der Digitalisierung beschäftigen. Andererseits richtet sie sich an Investoren, die die Nachfrage etablierter Unternehmen nach innovativen Technologien vertreten.



Die „AMI Polymers in Building and Insulation Conference 2018“ bringt Experten aus dem Bereich der Dämmung und der Polymerchemie zusammen um über die aktuellen Trends, Entwicklungen und Herausforderungen für die Dämmstoff- und Bauindustrie in der Zukunft zu diskutieren.

4. Fazit

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass mit lediglich kleinen Modifikation gegenüber dem Projektantrag die definierten Ziele erreicht werden konnten. Der Ausbau der internen Kapazitäten zur Rohwarenherstellung hat sich als enorm zweckdienlich erwiesen, weswegen auch in der zweiten Förderperiode diese Kapazitäten verstärkt genutzt und sogar weiter ausgebaut wurden.

Hinsichtlich des zweiten Wertschöpfungsschrittes (Schäumung der Rohware) hat sich herausgestellt, dass es deutlich wirtschaftlicher sein wird eine Sumfoam-spezifische CO₂-Hochdruckanlage für eine industrielle Produktion zu konstruieren. Vor diesem Hintergrund war die frühe Einbeziehung von Anlagenkonstruktoren essenziell. Der Austausch und die Testreihen mit verschiedenen Anlagenherstellern waren für die nachfolgenden Skalierungsschritte subsidiäre Hilfestellungen. Durch die gewonnen Erkenntnisse innerhalb der Produktion konnte die Anwendbarkeit der Herstellungsprozesse nicht nur im Technikumsmaßstab examiniert sondern auch die Anwendbarkeit der Technologie im industriellen Umfeld bestätigt und getestet werden. Innerhalb dieser Testreihen wurde die patentierte Technologie unter produktionsähnlichen Bedingungen validiert. Das Resultat dieser Untersuchungen bestätigte die vorher gewonnen Erkenntnisse innerhalb des Technikumsmaßstabes und bewiesen eine problemlose Skalierung auf industrielle Maßstäbe. Somit wurden die im Projektantrag definierten Ziele sogar übertroffen und begünstigen den zukünftigen Fortschritt während der Skalierungsphase.

Durch die enge Kooperation mit der va-Q-tec AG, war es möglich in sehr kurzen Intervallen Optimierungsschleifen hinsichtlich der Anwendung von Sumfoam in VIPs durchzuführen. Dies hat maßgeblich zu den bisherigen Erfolgen in Arbeitspaket 3 beigetragen. Diese Kooperation wird auch nach dem Projektabschluss weiter intensiviert. Bezüglich der Anwendungen außerhalb von VIPs, hat sich ergeben, dass das Interesse des Marktes und der Dämmstoffhersteller sehr groß ist und weitere Kooperationen mit zusätzlichen Anwendungen möglich sind und in der Zukunft durch viele Pilotierungen umgesetzt werden.

Das Ergebnis der ökologischen Bewertung in Bezug auf vergleichbare Produktbereiche bestätigt einen klaren Mehrwert von Sumfoam. Das GWP in Verbindung mit der Dämmperformance

fällt klar zugunsten von Sumfoam aus und bietet ein großes Potenzial für die Akquise von neuen Partnern, Produktpilotierungen und Förderungen.

Auch die ökonomische Bewertung fällt dahingehend positiv aus, dass mit Sumfoam erstmals ein polymerbasierter Nanoschaum wirtschaftlich skalierbar ist und der voraussichtlich bereits in der ersten Industrialisierungsstufe wettbewerbsfähig ggü. bestehenden Hochleistungsdämmstoffen wie bspw. den Aerogelen im Markt positioniert werden kann. Einhergehend mit weiterem Kostensenkungspotential im Rahmen weiterer Skalierungsstufen.

Aufgrund der umfangreichen Öffentlichkeitsarbeit, die insbesondere in Form von Messen, Tagungen und Konferenzen durchgeführt wurde, konnte die Sichtbarkeit des Sumfoam-Projektes deutlich erhöht werden und es konnten weitere potenzielle Partner für die industrielle Produktion und Markteinführen identifiziert und akquiriert werden.

Die für das gesamte Projekt gesetzten Ziele konnten erreicht und zum Teil sogar übertroffen werden. Zudem konnten insbesondere die positiven Umwelteinflüsse hinsichtlich der Einsparung von CO₂-Emissionennachweislich im Rahmen der durchgeführten Öko-Bilanzierung validiert werden, welche sich durch die zusätzlich gewonnen Erkenntnisse abermals verbessern werden. Die Verbesserungen der Produktionsabläufe und die Skalierung der Technologie werden die Ökobilanz zukünftig weiter positiv beeinflussen und bestätigen damit umso mehr die positiven Einflüsse von Sumfoam, nicht nur auf die Dämmstoffindustrie sondern auch auf anderen Gebieten rund um die Anwendbarkeit von nanoporösen Polymerschäumen.

5. Literaturverzeichnis

- [Kar14] Karrer, C.: Innovationen aus dem Dämmstoffbereich - innovativer als man denkt. Vortrag, FIW Forschungsnachmittag, 04.06.2014, abgerufen am 12.05.2015 unter http://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/forschungsnachmittag_2014/Innovationen_aus_dem_Daemmstoffbereich.pdf.
- [Not15] Notario, B. et al.: Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer* 56, 2015, S. 57 - 67.
- [Cha12] Chau, V. : EU project NANOFOAM – New NANO-technology based high performance insulation FOAM. Proceedings of the International Symposium on Superinsulating Materials, Brüssel, Belgien, 26.April 2012.
- [Jel10] Jelle, B.P.; Gustavsen, A.; Baetens, R.: The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of Building Physics*, 34 (2), 2010, S. 99 - 123.
- [Mue13] Müller, A.: Preparation of Polymer Nano-Foams: Templates, Challenges and Kinetics. Dissertation, Universität zu Köln, 2013.
- [Mue14] Müller, A.; Pütz, Y.; Oberhoffer, R.; Becker, N.; Strey, R.; Wiedenmann, A.; Sottmann, T.: Kinetics of pressure induced structural changes in super- or near-critical CO₂-microemulsions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16, 18092-18097, 2014.
- [Str10] Strey, R.; Müller, A.: Erzeugung Nanodisperser Einschlüsse in einer hochviskosen Matrix. Deutsches Patent- und Markenamt, DE 10 2010 053 064 A1, Offenlegungsdatum: 06.06.2012.
- [Str13] Strey, R.; Oberhoffer, R.; Müller, A.: Herstellung von porösen Materialien durch Expansion von Polymergelen. DE 10 2013 223 391 A1, Deutsches Patent- und Markenamt, Offenlegungsdatum: 21.05.2015.

-
- [Asp16] Aspen Aerogels, INC.: Annual Report 2016, Offenlegungsdatum: USA
02.März.2017, abgerufen am 01.05.2018 unter <http://ir.aerogel.com/investors/financial-information/2017/default.aspx>.
- [Mar17] MarketsandMarkets Research Private Ltd.: Building Thermal Insulation Market
2017 – Global Forecast to 2022, Offenlegungsdatum: August 2017, abgerufen
am 01.05.2018 unter <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/building-insulation-materials-market-510.html>.