

Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik der  
Technischen Universität Bergakademie Freiberg

## **Entwicklung kostengünstiger Solarthermiekollektoren mit Glasschaumplatten als Konstruktionselement**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 29175 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Heiko Hessenkemper &  
Dipl.-Ing. Marc Lüpfert

Freiberg, 19.12.2013

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az **29175**Referat **24/2**

Fördersumme

**125.000 €**

**Antragstitel**      **Entwicklung kostengünstiger Solarthermiekollektoren mit Glasschaumplatten als Konstruktionselement**

**Stichworte**      Solarthermie, Schaumglas, Reststoffe

Laufzeit

Projektbeginn

Projektende

Projektphase(n)

**30,5 Monate****13.04.2011****31.10.2013**

Zwischenberichte

**1****Bewilligungsempfänger** TU Bergakademie Freiberg

Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik

Lehrstuhl für Glas- und Emailtechnik

Leipziger Straße 28

09596 Freiberg

Tel (03731) 3293

Fax (03731) 2451

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Heiko Hessenkemper

Bearbeiter

Dipl.-Ing. Marc Lüpfer

**Kooperationspartner** Vaillant GmbH

Berghauser Str. 40

42859 Remscheid

### ***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Derzeitig am Markt verfügbare Flachkollektoren zur thermischen Nutzung solarer Energie sind einerseits teuer und besitzen andererseits kaum noch Potenzial zur Leistungssteigerung oder Kostensenkung. Um die Verbreitung der Solarthermie zu fördern, müssen daher neue Konzepte für Solarkollektoren entwickelt werden. An einem solchen Konzept soll in diesem Projekt gearbeitet werden. Hierbei besteht die Idee darin, ein Glas als Absorber einzusetzen. Dieses Glas wird nahezu vollständig aus Reststoffen hergestellt, was besonders ressourcenschonend und kostengünstig ist. Außerdem soll der gesamte Kollektor aus nur wenigen Komponenten aufgebaut sein und dadurch sehr einfach sowie kostengünstig hergestellt werden können. Die Senkung der Herstellkosten gegenüber marktüblicher Flachkollektoren soll die thermische Nutzung der Solarenergie für Investoren attraktiver gestalten.

Ziel des Vorhabens ist es, Fertigungstechnologien zu entwickeln, mit denen eine sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvolle Herstellung solcher Glaskollektoren möglich wird.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Zu Beginn des Projektes wurden die verfahrenstechnischen Grundlagen für die Herstellung der Hauptkomponente des Glaskollektors – die Glasschaumplatte – erarbeitet. Hierfür wurden zunächst das Schäumungsverhalten und relevante Eigenschaften verschiedener industrieller Reststoffe sowie die Blähcharakteristik geeigneter Blähmittel untersucht. Anhand der daraus gewonnenen Eigenschaftsprofile wurden Gemengezusammensetzungen erstellt und ein optimales Temperaturregime für die Glasschäumung erarbeitet. Weiterhin wurden Möglichkeiten zur Verbesserung von Verfahren und Schaumqualität durch verschiedene Formenwerkstoffe und –geometrien, Trenn- oder auch Armierungsmittel untersucht. Im weiteren Projektverlauf wurden diverse Möglichkeiten zur Verbindung des Schaumglases mit dem Abdeckglas und mit den Rohrleitungsanschlüssen untersucht. Die verschiedenen Verfahrenstechniken wurden hinsichtlich der mechanischen und chemischen Beständigkeit der erzielbaren Verbindungen geprüft. Zum Ende des Projektes hin wurden oberflächlich profilierte Schaumglasgrundkörper im Maß 600 mm x 600 mm x 125 mm hergestellt und daran verschiedene Verbindungstechnologien getestet, um labormaßstäblich gefertigte Prototypen herstellen zu können.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

## **Ergebnisse und Diskussion**

Das Ziel des Projektes war es, für die Konzeptidee eines neuen solarthermischen Kollektors die Fertigungstechnologien zu entwickeln. Die Fertigung dieses Kollektors besteht aus zwei Hauptschritten: der Herstellung des Kollektorgrundkörpers aus Schaumglas und dem Verbinden des Grundkörpers mit zwei Deckgläsern und zwei Rohrleitungsanschlüssen.

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Rohstoffe untersucht, die zur Glasschäumung verwendet werden könnten. Vor der Evaluierung ihrer Eignung für den Prozess wurden die dafür relevanten Eigenschaften untersucht. Ein Glasrohstoff, der aus industriellen Reststoffen gewonnen wird, erschien dabei als besonders gut geeignet. Er lässt sich ausgezeichnet schäumen, ergibt gute Schaumeigenschaften und da er bislang deponiert wird, ist er sehr günstig zu bekommen. Als Blähmittel hat sich Ruß als sehr wirksam sowohl hinsichtlich der Schäumung als auch der schwarzen Färbung des Schaumglases erwiesen. Aus einem Vergleich verschiedener Ruße zeigte sich, dass derjenige mit der geringsten spezifischen Oberfläche die beste Blähung bewirkt.

Zur Formgebung des Schaumglases soll der Grundkörper fertig in einer Form geschäumt werden. Aufgrund hoher Anforderungen an die Form bei der Entformung einer komplexen Schaumgeometrie musste ein geeignetes Formmaterial gefunden werden. Gusseisen mit einer Trennmittelschicht aus Kaolin erfüllten am besten diese Ansprüche.

Aus den Erkenntnissen der Laborversuche heraus, ist es gelungen, den Schaumkörper für einen Prototypen in der Größe 600 mm x 600 mm x 125 mm herzustellen.

Für den zweiten Hauptschritt der Fertigung wurden Fügetechnologien zur Verbindung des Schaumglasgrundkörpers mit den Deckgläsern und den Rohrleitungsanschlüssen untersucht und entwickelt. Dabei wurden direkte Verschmelzungen, Verbindungen mittels anorganischer Zwischenschichten und mittels organischer Stoffe geprüft. Als aussichtsreich erscheint demnach die Verbindung mittels Aluminium. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Dichtungen, wobei die Anpresskraft durch eine Rahmenkonstruktion gelöst wird. Die Rohrleitungsanschlüsse können direkt in die Kollektorplatte eingeschäumt werden. Sie bestehen aus Gusseisen und werden zur besseren Anbindung an das Schaumglas emailt.

Die Verbindung mittels Dichtung und Rahmenkonstruktion war für den Prototyp nicht erfolgreich, da bei dieser Lösung das Deckglas eine zu hohe Last durch den Kollektorrinnendruck halten müsste. Die Verbindung mittels Aluminium bedarf aufgrund umfassender Wechselwirkungen zwischen den Materialien einer weitergehenden Entwicklung und konnte aus technischen Gründen noch nicht am Prototyp umgesetzt werden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Im Laufe des Projektes wurden die Konzepte und die Projektergebnisse auf folgenden Messen und Medien publiziert:

- 10.08.2011: „Neue Solarthermiekonzepte“, Vortrag bei der 9. Sitzung des IAK Photovoltaik und Solarthermie des VDMA, Frankfurt
- 04.-08.04.2011: „Grüne Module aus Schwarzglas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Hannover Messe
- 18.-20.10.2011: „Helsta – complete glass. Grüne Solarkollektoren aus Schwarzglas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Messe Materialica, München
- Dez. 2011: „Neue Solarkollektoren aus schwarzem Glas“, Lasermagazin, Ausgabe 4, S. 55-57
- 23.-27.04.2012 „Grüne Solarkollektoren aus schwarzem Glas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Hannover Messe
- 08.05.2012 „Neue Solarkollektoren aus Glas“, Vortrag beim 28. Zwieseler Fachschulkolloquium, Zwiesel
- 23.-25.10.2012 „Glasschaum – Werkstoff für vielfältige Anwendungen“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Messe Materialica, München
- 29.-31.01.2013 „Grüne Solarkollektoren aus schwarzem Glas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Terratec/ Enertec, Leipzig
- 08.-12.04.2013 „Grüne Solarkollektoren aus schwarzem Glas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Hannover Messe
- 15.-17.10.2013 „Innovative Wärme- und Schalldämmung mit Glasschaum“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Messe Materialica, München

## **Fazit**

Bezüglich des bevorzugten Glasrohstoffes GR 2 ist zu prüfen, ob auch andere als die bislang verwendete Quelle gleichzeitig genutzt werden können, um die Abhängigkeit vom Versorger zu umgehen und um eine große Produktion realisieren zu können. Daneben ist auch die Stabilität der Rohstoffeigenschaften zu untersuchen.

Bei der Verbindung des Flachglases mit dem Schaumglas mittels Aluminium besteht noch großes Optimierungspotenzial, wie in Kapitel 3.5 beschrieben ist. Außerdem muss untersucht werden, ob sich auch große Formate verbinden lassen und ob die Zugfestigkeit des Schaumglases für den Betrieb ausreicht oder ob über außen angelegte Druckkräfte die Zugbelastung reduziert werden muss.

Bei der Einschäumung der Rohrleitungsanschlüsse muss überprüft werden, ob die Spannungen, die aufgrund der unterschiedlichen WAK von Gusseisenrohr und Schaumglasmatrix entstehen, auch bei großen Kollektoren noch gering genug sind, um eine rissfreie Verbindung zu gewährleisten. Außerdem muss untersucht werden, ob die Verbindung den Einsatz bei ständigen Temperaturveränderungen über Jahre hinweg rissfrei übersteht.

Die Strömungsverteilung im Kollektor ist am Prototyp zu prüfen. Dabei sind etwaige Toträume der Strömung, der Druckverlust und die Homogenität der Strömungsverteilung über die Kollektorfläche zu untersuchen und zu optimieren. Eine Strömungsoptimierung mittels Simulation ist zu überdenken.

Der Prototyp sollte außerdem gefertigt werden, um die Leistungsfähigkeit des Kollektors ermitteln zu können. An dieser Messung ist schließlich abzuleiten, an welchen Stellen Optimierungsbedarf besteht.

Außerdem sollte im Laufe der weiteren Entwicklungen die Montagemöglichkeit des Kollektors auf Dächern und auch der Aspekt des Kollektorrecyclings betrachtet werden.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Projektkennblatt</b> .....                                                                     | I   |
| Inhaltsverzeichnis .....                                                                          | II  |
| I   Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....                                                     | III |
| II   Abkürzungsverzeichnis .....                                                                  | IV  |
| 1   Zusammenfassung .....                                                                         | 1   |
| 2   Einleitung .....                                                                              | 2   |
| 3   Projektergebnisse .....                                                                       | 4   |
| 3.1   Theoretische Überprüfung bestehender Fertigungskonzepte .....                               | 4   |
| 3.2   Materialtechnische Grundlagen bzgl. der Ausgangsstoffe .....                                | 4   |
| 3.3   Materialtechnische Grundlagen bzgl. des Formenmaterials .....                               | 6   |
| 3.4   Verfahrenstechnische Grundlagen der Glasschäumung .....                                     | 10  |
| 3.4.1   Untersuchung der Schäumbarkeit der Glasrohstoffe .....                                    | 10  |
| 3.4.2   Optimierung der Schäumbarkeit .....                                                       | 15  |
| 3.4.3   Festigkeit der Schaumgläser .....                                                         | 22  |
| 3.5   Verfahrenstechnische Grundlagen der Fügetechnologie .....                                   | 24  |
| 3.6   Theoretische Betrachtung zur Optimierung der Strömungseigenschaften .....                   | 30  |
| 3.7   Labormaßstäbliche Fertigung von Prototypen .....                                            | 31  |
| 3.8   Abschätzung notwendiger Modifikationen und technischer Anforderungen für ein scale-up ..... | 36  |
| 3.9   Abschätzung der Herstellkosten des Schaumglaskollektors .....                               | 37  |
| 3.9.1   Investitionskosten .....                                                                  | 37  |
| 3.9.2   Laufende Kosten .....                                                                     | 37  |
| 3.10   Ökologische Bilanzierung .....                                                             | 39  |
| 3.11   Veröffentlichung der Ergebnisse .....                                                      | 40  |
| 4   Fazit .....                                                                                   | 42  |
| Literaturverzeichnis .....                                                                        | 43  |
| Anhang .....                                                                                      | A 1 |

# I Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: TG-Kurve verschiedener Ruße .....                                                                                                                                                 | 6  |
| Abbildung 2: Form aus CSH .....                                                                                                                                                                | 8  |
| Abbildung 3: Schaumglas auf Basis TV .....                                                                                                                                                     | 10 |
| Abbildung 4: Schaumglas bei gleicher Schäumungstemperatur und unterschiedlichen Blähmittelmengen<br>(Nr. 1 und 2): links: GR 1; rechts: Floatmehl .....                                        | 11 |
| Abbildung 5: Schaumglas bei gleicher Schäumungstemperatur und unterschiedlichen Anteile (Nr. 1 und 2 in den<br>Bildern) an Blähmittel 1: links: GR 1; rechts: GR 2 .....                       | 12 |
| Abbildung 6: Schaumglas bei gleicher Schäumungstemperatur (wie in Abbildung 5) und unterschiedlichen<br>Anteilen (Nr. 1 und 2 in den Bildern) an Blähmittel 2: links: GR 1; rechts: GR 2 ..... | 13 |
| Abbildung 7: Überblick über Glasschäume aus variierenden Anteilen der drei Glasrohstoffe GR 2/ TV/ SVZ .....                                                                                   | 14 |
| Abbildung 8: Schaumglasquerschnitte unter Verwendung unterschiedlicher Ruße als Blähmittel .....                                                                                               | 16 |
| Abbildung 9: Abhängigkeit der Schwefellöslichkeit im Glas vom Redoxzustand .....                                                                                                               | 19 |
| Abbildung 10: Monolithischer Glasschaumkörper mit Schichten unterschiedlicher Dichte (erkennbar an<br>Porengrößen) .....                                                                       | 21 |
| Abbildung 11: Anordnung zur Zugprüfung von Verbindungen .....                                                                                                                                  | 24 |
| Abbildung 12: Verbindung Schaumglas/ Flachglas mittels Aluminiumfolie; links: vor der mechanischen Prüfung;<br>rechts: nach der mechanischen Prüfung .....                                     | 27 |
| Abbildung 13: Verbindung Schaumglas/ Flachglas mittels Zinn; links: unter Luft hergestellt; rechts: unter<br>redzierender Atmosphäre hergestellt .....                                         | 28 |
| Abbildung 14: Dämmstoffdübel und zugehöriges Loch im Schaumglas .....                                                                                                                          | 29 |
| Abbildung 15: Schaumglas für Prototyp; links: Grundkörper; rechts: Schaumstruktur im Querschnitt .....                                                                                         | 33 |
|                                                                                                                                                                                                |    |
| Tabelle 1: Partikelgrößen der Glasrohstoffe .....                                                                                                                                              | 4  |
| Tabelle 2: Berechnete Viskositätsfixpunkte .....                                                                                                                                               | 5  |
| Tabelle 3: Gemessene Transformationstemperatur (bei $10^{12,5}$ Pas) .....                                                                                                                     | 5  |
| Tabelle 4: WAK der Glasrohstoffe .....                                                                                                                                                         | 6  |
| Tabelle 5: WAK der Formwerkstoffe .....                                                                                                                                                        | 7  |
| Tabelle 6: Abhängigkeit der Schäumung von der Atmosphäre bei Ruß und SiC als Blähmittel .....                                                                                                  | 18 |
| Tabelle 7: Biegefestigkeiten bei verschiedenen Maximaltemperaturen .....                                                                                                                       | 20 |

## II Abkürzungsverzeichnis

|                      |                                                          |
|----------------------|----------------------------------------------------------|
| <i>SVZ</i>           | <i>Schlacke aus dem Sekundärstoff Verwertungszentrum</i> |
| <i>TV</i>            | <i>TV-Röhrenglas</i>                                     |
| <i>GR</i>            | <i>Glasrohstoff</i>                                      |
| <i>XRD</i>           | <i>Analysemethode durch Röntgenbeugung</i>               |
| <i>TG</i>            | <i>Thermogravimetrie</i>                                 |
| <i>DSC</i>           | <i>Differenzkalorimetrie</i>                             |
| <i>WAK</i>           | <i>Wärmeausdehnungskoeffizient</i>                       |
| <i>TWB</i>           | <i>Temperaturwechselbeständigkeit</i>                    |
| <i>T<sub>G</sub></i> | <i>Transformationstemperatur eines Glases</i>            |
| <i>CSH</i>           | <i>Calciumsilikathydrat</i>                              |
| <i>GE</i>            | <i>Gusseisen</i>                                         |
| <i>PB</i>            | <i>Porenbeton</i>                                        |

# 1 Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes war es, für die Konzeptidee eines neuen solarthermischen Kollektors die Fertigungstechnologien zu entwickeln. Die Fertigung dieses Kollektors besteht aus zwei Hauptschritten: der Herstellung des Kollektorgrundkörpers aus Schaumglas und dem Verbinden des Grundkörpers mit zwei Deckgläsern und zwei Rohrleitungsanschlüssen.

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene Rohstoffe untersucht, die zur Glasschäumung verwendet werden könnten. Vor der Evaluierung ihrer Eignung für den Prozess wurden die dafür relevanten Eigenschaften untersucht. Ein Glasrohstoff, der aus industriellen Reststoffen gewonnen wird, erschien dabei als besonders gut geeignet. Sie lassen sich ausgezeichnet schäumen, ergeben gute Schaumeigenschaften und sie bislang deponiert werden, sind sie sehr günstig zu bekommen. Als Blähmittel hat sich Ruß als sehr wirksam sowohl hinsichtlich der Schäumung als auch der schwarzen Färbung des Schaumglases erwiesen. Aus einem Vergleich verschiedener Ruße zeigte sich, dass derjenige mit der geringsten spezifischen Oberfläche die beste Blähung bewirkt.

Zur Formgebung des Schaumglases soll der Grundkörper fertig in einer Form geschäumt werden. Aufgrund hoher Anforderungen an die Form bei der Entformung einer komplexen Schaumgeometrie musste ein geeignetes Formmaterial gefunden werden. Gusseisen mit einer Trennmittelschicht aus Kaolin erfüllten am besten diese Ansprüche.

Aus den Erkenntnissen der Laborversuche heraus, ist es gelungen, den Schaumkörper für einen Prototypen in der Größe 600 mm x 600 mm x 125 mm herzustellen.

Für den zweiten Hauptschritt der Fertigung wurden Fügetechnologien zur Verbindung des Schaumglasgrundkörpers mit den Deckgläsern und den Rohrleitungsanschlüssen untersucht und entwickelt. Dabei wurden direkte Verschmelzungen, Verbindungen mittels anorganischer Zwischenschichten und mittels organischer Stoffe geprüft. Als aussichtsreich erscheint demnach die Verbindung mittels Aluminium. Die Rohrleitungsanschlüsse können direkt in die Kollektorplatte eingeschäumt werden. Sie bestehen aus Gusseisen und werden zur besseren Anbindung ans Schaumglas emailliert.

Im weiteren Vorgehen ist auch die Verbindung der Deckgläser mit dem Kollektorgrundkörper im Maßstab des Prototyps umzusetzen. Damit sollte ein Prototyp für die Vermessung der Leistungsfähigkeit bereitgestellt werden können.

Das vom DBU geförderte Projekt (Az 29175) wurde unter finanzieller Beteiligung der Firma Vaillant GmbH durchgeführt.



## 2 Einleitung

Im Frühjahr 2011 wurde von der Bundesregierung in Deutschland die Energiewende ausgerufen. Auch wenn dieses Ereignis in erster Linie mit dem sukzessiven Ausstieg aus der Kernenergie und der notwendigen Substitution auf dem Strommarkt verbunden ist, sollte doch nicht vergessen werden, dass für eine klima- und umweltfreundliche Gestaltung unseres Energieversorgungssystems auch der Wärmesektor betrachtet werden muss. Wärme ist schließlich mit fast 60 % des Energieverbrauchs in Deutschland die größte Energiesenke. Und in diesem Bereich muss noch viel getan werden. In 2012 wurden lediglich 10,2 % des Endenergieverbrauchs für Wärme aus Erneuerbaren Energien gewonnen. Deren Anteil am Bruttostromverbrauch hingegen war immerhin schon 23,5 % [1].

Noch drastischer stellt sich das Verhältnis bei der Nutzung der Sonnenenergie dar. Trotz schlechterem Wirkungsgrad wird diese Energiequelle heute dominant zur Stromerzeugung genutzt. Rund 260 Mio. m<sup>2</sup> installierter Photovoltaik-Fläche stehen in Deutschland Ende 2012 gerade einmal etwa 16,5 Mio. m<sup>2</sup> für Solarthermie gegenüber [2]. Ein wesentlicher Grund für diese Diskrepanz ist die vergleichsweise geringe Rendite bei solarthermischen Anlagen bzw. die hohen Wärmegestehungskosten, welche aber für die meisten Investoren eine entscheidende Rolle spielen. Zur Steigerung der Rendite gibt es zwei Wege: die Erhöhung des Ertrages in Form der nutzbaren Wärmeausbeute und die Senkung der Kosten für Investoren. Da hinsichtlich der Wärmeausbeute der heute bereits weit entwickelten Systeme kaum noch Entwicklungspotenzial besteht, muss es also ein wesentliches Ziel sein, die Anlagenkosten zu senken. Der Kollektor ist dabei ein Kostenschwerpunkt und sollte folglich auch im Fokus des Interesses liegen.

Der Lösungsansatz zur Senkung der Herstellkosten der Solarkollektoren besteht darin, einerseits die Materialkosten zu senken durch Verwendung von Glas aus industriellen Reststoffen anstatt teurer Metalle und andererseits den Kollektoraufbau zu vereinfachen, sodass auch die Fertigungskosten reduziert werden können. Abschätzungen ergeben, dass somit die Herstellkosten auf etwa 1/3 (50 €/m<sup>2</sup>) gegenüber marktüblichen Flachkollektoren gesenkt werden können. Neben den ökonomischen Vorteilen weist der Kollektor auch deutliche ökologische Vorteile gegenüber den herkömmlichen Kollektoren auf. Infolge der Verwendung industrieller Reststoffe, die ansonsten deponiert werden, können gleichzeitig Materialien wieder in den Wertschöpfungskreislauf eingebunden und im Gegenzug mineralische Ressourcen geschont werden. Außerdem soll durch die Verwendung von fast ausschließlich Glas auch der Kollektor selbst gut recycelt werden können. Mit diesem Produkt können also wesentliche Beiträge sowohl zur Energiewende als auch Wertstoffwende geleistet werden.

Dieser Ansatz soll später nicht nur für solarthermische Kollektoren, sondern auch für PVT-Kollektoren (Kombination von Photovoltaik mit Solarthermie) und für Meerwasserentsalzungsanlagen nach dem Prinzip der Solardestillation genutzt werden.

Um diesen neue solarthermischen Kollektor herstellen zu können, sind zwei wesentliche Prozessschritte erforderlich. Im ersten Schritt muss der Grundkörper aus Schaumglas hergestellt werden. Im Laufe des Projektes sollten dafür verschiedene Rohstoffe auf deren Eignung untersucht werden, Gemengezusammensetzungen getestet und Temperaturregime entwickelt werden. Für die Anwendung relevante Eigenschaften wie Festigkeit und Farbe sollten an die Anforderungen angepasst und optimiert werden. Weiterhin war die Frage nach einem geeigneten Formmaterial inklusive Trennmittel, mit dem eine Formgebung des Schaumglaskörpers während des Blähprozesses möglich ist, Teil des Projektes. Weiterhin sollen die Strömungsführung im Kollektor und die konstruktive Gestaltung betrachtet werden.

Der zweite wesentliche Schritt zur Lösung der Fertigungsaufgabe ist die Verbindung der Einzelteile Schaumglasgrundkörper, Deckgläser und Rohrleitungsanschlüsse. Im Projekt sollen verschiedene Materialien und Fügetechnologien untersucht und entwickelt werden, die den anspruchsvollen Bedingungen des Einsatzes standhalten. Darunter zählen die direkte Verbindung durch Verschmelzen sowie die Verbindung mittels anorganischer Zwischenschichten oder organischer Klebstoffe. Die im Labor hergestellten Verbindungen sind auf ihre mechanischen Eigenschaften nach Alterung durch hohe Temperaturen, Wasserangriff und UV-Belastung zu untersuchen.

Zum Ende des Projektes soll anhand der gewonnenen Erkenntnisse ein Prototyp gefertigt werden, an dem einerseits die Herstellbarkeit gezeigt wird und der andererseits bezüglich seiner Leistungsfähigkeit geprüft werden kann.

### 3 Projektergebnisse

#### 3.1 Theoretische Überprüfung bestehender Fertigungskonzepte

Bei der Überprüfung der vor dem Projekt bestehenden Konzepte fiel ein alternatives Material zu Schaumglas auf: Porenbeton. Porenbeton hat gegenüber Schaumglas den deutlichen Vorteil des günstigeren Preises (ca. Faktor 10). Die ersten Versuche zeigten auch wesentliche Nachteile auf. Bei gleicher Festigkeit ist ein dichter Porenbeton notwendig, was sich negativ auf das Kollektorgewicht auswirkt. Außerdem müsste dann für den gleichen Dämmwert eine etwa doppelt so starke Platte verwendet werden, was sich ebenfalls beim Gewicht bemerkbar macht. Als weiteres Problem hat sich die offene Porosität bei diesem Material erwiesen. Diese wurde zwar mit verschiedenen Methoden versucht zu schließen. Es konnte jedoch keine langzeitbeständige Variante gefunden werden. Die Vorversuche führten zum Ausschluss dieses Materials und zur Bestätigung der bestehenden Fertigungskonzepte.

#### 3.2 Materialtechnische Grundlagen bzgl. der Ausgangsstoffe

Die verwendeten Ausgangsstoffe für das Glas waren Floatglas (F), SVZ-Schlacke (SVZ), TV-Röhrenglas (TV) sowie zwei weitere Sekundärrohstoffe (Glasreststoffe GR 1 und GR 2).

Während F, SVZ und TV als loses Schüttgut vorlag, mussten GR1 und GR 2 aus den Bruchstücken eines Filterkuchens gewonnen werden. Die Primärpartikelgröße von GR hat laut Hersteller eine Partikelgröße von  $x_{50} = 4,8 \mu\text{m}$ . Nach dem Zerkleinern des Filterkuchens lag ein Pulver mit Agglomeratgrößen unter  $63 \mu\text{m}$  vor. Die mittleren Partikelgrößen der anderen Glasrohstoffe sind in Tabelle 1 zu finden.

**Tabelle 1: Partikelgrößen der Glasrohstoffe**

| Rohstoff               | Float | SVZ   | TV    | GR 2 |
|------------------------|-------|-------|-------|------|
| $x_{50} [\mu\text{m}]$ | 42,9  | 153,2 | 147,1 | 4,8  |

Da für die Schäumung eines Glases dessen Viskosität entscheidend ist, wurden die Viskositätskurven (Abhängigkeit von der Temperatur) ermittelt. Dafür wurde zunächst ein Computerprogramm verwendet, welches verschiedene Eigenschaftswerte aus der Zusammensetzung berechnet. Die berechneten Viskositätsfixpunkte sind in Tabelle 2 zu finden. Die hohe Viskosität von SVZ wird höhere Schäumungstemperaturen sowie andere Blähmittel erfordern als die vergleichsweise geringe Viskosität von TV. Weiterhin ist

festzustellen, dass GR 1 und GR 2 chemisch länger sind als alle anderen Gläser, d. h. die gleiche Viskositätsveränderung in einem größeren Temperaturintervall erfahren. Für die Schäumung ist das theoretisch positiv, da für die effektive Gasfreisetzung und die Blähung ein größerer Temperaturbereich zur Verfügung steht. Dieses Ergebnis ist insofern jedoch vorsichtig zu betrachten, da GR 1 und GR 2 nicht vollständig homogen und amorph sind. XRD-Analysen zeigen, dass sie Verunreinigungen von Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) und Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) jeweils in Höhe von 2 - 6 % besitzen. Daneben wurden die Glühverluste bestimmt. Zwischen 500 °C und 1000 °C betragen diese Verluste 0,8 % bei GR 1 und 2,7 % bei GR 2. Ursachen hierfür sind in der  $\text{CO}_2$ -Abspaltung des Calcit, in der Freisetzung von Gasfracht aus dem Glas sowie in einer späten Wasserabspaltung aus Hydratphasen zu sehen.

**Tabelle 2: Berechnete Viskositätsfixpunkte**

| Viskosität $\log \eta$<br>[ $\eta$ in Pas] | F     | SVZ    | TV     | GR 1   | GR 2   |
|--------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 4                                          | 906±8 | 967±96 | 875±17 | 981±13 | 999±14 |
| 6,6                                        | 722±6 | 865±71 | 684±12 | 772±10 | 789±9  |
| 12                                         | 547±7 | 683±75 | 498±11 | 569±9  | 585±13 |

Um die berechneten Werte für die Viskosität zu überprüfen, wurden die Transformationstemperaturen (bei einer Viskosität von  $10^{12,5}$  Pas) von F, TV und SVZ gemessen. GR 1 und GR 2 konnten nicht auf diese Weise gemessen werden, da sie bei der Erwärmung aufschäumten. Die gemessenen Temperaturen liegen etwas über den berechneten. Die Tendenzen sind jedoch deutlich zu erkennen.

**Tabelle 3: Gemessene Transformationstemperatur (bei  $10^{12,5}$  Pas)**

| Probe    | Transformationstemp. [°C] |
|----------|---------------------------|
| F-Glas   | 552,4                     |
| TV-Glas  | 506,7                     |
| SVZ-Glas | 698,1                     |

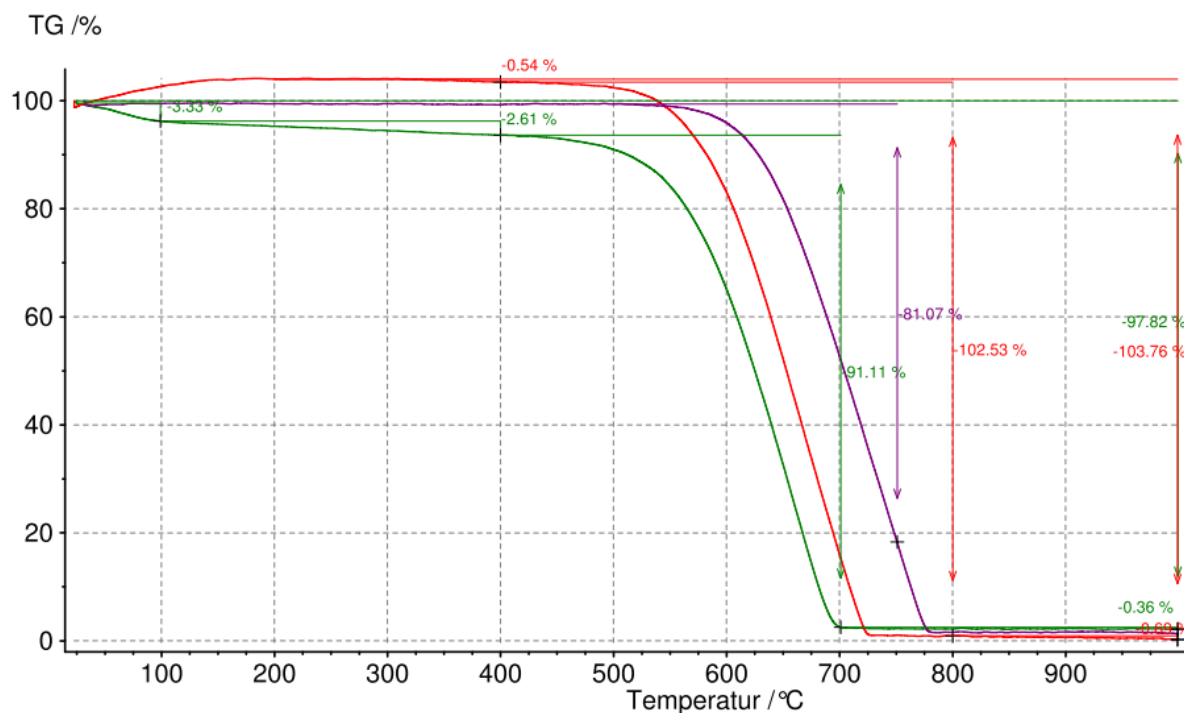
Für die Verbindung mit den Rohrleitungsanschlüssen und den Deckgläsern sowie für die Entformbarkeit nach dem Schäumen sind die Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) der Gläser wichtig. Die berechneten WAK der Gläser sind in Tabelle 4 zu finden.

**Tabelle 4: WAK der Glasrohstoffe**

| Rohstoff                         | F   | SVZ  | TV   | GR 1 | GR 2 |
|----------------------------------|-----|------|------|------|------|
| WAK [ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ] | 9,4 | 9,46 | 9,99 | 7,5  | 7,28 |

Weiterhin werden für die Schäumung Blähmittel benötigt. Dafür wurden hauptsächlich verschiedene Ruße untersucht, da diese den Schaum dunkel färben sollen. Daneben wurden auch die industriell üblich verwendeten Blähmittel Siliziumkarbid (SiC) und Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) genutzt.

Um die starke Abhängigkeit des Oxidationsverhalten verschiedener Ruße von ihrer spezifischen Oberfläche und ihrer Oberflächenchemie beurteilen zu können, wurde mittels TG und DSC ihr Reaktionsverhalten beobachtet. Abbildung 1 zeigt die TG-Kurven von drei Rußen. Es ist deutlich erkennbar dass sich sowohl Reaktionsbeginn als auch –ende um bis zu 100 K unterscheiden.



**Abbildung 1: TG-Kurve verschiedener Ruße**

### 3.3 Materialtechnische Grundlagen bzgl. des Formenmaterials

Für die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes für die Schäumungsformen wurden zunächst alle wichtigen Eigenschaften wie Wärmeausdehnungskoeffizient WAK (siehe Tabelle 5), Wärmeleitfähigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit TWB, mechanische Stabilität,

Herstellbarkeit/ Preis möglicher Materialien zusammengetragen. Nach einer Bewertung der Eigenschaften der jeweiligen Materialien kamen drei Werkstoffe in die nähere Auswahl, welche genauer betrachtet wurde. Diese Werkstoffe sind Calciumsilikathydrat (CSH), Gusseisen (GE) sowie Porenbeton (PB).

CSH hat bei guten Festigkeitswerten (ca. 15 MPa Biegefestigkeit) einen geringeren WAK [3] als Glas, eine gute TWB und ist sehr gut bearbeitbar. GE hat einen etwas größeren WAK [4] als Glas, eine sehr hohe mechanische Stabilität und eine gute TWB. PB hat einen geringfügig kleineren WAK [5] als Glas, einen sehr geringen Preis, allerdings recht geringe Festigkeit bei konventionellem PB (ca. 2,0 MPa Biegefestigkeit bei 1 g/cm<sup>3</sup> Dichte [5]).

**Tabelle 5: WAK der Formwerkstoffe**

| Material                         | CSH              | GE                  | PB                  |
|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| WAK [ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ] | 5,7 (bei 900 °C) | 10,4 (bei 0-100 °C) | 8,0 (bei 20-100 °C) |

Bei CSH ist trotz ausreichender Festigkeit die Bearbeitbarkeit sehr gut, allerdings führt die Differenz der WAK zur Rissbildung im Glasschaum. Bei der Abkühlung schrumpfen die Materialien unterschiedlich stark. Auf der strukturierten Seite der Form verzahnen sich Glas und Form miteinander, sodass die Körper nicht aneinander vorbei gleiten können, wodurch sich Spannungen ausbilden. Werden diese Spannungen zu groß, entstehen Risse im Glasschaum. Daneben haben unterschiedliche Wärmedehnungen eine schlechtere Entformung des Glases zur Folge. Erste Erfahrungen mit der Problematik der Rissbildung wurden bei Modellschäumungen (Fläche ca. 200 mm x 140 mm, Form in Abbildung 2 zu sehen) gemacht. Diese zeigten beispielsweise im Zusammenhang mit CSH, dass sich Risse auch durch erste konstruktive Änderungen nicht vollständig verhindern lassen. Neben 30°-Entformungsschrägen konnte auch das Abrunden von Kanten die Rissbildung nicht unterbinden.



**Abbildung 2: Form aus CSH**

Bei GE liegt der WAK wesentlich näher am WAK des Glases als beim untersuchten CSH. Die positive Wirkung konnte bei Versuchen mit einer Form aus dem Gusseisen EN-GJL-250 beobachtet werden. Die Form hat eine Fläche von 140 mm x 140 mm und ist mit der gleichen einfachen Kanalstruktur versehen wie die Form aus CSH. Aus den Untersuchungen der Schäumung in der Form konnte festgestellt werden, dass sich der Glasschaum gut von der Formhälfte mit Struktur trennen lässt. In der rückseitigen Formhälfte wird der Glasschaum allerdings eingeklemmt. Das GE schrumpft sich also auf das Glas auf. Die Entformung ist hier lediglich bei Temperaturen oberhalb 100 °C möglich gewesen. Durch die Druckbelastung beim Abkühlen reißt das Glas jedoch nicht, sodass intakte Schäume entformt werden können.

Die Versuche mit Porenbeton wurden mit vergleichbarer Formgeometrie durchgeführt. Es musste zeitig festgestellt werden, dass der Porenbeton keine ausreichende Festigkeit besitzt. Er wird beim Handling schnell beschädigt und kann bei ungenau eingestellter Schäumung durch den Innendruck des blähenden Glases brechen. Die Entformung konnte hingegen unproblematisch und rissfrei gewährleistet werden.

Das Entformungsproblem scheint derzeit am besten zu lösen sein, indem die Strukturseite der Form aus GE hergestellt wird. Der andere Teil der Form sollte entweder aus CSH oder aus einzelnen GE-Teilen bestehen.

Neben den primären Anforderungen an das Formenmaterial wurde weiterhin deren Einfluss auf die Schäumung beobachtet. Erwartungsgemäß zeigten sich Unterschiede in der Oberflächenqualität des Schaumglases abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der

Form. Drastischer als erwartet erwies sich allerdings der Einfluss des thermischen Verhaltens der Form auf die Glasschäumung. Hierbei spielen dessen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Je größer die Wärmekapazität und je geringer die Wärmeleitfähigkeit, desto stärker wird der Temperaturanstieg des Ofens im Forminneren gedämpft. Daraus ergeben sich erhebliche Konsequenzen auf das zu verwendende Temperaturregime. Auch diese Wechselwirkungen sind bei der Werkstoffauswahl und bei der Prozessführung zu berücksichtigen.

Der Vergleich der Schäumungsverhalten in CSH- und GE-Form zeigten außerdem, dass Vor- und Nachteile eines Formmaterials stark von der Gemengezusammensetzung abhängig sind. In den ersten Versuchen schäumten die untersuchten Gemenge in der CSH-Form besser als in GE-Form. Spätere Versuche mit anderen Rohstoffen zeigten wiederum eine gegenläufige Tendenz. Ein wesentlicher Unterschied bei allen Versuchen war die wesentlich dunklere Farbe der Schäume aus der GE-Form. Dadurch liegt die Vermutung nahe, dass sich in den Formen die Atmosphären unterscheiden und sich dies mehr oder weniger stark auf die Schäumung auswirkt. GE dichtet das Forminnere gut gegen die Ofenatmosphäre ab und verbraucht vermutlich sogar durch die eigene Oxidation (Graphit im GE) Sauerstoff, sodass die Schäumung unter sauerstoffarmen Bedingungen stattfindet. CSH verbraucht keinen Sauerstoff und hält außerdem in seinen Poren Luft zur Reaktion bereit. Wie in Kapitel 3.4.2 gezeigt wird, schäumen Gemenge mit Ruß als Blähmittel unter Sauerstoff in der Atmosphäre schlecht, sodass die Ergebnisse in der GE-Form wesentlich besser waren als in der CSH-Form. SiC als Blähmittel reagiert hingegen wesentlich weniger kritisch auf Sauerstoff.

#### Trennmittel:

Da zur Entformung auch die Trennmittel mit dem Formenmaterial im Zusammenhang stehen, erfolgte auch die Auseinandersetzung mit diesen Stoffen. Verglichen wurden Korund, Calciumhydroxid, Gips und Kaolin jeweils als Suspension sowie ein Aluminiumspray. Diese wurden auf eine CSH-Form aufgetragen, welche mit Glas ausgeschäumt wurde. Von den Suspensionen eignete sich Kaolin am besten, da es sowohl eine sehr gute Trennwirkung als auch Verarbeitbarkeit aufweist. Das Aluminiumspray wirkt ebenfalls sehr gut als Trennmittel, hinterlässt allerdings unregelmäßige Verfärbungen auf dem Glas.

Auftragen lässt sich die Kaolin-Suspension am besten durch Sprühen. Das CSH saugt das Wasser beim Auftreffen der Tröpfchen sofort auf, sodass die Suspension nicht verläuft.



Dadurch kann eine gleichmäßige und beliebig dicke Kaolinschicht erzeugt werden. Das GE kann das Wasser nicht aufsaugen und muss daher vor dem Besprühen erwärmt werden. Ein Temperaturbereich zwischen 140 °C und 160 °C hat sich dabei als optimal für die GE-Vorwärmung erwiesen. Beim Auftreffen der Suspensionströpfchen auf die heiße Form verdampft das Wasser und das Kaolin bleibt zurück. Bei höheren Temperaturen traten Risse und Abplatzungen der Kaolinschicht auf oder das Wasser verdampfte bereits vor dem Auftreffen auf der Form, wodurch das Kaolin kaum haften blieb.

### 3.4 Verfahrenstechnische Grundlagen der Glasschäumung

#### 3.4.1 Untersuchung der Schäumbarkeit der Glasrohstoffe

Im Zuge der Suche nach Glasrohstoffen für den Glasschäumungsprozess haben sich neben Schlackenglas (SVZ) und TV-Glas noch zwei weitere Rohstoffquellen ergeben. Diese beiden Rohstoffe (GR 1 und GR 2) sollten sich den theoretischen Überlegungen nach (hoher Glühverlust bei Schäumungstemperaturen) sehr gut schäumen lassen. Außerdem werden sie nach Angaben der Produzenten derzeit deponiert. Durch die Verwendung in der Schaumglasherstellung könnte die Deponie umgangen werden und im Gegenzug mineralische Ressourcen geschont werden.

TV schäumt nur unter Blähmittelzugabe, benötigt aber, verglichen mit dem Schäumungsverhalten des Floatglases, nur wenig davon. Es entsteht eine dunkle Schaumfarbe, jedoch mit einer sehr groben Porenstruktur (siehe Abbildung 3).

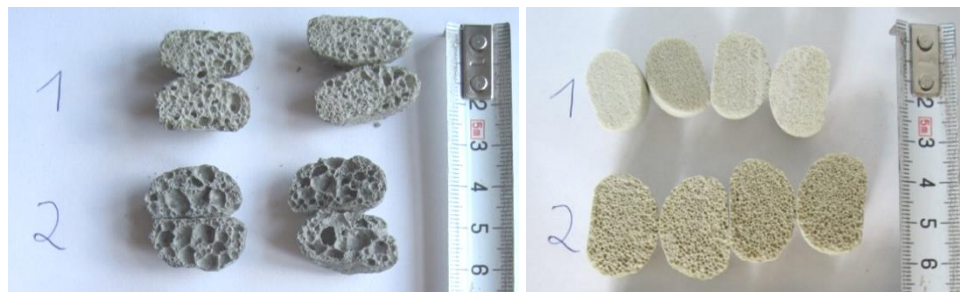


Abbildung 3: Schaumglas auf Basis TV

Das Schlackenglas SVZ zeigte sich als sehr schwer zu schäumen. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der starken Kristallisationsanfälligkeit dieses Glases begründet. Die Kristallbildung erhöht dabei den Widerstand des Werkstoffs gegen das Blasenwachstum.

Eine Verwendung dieses Glases kann allerdings in Kombination mit anderen Glasrohstoffen ermöglicht werden, wie später noch gezeigt wird.

Bei GR 1 und GR 2 konnte in den Laborversuchen eine selbstständige Schäumung sogar vollkommen ohne Blähmittelzusatz festgestellt werden. Der bei konventioneller Schaumglasproduktion häufig verwendete Glasrohstoff F erfordert hingegen bis zu 5 % dieser Beigaben [6]. Der mögliche Verzicht auf zusätzliche Blähmittel beziehungsweise die Reduzierung der Blähmittelmenge eröffnen neben den voraussichtlich geringen Kosten für diesen Glasrohstoff ein neues Kostensenkungspotenzial für die Herstellung des Solarkollektors. Auch bei geringen Blähmittelzugaben und bei relativ geringen Temperaturen weisen GR 1 und GR 2 eine vorteilhafte Schäumung gegenüber F im Sinne einer möglichst geringen Schaumdichte auf. Zur besseren Vergleichbarkeit der alternativen Glasrohstoffe wurden im Laufe des Projektes parallel auch stets Schäumungen mit F durchgeführt. Die Blähung von F stellte sich in den erfolgten Versuchen als vergleichsweise unproblematisch heraus, bedarf allerdings deutlicher Optimierungen in Hinblick auf die erwünschten Schaumeigenschaften. Aufgrund der höheren Kosten dieses Rohstoffs gegenüber den zuvor beschriebenen Rohstoffen stellt F derzeit lediglich eine gute Rückfallvariante dar. Werden die Schaumstrukturen jedoch verglichen, ist festzustellen, dass F gleichmäßiger schäumt (siehe Abbildung 4).



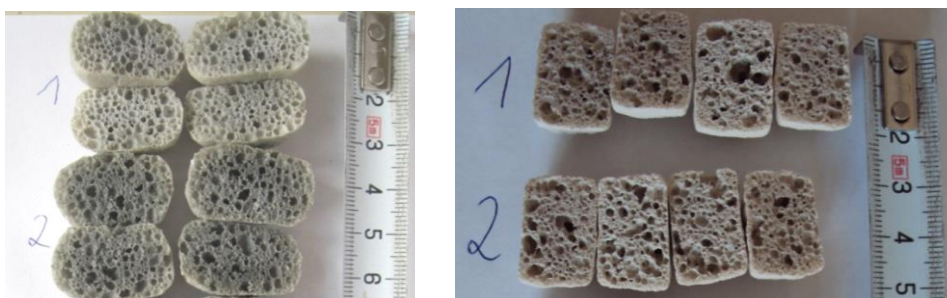
**Abbildung 4: Schaumglas bei gleicher Schäumungstemperatur und unterschiedlichen Blähmittelmengen (Nr. 1 und 2): links: GR 1; rechts: Floatmehl**

Zum Vergleich der beiden Glasrohstoffe GR 1 und GR 2 wurde deren Schäumungsverhalten unter Berücksichtigung zweier unterschiedlicher Blähmittel untersucht. Dabei ergaben sich für beide Glasrohstoffe bei jeweils gleichen Blähmitteln und gleichen Blähmittelanteilen im Wesentlichen übereinstimmende Schaumdichten.

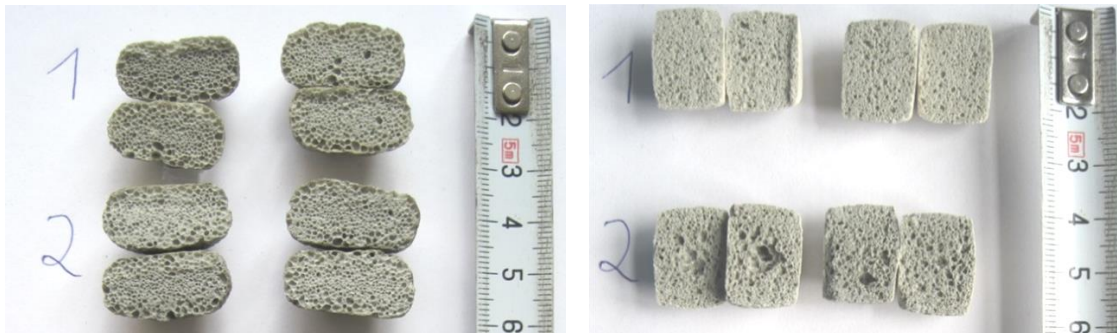
Auffällig sind allerdings zwei wichtige Unterschiede: die Schaumform und die Porengrößenverteilung. Die mit GR 2 geschäumten Gläser weisen stärker die Tablettenform auf, mit der sie in den Ofen eingebracht wurden (erkennbar an den eckigeren Querschnitten

der Schäume; siehe Abbildung 5 und Abbildung 6). Dies deutet auf eine höhere Viskosität des Glases bei Schäumungstemperatur hin, was bereits bei der Untersuchung der Rohstoffe (siehe Kapitel 3.2) gezeigt wurde. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in dem höheren Aluminiumionengehalt des Rohstoffes, welcher mittels Elementanalyse nachgewiesen werden konnte. Die Aluminiumionen werden in diesem Glas als Netzbildner eingebaut, d.h. das Glasnetzwerk wird verfestigt, was den Viskositätsabfall mit steigender Temperatur im Schäumungsbereich verlangsamt. Ein positiver Effekt dieses verfestigten Glasnetzwerkes ist eine höhere Festigkeit des Glases. Negativ wirkt sich dies hingegen auf die Schäumung in der Hinsicht aus, dass zur Erzielung der gleichen Viskosität bei GR 2 eine höhere Temperatur notwendig ist. Die Laborversuche zeigen allerdings, wie oben bereits erwähnt, dass die erreichten Schaumdichten vergleichbar mit denen des GR 1 sind. Das bedeutet wiederum, dass trotz schlechterer Voraussetzungen für die Schäumung bezüglich der Viskosität das Glas genauso gut bläht, also vermutlich grundsätzlich mehr Gas freisetzen kann. Drei Gründe für die gute Gasfreisetzung sind die höheren Eisen- und Schwefelgehalte sowie der größere Glühverlust. Eisen kann gelöst im Glas sowohl zwei- als auch dreiwertig vorliegen und besitzt somit die Fähigkeit durch Reduktion Sauerstoff zur Blähung frei zu geben. Schwefel liegt im Glas ebenfalls in verschiedenen Oxidationsstufen gelöst vor, wobei durch eine Reduktion des Glases einerseits wieder Sauerstoff frei wird und andererseits die Löslichkeit des Schwefels selbst sinkt. In diesem Fall trägt der Schwefel ebenfalls zur Schäumung des Glases bei.

Die inhomogenere Schaumstruktur ist im Labormaßstab (wie in Abbildung 5 und Abbildung 6 zu erkennen) noch relativ unproblematisch, könnte sich bei größeren Bauteilen allerdings zu Fehlern mit festigkeitssenkendem Einfluss ausweiten. Daher ist für den Kollektor bei GR 2 besonders auf eine homogene Mischung im Gemenge zu achten.



**Abbildung 5: Schaumglas bei gleicher Schäumungstemperatur und unterschiedlichen Anteile (Nr. 1 und 2 in den Bildern) an Blähmittel 1: links: GR 1; rechts: GR 2**



**Abbildung 6: Schaumglas bei gleicher Schäumungstemperatur (wie in Abbildung 5) und unterschiedlichen Anteilen (Nr. 1 und 2 in den Bildern) an Blähmittel 2: links: GR 1; rechts: GR 2**

Weiterhin wurde bei den Versuchen zur Schäumung der Rohstoffe GR 1 und GR 2 festgestellt, dass sich die Schaumdichte nahezu unabhängig von Temperaturregime und Blähmittelmenge kaum unter  $0,35 \text{ g/cm}^3$  senken ließ. Aus diesem Grund wurde mit weiteren Untersuchungen des Rohstoffes und des Schaumes aus diesem Rohstoff nach den Ursachen für diese stagnierende Blähung gesucht. Aus XRD-Analysen ging hervor, dass sowohl der Rohstoff als auch der Schaum Kristallphasen enthalten, also nicht wie erwartet amorph vorliegen. Während im Rohstoff hauptsächlich Calcit und Quarz vorhanden sind, kommen im Schaum Diopsid ( $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ) und Wollastonit ( $\text{CaSiO}_3$ ) vor. Diese Kristallphasen wurden ebenfalls von Bernado et.al. [7] in kristallisierenden Glasschäumen gefunden. In ihrem Artikel beschreiben sie einerseits die viskositätserhöhende Wirkung und andererseits die Festigkeitssteigerung durch Kristallphasen. Die unterschiedlichen Kristallphasen in den Rohstoffen GR 1 und GR 2 gegenüber deren Schäumen zeigen, dass es während der Schäumung zu einer Kristallisation kommt. Die fortschreitende Kristallisation während der Schäumung erhöht die Glasviskosität und bewirkt einen steigenden Widerstand gegen die Blähung. Somit ist die beobachtete Begrenzung der Dichte auf etwa  $0,35 \text{ g/cm}^3$  zu erklären. Um dem entgegenzuarbeiten, wurde ein rein amorpher Glasrohstoff zur Senkung des Kristallanteils erfolgreich zugegeben. Die untere Grenze der Schaumdichte wurde dann nicht detaillierter untersucht. Es ist allerdings davon auszugehen, dass Dichten unter  $0,2 \text{ g/cm}^3$  mit dieser Maßnahme zu erreichen sind.

Auf die positive Auswirkung der Kristallisation auf die Festigkeit des Schaumkörpers wird in Abschnitt 3.4.3 näher eingegangen.

Die einzelnen Glasrohstoffe zeigten in den Untersuchungen sehr unterschiedliche Charakteristiken. Mit den im Folgenden beschriebenen Versuchen sollten die verschiedenen Gläser und damit deren Vorteile kombiniert werden. Dazu wurden Gemenge mit bis zu 90 Ma.-% GR 2, maximal 20 Ma.-% TV und bis zu 45 Ma.-% SVZ unter gleichem

Temperaturregime bei 800 °C im Ofen wärmebehandelt. Abbildung 7 zeigt eine Zusammenstellung der dabei entstandenen Proben.

Es lässt sich die grundsätzliche Tendenz erkennen, dass sowohl mit steigendem TV-Anteil als auch mit steigendem SVZ-Anteil das Glas weniger stark schäumt und die Dichte zunimmt (nicht nur aufgrund der größeren Rohdichte von TV und SVZ gegenüber GR 2). Die Schäumbarkeit nimmt durch Zugabe von SVZ stärker ab als durch TV, was an der fehlenden Beteiligung von SVZ an der Schäumung liegt. Dieses Glas fungiert bei 800 °C noch als nahezu inerter Zuschlagstoff. Des Weiteren ist wahrscheinlich, dass SVZ die Kristallisation fördert. Dies wurde allerdings nicht durch Analysen belegt. Der Rohstoff TV hingegen erweicht sogar früher als das Basismaterial GR 2 (siehe Kapitel 3.2), wodurch die Versinterung der Glaspartikel begünstigt wird. Dadurch werden entstehende Gase früher in Hohlräumen gefangen und zur Schäumung genutzt. Im Gegenzug trägt TV allerdings aufgrund wesentlich geringerer Mengen an gelöstem Gas vermutlich kaum zur Schäumung aktiv bei, was sich bei höheren TV-Anteilen negativ auf das Porenvolumen auswirkt. Welcher der beiden Effekte (positiv und negativ) überwiegt, scheint auch vom Anteil an SVZ abzuhängen. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, schäumen bei steigendem SVZ-Anteil jene Gemenge mit mittlerem TV-Anteil am besten. An dieser Stelle soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse hauptsächlich zur Ergründung des Schäumungsverhaltens der Rohstoffe dienen, weniger zur Evaluierung von Schaumeigenschaften. Eine jeweilige Anpassung des Temperaturregimes würde voraussichtlich auch optimierte Schaumeigenschaften ergeben. Ein weiterer Parameter zur Optimierung ist die Partikelgröße des Glasrohstoffes. Die Rohstoffe von TV und SVZ bestanden in den Versuchen aus größeren Partikeln, die schlechter Versintern weniger Hohlräume bilden.



Abbildung 7: Überblick über Glasschäume aus variierenden Anteilen der drei Glasrohstoffe GR 2/ TV/ SVZ



Auch wenn die Kombination mehrerer Glasrohstoffe eine Ergänzung der einzelnen positiven Eigenschaften erhoffen lässt, fiel für den weiteren Projektverlauf die Konzentration auf einen Glasrohstoff. Für die Einstellung eines optimierten Schäumungsprozesses mit mehreren Komponenten wäre ein hoher Arbeitsaufwand erforderlich gewesen. Der Rohstoff GR 2 wurde für die weitere Verwendung ausgewählt, da er als Reststoff kostengünstig ist, eine ausgezeichnete Schäumbarkeit zeigt und Glasschäume mit vergleichsweise hoher Festigkeit ermöglicht, wie in Abschnitt 3.4.3 noch gezeigt wird.

### **3.4.2 Optimierung der Schäumbarkeit**

In weitergehenden Laborversuchen wurden diverse Gemengezusätze und Prozessparameter untersucht, um die Schaumeigenschaften im Sinne der Anwendung im neuen Solarkollektor zu optimieren.

#### Rußuntersuchung:

Da bezüglich der Rohstoffkosten, der dunklen Färbung des Glasschaumes sowie der Blähwirkung Ruß als Blähmittel besonders vielversprechend erscheint, wurden zehn Typen dieses Materials mit unterschiedlichen Eigenschaften (spezifische Oberfläche, Primärpartikelgröße, chemische Oberflächengruppen) verglichen. Die Überlegungen waren dabei folgende: Je größer die spezifische Oberfläche und je mehr chemische Oberflächengruppen, desto früher sollte ein Ruß im Schäumungsprozess oxidieren. Der Ruß sollte einerseits nicht reagieren, bevor das Glaspulver dicht versintert ist, und andererseits sein Reaktionsmaximum bei der maximalen Schäumungstemperatur erreichen.

Thermoanalysen (TG, DSC) der verschiedenen Ruße zeigen deutliche Unterschiede bezüglich der Zersetzungstemperaturen. Sowohl Reaktionsbeginn und –ende als auch die Reaktionsmaxima unterscheiden sich um bis zu 100 K. Schäumungsversuche an Würfeln mit 5 cm Kantenlänge bestätigten schließlich die Erwartungen. Wie in Abbildung 8 an drei ausgewählten Glasschäumen zu sehen ist, zeigen sich deutliche Unterschiede in Blähverhalten, Farbintensität und Farbverteilung. Diejenigen Ruße mit der höchsten spezifischen Oberfläche zeigen zwar tendenziell die dunkelste Schwarzfärbung (Beurteilung mit dem bloßen Auge), beginnen allerdings bereits bei zu niedrigen Temperaturen zu reagieren. Dadurch bleibt zumindest in der äußeren Schaumschicht nicht genügend Restkohlenstoff zur Färbung, was sich nachteilig auf die Konzeptidee des solaren Absorbers aus Schaumglas auswirken würde. Möglicherweise kann dieser Nachteil durch Schäumung unter sauerstoffarmer Atmosphäre oder Kombination geeigneter Ruße aufgehoben werden.

Aufgrund des homogensten Schäumungsbildes und der am besten passenden Thermoanalyse wird für die weiteren Versuche der Ruß mit der geringsten spezifischen Oberfläche als beste Lösung für die Gläser GR 1 und GR 2 erachtet.



**Abbildung 8: Schaumglasquerschnitte unter Verwendung unterschiedlicher Ruße als Blähmittel**

Als konzeptionelle Alternative besteht für einen hellen Glasschaum potentiell die Möglichkeit, das Wärmeträgermedium einzufärben. In diesem Fall bestünde keine Abhängigkeit mehr der solaren Absorption vom Absorptionskoeffizienten des Schaumglases. Im Projekt wurde diese Alternative jedoch nicht näher untersucht.

Weiterhin zeigten einige Versuche, dass eine Kombination zweier unterschiedlich wirkender Blähmittel positiv auf die Schäumung Einfluss nimmt. Eine Interaktion der Blähmittel bewirkt hier vermutlich eine Verstärkung der Einzelmechanismen. Als Beispiel sei der gleichzeitige Einsatz von Kalk und Ruß genannt. Das bei der Zersetzung des Kalks freiwerdende  $\text{CO}_2$  bildet mit dem Ruß das Boudouard-Gleichgewicht wodurch  $\text{CO}_2$  zugunsten  $\text{CO}$  abgebaut wird. Der demnach sinkende  $\text{CO}_2$ -Partialdruck führt zur Verstärkung der Kalkzersetzung.

Zur Verstärkung der Schäumung wurden verschiedene Zuschlagstoffe getestet, welche Blasenbildung und –wachstum unterstützen sollten, um eine noch geringere Wärmeleitfähigkeit der Schaumglasgrundplatte bei geringeren Rohstoff- und Energiekosten zu erreichen. Um die Blasenbildung zu verbessern, muss der kritische Blasenradius  $r_{\text{krit}}$  gesenkt werden. Blasen, die größer als dieser Radius sind, können weiter wachsen. Kleinere Blasen schrumpfen wieder. Sinkt also der kritische Blasenradius, werden mehr Bläschen in die Lage versetzt zu wachsen. An folgender Gleichung werden die Maßnahmen deutlich, die zur Verbesserung der Blasenbildung beitragen können:

$$r_{\text{krit}} = \frac{2 \cdot \tilde{\alpha}}{p_{\text{RG}} + p_{\text{D}} - p_{\text{U}}}$$

$r_{\text{krit}}$  ... kritischer Blasenradius

$\gamma$  ... Oberflächenspannung

$p_{\text{RG}}$  ... Partialdruck der Reaktionsgase

$p_{\text{D}}$  ... Dampfdruck der Glasbestandteile

$p_{\text{U}}$  ... Umgebungsdruck

Die Oberflächenspannung des Glases sollte durch Zugabe von Oxidationsmitteln gesenkt werden. Eine Erhöhung des Partialdrucks der Reaktionsgase wird ebenfalls durch Oxidationsmittel erreicht und sollte daneben weiterhin durch eine Senkung der Gaslöslichkeit des Glases hervorgerufen werden.

#### Oxidationsmittel:

Die positive Wirkung von Oxidationsmitteln ist in der Industrie und in der Forschung bereits lange bekannt. In der Literatur wird hauptsächlich der Einsatz von Eisen-, Mangan- und Ceroxid diskutiert. Ein wichtiger Vorteil der Oxidationsmittel ist eine homogene Sauerstoffverteilung im Glasschaum [8], die vor Allem bei größeren Schaumkörpern eine gleichmäßigere Schaumstruktur hervorrufen soll. Untersucht wurden im Projekt die Stoffe Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Kaliumpermanganat ( $\text{KMnO}_4$ ). Das Kaliumpermanganat hat dabei den Vorteil, dass es bereits unterhalb der Sintertemperatur des Glases (um  $T_{\text{G}}$ ) beginnt, Sauerstoff abzuspalten. Die Ergebnisse der Versuche spiegeln diesen Vorteil wider. Während das Eisenoxid (Anteil 1 – 4 %) keinen signifikanten Einfluss auf die Dichte ausübte, konnte mit 1 % Kaliumpermanganat die Dichte bereits um etwa 25 % gesenkt werden. Für eine positive Wirkung des Eisenoxids war die Schäumungstemperatur von 820 °C vermutlich noch zu gering.

#### Ofenatmosphäre:

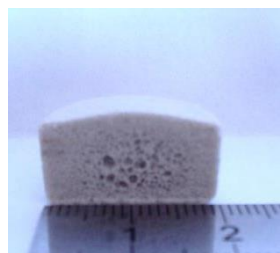
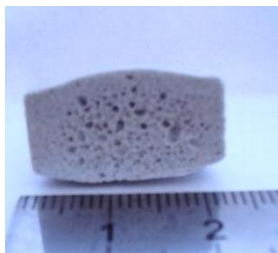
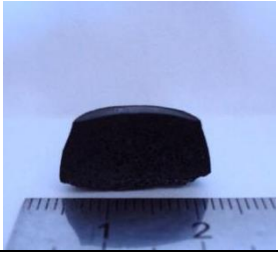
Die Ofenatmosphäre ist ein nicht zu vernachlässigender Parameter bei der Glasschäumung. Zur Evaluierung wurde Glas in reduzierender Atmosphäre (Formiergas, 90 %  $\text{N}_2$ , 10 %  $\text{H}_2$ ), inerte Atmosphäre (100 %  $\text{N}_2$ ) und oxidierender Atmosphäre (synthetische Luft) geschäumt. Ein Überblick über die wesentlichen Ergebnisse ist in Tabelle 6 zu finden. Die Untersuchungen ergaben, dass sich eine inerte Atmosphäre am besten für die Schäumung eignet, da das Blähmittel (Ruß, SiC) nicht zu früh reagiert. Wenn eine reduzierende Atmosphäre angelegt wird, sind die Bedingungen zusammen mit dem Blähmittel zu stark reduzierend, sodass die Schwefellöslichkeit im Glas sehr hoch ist und weniger Gase frei werden (vgl. Abbildung 9). Außerdem wird dadurch der kritische Blasenradius vergrößert. Bei

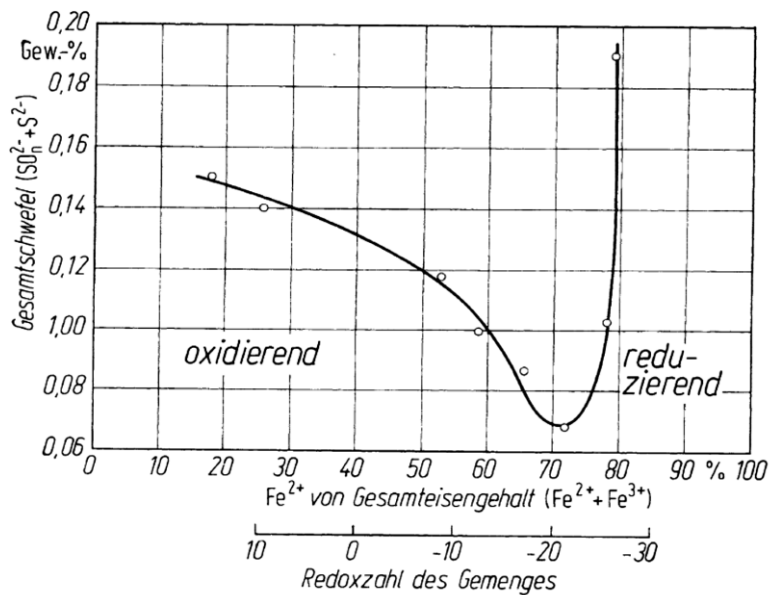


oxidierender Atmosphäre hingegen oxidiert das Blähmittel zu früh und steht nicht mehr der Blähung zur Verfügung. Außerdem ist festzustellen, dass SiC weniger negativ auf zu viel Sauerstoff reagiert als Ruß. Dies liegt vermutlich an der Entstehung einer  $\text{SiO}_2$ -Schutzschicht auf den SiC-Partikeln, die die weitere Oxidation hemmt. Bei großen Schaumkörpern ist die Auswirkung auf die Schaumdichte nicht so stark, jedoch auf die Farbe in der Außenschicht.

Diese Versuche zeigen, dass eine kontrollierte Ofenatmosphäre für eine spätere Produktion unabkömmlich ist.

**Tabelle 6: Abhängigkeit der Schäumung von der Atmosphäre bei Ruß und SiC als Blähmittel**

|                   | 1 % Ruß                                                                             | 1 % SiC                                                                              |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| synthetische Luft |    |    |
| Stickstoff        |   |   |
| Formiergas        |  |  |



**Abbildung 9: Abhängigkeit der Schwefellöslichkeit im Glas vom Redoxzustand**

#### Festigkeitssteigerung:

Damit beim Schaumglasgrundkörper eine möglichst geringe Dichte realisiert werden kann (Dämmwirkung des Glasschaumes, Gewicht des Kollektors), ohne die mechanischen Eigenschaften zu stark zu verschlechtern, sollte die Festigkeit des Schaumes verbessert werden. Ein Schwerpunkt wurde hier auf das Temperaturregime und dabei hauptsächlich auf die Schäumungstemperatur und die Haltezeit dieser Temperatur gelegt. Dieser Bereich des Temperaturregimes hat den größten Einfluss auf die Schaumstruktur und wirkt sich damit besonders stark auf die Schaumfestigkeit aus. Für eine hohe Festigkeit sind kleine Poren erstrebenswert, sodass theoretisch sowohl die Temperatur als auch die Haltezeit minimiert werden sollten. Praktisch allerdings sind diese beiden Parameter gegenläufig: je höher die Schäumungstemperatur ist, desto geringer ist die notwendige Haltezeit, um die gleiche Dichte zu erhalten. Die Versuche ergaben jedoch höhere Festigkeitswerte bei geringeren Temperaturen mit längeren Haltezeiten, vermutlich da infolge des geringeren Gasdrucks in den Poren und der geringeren Koaleszenzneigung (Neigung der Blasen zum Zusammenschluss) die Poren kleiner sind. Ein weiterer Vorteil geringerer Schäumungstemperaturen mit längeren Haltezeiten ist die bessere Homogenität in Temperatur- und damit in Porengrößenverteilung, was sich vor allem bei großen Formen auf die Festigkeit auswirkt. Einen Eindruck von den Verhältnissen dieser Parameter zeigt Tabelle 7. Darin sind die Festigkeiten von Biegestäben (55 mm x 15 mm x 10 mm) zu sehen, welche bei unterschiedlichen Temperaturen und mit unterschiedlichen Haltezeiten geschäumt wurden.

**Tabelle 7: Biegefestigkeiten bei verschiedenen Maximaltemperaturen**

| <b>Maximaltemperatur mit Haltezeit</b> | <b>3-Punkt-Biegefestigkeit [MPa]</b> |
|----------------------------------------|--------------------------------------|
| 30 min Haltezeit bei 760 °C            | 1,37 ± 0,17                          |
| 20 min Haltezeit bei 800 °C            | 1,32 ± 0,11                          |
| 10 min Haltezeit bei 840 °C            | 0,99 ± 0,11                          |
| ohne Haltezeit bei 840 °C              | 1,20 ± 0,09                          |

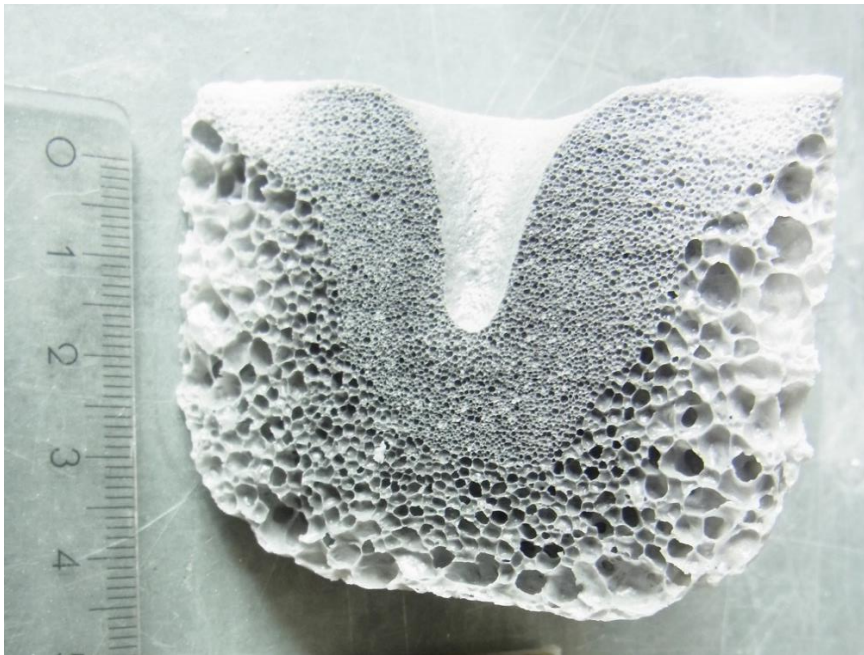
Daneben beeinflusst auch die Abkühlgeschwindigkeit die Festigkeit stark. Da sich hierbei allerdings Laborergebnisse kaum auf den Industriemaßstab anwenden lassen, wird dieser Einfluss erst an großen Formen evaluiert werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt zur Steigerung der Schaumfestigkeit war die Verstärkung durch Fasern. Einerseits wurden verschiedene Stahlfasertypen gleichen Materials aber unterschiedlicher Dicken (Mikrometerbereich) und Längen (Millimeterbereich) zum Schaumglasgemenge hinzugegeben. Theoretisch sollten diese einen positiven Einfluss auf die Schaumfestigkeit haben, da die Fasern eine höhere Festigkeit, Bruchdehnung sowie einen höheren Elastizitätsmodul besitzen als die Matrix. In den Versuchen wurden leichte Festigkeitssteigerungen festgestellt. In der Tendenz steigt die Festigkeit mit steigendem Faseranteil und steigender Faserdicke. Die stärkste Festigkeitserhöhung im Rahmen der Versuchsreihen wurde bei 10 % Anteil der größten Fasern gemessen. Hier ergab sich eine um 17 % höhere Festigkeit als bei der Nullprobe. Bei einem Preis von etwa 10 €/kg würden 10 % Stahlfasern im Gemenge jedoch die Rohstoffkosten um etwa 20 € pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche erhöhen. Dies ist nicht mit dem Ziel eines kostengünstigen Kollektors vereinbar.

Weiterhin wurden Glasfasern zur Verstärkung hinzugegeben. Hierbei zeigten sich allerdings keine Vorteile. Kieselglasfasern überleben die Schäumung, verschlechtern aber die Blähung – vermutlich durch die Bildung von Kanälen, durch die die Blähgase entweichen können. Alle weiteren Glasfasertypen lösen sich in der Schaumglasmatrix auf.

Da die ersten Versuche zur Entwicklung einer Fügetechnologie (siehe Kapitel 3.5) bereits zeigten, dass die Zugfestigkeit des Schaumglases an den Verbindungsstellen infolge des

Kollektorrinnendrucks eine begrenzende Größe werden könnte, wurden Lösungsansätze verfolgt, die stark belasteten Bereiche der Schaumglasgrundplatte zu verstärken. Bei einem dieser Ansätze sollte die strukturierte Seite der Platte mit einem dichteren und damit mechanisch stabilerem Schaum ausgestattet werden. Zur Erhaltung der guten Wärmeisolierung muss auf der unstrukturierten Seite weiterhin ein Glasschaum mit geringer Dichte vorliegen. Um dem Ziel einer möglichst kostengünstigen Produktion nachzukommen, wurde versucht, den Dichteunterschied in einem Prozessschritt und damit in einem monolithischen Schaumkörper zu realisieren. Wie in dem Beispiel in Abbildung 10 zu sehen ist, konnten mit unterschiedlichen Blähmittelmengen und -arten solche Körper im Labormaßstab hergestellt werden.



**Abbildung 10: Monolithischer Glasschaumkörper mit Schichten unterschiedlicher Dichte (erkennbar an Porengrößen)**

Eine weitere Möglichkeit, die mechanisch intensiver belasteten Bereiche zu verstärken, besteht darin, eine dichte Glasschicht (Porosität nahe Null) von wenigen Millimetern Dicke zu erzeugen. Dafür wurden die Glasrohstoffe F, TV und Braunglas als Pulver mit Ruß zur Schwarzfärbung gemischt und als erste Schicht unter das schäumende Gemenge in die

Form gegeben. Es gelang, eine dunkel gefärbte Glasschicht zu erzeugen, ohne dieses Glas zu schäumen. Durch die Versinterung der Glaspartikel entstanden jedoch Schwindungsrisse, durch die das schäumende Gemenge hervortrat. Die dichte Schicht war daher nicht vollständig durchgängig. Eine Lösung des Problems könnte durch die Wahl größerer Partikel und breiterer Partikelgrößenverteilungen erreicht werden. Diese zeigen eine geringere Schwindung bei der Sinterung. Getestet wurde dieser Lösungsansatz mittels kleiner Glaskugeln (Durchmesser 0,4 – 0,6 mm und 1,25 – 1,65 mm). Mit diesen konnte eine rissfreie Schicht im Labormaßstab (13 cm x 13 cm) erzeugt werden. Auch wenn eine Verwendung dieser Glaskugeln mit 1 – 2 €/kg sehr teuer wäre, zeigt der Versuch, dass mit größeren Partikeln eine durchgängige Schicht möglich ist.

Beim zweiten Lösungsansatz wird eine Flachglasscheibe in die Struktur der Form einsinken gelassen und bildet so eine durchgängige, dichte Schicht. Unterstützt durch den Schäumungsdruck bei der Blähung bildet die Scheibe sehr gut die Kontur der Form ab. Auch das konnte im Labormaßstab gezeigt werden.

### **3.4.3 Festigkeit der Schaumgläser**

Durch eine teilweise Kristallisation des Glasrohstoffes GR 2 konnte ein positiver Effekt auf die Festigkeit gemessen werden. Die Biegezugfestigkeit eines Gemischs aus GR 2 mit einem amorphen Zusatz war rund 40 % höher als bei einem nicht kristallisierenden F-Gemenge. Da der Grund in dem Kristallanteil gesehen wird, wurde versucht, durch die Zugabe eines Tones die Kristallisation zu fördern und damit die Festigkeit eines sonst amorphen Glasschaumes zu erhöhen. Überraschenderweise stieg durch eine Zugabe von 5 % Ton der Kristallanteil im Glasschaum nur um 1,3 %, die Festigkeit jedoch um etwa 60 %. Vermutlich löst sich ein großer Teil des Tones im Glas, wodurch sowohl der Aluminium- als auch der Siliziumgehalt im Glas steigen. Dadurch würde sich die intrinsische Festigkeit der amorphen Matrix selbst erhöhen.

Weiterhin wurde die Wirkung einer glatten, geschlossenen Außenhaut auf die Festigkeit eines Glasschaumkörpers untersucht. Der Theorie nach sollten Körper mit dieser Haut stabiler sein als ohne Haut, da sich die Festigkeit von Glas allgemein wesentlich nach der Fehlergröße an der Oberfläche richtet. Offene Poren an der Oberfläche sollten große Fehler darstellen, an denen es zu Spannungsüberhöhungen kommt, welche für eine geringe Festigkeit verantwortlich sind. In den Untersuchungen wurden Proben mit und ohne durchgängige Außenhaut sowie Proben auf Basis von GR 2 und F verglichen. Da bei den häufigsten Anwendungen der Glasschaum auf Druck belastet wird, hat sich für die

Charakterisierung der mechanischen Stabilität in diesem Werkstoffbereich die Druckprüfung etabliert. Aus diesem Grund wurden auch unsere Glasschäume auf diese Art und Weise geprüft. Eine gute Orientierung des Prüfverfahrens gibt hierbei die DIN EN 826: 1996.

Untersucht wurden vier Versuchsreihen, die auf Grundlage vorangegangener Laborversuche als vergleichbar erachtet wurden:

- 1) Glasschaum auf Basis F mit 3 % SiC; Schäumung bei 950 °C; ohne Außenhaut
- 2) Glasschaum auf Basis F mit 3 % SiC; Schäumung bei 950 °C; mit Außenhaut
- 3) Glasschaum auf Basis GR 2 mit 1 % Ruß; Schäumung bei 800 °C; ohne Außenhaut
- 4) Glasschaum auf Basis GR 2 mit 1 % Ruß; Schäumung bei 800 °C; mit Außenhaut

Der Vergleich zwischen den Versuchsreihen 1 und 3 ergab sowohl hinsichtlich der Mittelwerte als auch der Standardabweichungen gleiche Ergebnisse. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass der Schaum aus GR 2 eine um ca. 10 % geringere Dichte aufwies. Das bedeutet, dass er bezogen auf die Dichte eine höhere Festigkeit besaß. Außerdem ist am ungleichmäßigeren Verlauf des Versagens (Kraft-Dehnungs-Kurve) die weniger homogene Schaumstruktur des GR 2-Schaumes, wie bereits in Abschnitt 3.4.1 beschrieben wurde, ablesbar.

Werden die Proben mit und ohne Haut miteinander verglichen, ist festzustellen, dass bei F der Schaum mit Haut eine höhere Festigkeit aber auch eine höhere Standardabweichung als der Schaum ohne Haut zeigt. Der Schaum auf Basis GR 2 besitzt hingegen mit Haut eine etwas geringere Festigkeit mit höherer Standardabweichung als ohne Haut. Außerdem sind an den Kraft-Dehnungs-Kurven zwischen mit Haut und ohne Haut stark abweichende Versagensverläufe sichtbar, die zur Erklärung der unterschiedlichen Festigkeiten beitragen: Ohne Haut werden Spannungen infolge der Belastung durch Brechen der äußeren Porenwände abgebaut. Mit Haut können diese Spannungen nicht abgebaut werden, da die Haut an sich stabiler ist. Dadurch entwickeln sich allerdings größere Spannungen, die zum spontanen Versagen durch Sprödbruch führen, was dann wiederum entscheidend von der Oberflächenqualität der Haut abhängt. Die Oberflächenqualität war bei Versuchsreihe 2 deutlich besser als bei Versuchsreihe 4, wodurch sich die Unterschiede in der Festigkeit erklären lassen. Das zeigt, dass auch die Oberflächenqualität berücksichtigt werden muss.

Daneben ist noch nicht geklärt, inwieweit die Prüfung mit Druckbelastung für die Anwendung des Glasschaumes im Kollektor aussagekräftig ist. Dort ist der Glasschaum infolge des Kollektorrinnendrucks vor allem durch Biegung und Zug belastet.

### 3.5 Verfahrenstechnische Grundlagen der Fügetechnologie

#### Mechanische Prüfmethoden:

Auf dem Arbeitsgebiet der Verbindungstechnologie wurde damit begonnen, Testverfahren für die Bewertung der Verbindungsfestigkeit zu entwickeln. Dabei soll aufgrund des Lastfalls in der späteren Anwendung die Verbindung Schaumglas/ Flachglas mittels Zugbelastung geprüft werden, wofür am Institut zwei mögliche Prüfanordnungen erarbeitet und getestet wurden.

Aufgrund besser variierbarer Klebeflächen und der Anzeigemöglichkeit einer Kraft-Dehnungs-Kurve wurde eine Prüfung in Anlehnung an die DIN EN ISO 527 gewählt. In Abbildung 11 ist die Anordnung bildlich dargestellt. An der Schraube, die im rechten Bild zu erkennen ist, wird die Zuglast aufgebracht. Sie wird in einen Metallzylinder eingeschraubt, der zur Kraftübertragung auf die Verbindung geklebt ist. Der Schaumglaswürfel wird mittels zweier Auflager neben dem Zylinder festgehalten.



**Abbildung 11: Anordnung zur Zugprüfung von Verbindungen**

#### Klebstoffe:

Laut Literatur sollen Silikonkleber zwar schlechtere Anfangsfestigkeiten verglichen mit beispielsweise Polyurethan(PU)-Klebern bei den Verbindungen erreichen, jedoch die beste Alterungsbeständigkeit gegen die genannten Belastungen aufweisen und dadurch die Festigkeit am stabilsten über lange Zeiten halten [9]. Weiterhin ermöglicht die vergleichsweise hohe Elastizität dieses Klebstoffes den Ausgleich thermischer Dehnungsunterschiede zwischen den verbundenen Elementen. Zwei Klebstoffe auf Silikonbasis (1-Komponenten- und 2-Komponenten-Klebstoff), die aufgrund ihrer theoretischen Eigenschaften für die Anwendung unter thermischer, chemischer und UV-Belastung als geeignet erschienen, wurden daraufhin genauer betrachtet. Da 1-K-Silikone

unter Luftfeuchtigkeit vernetzen, wodurch bei breiteren Klebefugen sehr lange Reaktionszeiten nötig sind, wurden diese für eine spätere Anwendung ausgeschlossen. 2-K-Silikone vernetzen durch eine Reaktion der beiden Komponenten, was wesentlich geringere Reaktionszeiten zur Folge hat. Dieses Silikon wurde daher für die experimentelle Untersuchung ausgewählt.

Festigkeitsprüfungen an verklebten Schaumglas-Flachglas-Verbunden ergaben, dass bei geringen Glasschaumdichten die Bruchfläche überwiegend im Glas liegt, also die Zugfestigkeit des Schaumglases die begrenzende Größe darstellt. Ob eine glatte Außenhaut oder geöffnete Poren an der Oberfläche des Glasschaumes die Klebefläche bilden, ist für die Festigkeit dabei kaum relevant. Mit steigender Schaumdichte nimmt auch die Zugfestigkeit der Verbindung zu; solange bis die Schaumfestigkeit nicht mehr die Schwachstelle ist. Je nach Oberflächen- und Klebequalität versagt die Verbindung dann aufgrund mangelnder Adhäsion oder Kohäsion des Klebstoffes. Aus diesen Resultaten ist zu erkennen, dass die Schaumfestigkeit ein wichtiger Parameter der Verbindung ist und gegenüber den herkömmlichen Glasschäumen erhöht werden sollte. In diesem Zusammenhang wurden dann auch die Versuche zur Erzeugung eines Dichtegradienten im Glasschaum (siehe Abschnitt 3.4.2) durchgeführt.

Nach den Untersuchungen der ungealterten Verbindungen sollte die Festigkeitsveränderung nach chemisch-thermischem Angriff getestet werden. Das verwendete 2-K-Silikon (OttoColl S610 von OTTO Chemie) soll laut Hersteller alterungs-, witterungs-, UV- und temperaturbeständig bis 180 °C sein sowie über eine recht hohe Festigkeit verfügen [10]. Die Versuche zeigten allerdings, dass in Kombination der Bedingungen hohe Temperatur und Wasserkontakt (bereits bei 95 °C) diese Klebstoffe erweichen lassen und, je nachdem welche Temperaturen vorherrschen, nur noch eine sehr geringe Zugfestigkeit vorliegt. Damit müssen diese Silikone für die Anwendung im Solarkollektor ausgeschlossen werden.

Neben dem Silikon wurden zwei 2-K-Epoxidharze (Turbocoll 2000 von Boldt und UHU Plus Endfest 300) sowie ein Silikonharz (SILRES MSE 100 von Wacker) untersucht. Bei allen drei Klebstoffen wurden die gleichen Resultate beobachtet: Die Verbindungen halten dem Heißwasserangriff nicht stand.

Lotgläser:



Eine weitere Fügetechnologie, von der eine bessere chemische Stabilität zu erwarten war, ist die Verbindung mittels Lotgläser.

Dazu wurden verschiedene Lotgläser nach ihren Eigenschaften Wärmedehnung und Transformationsbereich bewertet. Auf dieser Basis wurde das Glaslot VL88 C von Telux für Versuche ausgewählt. Dieses Glaslot hat einen WAK von  $8,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (zwischen 20 und 300 °C) und eine Verarbeitungstemperatur zwischen 410 und 420 °C [11].

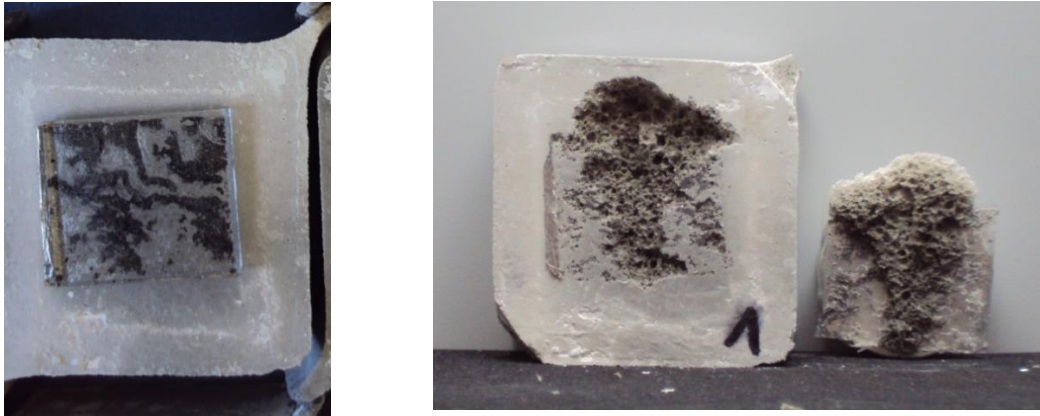
Mit Hilfe dieses Lotglases konnte zwar eine rissfreie Verbindung hergestellt werden, jedoch verfügt dieses Lotglas ebenfalls nicht über die nötige hydrolytische Beständigkeit. Unter Heißwasserangriff wurde die Schicht bereits nach kurzer Zeit stark angegriffen, sodass eine dauerhafte Verbindung damit nicht erreichbar ist. Die Begründung dafür liegt im strukturellen Zusammenhang von Erweichungstemperatur, WAK und chemischer Beständigkeit. Allgemein gelten folgende Tendenzen: Je niedriger ein Glas erweichen soll, desto schwächer müssen dessen Bindungsverhältnisse sein. Gleichzeitig bewirken allerdings schwächere Bindungen einen höheren WAK und eine schlechtere chemische Beständigkeit.

#### Lotmetalle:

Als Alternative zu Klebstoffen und Lotgläsern wurden zur Befestigung der Deckgläser auf dem Schaumglas verschiedene Metalle untersucht. Aus vergangenen Forschungsarbeiten (z.B. [12]) am Lehrstuhl ist bekannt, dass bei der Kontaktierung von Aluminium mit Glas bei erhöhten Temperaturen ein Ionenaustausch zwischen den Materialien stattfindet, wodurch eine von Email bekannte Übergangsschicht entsteht, welche die beiden Werkstoffe verbindet. Der gleiche Mechanismus ist auch mit niedriger schmelzenden Metallen wie Zinn oder Zink denkbar. Aufgrund der großen Differenz der WAK von Glas und Metall muss darauf geachtet werden, dass die Metallschicht sehr dünn ist. Ansonsten entstehen zu große Spannungen im Glas, die zum Verbindungsbruch führen können.

Zur Verbindung von Gläsern mittels Aluminium wurden verschiedene Darreichungsformen des Aluminiums – Pulver, Gieß, Spray, Folie, Blech – getestet. Mit Pulver und Gieß konnten keine gute Verbindung erreicht werden. Schon die Aluminiumpartikel versinterten sogar bei Temperaturen bis 700 °C (Schmelzpunkt Aluminium: ca. 660 °C) kaum. Die Ursache liegt vermutlich in der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht auf der Oberfläche der Partikel, welche bereits bei Raumtemperatur vorliegt. Beim Aluminiumspray entstehen bessere Verbindungen, die allerdings nicht vollflächig realisiert werden können. Beim Verdampfen der Lösungsmittel im Spray entstehen Entgasungskanäle, die den Kontakt mit dem Glas unterbrechen. Die Aluminiumfolie stellt einen ähnlich guten aber unvollständigen Kontakt zwischen den Glasoberflächen her, da sie zu dünn ist, um die leichten Unebenheiten des Schaumglases

auszugleichen (siehe Abbildung 12 links). Trotzdem konnte eine maximale Zugfestigkeit von 0,8 MPa bei einer Schaumdichte von 0,5 g/cm<sup>3</sup> erzielt werden. Die Schwachstelle lag hierbei im Schaumglas (siehe Abbildung 12 rechts), wobei dieses Problem durch eine dichtere Oberflächenschicht gelöst werden soll.



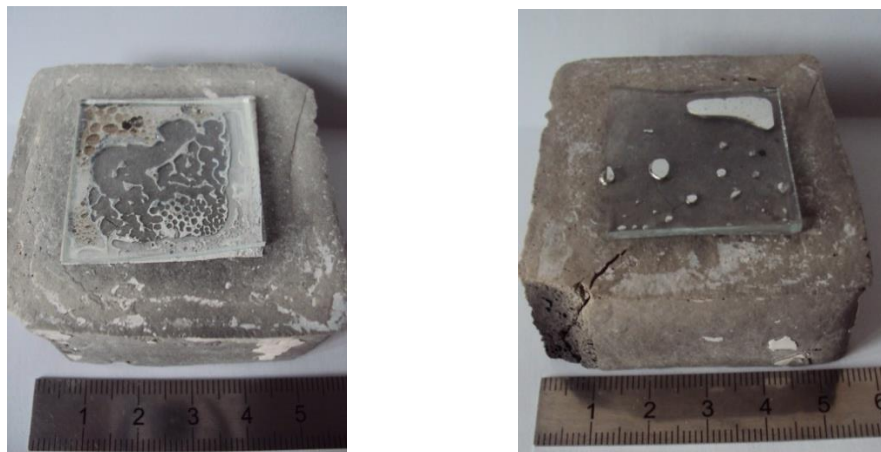
**Abbildung 12: Verbindung Schaumglas/ Flachglas mittels Aluminiumfolie; links: vor der mechanischen Prüfung; rechts: nach der mechanischen Prüfung**

Das Problem des unvollständigen Kontakts sollte durch die Verwendung einer dickeren Aluminiumfolie bzw. eines Aluminiumblechs gelöst werden. Umso dicker jedoch die Aluminiumschicht ist, desto größer werden die Spannungen in der Verbindung. Mit 0,3 mm konnte eine Schichtdicke gefunden werden, die sowohl einen guten Kontakt als auch akzeptable Spannungen ermöglicht. Um bei der Prüfung der Zugfestigkeit eine verdichtete Schaumglasschicht zu simulieren (Schwachstelle nicht im Schaum), wurden jeweils zwei Flachglasscheiben mit dem Aluminiumblech verbunden. Die Messungen ergaben Werte bis zu 2,1 MPa. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die beiden Seiten einer Floatglasscheibe (Zinnbadseite und Atmosphärenseite) unterschiedliche Verbindungsqualitäten ergeben. Die Atmosphärenseite zeigt deutlich stärkere Wechselwirkungen mit dem Aluminium und höhere Festigkeiten als die Zinnbadseite. Die Ursachen dieser Beobachtung konnten noch nicht erforscht werden.

Durch weitere Optimierungen an dieser Fertigungstechnologie sind vermutlich noch große Festigkeitssteigerungen möglich. So könnte beispielsweise die Blechdicke des Aluminiums bis zum Mindestmaß, bei dem gerade noch ein vollflächiger Kontakt zu erreichen ist, reduziert werden. Die Kontaktierung des Aluminiums mit dem Glas kann, so haben Versuche gezeigt, durch Anlegen einer sauerstoffarmen Atmosphäre und durch höheren Anpressdruck verbessert werden. Auch hinsichtlich der Maximaltemperatur und der Haltezeit muss an einem Optimum gearbeitet werden. Die Spannungen im Verbund können reduziert werden, indem eine Legierung mit einem niedrigeren WAK verwendet wird. 12 % Silizium

(Eutektikum) als Legierungselement lässt den WAK zwischen 20 und 100 °C von 23,6 auf  $20,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  sinken [13].

Aufgrund der aussichtsreichen Ergebnisse mit Aluminium sollte auch Zinn als Lotmetall überprüft werden. Zinn schmilzt bereits bei etwa 230 °C und sollte das Fügen somit bei niedrigeren Temperaturen ermöglichen als mit Aluminium. Da für eine bedeutende Wechselwirkung mit dem Glas allerdings Temperaturen notwendig sind, die deutlich über dem Schmelzpunkt des Zinns liegen, bildete das Zinn während des Prozesses Tröpfchen zwischen den Glasoberflächen. Diese bildeten entweder unter Sauerstoffeinwirkung einen sehr ungleichmäßigen Film oder unter reduzierender Atmosphäre unterschiedlich große Zinntropfen (siehe Abbildung 13).



**Abbildung 13: Verbindung Schaumglas/ Flachglas mittels Zinn; links: unter Luft hergestellt; rechts: unter reduzierender Atmosphäre hergestellt**

#### Dichtungen:

Da die Klebstoffe zwar die mechanische Aufgabe der Verbindung leisten könnten, jedoch nicht gleichzeitig die Dichtungsaufgabe bei hohen Temperaturen, entstand der Lösungsansatz die Aufgaben zu trennen. Für Dichtungen, auch unter chemisch und thermisch anspruchsvollen Bedingungen, gibt es auf dem Markt verschiedene Materialien. Dazu gehören beispielsweise EPDM, PTFE oder HTV-Silikon.

Zur Abdichtung des Kollektors zwischen Schaumglas und Flachglas bietet sich eine Flachdichtung an, um die Anpresskraft auf eine größere Fläche zu verteilen. Die Anpresskraft wiederum könnte mit Hilfe einer Rahmenkonstruktion oder auch mittels Dämmstoffdübel generiert werden. Die Dübel könnten dazu ins Schaumglas eingeschraubt werden und dadurch die Kraft in den Kollektorkörper ableiten. Zugversuche mit dem Dämmstoffdübel FID 50 von Fischer (siehe Abbildung 14 links) ergaben Werte für die Zugkraft bis rund 500 N bei einer Dichte des Glasschaumes von  $0,165 \text{ g/cm}^3$ . Dabei ist der

Schaumglasblock (50 x 50 x 50 mm<sup>3</sup>) zerbrochen. Bei einer höheren Schaumdichte ist von entsprechend höheren maximalen Lasten auszugehen. Da sich die Dämmstoffdübel FID 50 in dichteres Schaumglas aufgrund der höheren Schaumfestigkeit allerdings nicht mehr einbringen ließen, musste hierfür eine andere Lösung gefunden werden. Dazu wurden 50 mm lange Gewindemuffen aus Stahl mit einem groben Außengewinde in die Prüfwürfel eingeschäumt. Bei einer Schaumdichte von 0,44 g/cm<sup>3</sup> wurden Zugkräfte bis rund 850 N gemessen. Dabei zerbrach nicht der Würfel sondern es löst sich die Muffe (siehe Abbildung 14 rechts).



**Abbildung 14:** links: Dämmstoffdübel und zugehöriges Loch im Schaumglas vor der Zugprüfung; rechts: Gewindemuffe mit hinterlassenem Loch im Schaumglas nach der Zugprüfung

Auch bei den Rohrleitungsanschlüssen ist eine Entkopplung der mechanischen und chemischen Anforderungen eine Lösungsmöglichkeit. So kann die Befestigung der Anschlüsse mittels Schraubverbindung, unter Umständen kombiniert mit einer Klebeverbindung zur Schwingungsdämpfung, realisiert werden. Durch ein Loch im Schaumglas wird ein Rohr mit einseitigem Flansch so gesteckt, dass sich der Flansch im Kollektorinneren befindet. Von außen wird das Rohr mittels Mutter gekontert. Die Abdichtung würde mit Hilfe einer chemisch beständigen (O-Ring-)Dichtung zwischen Flansch und Schaumglas gewährleistet werden.

#### eingeschäumte Rohre:

Eine wesentlich elegantere Lösung der Anschlüsse sieht folgendermaßen aus: Ein 90°-Rohrbogen aus Gusseisen wird direkt im Blähprozess des Glases eingeschäumt. Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, weichen die WAK des Glases und des Gusseisens nicht sehr stark voneinander ab. Das ermöglicht nicht nur die rissfreie Entformung der GE-Form sondern auch das rissfreie Einschäumen der GE-Rohre. Zur Verbesserung der Anbindung

an das Schaumglas wird das Rohr emailliert. Dazu wird eine Emailfritte (Pulver), die einen WAK zwischen Schaumglas und GE hat, als wässrige Suspension auf das Rohr aufgetragen und bei etwa 800 °C eingebrannt. Das Einbrennen kann während des Schäumungsprozesses in der Form geschehen. Das Emaillieren der GE-Rohre hat sich als positiv herausgestellt. In einer Versuchsreihe wurde die Anbindung der Rohre an die Schaumglasmatrix untersucht. An die eingeschäumten Rohre wurde eine Torsionslast angelegt und gemessen, bei welchem Drehmoment die Rohre aus der Matrix brachen. Die blanken GE-Rohre lösten sich bei einem Drehmoment von 62 Nm. Die emaillierten Gussrohre hingegen hielten dem maximal messbaren Drehmoment von 100 Nm stand. Die technologische Umsetzung konnte im Labor erfolgreich getestet werden.

### **3.6 Theoretische Betrachtung zur Optimierung der Strömungseigenschaften**

Um die Energieeffizienz des Solarkollektors so optimal wie möglich gestalten zu können, ist auch die Strömungsführung des Wärmeträgerfluids zu betrachten. Die Strömungsführung beeinflusst dabei sowohl die Wärmeübertragung vom Absorber auf das Fluid als auch die benötigte elektrische Pumpenleistung infolge der hydraulischen Verluste bei der Durchströmung des Kollektors. In der Literatur ist ein Kanalsystem zu finden, welches mit Hilfe bionischer Ansätze dieses Ziel verfolgt [14]. Die stark verzweigte Struktur, welche beispielsweise an den Verlauf von Blutbahnen erinnert, lässt sich bei der Strömungsführung herkömmlicher Flachkollektoren mit Rohren nicht realisieren. Sie bietet sich stattdessen für die Formgebung nach dem Rollbond-Verfahren an.

Die Kanalfäche des Schaumglaskollektors entspricht ungefähr der Absorberfläche und sollte daher möglichst groß sein. Die Stege zwischen den Kanälen werden aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Glases vermutlich kaum zur Erwärmung des Fluids beitragen und sollten dementsprechend möglichst dünn gestaltet werden und eine geringe Fläche einnehmen. An diesen Überlegungen wird bereits erkenntlich, dass die Strömungsführung nicht gleich den Rollbond-Kollektoren oder Rippe-Rohr-Kollektoren gestaltet werden kann.

Da für eine vertrauenswürdige Simulation der Strömung und des Wärmeübergangs im Kollektor selbst ein Fachmann mehrere Wochen bis Monate beschäftigt wäre, sollte eine gute Strömungsführung für den Prototypen zumindest durch eine systematische Betrachtung gefunden werden.

Zur Gestaltung des Prototypen wurde eine Strömungsführung gewählt, die einer Harfenströmung gleich kommt. Hinweise zur Gestaltung von Wärmetauschern in

Harfenstruktur werden von Martin [15] gegeben. Für eine möglichst homogene Strömungsverteilung wurden die Verteiler- und Sammlerquerschnitte größer gewählt als die Querschnitte der Steigrohre. Außerdem soll die Homogenität gefördert werden, indem der Sammlerquerschnitt größer ist als der Verteilerquerschnitt. Weitere Maßnahmen zur Förderung der Strömungshomogenität sind theoretisch erarbeitet wurden, bisher jedoch noch nicht umgesetzt. Dazu zählt, dass der Strömungswiderstand der Steigrohre im Kollektor dominant sein sollte und dass die Übergänge Verteiler/ Steigrohr sowie Steigrohr/ Sammler möglichst verlustarm gestaltet werden [16].

### **3.7 Labormaßstäbliche Fertigung von Prototypen**

#### Schäumungsform:

Vor der Herstellung des Prototypen steht die Fertigung der Form. Die Entscheidung fiel auf das Formenkonzept, bei der die strukturierte Seite aus Gusseisen verwendet und der Rest der Form aus mehreren Teilen zusammengesetzt wird. Damit soll die Entformung des Glasschaumes am wenigsten problematisch gelingen.

Da für die Schäumung ein elektrisch beheizter Kammerofen mit einer Innenraumfläche von 780 mm x 830 mm zur Verfügung steht, sollte die Form eine maximale Fläche von 700 mm x 700 mm einnehmen. Daraufhin wurde eine Platte mit der negativen Kollektorstruktur konstruiert (Zeichnung im Anhang). Diese wurde in Form gegossen und Sand gestrahlt. Damit eine glatte Oberfläche entsteht, die insbesondere für die Entformung aber auch für die Verbindung Schaumglas/ Flachglas wichtig ist, wurde die Kontur noch einmal nachgefräst. Auf dieser Platte wurde eine Rahmenkonstruktion bestehend aus fünf Einzelteilen befestigt. Diese Einzelteile wurden aus einem warmfesten Stahl gefertigt.

#### Formvorbereitung:

Zur Vorbereitung der Form auf die Schäumung werden die Einzelteile im Ofen auf 160 °C vorgewärmt und anschließend mit einer Kaolinsuspension an den Flächen, die später mit dem Schaumglas in Kontakt stehen, besprüht. Fixiert werden die Einzelteile mit Hilfe von Schrauben und Muttern aus Edelstahl.

#### Gemengevorbereitung und Formbefüllung:

Da der Übergang von den Laborversuchen auf diesen Prototypmaßstab mit vielen Parameterveränderungen einhergeht, wurde zunächst eine Gemengezusammensetzung gewählt, die eine vergleichsweise unkomplizierte Schäumung versprach. Als Glasrohstoff wurde F gewählt, Ruß zur Färbung und Kalk als zusätzliches Blähmittel.

Die Gemengebestandteile werden in einem Eirich-Intensivmischer miteinander vermengt. Um die Homogenität der Mischung zu verbessern, werden zwei Methoden angewandt. Einerseits werden die Blähmittel zunächst in eine ca. 10 %-ige Vormischung gebracht. Dies erfolgt mit Hilfe von Mischkugeln in einem Überkopfmischer. Im Eirich-Mischer wird die Vormischung mit dem restlichen Glasrohstoff vermengt. Andererseits werden nach einer Trockenmischzeit von einer Minute nochmals 0,5 % Wasser zugegeben. Das Wasser fördert dabei nicht nur die Homogenität des Gemenges sondern reduziert auch die Verstaubung beim Handling.

Das Gemenge wird anschließend in die vorbereitete Form gegeben und leicht angedrückt. Die Komprimierung der Schüttung verbessert infolge der höheren Wärmeleitfähigkeit des dichteren Schüttgutes die Temperaturhomogenität während der Aufheizphase. Um Schichten unterschiedlicher Dichte im Schaumglas zu erzeugen, werden die verschiedenen Gemenge nacheinander homogen in der Form verteilt und jeweils angedrückt.

Gemäß den Laborversuchen wurde versucht, eine dichte Schaumglasoberfläche zu schaffen, indem vor der Schäumung eine Glasscheibe in die Struktur der Form einsinken gelassen wurde. Bei einer Einsinktemperatur von 700 °C konnten die besten Ergebnisse erzielt werden. Bei tieferen Temperaturen sinkt das Glas weniger stark ein. Bei höheren Temperaturen hingegen dichtet das Glas bereits ausreichend gut gegen die Form ab, sodass eingeschlossene Luft nicht mehr entweichen kann und Blasen bildet.

#### Temperaturregime:

Das folgende Temperaturregime hat sich nach einigen Versuchen als positiv erwiesen, muss allerdings durch geringfügige Veränderungen an unterschiedliche Gemenge angepasst werden.

Von Raumtemperatur erfolgt eine rasche Erwärmung mit 6 K/min auf 550 °C. In diesem Temperaturintervall laufen kaum Prozesse ab, sodass die Heizrate unkritisch ist. Zwischen 550 °C und 650 °C erfolgt die Versinterung des Gemenges. Diese sollte gleichmäßig erfolgen. Um dafür eine homogene Temperaturverteilung zu erreichen, wird mit nur 1,5 K/min erwärmt. Zwischen 650 °C und der Schäumungstemperatur von 800 °C wird wieder mit 6 K/min geheizt, damit das Glas schnell dicht sintert und die entstehenden Blähgase nicht entweichen. Bei 800 °C erfolgt eine 60-minütige Haltezeit, damit sich die Temperatur gleichmäßig im Glas verteilt und eine homogene Porengrößenverteilung entsteht. Um bei der Abkühlung ein Zusammenfallen des Schaumes infolge des abnehmenden Gasdrucks zu verhindern, wird mit 2 K/min auf 650 °C abgekühlt. Danach richtet sich die Abkühlrate nach der maximalen Auskühlung des Ofens. Eine aktive Kühlung ist nicht möglich.



### Ergebnisse der Prototypenschäumung:

Sind Temperaturregime, Gemengezusammensetzung und –masse gut aufeinander abgestimmt, wird die Form vollständig mit dem Glasschaum gefüllt. Die Kanalstruktur lässt sich ausschäumen und die Geometrie wird dabei gut abgebildet (siehe Abbildung 15 links). Wird die Form allerdings nicht zu 100 % ausgefüllt, fehlt der notwendige Druck, um das Glas in jede Ecke zu pressen.

Das Schaumglas ist auch bei Abkühlung auf Raumtemperatur mühelos und zerstörungsfrei entformbar. Die Spannungen zwischen Form und Schaumglas werden also nicht zu groß. Auch das Trennmittel funktioniert einwandfrei.

Es konnte auch in diesem Maßstab der positive Effekt der Zugabe von GR 2 zum Float festgestellt werden. Schon 10 % GR 2 verstärkten die Schäumung deutlich. Weiterhin konnte die Erzeugung unterschiedlich dichter Schichten aus den Laborversuchen im Prototypmaßstab reproduziert werden (siehe Abbildung 15 rechts). Durch Strömungen bei der Schäumung bleibt die Grenze zwischen den Schichten allerdings nicht gleichmäßig horizontal. Die Ursache für diese Ungleichmäßigkeit ist vermutlich die Temperaturinhomogenität im Gemenge. Die minimal erreichte Schaumdichte beträgt  $0,25 \text{ g/cm}^3$ . Insgesamt ist die Dichte des Schaumglases noch zu senken und die Porengrößenverteilung zu optimieren. Ein Ofen mit besserer Temperaturhomogenität kann vermutlich einen großen Beitrag dazu leisten.

Neben der Dichte des Schaumes ist weiterhin auch dessen Farbe an der Oberfläche verbesserungswürdig. Dies könnte durch die Einstellung einer definierten Atmosphäre bei der Schäumung optimiert werden, ist jedoch an dem verwendeten Ofen nicht möglich. Hier konnte nur unter Luft geschäumt werden. Der Sauerstoff in der Luft führt zur Oxidation des Rußes an der Oberfläche.



**Abbildung 15: Schaumglas für Prototyp; links: Grundkörper; rechts: Schaumstruktur im Querschnitt**



Die Schäumung eines Körpers mit dichter Oberflächenschicht mittels zuvor voreingesunkener Glasscheibe war nicht erfolgreich. Ein Problem war die eingeschlossene Luft, die infolge ihrer thermischen Ausdehnung einen großen Hohlraum im Schaumkörper erzeugte. Vermieden werden könnte dies entweder durch Bohrungen in der Formplatte, die der Entgasung dienen, oder indem die Glasscheibe bereits vor der Schäumung vollständig an der Form anliegt und somit keine Luft vorhanden ist. Für letztere Variante wäre eine Pressformgebung für die Scheibe nötig anstatt eines freien Einsinkens. Ein weiteres Problem bestand in der sehr ungleichmäßigen Schichtdicke der Scheibe nach der Schäumung. Teilweise drückte das Schaumglas durch die dichte Glasschicht hindurch bis auf die Form. Um eine gleichmäßige Schichtdicke zu erhalten, sollte bei geringeren Temperaturen geschäumt werden, sodass die Glasscheibe infolge der höheren Viskosität weniger verdrängt wird. Daneben würde sich vermutlich auch eine homogenere Temperaturverteilung positiv auf den Erhalt der dichten Schicht auswirken. Ein letztes Problem entstand aufgrund der unterschiedlichen WAK des eingesunkenen Floatglases und des Schaumglases. Bei einem Schaumglas aus 50 % GR 2 und 50 % Floatglas wurde beispielsweise ein um  $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (zwischen 20 und 500 °C) höherer WAK gemessen als bei reinem Floatglas. Die Ursache hierfür liegt vermutlich im Kristallphasenanteil des Schaumglases. Behoben werden könnte dieses Problem durch Verhindern der Kristallisation im Schaumglas oder durch eine gezielte Erzeugung von Kristallphasen mit geringerem WAK.

#### Integration der Rohrleitungsanschlüsse:

Zur Integration der Rohrleitungsanschlüsse wurden die positiven Laborversuche zum Einschäumen von GE-Rohren genutzt. Zur Anwendung kamen dafür 90 °-Rohrbögen mit  $\frac{3}{4}$  " Durchmesser. Die Bögen bewirken im Vergleich zu geraden Rohren eine nochmals verbesserte Verankerung im Schaumglas. Die Rohrbögen müssen nach dem Emaillieren in der Form fixiert werden, damit sie während der Schäumung an ihrem vorgesehenen Ort bleiben. Dazu wurde jeweils an den diagonal gegenüber liegenden Ecken der Form ein Hilfsrohr durch ein Loch in der Formenwand in den Rohrbogen eingeschraubt und mit Hilfe einer Mutter von außen gekontert (siehe Abbildung 16).

Die Rohrleitungsanschlüsse konnten auf diese Weise sehr fest und rissfrei in den Kollektorgrundkörper eingeschäumt werden. In die Innengewinde der Rohrbögen lassen sich für den Einsatz des Kollektors die externen Rohrleitungen einfach einschrauben.



**Abbildung 16: Form mit fixierten Rohrbögen (Blick von oben)**

#### Verbindung der Deckgläser mit dem Schaumglaskörper:

Als Abdeckung des Kollektors sind gemäß dem Konzept zwei Deckgläser vorgesehen. Um von außen eine Kraft auch auf die untere Scheibe ausüben zu können, ist eine Kraftübertragung von der oberen Scheibe erforderlich. Bei einer Zwei-Scheiben-Isolierverglasung kann der Abstandhalter zwischen den Gläsern diese Aufgabe übernehmen. Daher wurde diese Lösung für den Prototyp ausgewählt. Die verwendete Verglasung bestand aus einer 3 mm-Floatglasscheibe auf der Oberseite und einer 4 mm-Floatglasscheibe auf der Unterseite, um der Last des Innendrucks standzuhalten.

Zunächst sollte der Kollektor mit einer Flachdichtung abgedichtet werden, wobei Schaumglaskörper und Glasabdeckung mit Hilfe einer Rahmenkonstruktion verpresst werden sollten. Als Dichtung wurde eine PTFE-Flachbanddichtung verwendet, da dieses Material einerseits für den Einsatz mit Heißwasserangriff geeignet ist und andererseits vergleichsweise weich ist, wodurch es Unebenheiten der Schaumglasoberfläche ausgleichen kann. Der Kollektor konnte auf diese Weise abgedichtet werden. Die untere Scheibe wurde allerdings bereits bei einem Kollektorinnendruck von etwa 0,1 bar zu stark belastet und brach. Der Grund hierfür ist die sehr große belastete Fläche. Die Kanalstege waren nicht mit der Scheibe verbunden und konnten somit keine Last aufnehmen. Die Schlussfolgerung aus dieser Erkenntnis lautet, dass die Stege unbedingt mit der unteren Scheibe verbunden sein müssen. Die Fluidkanäle dürfen laut Berechnungen dabei rund 50 mm breit sein, damit die Scheibe einem Innendruck von 5 bar problemlos standhält.

Um dies zu überprüfen wurden Verglasung und Schaumglaskörper mittels eines 2-K-Epoxidharzes am Rand und an den Stegen verklebt. Leider konnte der Innendruck jedoch nicht auf über 0,2 bar erhöht werden, da der Kollektor bei diesem Druck undicht wurde. Die Leckage befand sich vermutlich im Schaumglas (Dichte ca. 0,28 g/cm<sup>3</sup>) in der Nähe der Fügezone. Daraus ist zu schließen, dass die Festigkeit des Schaumglases in diesem Bereich deutlich erhöht werden müsste, um der Zugkraft aufgrund des Innendrucks zu widerstehen.

Die Verbindung mittels Aluminium wurde noch nicht im Prototypmaßstab getestet, da einerseits die technologischen Grundlagen noch nicht hinreichend untersucht werden konnten und andererseits der Schaumglaskörper ohnehin nicht die notwendigen mechanischen Eigenschaften aufweist, um dem Innendruck standzuhalten.

### **3.8 Abschätzung notwendiger Modifikationen und technischer Anforderungen für ein scale-up**

Größere Formen zu schäumen verlangt nach Anpassung des Temperaturregimes. Da die Wärme mehr Zeit benötigt, um in die Gemengemitte zu gelangen, werden geringer Heizraten und längere Haltezeiten notwendig. Dadurch können allerdings auch die Blähmittel stärker entweichen und stehen die Schäumung nicht mehr zur Verfügung. Daher werden möglicherweise mehr Blähmittel zu verwenden sein. Auch das Glas wird durch die veränderte Temperaturkurve mehr Zeit zur Kristallisation bekommen, was vermutlich Modifikationen verlangt.

Da bei einem größeren Produktionsmaßstab eine größere Menge an Rohstoffen aufbereitet und gemischt werden müssen, ist eine Anpassung der Zerkleinerungs- und Mischtechnik unumgänglich.

Um auf die Formbestandteile eine gleichmäßige Trennmittelschicht auftragen zu können, ist eine geeignete Sprühtechnik vorteilhaft. Damit Verschmutzungen im Produktionsraum verhindert werden und ein guter Arbeitsschutz gewährleistet werden kann, ist eine Sprühkammer mit Absaugung empfehlenswert. Diese kann ebenfalls zum Aufbringen des Emailpulvers auf die Rohrleitungsanschlüsse genutzt werden.

Wie bereits im vorigen Kapitel erklärt, sollte die Ofentechnik an die Anforderungen der Glasschäumung angepasst werden. Dabei sind eine möglichst homogene Temperaturverteilung, die Einstellung des Sauerstoffpartialdruckes sowie eine schnelle Heizung und Kühlung die wichtigsten Aspekte.

### **3.9 Abschätzung der Herstellkosten des Schaumglaskollektors**

#### **3.9.1 Investitionskosten**

Laut „A UK market survey for foam glass“[17] werden für eine Produktion von 45.000 m<sup>3</sup>/a Glasschaum ca. 6 Mio. € an Investitionskosten (Immobilie, Werksgebäude, Mühlen, Mischer, Ofen mit fossiler Beheizung, Transporttechnik, Elektrotechnik, Dienstleistungen für Planung und Beratung, Versand und Montage, Sonstiges (z.B. Werkzeug, Mobiliar, Fahrzeuge, Arbeitskraft)) notwendig. Da für die Schaumglaskollektoren im ersten Schritt nur ca. 200.000 m<sup>2</sup> Glasschaum pro Jahr, entsprechend etwa 20.000 m<sup>3</sup>, produziert werden sollen, können an dieser Stelle zunächst Kosten eingespart werden. Zusätzliche Kosten entstehen allerdings einerseits durch die Formen, in denen die Schäumung stattfindet und andererseits durch die zusätzlichen Fertigungsschritte zum Kollektor – der Emailierung der Rohrleitungsanschlüsse und der Verbindung mit der Kollektorabdeckung. Wird von einer Produktion von 200.000 m<sup>2</sup>/a ausgegangen, müssen pro Tag etwa 650 m<sup>2</sup> Glasschaum hergestellt werden. Da ein vollständiger Durchlauf einer Form durch die Produktionskette etwa 2 Tage dauert, sind für eine kontinuierliche Produktion etwa 1.300 m<sup>2</sup> Formen nötig. Aufgrund der unterschiedlichen Produkte und um eine Reserve bereitstehen zu haben, sollte von ca. 2.000 m<sup>2</sup> an Formen ausgegangen werden. Bei einem Preis pro Form von etwa 140 €/m<sup>2</sup>, bedeutet dies ein Investitionsvolumen für Formen von 280.000 €. Weiterhin werden für das Schaumglaswerk zusätzliche Kosten für die Fertigungsanlage zur Montage der Anbauteile erforderlich. In Summe werden sich die Investitionskosten des Schaumglaswerkes auf schätzungsweise 7 bis 10 Mio. € belaufen.

#### **3.9.2 Laufende Kosten**

Energiebedarf:

Bei einer herkömmlichen Schaumglas-Schotterproduktion werden für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Glasschaum etwa 100 kWh Energie benötigt. Für die Solarkollektorproduktion wird zusätzlich Energie zur Erwärmung der Formen, zum Emailieren der Rohrleitungsanschlüsse und zum Betrieb der Montageanlage benötigt, welche sich auf schätzungsweise ca. 300 kWh/m<sup>3</sup> respektive 30 kWh/m<sup>2</sup> belaufen wird. Bei einem Preis für Gas von ca. 4 ct/kWh würden die Energiekosten 1,20 €/m<sup>2</sup> betragen. Wird berücksichtigt, dass ein Teil der Energie aus teurerem elektrischen Strom gewonnen wird, belaufen sich die Energiekosten insgesamt auf etwa 2,2 €/m<sup>2</sup>.

Personalkosten:

In der vollkontinuierlichen Produktion werden für die Fertigung etwa 6 Facharbeiter pro Schicht benötigt. Ergänzt durch Führungskräfte und Verwaltung, umfasst das Betriebspersonal ca. 42 Personen. Um die Fertigungslöhne abschätzen zu können, soll die Orientierung an den Tariflöhnen der Papier, Pappe und Kunststoff verarbeitenden Industrie in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen dienen. Ab 03/2012 betragen diese 1.650 €/Monat bei 37 h/Woche. Werden hierzu die Sozialversicherungsbeiträge der Arbeitgeber von rund 21 % gerechnet, belaufen sich die Lohnkosten für 33 Facharbeiter auf rund 66.000 € im Monat. Verdienen 9 weitere Mitarbeiter in Verwaltung, Vertrieb und Geschäfts-/ Betriebsführung durchschnittlich 3500 €/ Monat ergeben sich hierfür nochmals rund 38.000 € pro Monat. Die Personalkosten belaufen sich damit in Summe auf 104.000 € pro Monat, was wiederum 6,20 €/m<sup>2</sup> entspricht.

#### Rohstoffkosten:

Für eine Glasschaumproduktion von 65 m<sup>3</sup>/d (650 m<sup>2</sup>/d, 10 cm Dicke) werden bei einer Schaumdichte von 250 kg/m<sup>3</sup> 16,3 Tonnen Glas pro Tag als Rohstoff benötigt. Es sei vorsichtig von Rohstoffkosten in Höhe von 50 €/t ausgegangen (zum Vergleich: teures Floatglasmehl fein: ca. 100 bis 150 €/t), was umgerechnet 815 €/d ergäbe. Hier kommen Blähmittel wie beispielsweise Glycerin und Ruß hinzu. In diesem Beispiel sei von Blähmittelanteilen ausgegangen, die sich im Labor bereits als wirkungsvoll erwiesen. Demnach würden 0,5 % (bezogen auf Masse des Glases) Glycerin einen Bedarf von 82 kg/d darstellen und bei einem Preis von 10 €/kg Kosten von 820 €/d verursachen. 1 % Ruß (163 kg/d) erzeugen bei einem Preis von ca. 1,50 €/kg 240 € Kosten pro Tag. Wasser (ca. 4 %) als Hilfsmittel kann in dieser Rechnung vernachlässigt werden. Somit ergeben sich in Summe für den Glasschaum 1875 €/d bzw. 2,90 €/m<sup>2</sup> an Rohstoffkosten.

Für den gesamten Kollektor kommen Verbindungsstoffe (z.B. Aluminiumfolie), zwei Deckgläser sowie zwei Rohrleitungsanschlüsse und Kollektorhalterungen für die spätere Montage. Bei einem Bedarf an Aluminiumfolie für 1 m<sup>2</sup> Kollektor von ca. 0,2 m<sup>2</sup> und einem Preis von 20 €/m<sup>2</sup> belaufen sich die Kosten auf 4 €/m<sup>2</sup>.

Für die untere Glasabdeckung genügt ein normales Floatglas mit 4 mm Dicke, was etwa 3 €/m<sup>2</sup> kostet. Das obere Flachglas sollte ein eisenarmes, thermisch vorgespanntes Walzglas sein, welches zu einem Preis von ca. 8 €/m<sup>2</sup> erhältlich ist.

Die beiden Rohrleitungsanschlüsse machen dann noch Kosten von ca. 5 € aus, Kollektorhalterungen Kosten von ca. 6 €.

Die notwendigen Rohstoffe und Anbauteile addieren sich in den Kosten damit zu 28,90 €/m<sup>2</sup>.

#### Formenkosten:

Zur Abschätzung der Formenkosten wird angenommen, dass eine Form durchschnittlich 50 Schäumungszyklen übersteht und 140 €/m<sup>2</sup> Form kostet. Somit ergeben die Formenkosten ca. 2,8 €/m<sup>2</sup> Glasschaum.

Abschreibungen:

Um die Abschreibungen einfach abschätzen zu können anhand einiger Maschinen und Anlagen, die im Schaumglaswerk Verwendung finden würden, eine mittlere Nutzungs- und Abschreibungsdauer ermittelt. Laut AfA-Tabellen gelten beispielsweise für folgende größere Anlagen die dazugehörigen Nutzungsdauern: Durchlauföfen 8 Jahre, Mischer 5 Jahre, Silos 8-12 Jahre. Auf dieser Grundlage werden Maschinen und Anlagen mit einem ungefähren Abschreibungsvolumen von 4 Mio. € linear über 8 Jahre abgeschrieben, was einer jährlichen Abschreibung von 500.000 € entspricht.

Weiterhin werden für Gebäude, Fahrbahnen, Parkplätze u.ä. lineare Abschreibungen in Höhe von 2 Mio. € über 20 Jahre angenommen, was 100.000 €/a an weiteren Abschreibungen bedeutet.

Pro Quadratmeter Kollektor ergeben sich damit insgesamt 3,00 € an Abschreibungen.

Kapitalkosten:

Für das notwendige Fremdkapital werden Zinszahlungen fällig. Im worst case werden 10 Mio. € für Investitionskosten sowie schätzungsweise 6,5 Mio. € für Liquiditätsreserven an Kapital benötigt. Davon werden geschätzt 50 % aus Fremdkapital gebildet und verzinst. Bei einem angenommenen Zinssatz von 6 % machen dies jährlich 0,5 Mio. € beziehungsweise 2,5 €/m<sup>2</sup> Kapitalkosten. Öffentliche Förderungen würden zur Senkung der Kapitalkosten beitragen, lassen sich zum derzeitigen Stand allerdings schwer quantifizieren.

Gemeinkosten/ Vertrieb:

Um die übrigen schlecht erfassbaren Kosten (z. B. Beratungshonorar, Bürobedarf, Dienstreisen, Marketing) zu berücksichtigen, werden weiterhin Gemeinkosten von pauschal 600.000 €/a bzw. 3 €/m<sup>2</sup> veranschlagt.

Die Summe der laufenden Kosten betragen für den Solarkollektor somit 48,60 €/m<sup>2</sup>.

### 3.10 Ökologische Bilanzierung

Zur ökologischen Bilanzierung wurden die kumulativen Energieaufwände (KEA) zur Herstellung der einzelnen Kollektorkomponenten abgeschätzt. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse dieser Betrachtung zusammengefasst.

**Tabelle 8: KEA der Kollektorkomponenten**

| Komponente   | Material                | Einheit        | Menge | KEA<br>[kWh/Einheit] | KEA<br>[kWh] | Quelle              |
|--------------|-------------------------|----------------|-------|----------------------|--------------|---------------------|
| Grundkörper  | Schaumglas              | m <sup>3</sup> | 0,1   | 250                  | 25,0         | eigene<br>Schätzung |
| Abdeckung    | Flachglas               | kg             | 17,5  | 3,69                 | 64,6         | [18]                |
|              | Flachglas<br>vorspannen | m <sup>2</sup> | 1     | 5,5                  | 5,5          | [18]                |
| Anschlüsse   | Gusseisenrohr           | kg             | 0,5   | 3,58                 | 1,8          | [19]                |
|              | Montagehalter, Stahl    | kg             | 0,3   | 6,5                  | 1,95         | [19]                |
| Verbindung   | Aluminiumfolie          | kg             | 0,054 | 39,1                 | 2,1          | [19]                |
| <b>Summe</b> |                         |                |       |                      | <b>100,9</b> |                     |

Streicher, Heidemann und Müller-Steinhagen [18] haben die KEA zweier Beispielanlagen mit 270 kWh/m<sup>2</sup> und 345 kWh/m<sup>2</sup> angegeben. Damit wird für den Schaumglaskollektor voraussichtlich nur etwa ein Drittel der Energie zur Herstellung benötigt als für herkömmliche Flachkollektoren. Der Großteil der Ersparnis stammt dabei aus dem Verzicht auf einen Metallabsorber und –rahmen.

### 3.11 Veröffentlichung der Ergebnisse

Im Laufe des Projektes wurden die Konzepte und die Projektergebnisse auf verschiedenen Messen und anderen Medien publiziert. Im Folgenden sind die Veröffentlichungen chronologisch geordnet aufgeführt:

- 10.08.2011: “Neue Solarthermiekonzepte“, Vortrag bei der 9. Sitzung des IAK Photovoltaik und Solarthermie des VDMA, Frankfurt

- 04.-08.04.2011: „Grüne Module aus Schwarzglas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Hannover Messe
- 18.-20.10.2011: „Helsta – complete glass. Grüne Solarkollektoren aus Schwarzglas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Messe Materialica, München
- Dezember 2011: „Neue Solarkollektoren aus schwarzem Glas“, Lasermagazin, Ausgabe 4, S. 55-57
- 23.-27.04.2012 „Grüne Solarkollektoren aus schwarzem Glas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Hannover Messe
- 08.05.2012 „Neue Solarkollektoren aus Glas“, Vortrag beim 28. Zwieseler Fachschulkolloquium, Zwiesel
- 23.-25.10.2012 „Glasschaum – Werkstoff für vielfältige Anwendungen“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Messe Materialica, München
- 29.-31.01.2013 „Grüne Solarkollektoren aus schwarzem Glas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Terratec/ Enertec, Leipzig
- 08.-12.04.2013 „Grüne Solarkollektoren aus schwarzem Glas“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Hannover Messe
- 15.-17.10.2013 „Innovative Wärme- und Schalldämmung mit Glasschaum“ (Standbetreuung mit Posterbeitrag), Messe Materialica, München



## 4 Fazit

Bezüglich des bevorzugten Glasrohstoffes GR 2 ist zu prüfen, ob auch andere als die bislang verwendete Quelle gleichzeitig genutzt werden können, um die Abhängigkeit vom Versorger zu umgehen und um eine große Produktion realisieren zu können. Daneben ist auch die Stabilität der Rohstoffeigenschaften zu untersuchen.

Bei der Verbindung des Flachglases mit dem Schaumglas mittels Aluminium besteht noch großes Optimierungspotenzial, wie in Kapitel 3.5 beschrieben wurde. Außerdem muss untersucht werden, ob sich auch große Formate verbinden lassen und ob die Zugfestigkeit des Schaumglases für den Betrieb ausreicht oder ob über außen angelegte Druckkräfte die Zugbelastung reduziert werden muss.

Bei der Einschäumung der Rohrleitungsanschlüsse muss überprüft werden, ob die Spannungen, die aufgrund der unterschiedlichen WAK von Gusseisenrohr und Schaumglasmatrix entstehen, auch bei großen Kollektoren noch gering genug sind, um eine rissfreie Verbindung zu gewährleisten.

Die Strömungsverteilung im Kollektor ist an einem Prototyp zu prüfen. Dabei sind etwaige Toträume der Strömung, der Druckverlust und die Homogenität der Strömungsverteilung über die Kollektorfläche zu untersuchen und zu optimieren. Eine Strömungsoptimierung mittels Simulation ist zu überdenken.

Der Prototyp sollte außerdem gefertigt werden, um die Leistungsfähigkeit des Kollektors ermitteln zu können. An dieser Messung ist schließlich abzuleiten, an welchen Stellen Optimierungsbedarf besteht.

Außerdem sollte im Laufe der weiteren Entwicklungen die Montagemöglichkeit des Kollektors auf Dächern und auch der Aspekt des Kollektorrecyclings betrachtet werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT; BÖHME, D. (Mitarb.); NICK-LEPTIN, J. (Mitarb.): Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung. Berlin, 2013. S 10
- [2] BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E.V.: Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie). URL [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de). Letzter Zugriff: 10.10.2013
- [3] CALSITHERM SILIKATBAUSTOFFE GMBH: Calcast. Datenblatt
- [4] GRIMMER, C.: Lieferprogramm. URL <http://www.burde-metall.at/tctable.htm>. Letzter Zugriff: 30.04.2013
- [5] FLASSENBERG, G.: Eigenschaften von Porenbeton. URL <http://www.bv-porenbeton.de/>. Letzter Zugriff: 30.04.2013
- [6] KOESE, S.; BAYER, G.: Schaumbildung im System Altglas-SiC und die Eigenschaften derartiger Schaumgläser. In: Glastechnische Berichte 55 (1982), Nr. 7. S. 151–160
- [7] BERNARDO, E.; SCARINCI, G.; BERTUZZI, P.; ERCOLE, P.; RAMON, L.: Recycling of waste glasses into partially crystallized glass foams. In: Journal of Porous Materials 17 (2010), Nr. 3. S. 359–365
- [8] GARCIA-TEN, J.; Saburit, A.; Orts, M. J.; Bernardo, E.; Colombo, P.: Glass foams from oxidation/reduction reactions using SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and AlN powders. In: Eur.J.Glass Sci. Technol. 52 (2011), Nr. 4. S. 103–110
- [9] LOTZ, S.: Untersuchungen zur Festigkeit und Langzeitbeständigkeit adhäsiver Verbindungen zwischen Fügepartnern aus Floatglas. Dissertation. Kaiserslautern. 1995
- [10] HERMANN OTTO GMBH: Technisches Datenblatt - Ottocoll S 610
- [11] TELUX SPEZIALGLAS GMBH: Lotglas für unterschiedliche Anwendungen
- [12] ARNOLD, L.: Wechselwirkung von heißen Glasoberflächen und Aluminium. Diplomarbeit. TU Freiberg. 2005. S.46 - 53
- [13] KAMMER, C.: Aluminium-Taschenbuch. 15. Auflage, 1. überarbeitete Ausgabe. Düsseldorf: Aluminium-Verlag. 1998. S. 201 f.
- [14] HERMANN, M.: Bionische Ansätze zur Entwicklung energieeffizienter Fluidsysteme für den Wärmetransport. Dissertation. Universität Karlsruhe. 2005. S. 77 - 79
- [15] MARTIN, H.: Wärmeübertrager. Stuttgart, New York: Thieme. 1988. S. 114 - 116

- [16] WEITBRECHT, V.; LEHMANN, D.; RICHTER, A.: Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions. In: Solar Energy 73 (2002), Nr. 6. S. 433–441
- [17] HURLEY, J.: A UK Market Survey for Foam Glass. In: WRAP Creating Markets for Recycled Resources (2003)
- [18] STREICHER, E.; HEIDEMANN, W.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.: Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit von thermischen Solaranlagen. OTTI - 14. Symposium Thermische Solarenergie. 24. - 26.04.2002
- [19] ITTERSHAGEN, M.: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas). Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/>. Letzte Aktualisierung: 17.09.2013

## Anhang

