



Entwicklung von Glasschäumen unter Einsatz von Abgas- & Mineralstäuben sowie Faserabfällen aus der Glasindustrie zur Verbesserung der Schmelztechnologie von Aluminium- und Kupferschmelzen vor dem Gießprozess

Abschlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem AZ: 38591/01
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Bewilligungsempfänger:

Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH

Projektpartner:

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Glas und Glastechnologie

Assoziierte Projektpartner (ohne Förderung):

ACTech GmbH Freiberg

Lauscha Fiber International GmbH

Erstellt durch:

Eberhard Engel (SM Freiberg)

Kathrin Choyna, Sindy Fuhrmann (TU BAF)

Freiberg, 26.05.2026

1 Inhaltsverzeichnis

2	Abbildungsverzeichnis	2
3	Tabellenverzeichnis	4
4	Zusammenfassung	5
5	Einleitung	6
6	Hauptteil	10
6.1	Anforderungsprofile für die Glasschäume	10
6.2	Laboruntersuchungen der alternativen Rohstoffe, d.h. Filterstäube und Glasfaserabfälle aus der Glasindustrie und deren Aufbereitung	10
6.3	Rohstoffauswahl und Laborversuche zur Entwicklung von Glasschäumen als Abdeckmittel auf Aluminiumschmelzen	13
6.4	Rohstoffauswahl und Laborversuche zur Entwicklung von Glasschäumen als Abdeckmittel auf Kupferschmelzen	15
6.5	Untersuchung der Wechselwirkung der Glasschäume mit den Schmelzen der Projektpartner	16
6.5.1	Wechselwirkung Aluminiumschmelze - Glasschaum	16
6.5.2	Wechselwirkung Kupferschmelze - Glasschaum	17
6.6	Untersuchung der Wechselwirkung der Glasschäume mit dem jeweiligen Feuerfestmaterial der Warmhalte- und Vergießtiegel	17
6.6.1	Aluminiumschmelze – SiC-Tiegelmaterial	18
6.6.2	Kupferschmelze – Feuerfestmaterial Schmelzöfen	18
6.7	Herstellung von Abdeck-Rohmaterial (Grünkorn) für Industrierversuche	21
6.8	Industrierversuche zur Abdeckung von Aluminiumschmelzen beim Projektpartner AC Tech Freiberg GmbH	22
6.9	Industrierversuche zur Abdeckung von Kupferschmelzen beim Projektpartner SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH	27
6.10	Entwicklung einer Recyclingtechnologie für Abdeckschäume & Möglichkeiten zur Wiederverwendung des ausgeschleusten Abdeckschaumes	34
6.11	Kostenkalkulation und Entwicklung einer Vermarktungsstrategie	36
6.12	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	39
7	Fazit	40
8	Literaturverzeichnis	41

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen der Glasfaser	11
Abbildung 2: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen von Filterstaub PW (Kalziumhydroxid)	12
Abbildung 3: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen von Filterstaub Rotary (Kalziumhydroxid)	12
Abbildung 4: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen – 50 % Faser/50 % FS PW	12
Abbildung 5: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen – 60 % Faser/40 % FS Rotary	13
Abbildung 6: Aufbereitung Glasfaser mittels Scheibenschwingmühle auf < 0,5 mm; links vorher, rechts nachher	13
Abbildung 7: Vergleich der Schäumreaktion mit organischem & anorganischem Blähmittel; links Glycerin (770 °C), rechts CaCO ₃ (770 °C)	14
Abbildung 8: Schäumreaktion mit Filterstaub im Gemenge; links FS Rotary 5 % (770 °C), rechts FS PW 5 % (750 °C)	14
Abbildung 9: Schäumverhalten im Blasigkeitsofen	15
Abbildung 10: Glasschaum mit Filterstaub im Gemenge; links FS PW 70 % (1200 °C), rechts FS Rotary 70 % (1180 °C)	16
Abbildung 11: EDX-Spektrum einer Aluminiumprobe nach Kontakt mit Glasschaumrezeptur	16
Abbildung 12: EDX-Linienscan (rot – Si; grün – Al) einer Aluminiumprobe nach Kontakt mit Glasschaumrezeptur	17
Abbildung 13: Fingertest SiC (Aluminiumschmelze) zur Korrosionsuntersuchung	18
Abbildung 14: Fingertest Mullit-Stampfmasse/Filterstaub zur Korrosionsuntersuchung	19
Abbildung 15: Schäumversuch - Gemenge mit Mullitmehl (links) & Quarzglasmehl (rechts)	20
Abbildung 16: Fingertest Mullit-Stampfmasse/Quarzglasmehl zur Korrosionsuntersuchung	20
Abbildung 17: Pelletierteller mit Durchmesser 50 cm (links) und 40 cm (recht	21
Abbildung 18: Mischer für 90 kg Batches & Pelletierteller Durchmesser 100 cm	21
Abbildung 19: Grünkorn mit anorganischem (links) & organischem Blähmittel	22
Abbildung 20: Industrieversuch AC Tech GmbH - links Induktionsofen mit Schmelze, rechts Grünkorn auf Schmelze	23
Abbildung 21: Messgerät zur Unterdruckdichtepfung [11]	23
Abbildung 22: Dichteindex bei Versuchen mit gecoatetem Grünkorn/Schaumglas	25
Abbildung 23: Widerstands-Tiegelofen mit Aluminiumschmelze & Schaumglasabdeckung	26
Abbildung 24: Messung Dichteindex mit coatiertem Schaumglas	26
Abbildung 25: Probenschliffe nach Unterdruckdichtemessung: von links – vor Abdeckung, nach 2 h Abdeckung, nach 7 h Abdeckung	27
Abbildung 26: Grünkorn nach Aufgabe auf eine Kupferschmelze (links); reduzierende Wirkung (rechts)	28
Abbildung 27: Glasschaum nach Einsatz als Abdeckung auf einer Kupferschmelze	29

Abbildung 30: Messung des Zinkabbrandes für zwei Kupferschmelzen	31
Abbildung 31: Warmhalteofen der Stranggussanlage; links mit Abdeckung, rechts nach Abschlacken	31
Abbildung 32: Temperaturverlauf der Kupferschmelze bei Abdeckung mit Grünkorn	32
Abbildung 33: Temperatur über der Schmelze nach Auflegen der Grünkornschicht	33
Abbildung 34: Temperatur über der Schmelze bei Abdeckung mit Holzkohle nach ca. 30 min	33
Abbildung 35: Temperatur über der Schmelze bei Abdeckung mit Grünkorn nach ca. 30 min	33
Abbildung 36: Glasschaum mit Schmelzeanhaftungen nach Industrieversuchen (links Al, rechts Cu)	34
Abbildung 37: Laborergebnis zum Recycling: Foto des Querschnitts eines Schaumglasgranulates aus recycelten Rohstoffen	35

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ICP-OES Glasfaser (¹ Juni '23; ² April '24)	11
Tabelle 2: ICP-OES Filterstaub Pelletwanne (¹ Juni '23; ² Juli '24; ³ April '24).....	11
Tabelle 3: ICP-OES Filterstaub Rotarywanne (¹ Juni '23; ² Juli '24; ³ April '24)	11
Tabelle 4: Untersuchung des Zinkabbrandes am Induktionsschmelzofen	30
Tabelle 5: Untersuchung des Zinkabbrandes am Kippschmelzofen	30
Tabelle 6: Kosten der Grünkornherstellung zur Abdeckung von Aluminiumschmelzen	36
Tabelle 7: Kosten der Grünkornherstellung zur Abdeckung von Kupferschmelzen...	36
Tabelle 8: Mögliche Kosteneinsparung bei Aluminiumschmelzen	37
Tabelle 9: Mögliche Kosteneinsparung bei Kupferschmelzen	38

4 Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben erfolgte die Entwicklung von Glasschäumen mit unterschiedlichen Temperaturanwendungen unter Verwendung von Abgas- und Mineralstäuben sowie Glasfaserabfällen aus der Glasindustrie. Diese dienen durch Aufbringen auf die Schmelze als Oxidations- bzw. Oberflächenschutz und sollen die Resorption von durch Metallschrottfeuchte gelösten Gasen ermöglichen ohne selbst mit der Schmelze zu reagieren.

Die Glasfaserabfälle konnten durch die Firma Grüning & Loske GmbH Laatzen auf $< 0,5$ mm zerkleinert werden und sind somit im Gemenge zum Granulieren geeignet. Im Labormaßstab wurden Schaumglasvarianten für verschiedene Temperaturanwendungen mit den Reststoffkomponenten entwickelt. Mittels Spektralanalyse (Funken-OES) und EDAX-Analysen konnte nachgewiesen werden, dass keine Reaktion der Glasschäume bzw. des Grünkorns mit den Aluminium- und Kupferschmelzen erfolgt. Die Untersuchung der Wechselwirkung verschiedener Schaumglasvarianten mit dem Feuerfestmaterial der Projektpartner zeigte, dass der Einsatz größerer Mengen Filterstaub zur Erhöhung der Erweichungstemperatur nicht geeignet ist. Dieser wurde im Verlauf des Projektes durch Quarzglasstaub bzw. Mullitmehl aus dem Recyclingprozess anteilig ersetzt. Durch diese Komponenten findet keine Korrosion statt.

Nach erfolgreichen Tests zur Granulierfähigkeit der ausgewählten Gemengerezepturen, wurde im kleintechnischen Maßstab eine ausreichende Menge Grünkorn für Industrierversuche an der TU BA Freiberg hergestellt.

Verschiedene Varianten konnten in Industrierversuchen bei den Projektpartnern SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH und ACTech GmbH Freiberg als Granulat bzw. Grünkorn in ihrer Beständigkeit und als Oxidations- bzw. Oberflächenschutz erfolgreich getestet werden. Die widersprüchlichen Ergebnisse in Bezug auf die Resorption von Wasserstoff aus Aluminiumschmelzen beim Projektpartner AC Tech GmbH und an der TU BA Freiberg erfordern weitere Untersuchungen.

Das Recycling der Glasschaumabdeckung ist prinzipiell möglich.

Im Projekt arbeiteten als Kooperationspartner die SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH, die TU Bergakademie Freiberg und als assoziierte Projektpartner AC Tech GmbH Freiberg & Microfine Glass Fiber, Lauscha Fiber International GmbH zusammen.

Die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt ermöglichte die Durchführung des Vorhabens mit dem Aktenzeichen 38591/01.

Der Abschlussbericht wird über die Bibliothek der DBU auf den Server der Deutschen Nationalbibliothek sowie auf die Website der DBU hochgeladen.

Um die Problematik der Wasserstoffreduzierung aus Aluminiumschmelzen durch eine Schaumglasabdeckung genauer und grundlegend zu klären, ist die zukünftige, weiterführende Zusammenarbeit der Projektpartner auch unter Einbeziehung weiterer Forschungspartner aus der Metallurgie, bzw. Gießereitechnik angedacht.

5 Einleitung

Für den Glasschmelzprozess am Standort Lauscha des assoziierten Projektpartners Lauscha Fiber International GmbH stehen zwei Schmelzwannen zur Verfügung, welche mit jeweils einer Abgasfilteranlage nach dem Stand der Technik ausgestattet sind. Diese keramischen Filterkerzen gewährleisten eine zukunftsichere Einhaltung der Emissionsgrenze für Staub ($< 1 \text{ mg/m}^3$). Durch die sehr gute Abscheideleistung fallen große Mengen an Filterstäuben an beiden Anlagen an. Da die Zusammensetzung und Form dieser Stäube zum Wiederverwenden im Glasschmelzprozess nicht geeignet sind, müssen diese aufwendig entsorgt werden. Der aktuell genutzte Entsorgungsweg ist die Untertage-Deponie. Jedoch ist diese Variante keine zukunftsichere Möglichkeit. Dieser Weg ist nicht nachhaltig und bereitet dem Unternehmen einen unwirtschaftlichen Kostenblock von ca. 360.000 € pro Jahr für ca. 500 Tonnen Filterstaub. Diese Menge fällt bei normaler Auslastung immer und kontinuierlich an.

Weiterhin fallen am Standort Abfallprodukte aus der Glasfaserherstellung (ohne Beschichtung) von ca. 500 Tonnen pro Jahr an. Aktuell können diese Glasfaserabfälle in der Form, wie sie gesammelt werden, nicht im eigenen Prozess eingeschmolzen werden. Hierfür wären weitere Bearbeitungsschritte notwendig. Die Entsorgung der Fasern kostet das Unternehmen aktuell ca. 200.000 € pro Jahr.

Ein Schwerpunkt im Projekt lag auf der Entwicklung neuer Glasschäume für unterschiedliche Temperaturanwendungen unter Verwendung dieser Abgas-/Mineralstäube und Glasfaserabfälle. Durch verschiedene Rohstoffkombinationen können bei optimalen Mischungsverhältnissen neue Glasschäume mit neuen chemischen und physikalischen Eigenschaften hergestellt werden [1].

Diese Glasschäume sollen als Abdeckmittel von Aluminium- und Kupferschmelzen eingesetzt werden. Das Ziel besteht in der technologischen und qualitativen Verbesserung des Schmelzbetriebes bzw. der Werkstoffqualität.

Da Aluminium- und Kupferschmelzen in verschiedenen Legierungen unterschiedliche Schmelz- und Warmhaltetemperaturen aufweisen (ca. 750 – 1250 °C), muss die Schäumtemperatur durch Veränderung der Rohstoffzusammensetzung dieser angepasst werden. Durch den Einsatz von Abgas- und Mineralstäuben in der Rezeptur lassen sich das Viskositätsverhalten und damit die Blähtemperatur beeinflussen. Die Erweichungstemperatur des Glasgemenges erhöht sich mit steigendem mineralischem Anteil, so dass Glasschäume für unterschiedliche Temperaturbereiche entwickelt werden können.

Glasfaserabfälle sollen im Gemenge anteilig den teuren Rohstoff Glasmehl ersetzen. Glasmehl zur Herstellung von konventionellem Schaumglas wird durch eine verbesserte Recyclingtechnologie immer knapper, womit ein größerer Anteil für die Glasherstellung verwendet wird. Die Glasfasern könnten den Anteil Glasmehl teilweise oder ganz ersetzen.

Aluminium- und Kupferschmelzen neigen zu hoher Löslichkeit von Wasserstoff aus der Umgebungsluft (Luftfeuchte) und Metallschrottfeuchte [2] [3]. Der gelöste Wasserstoff beeinträchtigt die Materialstruktur als Störstellen und damit die mechanischen Eigenschaften sowie die Gefügequalität der Gusserzeugnisse [4]. Die Porenbildung erfolgt

vorzugsweise an bereits vorhandenen inneren Oberflächen, z. B. an den Grenzflächen zwischen Metallmatrix und oxydischen Verunreinigungen oder Ausscheidungen, während des Erstarrungsprozesses. Die Reduzierung des Wasserstoffgehaltes der Schmelze ist für die Qualität des Gussstückes eine wichtige Voraussetzung.

Der Wasserstoff in Aluminiumschmelzen wird nach dem Stand der Technik durch das „Spülen“ entgast, vorherrschend ist als physikalische Methode die Spülgasbehandlung mit N_2/Ar . Durch den Einsatz der zu entwickelnden Glasschäume wird die Spülgasmenge verringert.

Für fast alle Kupferwerkstoffe gilt, dass sich der Gehalt an Sauerstoff und Wasserstoff negativ auf deren Eigenschaften auswirkt [5]. Für die Herstellung einer hochwertigen Legierung mit niedrigem Gehalt an beiden Elementen gibt es zwei Verfahrensweisen. Beim oxidierenden Schmelzen wird durch eine absichtliche Oxidation der Schmelze eine Senkung des Wasserstoffgehalts bewirkt. Hier wird z.B. bei brennstoffbeheizten Öfen eine oxidierende Flammenführung, das heißt eine Verbrennung mit Luftüberschuss, eingestellt [6].

Der so in den Feuerungsabgasen noch enthaltene Sauerstoff reagiert mit der Schmelze und bildet Oxide, die sich entweder in der Schmelze lösen oder aber entweichen beziehungsweise verschlacken. Das bedeutet Material- und Energieverlust. Der entstehende Sauerstoffüberschuss in der Schmelze wird durch eine anschließende Reduktion entfernt. Das am häufigsten verwendete Mittel ist Phosphorkupfer. Die Reaktion senkt den Sauerstoffgehalt so weit ab, dass eine Schmelze mit niedrigem Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt erzielt werden kann. Das so entstehende Phosphoroxid wird als Schlacke abgezogen.

Bei der neutralen Schmelzföhrung wird, soweit wie möglich, das Schmelzgut vor dem Kontakt mit der Atmosphäre geschützt, um die Einwirkung von Luftsauerstoff und –feuchtigkeit zu verhindern (Gaslöslichkeit in der Schmelze). Das erfolgt durch das Abdecken der Schmelze im Warmhalte- und Vergieöfen mit einer ausreichend dicken Schicht aus Holzkohle [7].

Durch eine Abdeckung der Schmelze mit Glasschaum (z.B. mit O_2 -Reaktionskomponenten) soll die Einsparung oder der Ersatz herkömmlicher Behandlungsmethoden zur Verbesserung der Materialqualität der Schmelzen erfolgen und das Verschlacken vermindert werden.

Die zu entwickelnden Glasschäume sollen die verschiedenen Metalllegierungen durch die Bildung einer geschlossenen Oberfläche vor der Aufnahme von Gasen aus der Umgebungsluft im Warmhaltebetrieb vor dem Vergießen oder beim Transport schützen. Die z.B. durch Metallschrottverunreinigungen gelösten Gase sollen mit der Blähreaktion des Glasschaumes durch oxidierende oder reduzierende Blähmittel aus der Schmelze resorbiert werden.

Die Schmelze steht ebenfalls mit dem Luftsauerstoff in Wechselwirkung. Es bildet sich die sogenannte Oxidhaut an der Oberfläche (Krätze), welche vor dem Vergießen entfernt werden muss. Dies föhrt zu Materialverlust, der durch die Bildung einer geschlossenen Abdeckung mit Glasschaum verhindert werden soll.

Das Projekt soll den Nachweis der technologischen Machbarkeit liefern. Bei erfolgreichen Erkenntnissen wäre künftig eine breite Industrieanwendung in der Aluminium- und Kupferguss-Produktion anzustreben.

Nach dem Stand der Technik kommen zur Schmelzebehandlung verschiedene pulverförmige und granuliert Hilfsmittel zum Einsatz.

Es werden Schmelzhilfsmittel zum Reinigen und Abkrätzen unterschieden.

Die pulverförmigen Abdeckungen haben den Nachteil der Staubentwicklung und evtl. toxischer Emissionen. Im Vergleich mit pulverförmigen Schmelzmitteln ist eine granuliert Form einfacher über der Schmelzoberfläche zu verteilen. Granulate sind außerdem überwiegend staubfrei, dadurch verringert sich die Zugabemenge deutlich. Weitere Vorteile sind eine gleichmäßige chemische Zusammensetzung durch die Granulatform und die Tatsache, dass keine Trennung während des Transports oder der Anwendung auftritt.

Abdeckmittel mit geringer Dichte sind nicht praxistauglich, da sie beim Auflegen wegfliegen.

Durch das Abdecken mit Glasschaum soll durch Verschmelzen der Granulate eine geschlossene Oberfläche geschaffen und dadurch die Metallschmelze vor der umgebenden Atmosphäre geschützt werden. In Schüttungen bei anderen granulierten Hilfsmitteln ist weiterhin Luft vorhanden.

Vermiculit z.B. dient zur Abdeckung von Pfannen für flüssiges Roh- und Gusseisen, für Verteilerpfannen, Gießrinnen und Stahlwerkskokillen [8]. Seine Anwendung beschränkt sich auf die Verringerung von Wärmeverlusten bei sehr hohen Schmelzbadtemperaturen ohne Versiegelungseigenschaft und Reaktionswirkung. Die Abgrenzung der im Projekt zu entwickelnden Glasschäume besteht außerdem in der Verwendung von mineralischen Reststoffen in der Rezeptur und einem einfachen Herstellungsprozess des Rohmaterials (Grünkorn).

Neben der eigentlichen Entwicklung der funktionalen Schaumgläser sollte innerhalb des Projektes auch das Aufbringen auf verschiedene Schmelzen im Kupfer- und Aluminiumguss – als Granulat und Grünkorn – getestet und die Wirkungen miteinander verglichen werden.

Folgende Effekte der Glasschäume auf die jeweiligen Metallschmelzen sollten untersucht werden:

- Temperaturbeständigkeit bei unterschiedlichen Metalllegierungen mit variierenden Schmelz- und Warmhaltetemperaturen
- Verwendung von Grünkorn zur Abdeckung – Einsparung der Kosten zur Herstellung von Granulat durch Wegfall des thermischen Prozesses
- Wärmedämmung während Warmhaltebetrieb vor dem Vergießen
- Qualitätsverbesserung der Schmelze durch Schutz vor umgebender Atmosphäre und Entfernung gelöster Gase aus der Schmelze durch Blähreaktion des aufgelegten Grünkorns (verschiedene Blähmittel mit oxidierender oder reduzierender Wirkung)

- Eine geringere Gaslöslichkeit führt zu weniger Ausschuss & erhöht die Gefügedichte und die mechanischen Eigenschaften der Gussteile.
- Verminderung von Materialverlust durch Oberflächenoxidation (Krätze bzw. Abbrand)
- Der Einsatz von Metallschrott in den Gießereien steigt immer weiter (Sekundärgießereien). Damit gewinnt das Thema des Eintrags von gelösten Gasen durch Verunreinigungen und deren Entfernung an Wichtigkeit.
- Einsparung der verwendeten Spülgasmenge und anderer üblicher Behandlungsmethoden der Schmelzen zur Entfernung gelöster Gase

Die Bearbeitung des Projektes mit den Projektpartnern SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH und der ACTech GmbH Freiberg ermöglichte Industrierversuche im kleineren Maßstab, welche im Ergebnis eine Quantifizierung einiger Effekte zuließen.

6 Hauptteil

6.1 Anforderungsprofile für die Glasschäume

Zu Projektbeginn wurden mit den Industriepartnern SM Freiberg GmbH und AC Tech Freiberg GmbH Anforderungsprofile für die zu entwickelnden Glasschäume als Schmelzabdeckung im Aluminium- und Kupferguss und deren Legierungen definiert.

Folgende Kriterien wurden festgelegt:

- Anwendungsbereich zwischen 750 und 800 °C bei Aluminium-Guss
- Anwendungsbereich zwischen 1150 und 1200 °C bei Kupfer-Guss
- keine Wechselwirkung mit dem jeweiligen Tiegelmateriale (Korrosion)
- Entfernung gelöster Gase aus der Schmelze (Wasserstoff in Aluminiumschmelze)
- Einsparung von Spülgas (Aluminiumschmelze)
- Einsparung/Ersatz von Holzkohle (Kupferschmelze)
- Schutz vor Gasaufnahme aus der umgebenden Atmosphäre
- Durchlässigkeit der Schüttung für Temperaturmessung, Nachchargierung und Probenahme
- keine Verklebungen mit dem Ofenmaterial
- Abdeckung muss ohne größeren Aufwand entfernt werden können
- inertes Verhalten des Glasschaumes/Grünkorns gegenüber der Schmelze
- Wärmedämmung während Warmhaltebetrieb vor dem Vergießen
- Verminderung von Materialverlust durch Oberflächenoxidation (Abbrand)

6.2 Laboruntersuchungen der alternativen Rohstoffe, d.h. Filterstäube und Glasfaserabfälle aus der Glasindustrie und deren Aufbereitung

Die vom Projektpartner Lauscha Fiber International GmbH zur Verfügung gestellten Reststoffe Filterstäube (nachfolgend FS genannt) & Glasfasern wurden an der TU BA Freiberg mittels ICP-OES (Optische Emissionsspektroskopie) hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht (Tabellen 1 bis 3). Die Filterstäube fallen in den Abgasfilteranlagen der beiden Schmelzwannen (Pellet- & Rotarywanne) an und wurden über die Projektlaufzeit durch zwei unterschiedliche Absorptionsmittel – Kalziumhydroxid bzw. Natriumhydroxid – abgeschieden, was in den Ergebnissen der chemischen Analyse durch einen erhöhten CaO- bzw. NaO-Gehalt zu erkennen ist.

Die Laboranalysen erfolgten über die Projektlaufzeit durch mehrere Stichproben, wobei keine wesentlichen Schwankungen in der Zusammensetzung der jeweiligen Varianten festgestellt wurde.

	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	ZnO	BaO	B ₂ O ₃
ICP ¹	2,98	2,88	0,45	5,79	0,06	13,07	0,0048	0,008	0,0166	4,79
ICP ²	3,11	3,02	0,58	5,95	0,0406	14,67	0,0046	0,0033	0,0062	4,86

Tabelle 1: ICP-OES Glasfaser (¹ Juni '23; ² April '24)

Glasschaum wird üblicherweise aus Natronsilikatglas hergestellt. Die Glasfaser besteht aus C-Glas, welches für eine bessere chemische Beständigkeit einen höheren Anteil an Kalziumoxid und Borsäure enthält. Außerdem sind weniger Alkalien enthalten. In den Laborversuchen wurde geprüft, ob diese Unterschiede einen Einfluss auf die Schäumfähigkeit haben.

	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	ZnO	BaO	B ₂ O ₃
ICP ¹	1,31	0,92	4,7	56,53	0,35	3,74	0,0021	0,691	0,0711	9,02
ICP ²	0,93	1,04	5,63	54,48	0,27	5,54	0,0151	1,75	0,14	7,65
ICP ³	0,32	0,29	1,55	0,70	0,0097	40,32	0,0176	0,0233	0,0061	11,35

Tabelle 2: ICP-OES Filterstaub Pelletwanne (¹ Juni '23; ² Juli '24; ³ April '24)

	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	ZnO	BaO	B ₂ O ₃
ICP ¹	1,11	0,61	2,5	46,78	0,2	8,28	0,0396	0,1859	0,0557	12,64
ICP ²	0,75	1,18	4,67	43,60	0,2	8,06	0,0319	2,04	0,26	16,53
ICP ³	0,03	0,37	3,78	0,15	0,0049	32,46	0,0263	1,32	0,32	15,14

Tabelle 3: ICP-OES Filterstaub Rotarywanne (¹ Juni '23; ² Juli '24; ³ April '24)

Im Anschluss erfolgte die Untersuchung der Reststoffe im Erhitzungsmikroskop nach DIN 51730/ISO 540, einem Labormessgerät zur thermo-optischen Untersuchung, um charakteristische Temperaturen zum Viskositätsverhalten für die glastechnologische Anwendung zu ermitteln (Abbildungen 1 bis 3).

Sinterbeginn:	n.b.
Erweichungstemperatur:	710°C Erweichungsbereich: 710°C - 914°C
Sphärischtemperatur:	832°C
Halbkugeltemperatur:	914°C Fließbereich: 914°C - 965°C
Fließtemperatur:	965°C

Abbildung 1: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen der Glasfaser

Sinterbeginn:	n.b.	
Erweichungstemperatur:	n.b.	Erweichungsbereich: n.b.
Sphärischtemperatur:	1251°C	
Halbkugelttemperatur:	n.b.	Fließbereich: n.b.
Fließtemperatur:	n.b.	

Abbildung 2: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen von Filterstaub PW (Kalziumhydroxid)

Sinterbeginn:	n.b.	
Erweichungstemperatur:	1283°C	Erweichungsbereich: n.b.
Sphärischtemperatur:	n.b.	
Halbkugelttemperatur:	n.b.	Fließbereich: n.b.
Fließtemperatur:	n.b.	

Abbildung 3: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen von Filterstaub Rotary (Kalziumhydroxid)

Mit den Erhitzungsmikroskop-Untersuchungen der Glasfaserabfälle und Filterstäube (Absorptionsmittel Kalziumhydroxid) in verschiedenen Kombinationen wurde nachgewiesen, dass durch Zugabe der Filterstäube das Viskositätsverhalten beeinflusst werden kann (Abbildungen 4 & 5). Die Filterstäube, welche durch das Absorptionsmittel Natriumhydroxid abgeschieden werden, enthalten einen hohen Anteil Natriumoxid, welches im Glassystem als Netzwerkandler fungiert und die Viskosität senkt und somit den Schmelzpunkt deutlich herabsetzt. Das Ziel im Projekt bestand darin, den Schmelzpunkt für die Anwendung der Schaumglasvarianten auf NE-Metallschmelzen zu erhöhen. Somit sind die Filterstäube, welche durch Natriumhydroxid abgeschieden werden, nicht geeignet und wurden im weiteren Verlauf nicht angewandt. Jedoch ist der Einsatz dieser in der Schaumglasherstellung für andere Anwendungen (z.B. als Isolationsbaustoff) durchaus denkbar und könnte eingehender untersucht werden.

Um den Anwendungsbereich auf höhere Temperaturen – v.a. Kupferschmelzen – zu erweitern, eignet sich der Einsatz der Filterstäube, welche in der Abgasfilteranlage durch Kalziumhydroxid abgeschieden wurden. Der enthaltene Kalziumoxid-Anteil wirkt im Glassystem als Netzwerkstabilisator und erhöht die Schmelztemperatur.

Sinterbeginn:	n.b.	
Erweichungstemperatur:	1051°C	Erweichungsbereich: 1051°C - 1069°C
Sphärischtemperatur:	n.b.	
Halbkugelttemperatur:	1069°C	Fließbereich: 1069°C - 1118°C
Fließtemperatur:	1118°C	

Abbildung 4: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen – 50 % Faser/50 % FS PW

Sinterbeginn:	n.b.	
Erweichungstemperatur:	907°C	Erweichungsbereich: 907°C - 1003°C
Sphärischtemperatur:	975°C	
Halbkugeltemperatur:	1003°C	Fließbereich: 1003°C - 1166°C
Fließtemperatur:	1166°C	

Abbildung 5: Erhitzungsmikroskopuntersuchungen – 60 % Faser/40 % FS Rotary

Die Korngröße der Filterstäube konnte als $< 63 \mu\text{m}$ ermittelt werden. Somit war für diese Einsatzstoffe keine weitere Aufbereitung notwendig.

Die Glasfaserabfälle des assoziierten Projektpartners Lauscha Fiber International GmbH konnten durch die Firma Grüning & Loske GmbH mittels Scheibenschwingmühle auf $< 0,5 \text{ mm}$ zerkleinert werden (Abbildung 6). Je nach Anforderungsprofil sind variable Korngrößen möglich.

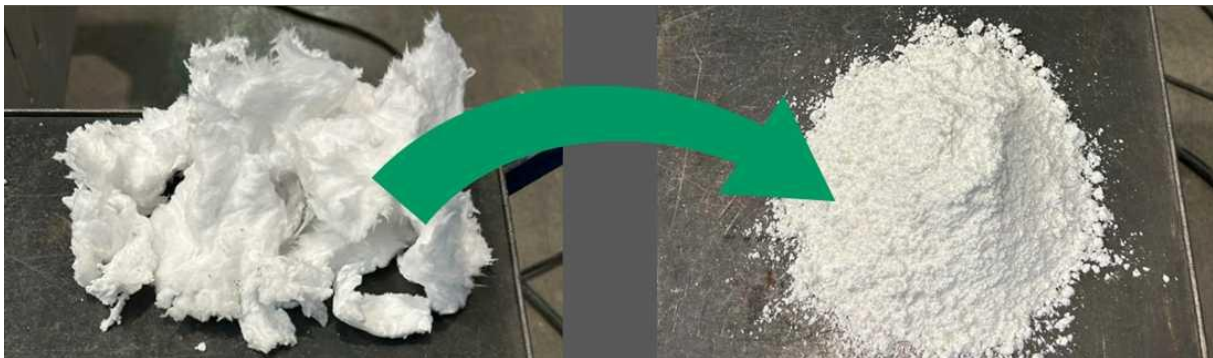


Abbildung 6: Aufbereitung Glasfaser mittels Scheibenschwingmühle auf $< 0,5 \text{ mm}$; links vorher, rechts nachher

6.3 Rohstoffauswahl und Laborversuche zur Entwicklung von Glasschäumen als Abdeckmittel auf Aluminiumschmelzen

Die Auswahl der Rohstoffe orientierte sich an den Glasbildungs- und Schäumeigenschaften für den vorgegebenen Anwendungsbereich zwischen 750 und 800 °C . Der für Schaumglasrezepturen eingesetzte Glasmehlanteil konnte durch 100% Glasfasern $< 0,5 \text{ mm}$ ersetzt werden. Anhand der Erweichungstemperatur der Glasfasern von ca. 710 °C (siehe Erhitzungsmikroskop-Untersuchungen) konnte nur ein geringer Anteil Filterstaub in der Rezeptur aufgenommen werden. Als Fluss- bzw. Bindemittel wurde Wasserglas (Modul 2,0) verwendet.

Im Labormaßstab erfolgte die Untersuchung verschiedener Rezepturen mit den Blähmitteln CaCO_3 (anorganisch) und Glycerin (organisch) auf ihre Schäumreaktion (Abbildung 7). Für Industrieversuche beim Projektpartner AC Tech GmbH wurde eine Gemengerezeptur mit Kombination aus beiden Blähmitteln aufgestellt.

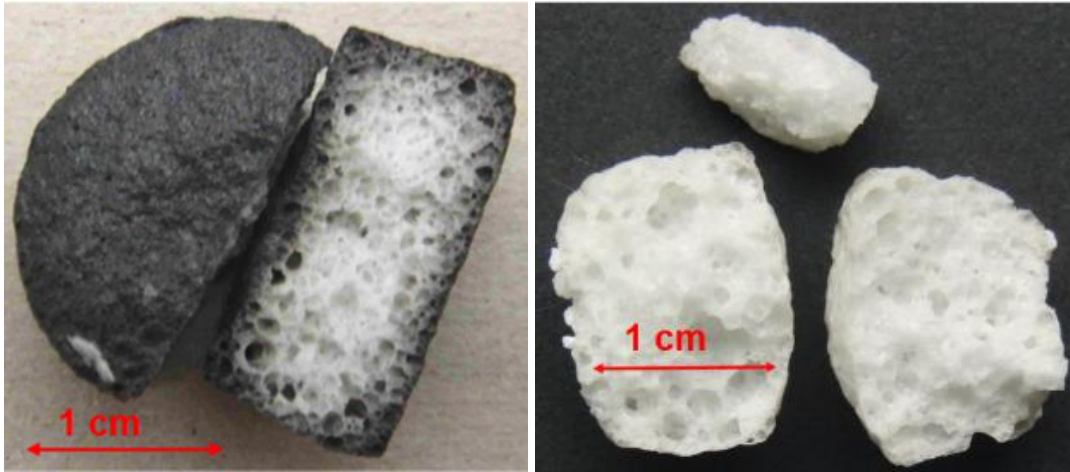


Abbildung 7: Vergleich der Schäumreaktion mit organischem & anorganischem Blähmittel; links Glycerin (770 °C), rechts CaCO_3 (770 °C)

Der Anteil der beiden Filterstäube, welche eine ähnliche Wirkung beim Schäumprozess aufwiesen, wurde mit maximal 5 % festgelegt (Abbildung 8). Bei höheren Anteilen findet im vorgegebenen Temperaturbereich keine ausreichende Schäumreaktion mehr statt.

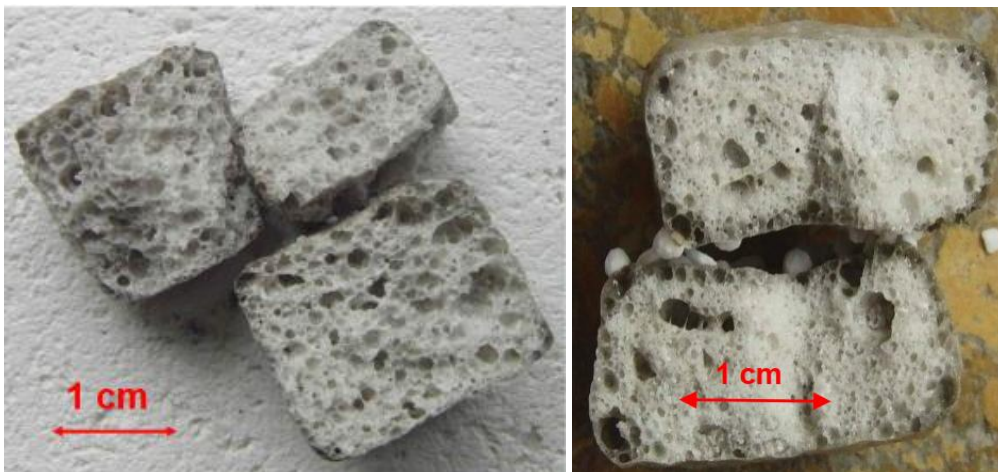


Abbildung 8: Schäumreaktion mit Filterstaub im Gemenge; links FS Rotary 5 % (770 °C), rechts FS PW 5 % (750 °C)

Der Schäumungs- und Glasbildungsprozess der Gemengerezepturen konnte in einem sogenannten Blasigkeitsofen temperaturabhängig visualisiert werden (Abbildung 9). Für die Untersuchung wurde ein Kieselglastiegel mit Grünkorn im Ofen erhitzt und die Reaktion mittels Kamera festgehalten. Am Beispiel setzt ab ca. 600 – 675 °C ein Schrumpfen der Granulate ein, danach erfolgt das Aufschäumen und > 850 °C das Schmelzen des Gemenges. Die hierfür ausgewählte Rezeptur entspricht dem Anforderungsprofil für Schaumglas als Abdeckung auf Aluminiumschmelzen in Bezug auf den Temperaturbereich zwischen 750 und 800 °C.

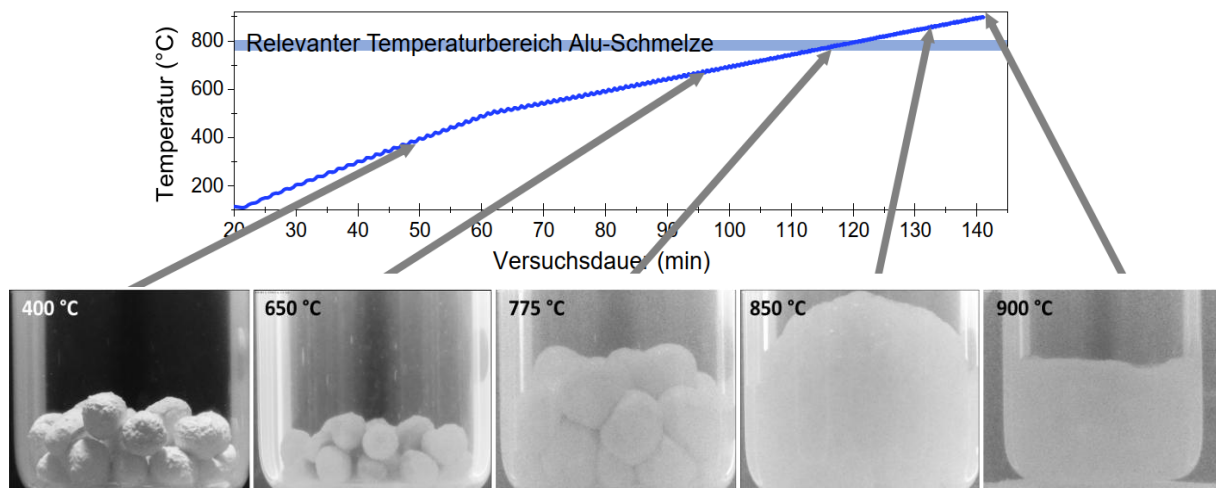


Abbildung 9: Schäumverhalten im Blasigkeitsofen

Die Rezepturentwicklung im Labormaßstab wurde mit Erfolg abgeschlossen.

6.4 Rohstoffauswahl und Laborversuche zur Entwicklung von Glasschäumen als Abdeckmittel auf Kupferschmelzen

Glasschaumvarianten als Abdeckung für Kupferschmelzen müssen laut Anforderungsprofil eine Temperaturstabilität zwischen 1150 und 1200 °C aufweisen. Das Granulat soll nicht verkleben und somit die Zugänglichkeit der Schmelze zur Temperaturmessung oder nachträglicher Materialzugabe gewährleisten.

Auch hier erfolgte der Ersatz von Glasmehl durch Glasfasern zu 100 %.

Als Blähmittel wurde in ersten Versuchen für die Temperaturanwendung CaCO_3 eingesetzt. In weiteren Versuchen erfolgte der Einsatz von CaCO_3 und Kohlestaub, um eine reduzierende Wirkung zu erreichen (Vermeidung von Abbrand). Das Bindemittel Wasserglas, welches im Glassystem als Flussmittel dient und die Schmelztemperatur herabsetzt wurde hier durch Kieselöl (Köstrosol 0730) ersetzt.

Die Filterstäube auf Kalziumhydroxidbasis aus Pellet- und Rotarywanne wurden in verschiedenen Anteilen getestet. Beide Filterstäube sind gleichermaßen für die Anhebung der Erweichungstemperatur des Gemenges geeignet.

Ein Glasschaum mit ca. 70 % Filterstaub konnte in Laborversuchen erfolgreich entwickelt werden (Abbildung 10).

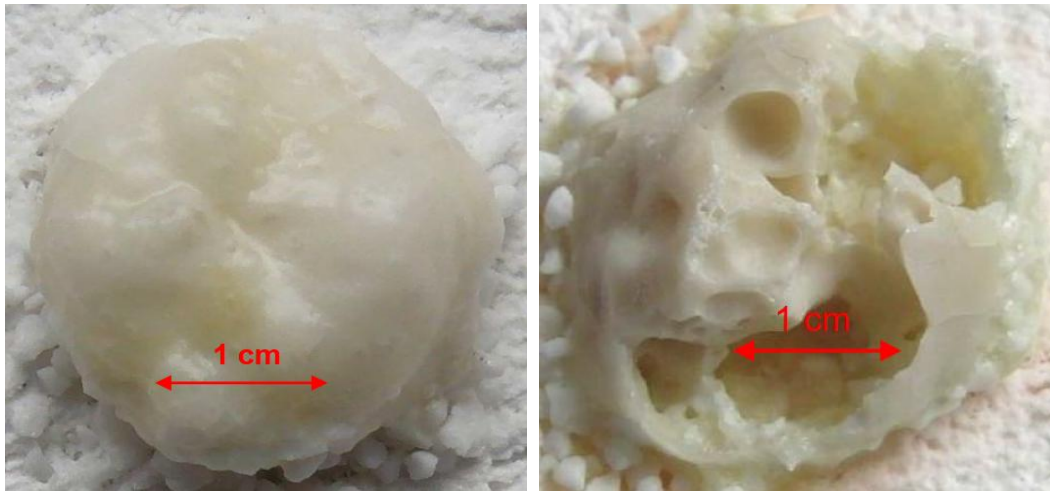


Abbildung 10: Glasschaum mit Filterstaub im Gemenge; links FS PW 70 % (1200 °C), rechts FS Rotary 70 % (1180 °C)

6.5 Untersuchung der Wechselwirkung der Glasschäume mit den Schmelzen der Projektpartner

6.5.1 Wechselwirkung Aluminiumschmelze - Glasschaum

Im Laborversuch wurden die Aluminiumlegierungen AlSi7Mg, A2O5 und AlMgty, welche vorrangig in den Industrieversuchen beim Projektpartner AC Tech GmbH als Probeschmelzen getestet werden sollten, aufgeschmolzen und 24 Stunden bei 750 °C im Muffelofen mit einer ausgewählten Glasschaumrezeptur in Kontakt gebracht. Im Anschluss erfolgte anhand von Probeschleifen die Untersuchung der Wechselwirkung des Glasschaums mit der Schmelze durch Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX). Die Abbildungen 11 & 12 zeigen Ergebnisse der Schmelze AlSi7Mg.

Die Messungen erfolgten von der Kontaktstelle Schmelze-Glasschaum über den Querschnitt in die Schmelze.

Im EDX-Spektrum konnten außer Aluminium und Silicium keine weiteren Elemente gefunden werden (Abbildung 11).

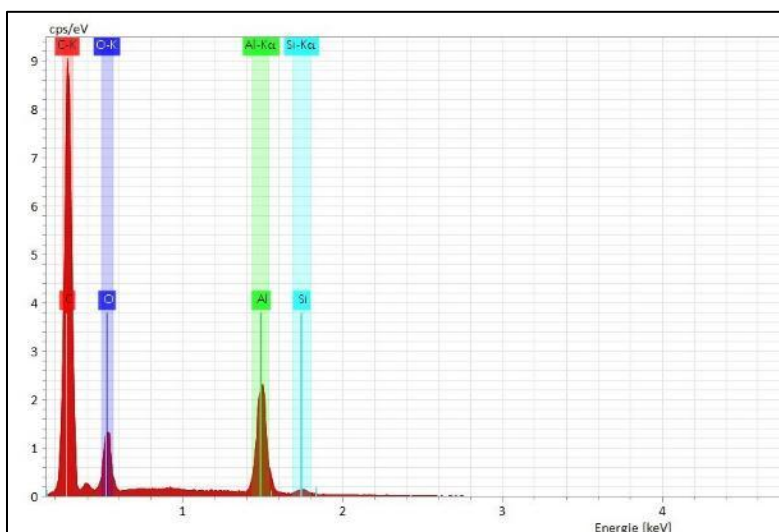


Abbildung 11: EDX-Spektrum einer Aluminiumprobe nach Kontakt mit Glasschaumrezeptur

Im Linienscan (Abbildung 12) sind kein Konzentrationsgefälle bzw. keine lokale Anreicherung von Silicium über den Querschnitt von der Oberfläche zur Probenmitte der Aluminiumschmelze nachzuweisen.

Somit konnte ausgeschlossen werden, dass Glaskomponenten aus dem Schaumglas in die Metallschmelze migrieren.

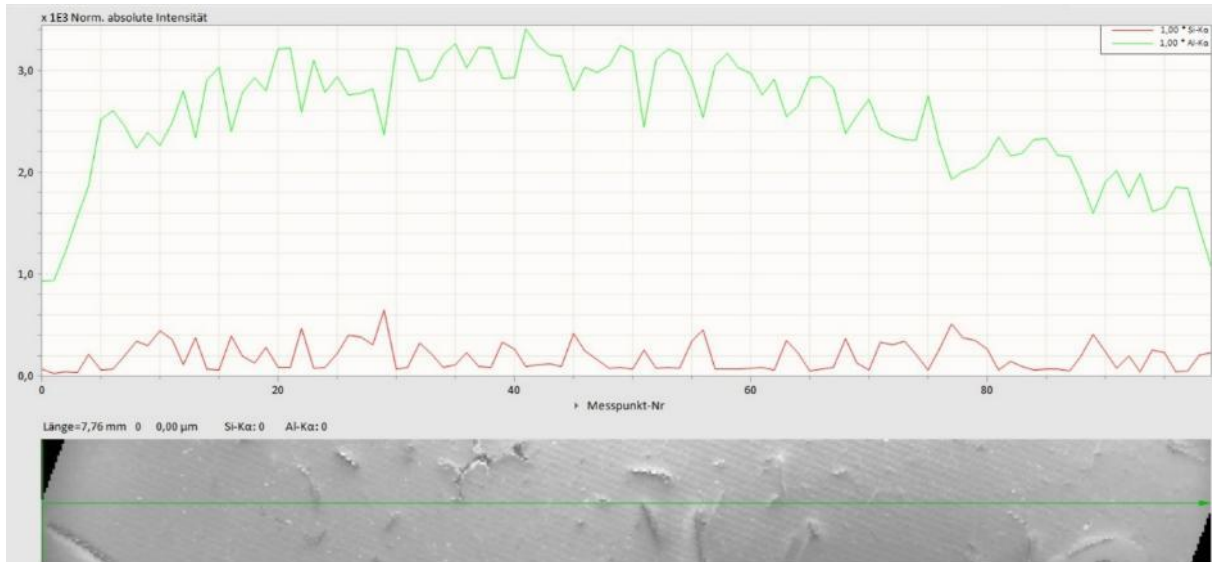


Abbildung 12: EDX-Linienscan (rot – Si; grün – Al) einer Aluminiumprobe nach Kontakt mit Glasschaumrezeptur

Untersuchungen mit den weiteren genannten Aluminiumlegierungen ergaben keine anderen Ergebnisse.

In den Industrierversuchen wurden Proben während der Abdeckung der Schmelzen mit Glasschaumgranulat mittels Funkenemissionsspektroskopie (F-OES) untersucht. Die Ergebnisse werden unter dem entsprechenden Berichtsabschnitt erläutert.

6.5.2 Wechselwirkung Kupferschmelze - Glasschaum

Die Kontamination verschiedener Kupferlegierungen durch die entwickelten Glasschäume wurde ebenfalls mit EDX-Messungen ausgeschlossen und die Ergebnisse in den Industrierversuchen durch Funkenemissionsspektroskopie (F-OES) bestätigt (Punkt 5.9).

6.6 Untersuchung der Wechselwirkung der Glasschäume mit dem jeweiligen Feuerfestmaterial der Warmhalte- und Vergießtiegel

Die Wechselwirkung der Glasschäume mit dem Feuerfestmaterial der Warmhalte- und Vergießöfen wurde in Anlehnung an den dynamischen „Fingertest“ nach Gebhardt [9] untersucht.

Dazu erfolgte die Herstellung von Probekörpern aus den jeweiligen Feuerfestmaterialien der Schmelzöfen als Quader mit einer Geometrie von 15 x 15 x 75 mm. Die Probekörper wurden über 24 h in der flüssigen NE-Metallschmelze mit Glasschaumabdeckung positioniert.

Die Korrosion konnte anhand der Querschnittsverringering der Feuerfestprobe an der Grenzfläche der Schmelze mit der Glasschaumabdeckung bewertet werden.

6.6.1 Aluminiumschmelze – SiC-Tiegelmaterial

Für Aluminiumlegierungen beim Projektpartner AC Tech GmbH werden Schmelzöfen aus SiC verwendet. Die Laborversuche zur Untersuchung der Wechselwirkung von SiC und Glasschaum wurden mit einer Gemengerezeptur durchgeführt, welche einen Anteil von 5 % Filterstaub enthielt. Im Korundtiegel erfolgte das Schmelzen einer Aluminiumprobe der Legierung AlSi7Mg und das Auflegen von Grünkorngranulat. Der SiC-Stab wurde in die Schmelze getaucht und über 24 Stunden bei 800 °C fixiert.

Anhand der Abbildung 13 ist zu erkennen, dass keine Korrosion des SiC-Materials stattgefunden hat.



Abbildung 13: Fingertest SiC (Aluminiumschmelze) zur Korrosionsuntersuchung

Die Wiederholung der Versuche mit weiteren Aluminiumlegierungen des Projektpartners zeigten ebenfalls keine Korrosionserscheinungen am Tiegelmaterial SiC.

6.6.2 Kupferschmelze – Feuerfestmaterial Schmelzöfen

Beim Projektpartner SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH kommen unterschiedliche Tiegelmaterialien zum Einsatz. Vorwiegend werden Schmelzöfen mit einer Mullit-Stampfmasse ausgestattet. Warmhalteöfen können auch aus SiC bestehen.

Für beide Materialien sind Korrosionstests durchgeführt worden.

Im ersten Versuch wurde eine im Labor entwickelte Glasschaumrezeptur unter Verwendung von ca. 65 % Filterstaub auf mögliche Wechselwirkungen mit dem Tiegelmaterial Mullit-Stampfmasse getestet. In Anlehnung an die Versuchsbeschreibung in Punkt 5.6 erfolgte das Schmelzen einer beim Projektpartner SM Freiberg verwendeten Kupferlegierung bei 1190 °C und das Aufbringen von Grünkorn. Anschließend wurde ein Probekörper aus Mullit-Stampfmasse in der Schmelze fixiert und über 24 Stunden unter Temperatureinwirkung im Ofen belassen.

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass der Mullit-Stab eine sehr starke Korrosion aufweist.



Abbildung 14: Fingertest Mullit-Stampfmasse/Filterstaub zur Korrosionsuntersuchung

Der gleiche Versatz wurde mit dem Tiegelmateriale SiC getestet, welches im Ergebnis eine noch stärkere Korrosion aufwies.

Die Versuche zeigten, dass SiC in Verbindung mit Glaskomponenten im Temperaturbereich 1150 bis 1200 °C zu starker Korrosion neigt, was durch eine Literaturrecherche bestätigt wurde, z.B. [10].

Bei Temperaturen um 1100 °C bildet SiC in oxidierender Atmosphäre zunächst eine SiO₂-Schutzschicht:



Diese Schicht ist normalerweise korrosionsbeständig. In Gegenwart einer Glasschmelze wird genau diese Schicht aufgelöst:



Die Auflösung von SiO₂ in alkalischen Schmelzen führt zu fortschreitendem Materialabtrag (Korrosion).

Im Laborversuch wurde der Extremfall mit Bildung einer Glasphase getestet. Da diese Reaktion bei den einzusetzenden Glasschaumvarianten nicht ausgeschlossen werden kann, beschränkten sich weitere Untersuchungen auf Tests in Tiegelöfen aus Mullit-Stampfmasse.

Als Fazit erfolgten weitere Laborversuche zur Anpassung der Glasschaumrezeptur. Der Filterstaub, welcher zur Erhöhung der Erweichungstemperatur verwendet wurde, um Glasschaum auf Kupferschmelzen im Temperaturbereich von 1150 bis 1200 °C einzusetzen, konnte u.a. durch Reststoffe aus der Glasindustrie ausgetauscht werden. In der Rezeptur kamen Quarzmehl, Quarzglas-mehl (Reststoff aus der Quarzglas-

bearbeitung) und Mullitmehl zum Einsatz. Diese sind durch ihren hohen Erweichungsbereich ebenso zur Verringerung der Viskosität der Glasfasern geeignet. Die Erweichungstemperatur von Quarzglasmehl liegt z.B. typischerweise im Bereich von etwa 1600 °C bis 1700 °C. Eine Rezepturanpassung mit Quarzglasmehl und Mullit zeigte in Laborversuchen eine gute Schaumbildung (Abbildung 15).

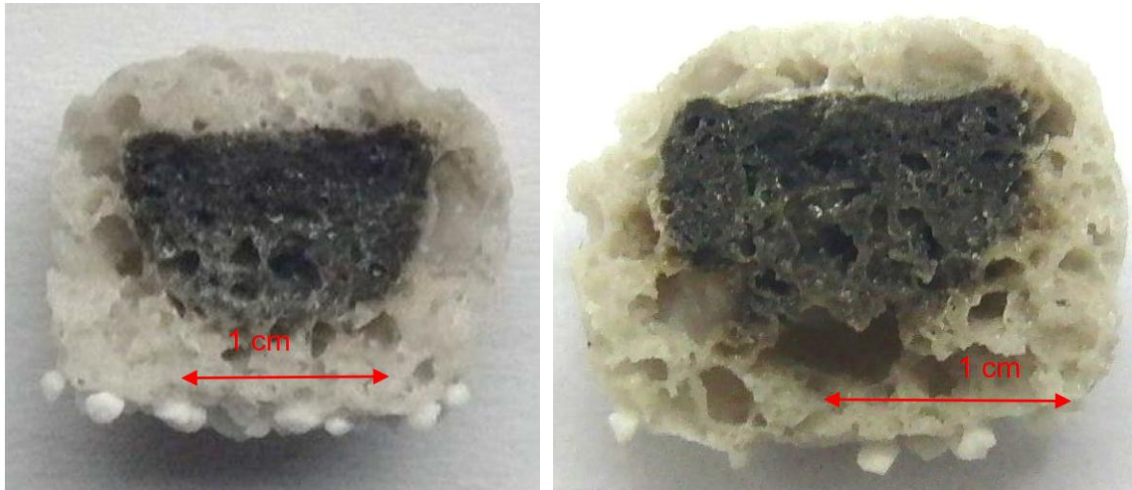


Abbildung 15: Schäumversuch - Gemenge mit Mullitmehl (links) & Quarzglasmehl (rechts)

Unter Verwendung von Quarzglasmehl bzw. Mullitmehl konnte der Anteil der Glasfasern in der Glasschaumrezeptur von ca. 30 % auf 60 % gesteigert werden. Der Fingertest mit diesen Rezepturen zeigte bei einer Versuchsdauer von 24 Stunden und 1190 °C keine Korrosion (Abbildung 16).



Abbildung 16: Fingertest Mullit-Stampfmasse/Quarzglasmehl zur Korrosionsuntersuchung

Quarzmehl als Glasschaumkomponente wurde für weitere Versuche ausgeschlossen, da es bei längerer Exposition (Staubbildung beim Mischen, Granulieren, Abtrieb) durch Einatmen gesundheitsschädigend wirken kann.

Die Korrosionsversuche haben im Ergebnis gezeigt, dass im Labor entwickelte Glasschaumvarianten mit Glasfasern und einem Filterstaubanteil von 5 % in SiC-Schmelztiegeln auf Aluminiumlegierungen eingesetzt werden können.

Das Abdecken von Kupferschmelzen mit Glasschaum in SiC-Tiegeln wurde ausgeschlossen. Die Anwendung von Glasschaumvarianten aus Glasfasern und Quarzglas-mehl zum Schutz von Kupferlegierungen in mit Mullit-Stampfmasse ausgekleideten Schmelzöfen ist möglich. Zu welchem Anteil Filterstaub in das Gemenge eingebracht werden könnte, wäre in zusätzlichen Versuchen zu prüfen.

6.7 Herstellung von Abdeck-Rohmaterial (Grünkorn) für Industrieversuche

Zur Herstellung von Grünkorn für die Industrieversuche bei den Projektpartnern konnten technische Ausrüstungen im Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recycling-systemtechnik (IART) an der TU BA Freiberg genutzt werden. Die Haver Engineering GmbH als An-Institut der TU BA Freiberg stellte die Mischtechnik und verschieden große Granulierteller (Abbildungen 17 & 18) zur Verfügung.



Abbildung 17: Pelletierteller mit Durchmesser 50 cm (links) und 40 cm (recht)



Abbildung 18: Mischer für 90 kg Batches & Pelletierteller Durchmesser 100 cm

Mit den Pelletiertellern von 40 bzw. 50 cm Durchmesser wurden mit vergleichsweise geringem Rohstoffaufwand geeignete Parameter wie z.B. Feuchtigkeitsgehalt für den Granulierungsprozess gefunden. Für die jeweiligen Varianten Grünkorn konnte ein maximaler Feuchtegehalt von ca. 20 % ermittelt werden.

Durch zahlreiche Mischversuche erfolgte der Nachweis, dass der Einsatz von Glasfasern keinen Nachteil auf die Homogenität im Gemenge hat.

Mit der Pelletierung war die Herstellung verschiedener Korngrößen möglich (Abbildung 19), welche nach der Trocknung des Grünkorns abgesiebt wurden, um sehr kleines Material ($< 1\text{ mm}$) zu entfernen.



Abbildung 19: Grünkorn mit anorganischem (links) & organischem Blähmittel

Die Granulierungsfähigkeit der Schaumglasrezepturen unter Einsatz der Reststoffe Glasfasern und Filterstäube in unterschiedlichen Anteilen konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Für die Industrierversuche wurde eine ausreichende Menge Grünkorn in mehreren Rezepturvarianten hergestellt.

6.8 Industrierversuche zur Abdeckung von Aluminiumschmelzen beim Projektpartner AC Tech Freiberg GmbH

Die Versuche beim Projektpartner AC Tech GmbH wurden in einem Induktionstiegelofen aus SiC mit einem Durchmesser von 30 cm durchgeführt. Als Versuchsschmelze kam die Aluminiumlegierung AlSi7Mg unter Verwendung von Kreislaufmaterial zum Einsatz. Die Schmelzkapazität betrug ca. 40 kg.

Die Glasschaumvarianten bzw. Grünkorn wurden jeweils mit einer Schichtdicke von ca. 6 cm auf die Schmelze aufgebracht (Abbildung 20).



Abbildung 20: Industrierversuch AC Tech GmbH - links Induktionsofen mit Schmelze, rechts Grünkorn auf Schmelze

Bei der Abdeckung von Aluminiumschmelzen durch Glasschaum bzw. Grünkorn stand die Entfernung von Wasserstoff aus der Schmelze und der Schutz vor Aufnahme von Gasen durch die umgebende Atmosphäre im Vordergrund. Der gelöste Wasserstoff beeinträchtigt die Materialstruktur durch Porenbildung während des Erstarrungsprozesses.

Bei Aluminiumschmelzen werden die Unterdruckdichtepprüfung mit Angabe eines Dichteindex verwendet, um den Wasserstoffgehalt und die Reinheit der Schmelze zu beurteilen. Bei der Prüfung erstarrt eine Schmelzprobe im Tiegel in einer Vakuumkammer bei vermindertem Druck, parallel dazu erstarrt eine Probe der gleichen Schmelze bei atmosphärischem Druck (Abbildung 21). Durch den Unterdruck expandieren Wasserstoffblasen stärker, Poren wachsen leichter und Gasfehler werden deutlicher sichtbar. So erhält man eine empfindliche Aussage über die Schmelzqualität.



Abbildung 21: Messgerät zur Unterdruckdichtepprüfung [11]

Im Vergleich werden beide Proben gewogen und die Dichte und das Volumen bestimmt. Weiterhin können Schliffe angefertigt und bewertet werden.

Der Dichteindex ist die wichtigste Kennzahl aus der Unterdruckprobe. Er beschreibt den relativen Dichteverlust der Vakuumprobe gegenüber der Normalprobe und ist durch folgende Definition gekennzeichnet:

$$DI = ((D_{\text{atm}} - D_{\text{vak}})/D_{\text{atm}}) \times 100 \%$$

D_{atm} ... Dichte der bei Atmosphärendruck erstarrten Probe

D_{vak} ... Dichte der Vakuumprobe

Ein niedriger Dichteindex kennzeichnet wenig Wasserstoff und eine geringe Porosität [11].

Im ersten Industrieversuch wurde Grünkorn mit 93 % Glasfasern und einer Kombination aus organischem und anorganischem Blähmittel getestet. Dieses wurde nach dem Granulieren bei 120 °C getrocknet. Bei Auflage betrug die Schmelzetemperatur 600 °C. Es erfolgte während des Versuches das Aufheizen auf 850 °C. Die Dichteindex nahm über die Versuchsdauer kontinuierlich zu.

Die Vermutung, dass sich noch Feuchtigkeit im Grünkorn befindet und dies zum Anstieg des Dichteindex führte, wurde durch Nachtrocknen bei 200 °C und erneutem Versuch getestet. Jedoch konnten auch hier keine besseren Ergebnisse erreicht werden.

Durch eine TG-Analyse (Thermogravimetrie) wurde das Vorhandensein von Kristallwasser ausgeschlossen.

Da in vorangegangenen Versuchen [12] das Auflegen eines konventionellen Glasschaumgranulates mit Coatierung (Kieselöl und Kaolin) und Nachbehandlung bei 600 °C zu einer starken Abnahme des Dichteindex geführt hatte, wurde diese Variante wiederholt. Im Anschluss wurde das Grünkorn ebenfalls mit Kieselöl und Kaolin ummantelt (gecoated) und bei 600 °C gebrannt. Durch beide Probematerialien (Glasschaumgranulat und Grünkorn mit Coatierung) konnte der Dichteindex gesenkt werden (Abbildung 22). Als Zielwert für eine gute Schmelzequalität sollte der Dichteindex < 3 % liegen. Dieser Wert wurde in keinem der Versuche erreicht. Im Vergleich beider Varianten zeigte das coatierete Schaumglas bessere Ergebnisse.

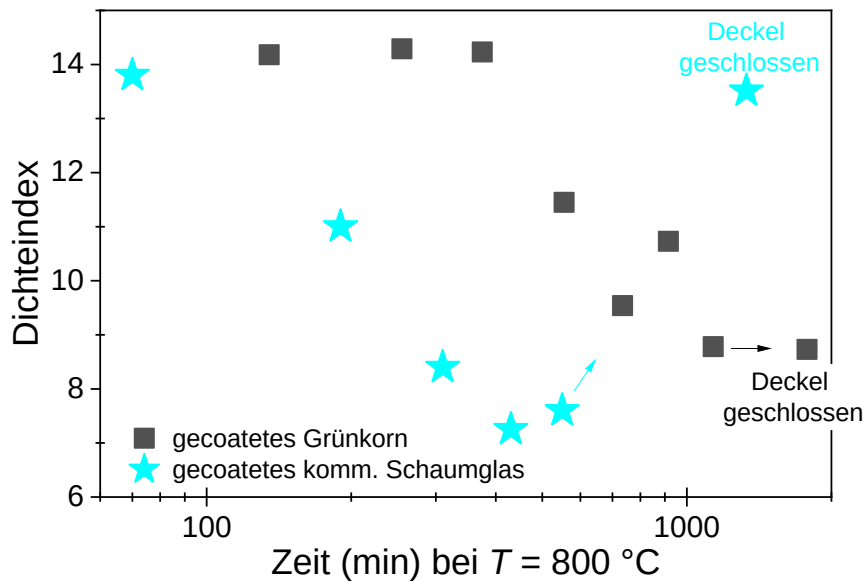


Abbildung 22: Dichteindex bei Versuchen mit gecoatetem Grünkorn/Schaumglas

Weitere Parameter wurden getestet – unterschiedliche Schmelzetemperaturen, Deckel offen/geschlossen, verschiedene Schichtdicken der Abdeckung, zusätzliches Einbringen einer reduzierenden Komponente in die Coatierung - was zu keiner Verbesserung der Untersuchungsergebnisse führte.

Da die Industrierversuche bei der AC Tech GmbH keinen eindeutigen Trend zur Wasserstoffentfernung aus der Schmelze erkennen ließen und die Vermutung bestand, dass durch industrielle Handhabung Störgrößen eingebracht werden, wurde ein Vergleichsversuch am Gießereiinstitut der TU BA Freiberg mit definierten Bedingungen durchgeführt.

Die Aluminiumlegierung AlSi9Cu3(Fe) DIN 226, unter Verwendung von Kreislaufmaterial, wurde in einem Widerstands-Tiegelofen aufgeschmolzen und impellert, um oxydische Verunreinigungen zu entfernen, an welchen bevorzugt Porenbildung durch Wasserstoffanlagerung stattfindet. Im Anschluss erfolgte die Aufgasung mit Wasserstoff um einen hohen Dichteindex als Ausgangswert (12,6) zu erhalten.

Zur Abdeckung der Schmelze wurde coatiertes Glasschaumgranulat verwendet, welches in den vorhergehenden Industrierversuchen schon getestet wurde. Die Schmelzbadtemperatur betrug 800 °C und die Schichtdicke ca. 6 cm (Abbildung 23).



Abbildung 23: Widerstands-Tiegelofen mit Aluminiumschmelze & Schaumglasabdeckung

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse dargestellt. In den ersten 4 Stunden zeigte sich eine kontinuierliche Abnahme des Dichteindex auf 1,4. Nach 7 Stunden war dieser auf 0,9 gesunken. Der Deckel war während des Versuches geschlossen. Die Abdeckung verblieb über 24 Stunden auf der Schmelze – es konnte ein Dichteindex von 0,8 erreicht werden.

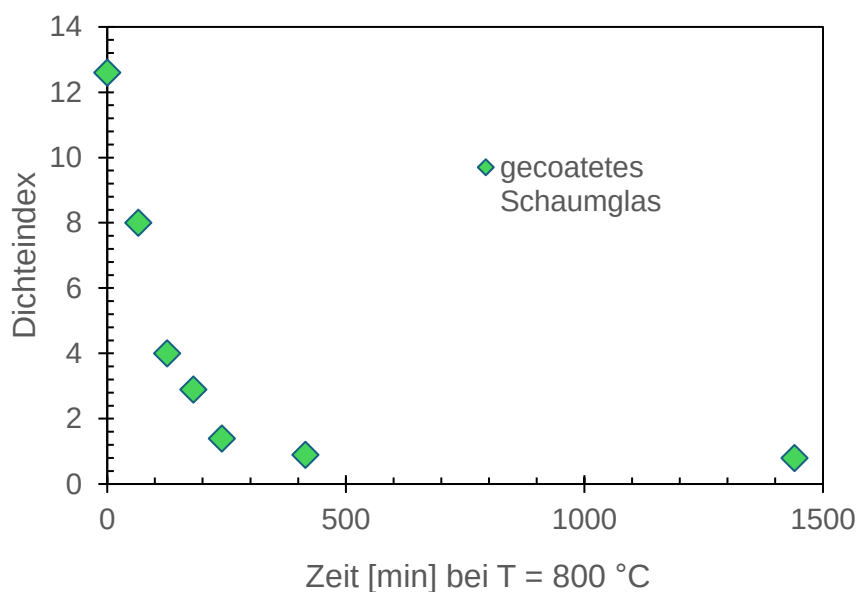


Abbildung 24: Messung Dichteindex mit coatiertem Schaumglas

Proben nach Unterdruckdichteprüfung sind als Anschliff in Abbildung 25 dargestellt. In der Schmelzprobe sind nach 7 Stunden Abdeckung mit Glasschaumgranulat keine Einschlüsse mehr in der Probe zu erkennen.



Abbildung 25: Probenschliffe nach Unterdruckdichtemessung: von links – vor Abdeckung, nach 2 h Abdeckung, nach 7 h Abdeckung

Ein Versuch mit Verwendung von Grünkorn als Abdeckung konnte aus Zeitgründen nicht wiederholt werden.

In den Industrierversuchen und den Versuchen am Gießereiinstitut wurden Schmelzproben durch Funkenemissionsspektroskopie (F-OES) untersucht. Es konnte bestätigt werden, dass keine Verunreinigung der Schmelze durch die Glasschaumabdeckung erfolgt.

Die Untersuchung der Wärmedämmung durch die Abdeckung mit Glasschaumvarianten war für Versuche beim Projektpartner AC Tech vernachlässigbar, da die Schmelz- und Vergießtiegel während der Standzeit mit einem Deckel verschlossen werden.

Durch die Abdeckung der Schmelze konnte eine Oberflächenoxidation/Krätzebildung vermieden werden.

6.9 Industrierversuche zur Abdeckung von Kupferschmelzen beim Projektpartner SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH

Im ersten Industrierversuch beim Projektpartner SM Freiberg GmbH wurde Grünkorn mit einem Glasfaseranteil von 60 % und einem Anteil Quarzglasmehl von 33 % zur Abdeckung von verschiedenen Kupferlegierungen verwendet. Als Blähmittel kam eine Kombination aus organischer und anorganischer Rohstoffkomponente zum Einsatz. Das Material wurde auf seine Handhabbarkeit und Anwendungsroutine geprüft. Weiterhin erfolgte die Untersuchung der Temperaturstabilität im Bereich von ca. 1100 °C bis 1200 °C, des Einflusses auf die Schlackebildung und den Zinkabbrand, sowie eine mögliche Energieeinsparung durch Wärmedämmung der Schmelze.

Für den Anwendungsbereich von Glasschaum auf Kupferschmelzen spielte die Entfernung von Wasserstoff aus der Schmelze keine Rolle. Es stand die reduzierende Wirkung als Ersatz von Holzkohle als Abdeckung zur Reduzierung von Abbrand im Vordergrund.

In einem Induktionsschmelzofen mit einem Durchmesser von ca. 50 cm und einer Kapazität von ca. 500 kg wurde die Kupferlegierung Sn8P auf eine Temperatur von 1115 °C geschmolzen und das Grünkorn in einer Schichtdicke von ca. 5 cm aufgegeben. Die reduzierende Wirkung ist anhand der Flammenbildung in Abbildung 26 gut zu erkennen.



Abbildung 26: Grünkorn nach Aufgabe auf eine Kupferschmelze (links); reduzierende Wirkung (rechts)

Die Glasschaumschicht wurde nach ca. 2 Stunden bei einer Schmelztemperatur von ca. 1220 °C problemlos entfernt, so dass die Schmelze für den Abgussprozess ohne Verunreinigung bereitgestellt werden konnte. An der Kontaktfläche mit der Schmelze kam es zur Ausbildung einer glasigen, viskosen Schicht. Das Nachlegen von Schmelzmaterial und die Temperaturmessung mittels Lanze konnte durch Verschieben der Grünkornschicht erfolgen. Beim Entfernen der Abdeckschicht wurde kein Anbacken mit dem Feuerfestmaterial des Schmelzofens festgestellt. Die Metallanhaftungen an der Glasschaumschicht waren gering.

Während es an der Kontaktfläche zur Schmelze zu Verbackungen kommt, verbleibt das darüber liegende Granulat als lose Schüttung. Durch den Temperaturgradienten über die Schichthöhe ist der Schaumbildungsprozess unterschiedlich stark ausgeprägt.

Abbildung 27 zeigt Glasschaumgranulat nach dem Einsatz als Abdeckung auf der Schmelze. Es ist zu erkennen, dass ein Schäumprozess mit einer gleichmäßigen Porenverteilung stattgefunden hat.



Abbildung 27: Glasschaum nach Einsatz als Abdeckung auf einer Kupferschmelze

Untersuchung des Zinkabbrandes

Den Abbrand von Zink zu verhindern hat nicht nur wirtschaftliche Aspekte. Der Abbrand bzw. das Verdampfen von Zink beim Kupferschmelzen kann gesundheitsschädlich sein, vor allem wenn Zinkdämpfe eingeatmet werden. Wenn zinkhaltige Legierungen stark erhitzt oder geschmolzen werden, verdampft Zink bereits relativ früh und oxidiert in der Luft zu Zinkoxidauch.

Für die nächsten Versuche wurde das Grünkorn in derselben Zusammensetzung zusätzlich mit Zuckerlösung ummantelt und getrocknet, um den reduzierenden Effekt zu verstärken. Es erfolgte die Untersuchung des Zinkabbrandes ohne und mit Abdeckung durch Glasschaum anhand von chemischen Analysen der Kupferlegierungen durch Funkenemissionsspektroskopie (F-OES). Auf den Vergießtiegeln zum Schmelzen der Kupferlegierungen, welche zum Auffüllen der Warmhalteöfen im Strangguss verwendet werden, kommt beim Projektpartner SM Freiberg keine Holzkohleabdeckung zum Einsatz. Die Schmelze wird vor dem Auffüllen analysiert und der fehlende Anteil Zink auflegiert.

Gleichzeitig konnte mit der Funkenspektroskopie bestätigt werden, dass durch die Glasschaumabdeckung keine Wechselwirkung mit der Schmelze stattfindet.

Die Untersuchung des Zinkabbrandes erfolgte an zwei Schmelzöfen mit folgenden Rotguss-Legierungen:

- Induktionsschmelzofen (ISO) mit Legierung RgT - strombetrieben
- Kippschmelzofen (KSO) mit Legierung Rg7 - gasbefeuert

Beide Öfen haben eine Schmelzkapazität von 500 kg.

Die Schmelzen ohne Abdeckung wurden nach Abbrand von Zink auflegiert und anschließend mit Grünkorn in einer Schichtdicke von ca. 5 cm bedeckt. Die chemische

Analyse erfolgte bei beiden Varianten nach ca. 30 min. In den Tabellen 4 und 5 sind die Versuchsparameter zusammengestellt.

Versuch 1 - Induktionsschmelzofen (ISO) mit Schmelze RgT

Uhrzeit	Probe	Zn-Wert	Temperatur vor Probennahme [°C]
13.00	1	6,27	1160
13.20	2	6,07 (-0,01 %/min)	1180
13.50	3	6,23 (Zielwert hochlegiert)	1130 (Aufgabe Grünkorn)
14.15	4	6,25	1137

Tabelle 4: Untersuchung des Zinkabbrandes am Induktionsschmelzofen

Versuch 2 – Kippschmelzofen (KSO) mit Schmelze Rg7

Uhrzeit	Probe	Zn-Wert	Temperatur vor Probennahme [°C]
11.30	1	4,20	1194
12.00	2	4,05 (-0,005 %/min)	1152
12.16	3	4,26 (Zielwert hochlegiert)	1203 (Aufgabe Grünkorn)
12.50	4	4,30	1180

Tabelle 5: Untersuchung des Zinkabbrandes am Kippschmelzofen

Auch hier war der Zugang zur Schmelze für Temperaturmessungen und Materialzugabe ohne Probleme möglich. Das Grünkorn bildete eine glasige, viskose Schicht an der Kontaktstelle zur Schmelze. Die darüber liegenden Granulate schäumten auf ohne miteinander zu verkleben.

Der Zinkanteil in der Schmelze ohne Abdeckung sinkt über die Zeit (Abbildung 30). Bei den Schmelzversuchen mit Glasschaumabdeckung ist keine Abnahme des Zinkwertes zu beobachten. Ein leicht erhöhter Wert könnte auf Messunsicherheiten bei der chemischen Analyse zurückzuführen sein.

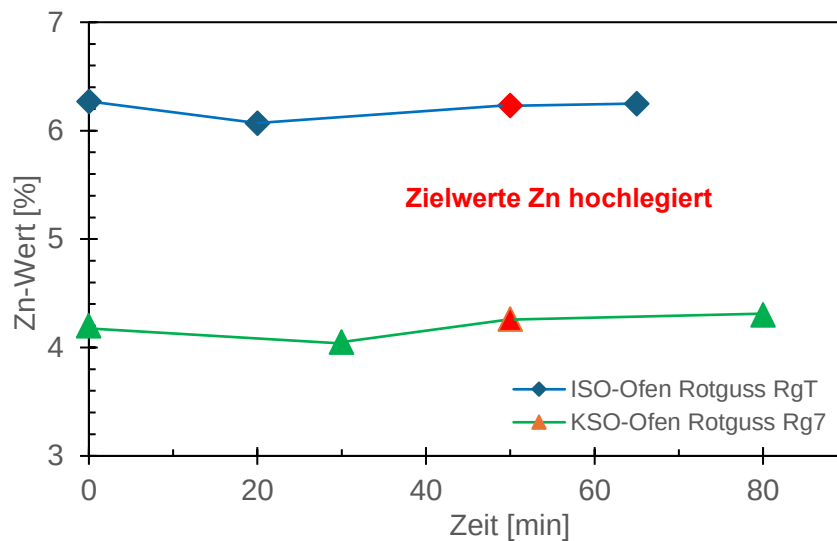


Abbildung 28: Messung des Zinkabbrandes für zwei Kupferschmelzen

Mit diesen Versuchen wurde nachgewiesen, dass die Glasschaumabdeckung auf Kupferschmelzen den Zinkabbrand verhindert und durch ihre reduzierende Wirkung gleichzeitig vor Schlackebildung durch Oxidation schützt. Die Temperaturstabilität des Glasschaumes ist im Temperaturbereich von 1100 °C bis 1200 °C gegeben.

Die Ergebnisse konnten mit einem weiteren Versuch am Induktionswarmhalteofen der Stranggussanlage bestätigt werden.

Untersuchung der Wärmedämmung

Die Wärmedämmwirkung des Glasschaumes auf der Schmelze wurde am Induktionswarmhalteofen der Stranggussanlage untersucht (Abbildung 31).



Abbildung 29: Warmhalteofen der Stranggussanlage; links mit Abdeckung, rechts nach Abschlagen

Der Versuch startete nach frisch befülltem Ofen (ca. 800 kg Schmelze) mit der Kupferschmelzlegierung Rg7. Die Schmelze wurde mit Holzkohle abgedeckt und nach ca. 30 min abgeschlackt. Danach erfolgte das Aufbringen einer ca. 5 cm hohen Grünkornschicht mit zusätzlicher reduzierender Wirkung (Coatierung mit Zuckerlösung).

Im Zeitraum von ca. 30 min nach Aufgabe war eine Temperaturerhöhung der Schmelze von fast 40 Kelvin festzustellen. Der Warmhalteofen der Stranggussanlage wurde bei Abdeckung der Schmelze mittels Holzkohle mit einer Ofenleistung von 44 kW betrieben. Diese konnte nach Erhöhung der Schmelzbadtemperatur durch Grünkornabdeckung auf 40 kW abgesenkt und über einen Versuchszeitraum von weiteren 160 min ohne Temperaturverlust beibehalten werden. Mit diesem Versuch wurde nachgewiesen, dass der Energieeintrag zum Warmhalten der Schmelze durch die Abdeckung mit Grünkorngranulat geringer wird.

Die Temperaturmessung der Schmelze ist in Abbildung 32 dargestellt.

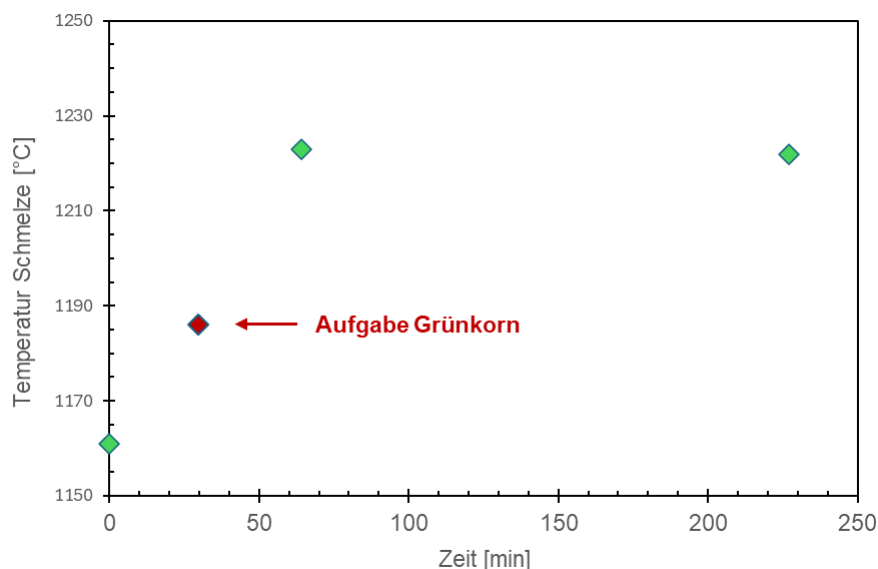


Abbildung 30: Temperaturverlauf der Kupferschmelze bei Abdeckung mit Grünkorn

Der Industrieversuch wurde über einen Zeitraum von ca. 4 h durchgeführt und wurde durch die Neubefüllung des Warmhalteofens mit Schmelze beendet. Während des Versuches war die Ofenabdeckung geöffnet. Wenn der Warmhalteofen mit einem Deckel verschlossen wird, erhitzen sich beide Abdeckungen ähnlich schnell und der Effekt der Wärmedämmung wäre hinfällig.

Die Entfernung des Glasschaumes war ohne Probleme möglich und Anhaftungen am Feuerfestmaterial wurden durch das Befüllen des Ofens abgelöst. Diese vermischen sich nicht mit der Schmelze, sondern schwimmen nach dem Entfernen wieder auf der Oberfläche und können abgeschlackt werden.

Die Temperaturmessungen während des Versuchablaufes konnten durch Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera durch das IGT begleitet werden (Abbildungen 33 bis 35).

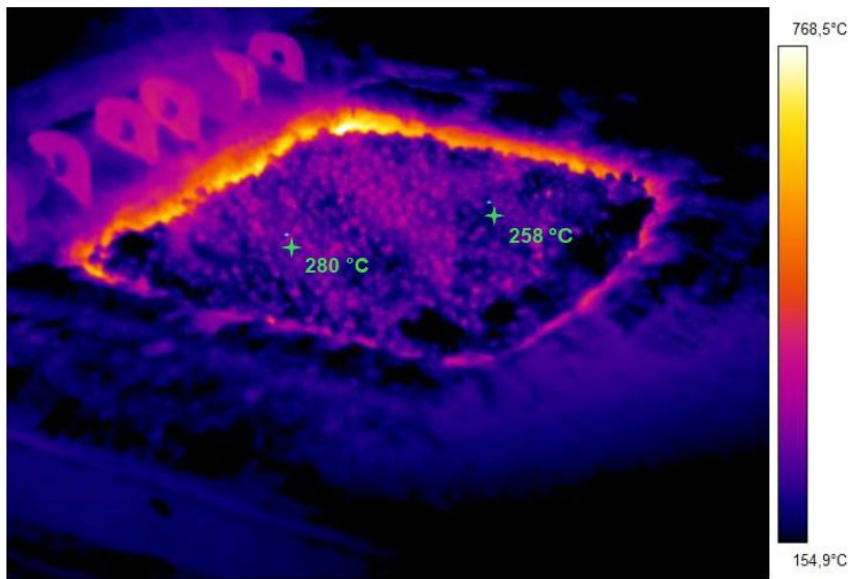


Abbildung 31: Temperatur über der Schmelze nach Auflegen der Grünkornschicht

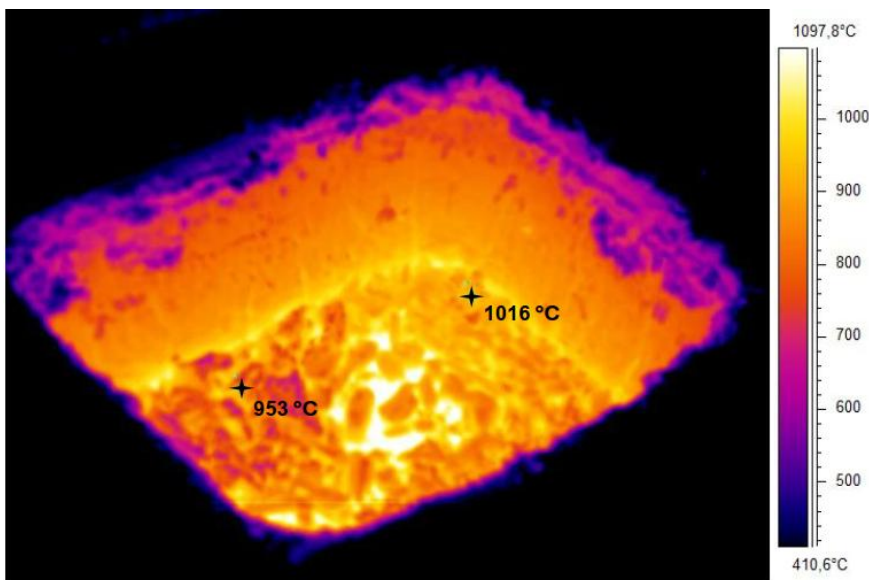


Abbildung 32: Temperatur über der Schmelze bei Abdeckung mit Holzkohle nach ca. 30 min

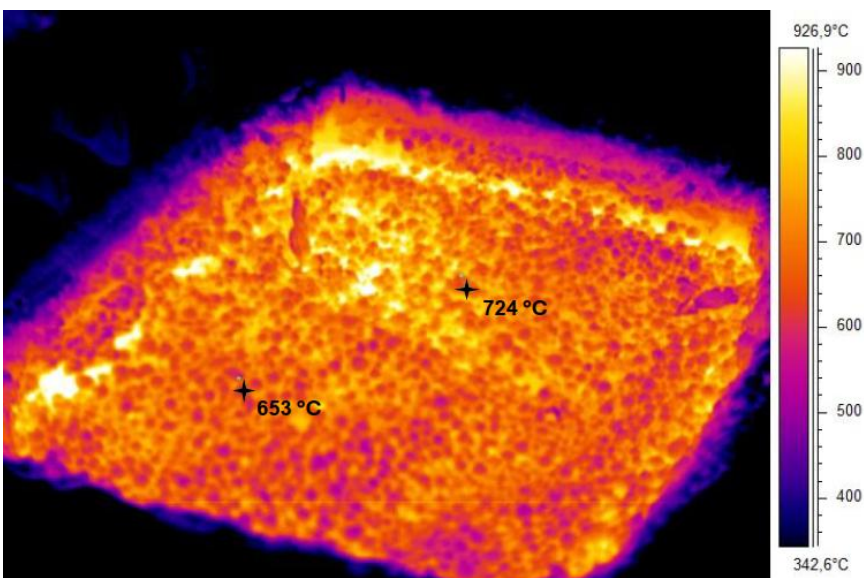


Abbildung 33: Temperatur über der Schmelze bei Abdeckung mit Grünkorn nach ca. 30 min

Diese bestätigen den Nachweis der Wärmedämmung durch das Abdecken der Schmelze mit Grünkorngranulat. Die Temperatur über der Abdeckung der Schmelze ist über einen längeren Zeitraum wesentlich geringer als bei Holzkohle. Das Bedecken des Schmelzbades mit Holzkohle schützt durch seine reduzierende Wirkung ebenfalls vor Abbrand und Schlackebildung. Wärmeverluste sind jedoch größer, da diese nur leicht isoliert.

Die Glasschaumschicht wird über den Versuchszeitraum weiter aufgeheizt, die Dämmwirkung hält jedoch über einen längeren Zeitraum an.

Der Warmhalteofen der Stranggussanlage wird nach Neubefüllung mit Schmelze durch den Vergießtiegel (je nach Gießleistung nach ca. 4 Stunden) wieder neu mit Holzkohle bedeckt.

Eine Versuchsreihe über mehrere Chargen wäre zu genauerer Betrachtung des energetischen Einsparpotentials durch die Abdeckung mit Glasschaumvarianten (z.B. Kühlwassertemperaturen, Energieeintrag Ofen usw.) sinnvoll, konnte jedoch im Rahmen des Projektes aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden. Eine erste Einschätzung wird unter Punkt 6.11 angegeben.

6.10 Entwicklung einer Recyclingtechnologie für Abdeckschäume & Möglichkeiten zur Wiederverwendung des ausgeschleusten Abdeckschaumes

Die oberen Schichten der Glasschaumabdeckungen, welche nicht mit der Schmelze verunreinigt sind und zum größten Teil noch als Granulat vorliegen, können nach der Verwendung als Abdeckmaterial auf Aluminium- und Kupferschmelzen leicht entfernt werden. Dies kann, wie in einem Vorprojekt untersucht, durch Absaugen erfolgen oder mechanisch durch Entfernen mit entsprechendem Werkzeug. Das Glasschaummateriale kann ohne Aufbereitung erneut als Abdeckung der Schmelzen genutzt werden.

Durch den direkten Kontakt mit der Schmelzbadoberfläche wird Glasschaumgranulat mit den jeweiligen Legierungen verunreinigt (Abbildung 36).



Abbildung 34: Glasschaum mit Schmelzeanhaftungen nach Industrieversuchen (links Al, rechts Cu)

Bei den Resten der Abdeckung, welche auf einer Kupferlegierung genutzt wurde, ist ein stärkeres Verbacken zu erkennen. Die Ursache könnte in der Auflage von Grünkorn liegen. Konventionelles Schaumglasgranulat wird im Drehrohrföfen bei Temperaturen

von bis zu 900 °C hergestellt. Höhere Temperaturen wären mit einem großen energetischen und materiellen Aufwand verbunden. Für Kupferschmelzen erfolgte deshalb die Abdeckung mit Grünkorn. Um die Verbackungen zu reduzieren, kann die Rezeptur in ihrer Temperaturbeständigkeit weiter verändert werden. Im Projektzeitraum konnten dazu keine weiteren Versuche gemacht werden.

Die entfernte Schicht nach Einsatz von coatiertem Schaumglasgranulat auf einer Aluminiumschmelze zeigt diese Verbackung kaum.

Das Restmaterial mit Anhaftungen durch Kontakt mit der Schmelze kann gesammelt und bei genügend Material in einem Tiegelofen bis zur Schmelztemperatur der jeweiligen Legierung erhitzt werden. Durch den Dichteunterschied fließt die Schmelze im Tiegel nach unten und der Glasschaum bleibt auf der Schmelze zurück. Das Abschmelzen muss unter Luftabschluss erfolgen, um die Oxidation von Aluminium bzw. Kupfer und die sich daraus ergebende Anhaftung am Granulat zu verhindern.

Der abgeschmolzene Glasschaum kann abgetragen werden. Durch Aufmahlen und Zugabe von Bläh- und Flussmittel ist die Herstellung von Granulat für neue Abdeckungen möglich. Erste Versuche im Labor zeigten erfolgversprechende Ergebnisse. Durch die Kontaktfläche zwischen Glasschaum und Metallschmelze wird es immer einen kleinen Verlust an Material geben, der bei größerer Kontaktfläche entsprechend größer ausfällt.

Das Ergebnis eines Schäumversuches von Restmaterial der Abdeckschicht auf einer Kupferschmelze nach Aufbereitung und neuer Gemengeherstellung zeigt Abbildung 37.



Abbildung 35: Laborergebnis zum Recycling: Foto des Querschnitts eines Schaumglasgranulates aus recycelten Rohstoffen

Die Einfärbung lässt einen Anteil an Kupfer im aufbereiteten Material erkennen, der jedoch keinen negativen Einfluss auf die Schäumfähigkeit (Porenstruktur) ausübt.

Prinzipiell wurde hiermit der Nachweis erbracht, dass die Wiederverwendung des ausgeschleusten Abdeckschaumes möglich ist. Weitere Versuche sowohl im Labor als auch im Industriemaßstab sind notwendig, um eine Wirtschaftlichkeit zu prüfen.

6.11 Kostenkalkulation und Entwicklung einer Vermarktungsstrategie

In den Tabellen 6 und 7 sind die Kosten für Rohstoffe und die Herstellung von Grünkorngranulat zur Abdeckung auf Aluminiumschmelzen bzw. Kupferschmelzen zusammengestellt. Die Kosten der Glasfaser ergeben sich aus dem bisher angesetzten Betrag für die Zerkleinerung unter Abzug der Entsorgungskosten. Die Gesamtkosten beziehen sich auf die Herstellung von Grünkorngranulat nach jeweils einer Rezepturvariante. Diese würden sich bei anteiligem Einsatz von Filterstaub im Gemenge verringern. Dafür müssten weitere, systematische Laborversuche durchgeführt werden, um den optimalen Gehalt im Zusammenhang mit der Feuerfestmaterialkorrosion zu ermitteln.

Rohstoffe + Herstellung	Kosten €/t	Kosten €/t Gemenge
Glasfaser	600	558,00
CaCO ₃	350	7,00
Glycerin	1670	33,40
Wasserglas	1080	21,60
Coatierung:		
Kaolin	360	1,80
Kieselsol	2500	12,50
Granulieren	420	420,00
Gesamtkosten		1.054,30 €/t Grünkorn

Tabelle 6: Kosten der Grünkornherstellung zur Abdeckung von Aluminiumschmelzen

Rohstoffe + Herstellung	Kosten €/t	Kosten €/t Gemenge
Glasfaser	600	360,00
Quarzglasmehl	350	115,50
CaCO ₃	350	7,00
Kohle	0	0
Kieselsol	2500	75,00
Coatierung:		
Zuckerlösung	1390	6,95
Granulieren	420	420,00
Gesamtkosten		984,45 €/t Grünkorn

Tabelle 7: Kosten der Grünkornherstellung zur Abdeckung von Kupferschmelzen

Kosteneinsparung durch Glasschaumabdeckung auf Aluminiumschmelzen

In Tabelle 8 sind die Kosten zur Spülung der Aluminiumschmelzen mit Argon und die Kosten für die Glasschaumabdeckung zur Entfernung von Wasserstoff

zusammengestellt. Beim Projektpartner AC Tech Freiberg wurde ein Induktionstiegelofen mit einem Ofeninnendurchmesser von 30 cm und einer Schmelzkapazität von ca. 40 kg verwendet. Die Schichthöhe der Glasschaumabdeckung betrug 6 cm. Die Kosten für weitere typische Tiegelgrößen sind ergänzt. Die Rechnung bezieht sich jeweils auf die Produktion von einer Charge pro Ofen.

Schmelzkapazität/Ofen	40 kg	500 kg	1000 kg
Ofeninnendurchmesser	30 cm	60 cm	80 cm
Granulatmenge/Abdeckung	1,2 kg	5 kg	9 kg
Kosten Granulatherstellung	1054,30 €/t	1054,3 €/t	1054,3 €/t
Arbeitstage im Jahr	230	230	230
Schmelzkapazität pro Ofen & Jahr	9,2 t/a	115 t/a	230 t/a
Granulatmenge im Jahr	0,276 t/a	1,15 t/a	2,07 t/a
Kosten Granulat	1054,3 €/t	1054,3 €/t	1054,3 €/t
Granulatkosten im Jahr	290,98 €/a	1212,44 €/a	2182,40 €/a
Kosten Argon pro Tonne Alu	17,00 €	17,00 €	17,00 €
Kosten Argon im Jahr	156,4 €/a	1955 €/a	3910 €/a
Einsparung pro Ofen	- 134,58 €/a	+ 742,56 €/a	+ 1727,60 €/a

Tabelle 8: Mögliche Kosteneinsparung bei Aluminiumschmelzen

Im Ergebnis ist der Einsatz der Glasschaumabdeckung auf Aluminiumschmelzen umso wirtschaftlicher, je größer die Schmelzkapazität eines Ofens in Bezug auf seinen Tiegeldurchmesser ist. Bei Betrieb mehrerer Öfen erhöht sich die Einsparung der Kosten entsprechend. Die Wirtschaftlichkeit würde sich durch Wiederverwendung der Abdeckung zusätzlich erhöhen.

Dazu kommen weitere Einflussmöglichkeiten wie:

- Kostensenkung des Granulates durch anteiligen Einsatz von Filterstaub im Gemenge
- die Vermeidung von Materialverlust durch Krätzebildung (konnte im Projekt nicht quantitativ bestimmt werden)
- Senkung des Energiebedarfs und damit der Energiekosten durch die Wärmedämmung der Schmelze, wenn keine Deckel vorhanden sind
- Effizienzsteigerung und damit Senkung der bisher sehr hohen Kosten für die Zerkleinerung der Fasern

Kosteneinsparung durch Glasschaumabdeckung auf Kupferschmelzen

Die Errechnung der Kosteneinsparung bezieht sich auf die Abdeckung des Schmelzbades mit Grünkorn, welche zu einer Wärmedämmung und somit zur Reduzierung des Energieeintrages (Ofenleistung) in den Warmhaltebetrieb der Schmelze führt und als Ersatz für die klassische Holzkohle zum Einsatz kommt. Die Einspareffekte (Tabelle 9) beziehen sich auf einen Warmhalteofen der Stranggussanlage beim Projektpartner SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH mit einer Schmelzkapazität von 800 kg.

Kupferlegierung Rg7	
Temperatur Schmelze mit Holzkohleschicht	1161 °C
Temperatur Schmelze mit Glasschaum-Schicht	1223 °C
Einsparung der Ofenheizleistung	4 kW/h
Masse der Schmelze	800 kg
spezifische Wärmekapazität Kupferlegierung	385 J/(kg*K)
Temperaturerhöhung durch Glasschaumschicht	62 K
$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$	
$Q = 800 \text{ kg} \cdot 385 \text{ J/kg/K} \cdot 62 \text{ K}$	19.096.000,00 J
Wärmemenge Q eingespart	19.096,00 kJ
Q pro Stunde	5,30 kWh
Q pro Tag	127,31 kWh/24 h
Einsparung Heizleistung	4,00 kW/h
Kosten Strom (Industriepreis Sachsen)	0,16 €/kWh
Arbeitstage im Jahr	260
Energieeinsparung durch Glasschaumabdeckung	
Kostenersparnis durch Glasschaumabdeckung	5.295,96 €/a
Kostenersparnis durch Reduzierung der Heizleistung	166,40 €/a
Energetische Einsparung	5.462,36 €/a
Kosten für Holzkohle	2012,43 €/t
Holzkohleverbrauch am Tag	0,015 t/d
Holzkohleverbrauch im Jahr	3,8 t/a
Kosten Holzkohle im Jahr	7647,22 €/a
Einsparung Kosten Holzkohle im Jahr	7647,22 €/a
Energetische Einsparung durch Glasschaumabdeckung + Einsparung Kosten Holzkohle	
	13.109,58 €/a
Kosten Glasschaum-Grünkorn	
einmalige Abdeckung, Menge	6 kg
Menge am Tag	12 kg
Menge im Jahr	3120 kg
Rohstoff- & Granulierkosten Grünkorn	984,45 €/t
Rohstoff- & Granulierkosten im Jahr	3.071,48 €/a
Gesamteinsparung Material & Energie	10.038,00 €/a

Tabelle 9: Mögliche Kosteneinsparung bei Kupferschmelzen

Die Energieeinsparung durch Wärmedämmung und den Ersatz von Holzkohle als Schmelzbadabdeckung durch Glasschaum in Form von Grünkorn beträgt 10.038,00 Euro im Jahr für einen Warmhalteofen mit einer Schmelzkapazität von 800 kg.

Bei Betrieb mehrerer Öfen erhöht sich die Einsparung der Kosten entsprechend. Hinzukommen würden weitere Kosteneinsparungen durch die Schutzwirkung vor Abbrand und Krätzebildung, welche im Projekt durch zu wenige Versuche nicht quantifiziert werden konnten.

Der verminderte Einsatz von Holzkohle in Gießereien trägt wesentlich zum Umwelt- und Klimaschutz bei. Holzkohle wird häufig aus Holz gewonnen, wodurch Waldressourcen beansprucht und bei nicht nachhaltiger Herkunft Entwaldung sowie Biodiversitätsverluste gefördert werden können. Durch die Reduzierung oder den Ersatz von Holzkohle sinkt der Bedarf an Holzrohstoffen und damit auch der Druck auf natürliche Ökosysteme. Zusätzlich werden bei der Herstellung und Verbrennung von Holzkohle erhebliche Mengen an Kohlendioxid (CO₂), Feinstaub und weiteren Emissionen freigesetzt. Eine Einsparung reduziert daher die Treibhausgasemissionen und verbessert die Luftqualität im Produktionsumfeld. Insgesamt unterstützt die Verringerung des Holzkohleeinsatzes eine ressourcenschonende Produktion, reduziert Umweltbelastungen und verbessert die ökologische Bilanz der Gießereiindustrie.

Entwicklung einer Vermarktungsstrategie

Um eine Vermarktung der Glasschaumabdeckung auf Aluminium- und Kupferschmelzen in Angriff zu nehmen, müssen weitere Versuche im industriellen Maßstab durchgeführt werden, um wissenschaftliche Restfragen zur Thematik zu klären und weitere Optimierungen vorzunehmen. Außerdem müssen eine zuverlässige Rohstofflieferkette (Abfall- und Reststoffe) und Herstellungsoptionen verhandelt und etabliert werden.

Zur Vermarktungsstrategie gehören dann außerdem:

- Veröffentlichungen in Fachzeitschriften der Gießereibranche
- Vorstellung der Thematik auf Fachtagungen
- Empfehlungen der beiden am Projekt beteiligten Gießereien SM Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH und AC Tech GmbH

6.12 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Das Projekt wurde im Rahmen der 98. HVG-DGG-Tagung im Mai 2025 in Goslar vorgestellt.

Der Abschlussbericht wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt veröffentlicht.

7 Fazit

Folgende im Projektantrag formulierten Ziele konnten erfolgreich bearbeitet werden:

- Zerkleinerung der Glasfasern zur Herstellung von Glasschaumgranulat
- Ersatz von Glasmehl im Glasschaum durch Glasfasern zu 100 %
- Entwicklung von Glasschaumvarianten für unterschiedliche Temperaturbereiche unter Verwendung von Reststoffen aus der Glasindustrie mit einem Anteil von > 90 %
- Nachweis der Temperaturbeständigkeit in Industrieversuchen
- keine Wechselwirkung mit den Schmelzen und dem Feuerfestmaterial der Gießereien
- Einsatz von Grünkorn und Glasschaum als Abdeckung möglich
- Wärmedämmung im Warmhaltebetrieb
- Verminderung von Krätze und Abbrand
- Recycling der Glasschaumabdeckung prinzipiell möglich

Die widersprüchlichen Ergebnisse in Bezug auf die Resorption von Wasserstoff aus Aluminiumschmelzen erfordert weitere Untersuchungen.

Eine künftige Zusammenarbeit zur Thematik ist vorgesehen, um sowohl grundlegende metallurgische und werkstoffwissenschaftliche Vorgänge durch die Auflage von Glasschaum bzw. Grünkorn auf die Schmelze zu untersuchen als auch die Industrietauglichkeit und den Einsatz als Produkt weiter voran zu bringen.

Die erzielten Ergebnisse sowie die bisherigen wirtschaftlichen Betrachtungen zeigen ein deutliches Potenzial des untersuchten Ansatzes. Insbesondere konnten sowohl die technische Machbarkeit nachgewiesen als auch wirtschaftliche und ökologische Vorteile aufgezeigt werden. Die bisherigen Erkenntnisse bilden damit eine belastbare Grundlage für eine vertiefende Untersuchung und Weiterentwicklung des Themas. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Fortführung der Arbeiten sinnvoll und gerechtfertigt, um die identifizierten Potenziale weiter auszuschöpfen und die Ergebnisse hinsichtlich Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit weiter zu validieren.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Steiner, Arjen: *Foam glass manufacturing as sustainable reuse of waste glass*. Physics and Chemistry of Glasses - European Journal of Glass Science and Technology Part B, Volume 66, Number 4, August 2025, pp. 159-159(1).
<https://doi.org/10.13036/17533562.66.4.AM47>
- [2] D. E. J. Talbot and P. N. Anyalebechi: *Solubility of hydrogen in liquid aluminium*. Materials Science and Technology Volume 4, Issue 1, 1988
<https://doi.org/10.1179/mst.1988.4.1.1>.
- [3] Talbot, D. E. J.: *“Effects of Hydrogen in Aluminium, Magnesium, Copper, and Their Alloys”*, International Metallurgical Reviews, Vol. 20, No. 1, 1975, S. 166–184.
- [4] Ostermann: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.
- [5] Williams et al.: *Hydrogen embrittlement and strain rate sensitivity of electrodeposited copper: part I – the effect of hydrogen content*. npj Materials Degradation (2024).
- [6] Schmitz, Wilfried; Trauzeddel, Dietmar: *Giesserei 103* (2016), Nr. 11, S. 44-45.
- [7] Schmitz, Wilfried; Trauzeddel, Dietmar: *ewi – elektrowärme international* (2016), Nr. 4, S. 47-52.
- [8] <https://www.klein-daemmstoffe.de/ressources/vermiculit-vermiculite-91287.html>
- [9] Gebhardt, T., Dunkl, M., et al.: *Feuerfeste Werkstoffe für die Glasindustrie und deren Prüfung*. Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie. Verlag der DGG, Frankfurt, a.M. (1998).
- [10] Otto, Sylvia: *Zur Korrosion von Bauteilen aus SiC in Verbrennungsatmosphären von verunreinigten Heizölen*. Dissertation 2005, TU BA Freiberg.
- [11] <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/unterdruck-dichtprobe-619/?cHash=4edd5b1800c6e11e8d2ea049b5c1bca4>
- [12] Projekt DBU-AZ 30674