



Aalener Gesellschaft für Leichtbauteile

- Entwicklungsgießerei -

zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008

zertifiziert nach DIN EN ISO 14001:2009

"Verminderung von Umweltbelastungen beim Gießprozess sowie zur Energieeinsparung durch ein innovatives Abdecksystem der Schmelzbadoberflächen und Schutz der Schmelzen gegenüber dem Angriff der umgebenden Atmosphäre"
Kurztitel: "Schwimmende Deckel für Aluminiumschmelzen"

Abschlussbericht Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU-
Aktenzeichen 30674
gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Autoren: Dipl.-Chem. (FH) Thomas Luckow
Prof. Dr. Dr. h.c. Friedrich Klein
Dipl.-Ing. Matthias Franke

Norderstedt, 22.08.2016

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30674/02- 21	Referat	21/2	Fördersumme	117.500 €
----	-------------------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung und Einsatz mineralischer Abdecksysteme für die Gießereiindustrie zur Energieeinsparung und Minderung von Umweltbelastungen sowie Risiken bei der Produktion**

Stichworte Gießereiindustrie Aluminiumschmelzen Energieeinsparung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	05.12.2014	05.06.2016	2

Zwischenberichte 30.06.15 und
31.12.15

Bewilligungsempfänger	OMEGA Minerals Production & Technology GmbH Rugenbarg 63a 22848 Norderstedt	Tel ++49 40 528707-0
		Fax ++49 40 528707-77
		Projektleitung Thomas Luckow
		Bearbeiter Nasser Fayed, Dr Norbert Südlan

Kooperationspartner Aalener Gesellschaft für Leichtbauteile mbH
Schleiermacherstr. 20
7341 Aalen

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

In einem Vorgängerprojekt wurde ein Abdeckmittel zum Schutz der Schmelzbadoberfläche gegen Wärmeverluste für die Gießereiindustrie auf der Basis eines Blähglasproduktes entwickelt, kleintechnisch hergestellt und in der Entwicklungsgießerei getestet. Dort konnte der verringerte Wärmeverlust nach Abdeckung nachgewiesen werden, jedoch keine verminderte Wasserstoffaufnahme der Legierungskomponenten. Auch reichte die Temperaturbeständigkeit der BUBBLES nicht für eine Anwendung > 800°C.

Die Entwicklung bot jedoch genügend Potenzial für Verbesserungen. In Abstimmung mit der Gießereiindustrie ergaben die folgenden Zielsetzungen:

- Weiterentwicklung des coatingten Abdeckmittels bis zu einer Temperaturstabilität > 800 °C
- Einbau funktionaler Schichten in die Oberflächen der BUBBLES zur Beeinflussung der Wechselwirkung mit der Schmelze
- Entwicklung eines schäumfähigen Granulates zur Abdeckung der Schmelzen

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Zur Erreichung der höheren Temperaturbeständigkeit war es notwendig, eine neue Rezeptur für die Coatingschicht zu entwickeln und diese auf die Oberflächen fest aufbringen zu können. Dazu gab es Versuche im Labormaßstab zur Herstellung der BUBBLES und zum Test im Labor-Schmelzofen. Die charakteristischen Eigenschaften der neuen BUBBLES wurden ermittelt. Danach erfolgte die Übertragung der Herstellung auf den kleintechnischen Maßstab. Die so produzierten Musterchargen testete die Entwicklungsgießerei hinsichtlich der reduzierten Wärmeabgabe, der Temperaturbeständigkeit, der Wasserstoffaufnahme und des Handlings beim Gießereiprozess.
- Der Einbau von funktionalen Schichten sollte einmal ein reduzierenden Einfluss auf die Schmelzen ausüben und andermal durch Salze gezielt die Kornfeinung oder die Zugabe von Legierungselementen verbessern helfen. Auch dazu wurden sowohl Untersuchungen im Labor und kleintechnischen Maßstab durchgeführt.
- Basierten die bisherigen Arbeiten auf einer Veredlung der Blähglasgranulate, gab es hier den Ansatz, ein Produkt zu generieren, das beim Auflegen auf die Schmelze aufschäumt und so diese gegen die Atmosphäre abschirmt und gleichzeitig die Wärmeverluste reduziert. Dazu waren wiederum Labor und kleintechnische Untersuchungen notwendig.

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

Ergebnisse und Diskussion

- Erhöhung der Temperaturbeständigkeit der BUBBLES auf 850 °C

Im Laborversuch konnte die angestrebte Erhöhung der Temperaturstabilität der BUBBLES > 850 ° C erreicht und kleintechnische Muster hergestellt werden. Jedoch waren diese im kleintechnischen Versuch nicht stabil, es bildete sich eine dünne Schmelzhaut der BUBBLES auf der Tiegeloberfläche aus. Ursache für die differierenden Ergebnisse sind unterschiedliche Oberflächenverhältnisse im Labortiegel und in der Entwicklungsgießerei. Jedoch zeigte sich ein positiver Einfluss der Schmelzschicht auf eine geringere Wasserstoffaufnahme der Schmelze sowie auf die Absaugung der BUBBLES beim Legierungswechsel. Die Untersuchungen erfolgten an der Al-Legierung 226, der meist eingesetzten Sekundärlegierung (betrifft ca. 60% der Al-Gussteile). Eine Übertragung der Ergebnisse auf in der Entwicklung befindlicher Cu- und Fe-freien Schmelzen scheint möglich.

- Einbau von Funktionsschichten

Eine oxidative Wirkung der Funktionsschichten ist nach Konsultation mit Gießereien für den Aluminiumguss nicht relevant; Interesse besteht an einer reduzierender Wirkung durch Einbau einer Kohlenstoffbeschichtung,

Laborversuche ergaben als einfachste Realisierung einer Funktionsschicht mit reduzierender Wirkung das Aufbringen einer Zuckerlösung auf die BUBBLES, Die präparierten BUBBLES führten beim Auflegen auf die

Al-Schmelze zu einer starken Rauchentwicklung und Abbrand des Zuckers. Es bildete sich ein geschlossener schwarzer Schaumkörper, der wiederum eine verminderte H₂-Aufnahme bewirkte.

Die Versuche erfolgten sowohl mit coateden BUBBLES als auch mit ungeblähtem Grünkorn.

Danach war wiederum nötig, die Erkenntnisse zur Herstellung von Musterchargen für die kleintechnischen Versuche in der Gießerei zu nutzen. Die Technikumsversuche in der Gießerei zeigten die Beherrschbarkeit der Rauchentwicklung mit Absaugung.

Eine Vorbehandlung der mit der Zuckerlösung beschichteten BUBBLES ergab keine Verbesserung der sehr starken Rauch- und Geruchsentwicklung. Deshalb ist für weiterführende Untersuchungen der Zucker durch Holzkohlestaub zu ersetzen.

Eine Abnahme des Deckels beim Einsatz ungeblähter BUBBLES von der Schmelze ist nach vorangegangener Verschlichtung der Zone über der Schmelze problemlos möglich. Der Effekt der H₂-Abreichung durch den Verschluss der Schmelzbadoberfläche bestätigte sich.

Der Einbau von Salzen als Funktionsschicht

Ziel war die Verbesserung der Kornfeinung und der Veredlung durch Aufbringen verschiedener Komponenten auf die coateden BUBBLES bei gleichzeitiger Verbesserung der Durchmischung und damit Homogenisierung der Schmelzen (Vergleichmäßigung der mechanischen Eigenschaften beim Abguss).

Dazu wurden Musterchargen in der Entwicklungsgießerei hergestellt und deren Wirkung auf die Aluminiumschmelzen untersucht. Dabei gelang es nicht, die BUBBLES solange in der Schmelze zu halten, damit der gewünschte Einfluss der Salze nachweisbar war.

Weiterhin wurde eine Entnahmemöglichkeit der Schmelze zur Absicherung einer kontinuierlichen Materialentnahme aus der abgedeckten Oberfläche entwickelt.

- Grünkorn (ungeblähte schäumfähige mineralische Pellets)

Wiederum in Laborversuchen wurden Muster entwickelt und getestet. Diese ergaben die grundsätzliche Eignung des Grünkorns zur Abdeckung der Al-Schmelzen. Sie schäumen ab 750°C und bilden eine kompakte Schaumschicht.

Darauf aufbauend erfolgte die kleintechnische Herstellung von Mustern für die Entwicklungsgießerei.

Dort kam es auch zur Ausbildung der kompakten grün-schwarzen Schaumplatte mit schlechterer Isolierwirkung als bei den nichtschmelzenden BUBBLES. Eine leichte Abnahme des „Deckels“ war hier auch möglich.

Nachdem sich dieses System für einen Einsatz in der Gießerei anbietet und durch die verringerte Wasserstoffaufnahme gegebenenfalls das Impellern eingespart werden kann, müssten die Schmelzen nicht mehr so hoch erhitzt werden.

Deshalb erfolgte die Entwicklung eines Grünkorns, das bereits bei Temperaturen um 720°C aufschäumt.

Dieses wurde kleintechnisch für die Entwicklungsgießerei hergestellt. Der Technikumsversuch bestätigte die Schäumwirkung bereits bei 720°C.

Der Verzicht auf das Impellern durch die reduzierte H₂-Aufnahme bei niedrigerer Schmelztempertur und der Abschirmung durch eine geschlossene Schmelzhaut kann immense Vorteile bieten.

Grundsätzlich ist auch kombinierter von Einsatz von Grünkorn zur Ausbildung einer dünnen Schaumschicht und darüber der coateden BUBBLES zur Wärmehaltung möglich. Zwar müsste dann die Gießerei beide Produkte einsetzen, jedoch ließen sich die BUBBLES leicht absaugen und sofort wiederverwenden. Das Recycling der Schaumschicht ist demgegenüber aufwendiger.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse erhielten ausgewählte Gießereien zu einer Bewertung. Darüber hinaus steht das Projektkonsortium mit dem Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie in Kontakt. Es wird eine Veröffentlichung der Ergebnisse in der Fachpresse vorbereitet.

Fazit

Es konnten keine coateden BUBBLES mit vergleichbarer Wärmedämmung mit einer Temperaturbeständigkeit > 850 °C unter praxisrelevanten Bedingungen erreicht werden. Die untersten Schichten bilden eine festschließende Schmelzhaut aus, die die Wasserstoffaufnahme der Schmelze deutlich verringert. Dadurch kann es möglich sein, zur Qualitätssicherung auf das Impellern verzichten zu können. Damit entfällt nicht nur ein Arbeitsgang sondern es folgt daraus eine um ca. 80 °C geringere Aufheizung der Schmelze. Außerdem ermöglicht die Schmelzhaut ein einfaches Abkrätzen der BUBBLES.

Der Einbau der Funktionsschichten mit reduzierender Wirkung durch Einbau von C-haltigen Substanzen bewirkt ein Abrauchen. Deshalb ist es notwendig, eine intensive Absaugung oberhalb des Tiegels zu gewährleisten. Der Effekt einer verringerten Wasserstoffaufnahme bestätigte sich auch hier unabhängig davon, ob coatierte BUBBLES oder coatiertes Grünkorn zum Einsatz kamen.

Der Einbau von Salzen führte nicht zu den erwarteten positiven Auswirkungen auf die Schmelzen. Weiterhin konnte ein schäumfähiges Granulat entwickelt werden, das schon bei ca. 720 °C aufschäumt und so einen Verschluss der Oberfläche gewährleistet. Insgesamt ist die Wärmedämmung der geschlossenen Schaumschicht etwas vermindert gegenüber den BUBBLES. Es ist jedoch auch eine Kombination beider Produkte möglich. Die geschlossene Schaumschicht wird nur dünn ausgebildet und darüber die coatierten BUBBLES geschichtet.

Allen Varianten ist gemein, dass sie selbst keine negativen Einflüsse auf die Al-Schmelzen ausüben, nur dünne Häute des Metalls anhaften und die BUBBLES fast vollständig wieder nutzbar sind.

Inhalt

1. Zusammenfassung.....	10
2. Einleitung	10
3. Darstellung der Untersuchungsmethodik und der erzielten Ergebnisse.....	12
3.1 Entwicklung von bis 850°C temperaturstabiler Blähglasgranulate	12
3.1.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	12
3.1.2 kleintechnische Herstellung der Muster für die Entwicklungsgießerei	16
3.1.3 Ergebnisse der Versuche im Gießereitechnikum	19
3.1.4 Testergebnisse aus der Entwicklungsgießerei	24
3.2 Einbau funktionaler Schichten in die Oberflächen der Blähglasgranulate.....	28
3.2.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	28
3.2.2 kleintechnische Musterherstellung.....	30
3.2.3. Versuche im Gießereitechnikum.....	31
3.2.4 kleintechnische Versuche in der Entwicklungsgießerei	35
3.3 Entwicklung eines schäumfähigen Grünkorns zur Abdeckung der Schmelzen.....	39
3.3.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	39
3.3.2 Kleintechnische Herstellung der Muster für die Versuche im Tiegelofen.....	43
3.3.3 Ergebnisse der Versuche im Gießereitechnikum	43
3.3.4 Ergebnisse der Versuche in der Entwicklungsgießerei.....	44
4. Fazit	48
5. Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 Bubbles hergestellt mit unterschiedlichen Blähmitteln
- Abbildung 2 Tiegelproben bei 900 °C
- Abbildung 3 Ofenraumtemperatur bei 900 °C
- Abbildung 4 Technologieschritte zur kleintechnischen Musterproduktion der Omega Bubbles
- Abbildung 5 Granulatproduktion im kleintechnischen Drehrohr-Ofen
- Abbildung 6 Trommelmischer mit Granulat
- Abbildung 7 Eintrag des Bindemittels in den Mischer mit Schrägrohr
- Abbildung 8 Sintern der Coatingschicht bei 600 °C
- Abbildung 9 Alu-Schmelze bei 850 °C im Induktionstiegelofen
- Abbildung 10 Alu-Schmelze mit Abdeckung
- Abbildung 11 Temperaturfühler bei 850 °C
- Abbildung 12 Temperatur Alu-Schmelze
- Abbildung 13 Schmelzhaut auf dem Metallbad
- Abbildung 14 Abkrätzen Metallbad-Oberfläche
- Abbildung 15 Bruchfläche der kalten Schmelzhaut
- Abbildung 16 abgekratztes Metallbad
- Abbildung 17 stationäre Absaughaube über dem Tiegelofen zur Absaugung der Rauchgase
- Abbildung 18 Alu-Proben (links in Luft, rechts in Vakuum)
- Abbildung 19 Abkühlkurven
- Abbildung 20 Als Glasplatte ausgebildete Schicht nach Abräumen der Granulate
- Abbildung 21 Glasplatte von oben (links) und unten (rechts)
- Abbildung 22 gecoatetes Granulat bei 850 °C auf der Alu-Schmelze im Labortiegel
- Abbildung 23 Entfernen des gecoateten Granulates von der Alu-Schmelze
- Abbildung 24 Grünkorn-Granulat mit Zucker bei 850 °C auf der Alu-Schmelze (Labortiegel)
- Abbildung 25 Entfernen der Schaumschicht von der Alu-Schmelze
- Abbildung 26 technologische Kette zur Herstellung des Grünkorns
- Abbildung 27 Zuckerbeschichtetes Granulat
- Abbildung 28 Verkohlung des Granulates
- Abbildung 29 Ausbrennen des Zuckers auf der Granulat-Oberfläche nach 4 h
- Abbildung 30 Entfernen des Granulates mit einer Kelle
- Abbildung 31 Widerstand-Tiegelofen bei 750 °C
- Abbildung 32 Temperaturregler / Sollwert 750
- Abbildung 33 Grünkorn-Granulat vor dem Schäumen auf dem Metallbad
- Abbildung 34 Abdeckung der Alu-Schmelze bei 750 °C Kontakttemperatur
- Abbildung 35 Austrag der Schaumplatte nach 4 Std. Abdeckzeit (verkohlt)
- Abbildung 36 Schaumplatte nach dem Austrag (obere Ansicht und Randbereich)
- Abbildung 37 Ansicht der Schaumplatte (Unterseite mit Aluhaut)
- Abbildung 38 Bruchfläche der Schaumplatte
- Abbildung 39 Abkühlkurven, zuletzt mit Zucker
- Abbildung 40 Logarithmierte Abkühlkurven, zuletzt mit Zucker
- Abbildung 41 Schaumschicht ohne Glasplatte über erstarrter Aluminiumschmelze
- Abbildung 42 Schaumschicht über erstarrter Glasplatte
- Abbildung 43 geschlossene Schaumschicht über der Alu-Schmelze

- Abbildung 44 nach Aufbruch des Tiegels Schaumschicht (1 cm dick) über dem Metall
- Abbildung 45 Untersuchungen der Erweichungstemperatur im Labor-Erhitungsmikroskop
- Abbildung 46 Musterproduktion „Grüngranulat“ für Versuchsgießerei
- Abbildung 47 Aluminium-Legierung 226 D
- Abbildung 48 Induktionstiegel-Ofen (100 kW)
- Abbildung 49 Vakuum-Prüfgerät zur Bestimmung des Dichte-Index der Legierung
- Abbildung 50 Vakuum-Prüfgerät zur Bestimmung des Dichte-Index der Legierung
- Abbildung 51 Ring aus Kalziumsilikat zur Probenentnahme

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1 Versuchsprogramm
- Tabelle 2 Versätze zur Änderung der Granulatzusammensetzung
- Tabelle 3 Blähmittel-Komponenten
- Tabelle 4 Vergleich der Bubbles-Eigenschaften für verschiedene Blähmittelvarianten
- Tabelle 5 Bewertung der Trennmittelwirkung
- Tabelle 6 Verlauf der H₂-Entgasung der Schmelze mit gecoatetem Abdeck-Granulat
- Tabelle 7 Verlustleistungen in Kilowatt
- Tabelle 8 Verlustleistungen in Kilowattstunden pro Tag
- Tabelle 9 Heizkosten pro Tag
- Tabelle 10 Einsparpotential pro Tag
- Tabelle 11 Einsparpotential je Quadratmeter und Tag
- Tabelle 12 Aufnahme von Wasser und Zuckerlösung an der Granulatoberfläche
- Tabelle 13 Aufnahme von Wasser und Zuckerlösung an der Granulatoberfläche (Grünkorn)
- Tabelle 14 Verlauf der H₂-Entgasung der Schmelze mit reduzierendem Funktionsträger auf dem Granulat nach Messung des Dichte-Index bei 850 °C
- Tabelle 15 Verlauf der H₂-Entgasung der Schmelze mit reduzierendem Funktionsträger im Granulat nach Messung des Dichte-Index bei 750 °C
- Tabelle 16 Vergleich Wärmedämmung der Grünkorngranulate
- Tabelle 17 Analyseergebnisse zur Ermittlung der Dichte
- Tabelle 18 Dichtebestimmung gemäß Spektralanalyse
- Tabelle 19 Ergebnisse der Unterdruckprüfung

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Abkrätzen: Entfernen von Schlacke aus einem Metallschmelzbad

Grünkorn: Pellets aus mineralischen Komponenten zum Aufschäumen

Impellern: In leichtmetallschmelzenden Betrieben werden seit 1980 zunehmend Impeller zur Schmelzebehandlung eingesetzt, sei es um Verunreinigungen zu entfernen, oder Zusätze von Schmelzebehandlungsmitteln in intensiven Kontakt mit der Schmelze zu bringen. In aller Regel sind das die Schmelzen reinigende, unerwünschte Verunreinigungen beseitigende Salzgemische meist in granulierter, verstaubungsarmer Form. Auch nützliche Legierungselemente können mittels Impeller in die Schmelze eingebracht werden. Die Praxis beschränkt sich nicht auf die bloße Impellerwirkung, bringt vielmehr mittels einer entsprechenden Zusatzein-

richtung gleichzeitig und in der Dosierung mit dem Gasstrom abgestimmt ein reaktives, oder inertes Gasgemisch ein. Daraus ergibt sich sowohl ein erhöhter Reinigungseffekt, also die Reduzierung störender Elemente, wie Wasserstoff und/oder Oxide, als auch eine optimierte Verteilung und damit nachhaltigere Reaktion in die Schmelze eingebrachter Elemente, vorwiegend solcher gefügebeeinflussender Art.
Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Impeller>

1. Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben beinhaltet die Entwicklung von mineralischen Abdeckmaterialien für Aluminiumschmelzen. Diese sollen dabei die Funktion einer weitgehenden Unterbindung von Wärmestrahlung und Konvektion von den Badoberflächen sowie einer reduzierten Wasserstoffaufnahme erfüllen ohne selbst mit der Schmelze zu reagieren. Entwickelt wurden drei Systeme, die ihrerseits für den Einsatz im Gießereibetrieb geeignet sind und somit Energie und Emissionen einsparen helfen. Auf der Basis von Laborversuchen konnten kleintechnische Musterchargen hergestellt und diese im Gießereibetrieb Tests unterzogen werden. Diese bestätigten die angestrebte Wirkungsweise.

2. Einleitung

In einem Vorgängerprojekt wurde die Idee entwickelt, durch das Abdecken der Oberflächen von Aluminiumschmelzen Energie durch die dann verminderte Wärmeabgabe einzusparen. Dazu mussten für diesen Zweck geeignete Abdeckmaterialien generiert werden, die als „Schwimmende Deckel“ diese Funktion übernehmen können und dabei voll recyclingfähig bleiben. Dies sollte auf der Basis von Blähglasgranulaten, den OMEGA-BUBBLES erfolgen.

Als Projektziele wurden formuliert:

- Erhöhung der thermischen Stabilität der Granulate auf 700°C
Dies konnte durch eine Coatierung der Granulate sicher erreicht werden. Nachweislich sind Schmelzbadoberflächen von 750°C sicher zu beherrschen.
- Reduktion der Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion
Durch Versuche in der Entwicklungsgießerei und in einem Umschmelzbetrieb konnte dies durch Aufnahme von Abkühlkurven dokumentiert werden.
- Hohe Recyclingquote für das Abdeckmaterial
Trotz noch nicht optimierter Absaugtechnik gelang es im Temperaturbereich bis 750°C die modifizierten OMEGA-BUBBLES von der Schmelzbadoberfläche nahezu vollständig und zerstörungsfrei für einen Wiedereinsatz zurück zu gewinnen.
- Keine Wechselwirkung zwischen Schmelze und Abdeckmaterial
CT-Aufnahmen am Korn und Analysen von Metallproben von der Oberfläche des Schmelzbades zeigten keine Beeinflussung durch das Abdeckmaterial.
- Verringerung der Reaktion der Schmelze mit der Umgebung (Sauerstoff- und Wasserstoffaufnahme)
Dieses Ziel wurde nicht erreicht.

Trotzdem werden die Ergebnisse auch von der Gießereiindustrie positiv gesehen und es bestand ein Interesse zur Vertiefung der Arbeiten. Aus den im Vorgängerprojekt gewonnenen Kenntnisse folgten Ansätze zur Weiterführung der Arbeiten mit neuen Aufgabenstellungen.

In den bisherigen Untersuchungen war das Ziel, die BUBBLES sicher bis zu maximalen Temperaturen bis 750 °C einsetzen zu können. Da aber in der Al-Gießerei auch

im Umschmelzbetrieb höhere Temperaturen bis 850 °C vorherrschen und damit eine deutlich höhere Energieeinsparung erreichbar ist, soll im Projekt die Temperaturbeständigkeit der Blähglasgranulate auf 900° C verbessert werden.

Dazu ist eine Weiterentwicklung der Coatingschicht notwendig und der Nachweis der sicheren Temperaturbeständigkeit vor dem Einsatz in der Versuchsgießerei zu erbringen.

Im nächsten Schritt muss die Herstellung der Coatings im Labor und in kleintechnischen Maßstab umgesetzt werden.

Ein neuer Aspekt stellt die Notfallvorsorge bei Stromausfall in Gießereien dar, der leider in der letzten Zeit häufiger von den Betrieben beklagt wird, Abgedeckte Schmelzbadoberflächen verzögern die Auskühlung und das Erstarren deutlich länger als dies die gespeicherte Wärme im Feuerfestmaterial leisten kann.

Ebenfalls eine Innovation stellt die Idee dar, eine Verminderung der Umweltbelastungen bei Einsatz von Legierungskomponenten durch den Einbau funktionaler Schichten zu erreichen. Der Ausbrand von Legierungskomponenten wurde durch die BUBBLES-Schicht in der vorliegenden Form im Vorgängerprojekt nicht verhindert, wie in Experimenten nachgewiesen werden konnte. Zur Unterbindung von Ausgasungen oder Verringerung des Ausbrands aus der Schmelze bei Zugabe von Hilfsmitteln sind deshalb funktionale Schichten zu entwickeln und die Wirkung dieser BUBBLES im Gießereibetrieb zu untersuchen.

Vorgesehen ist der Auftrag von Redoxschichten in Form von organischen Reaktionskomponenten zur chemischen Bindung des Sauerstoffangebotes über der Schmelzbadoberfläche zur Vermeidung von Oxidationsreaktionen (Krätzebildung).

Der Einbau von Absorptionskomponenten welche Ausdampfungen aus der Schmelze über die Badoberfläche durch chemische Reaktionen binden und so eine Kontamination der Ofenabgase verringern oder gar vermeiden.

Zur Umsetzung bedarf es geeigneter Granulat-Zusammensetzungen sowie darauf abgestellter Oberflächenbeschichtung und Bindung der Komponenten. Die Untersuchung des Reaktionsablaufes ist durch Analytik der Granulatrückstände und Metallbadproben zu begleiten, um eine Auswahl der geeignetsten Funktionsmittel erreichen zu können

Eine weitere Neuerung stellen die Versuche zur Unterbindung der Krätzebildung durch Grünkornschichten bestehend aus einem Granulat auf Basis von schäumfähigen Alkali-Kalk-Gläsern dar, die eine Ausbildung einer geschlossenen Schmelzschicht über die gesamte Badoberfläche mit darüber liegender Wärmedämmschicht ermöglichen sollen. Ausgangsmaterial ist dabei das Rohprodukt der OMEGA-BUBBLES, das entsprechend der Zielstellung zu modifizieren ist. Die Grünkornschicht besitzt noch das Schäumpotential in der Rohstoffzusammensetzung und reagiert erst bei Temperaturkontakt oberhalb von 800 °C. Bei Auflage des Grünkorn-Granulates auf die Schmelze bildet sich sofort eine untere Schaumschicht, welche unmittelbar auf der Badoberfläche eine Schmelzhaut bildet. Dadurch wird der Einfluss von Luftsauerstoff vermieden. Über die Schichtdicke der Granulatschicht bildet sich eine abnehmende Schaumstruktur aus, welche bei weiterer Durchwärmung nachschäumt. Der Energiebedarf für das Aufschäumen beträgt nur wenige Prozente

der Wärmeabstrahlung gegenüber der Abstrahlung bei ungeschützter Metallbadoberfläche.

Alle drei Entwicklungen im Forschungsvorhaben verlaufen nach dem gleichen Schema:

- Auswahl geeigneter Rohstoffe zur Änderung der Granulat-Zusammensetzungen
- die Oberflächenbeschichtung und Bindung an den OMEGA-BUBBLES
- Untersuchung des Reaktionsablaufes durch Analytik der Granulatrückstände und Metallbadproben
- Auswahl Muster für die kleintechnische Herstellung
- technologische Umsetzung der Rezeptur und kleintechnische Musterchargenproduktion
- Einsatz der Muster in Tiegelöfen unter realen Bedingungen
- Erfassung der Wärmerückhaltung
- Bestimmung des Dichte-Index als Maßstab der Entgasung

Art der Untersuchung/Produktziel	Projektziel 1	Projektziel 2		Projektziel 3	
	OMEGA-Bubbles > 850°C	OMEGA-Bubbles mit Funktionsschicht C-haltig	Salze	Grünkorn mit Schmelztemperatur 800 °C	720°C
Laboruntersuchungen	x	x	x	x	x
kleintechnische Musterherstellung	x	x		x	x
Untersuchungen Gießereitechnikum	x	x		x	x
Untersuchungen Entwicklungsgießerei	x	x	x	x	x

Tabelle 1: Versuchsprogramm

3. Darstellung der Untersuchungsmethodik und der erzielten Ergebnisse

3.1 Entwicklung von bis 850°C temperaturstabiler Blähglasgranulate

3.1.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Es wurde eine ganze Palette möglicher Komponenten zum Einsatz als Versatz in die neuen Abdeckmaterialien ermittelt und bewertet. Ausgewählt wurden die in der Tabelle aufgeführten Stoffe. Mit diesen wurden dann im Labor die neuen BUBBLES hergestellt und deren Eigenschaften bestimmt.

Versuchsreihe OMEGA-BUBBLES Wasserglas / Kieselsol

Omega Mienerals
Production & Technology

Testreihe	Standard	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Wasserglas 40%ig 1:3 vorgemischt	14,5									14,5
Köstropur 1540 1:3 vorgemischt		14,5								
Köstropur 4550 1:3 vorgemischt			14,5							
Bindzil 40-170 1:3 vorgemischt				14,5						
Nyacol LiSol 6, Lff					14,5					
Nyacol LiSil, 1:1 vorgemischt						14,5				
Betol KS307							14,5			
Betolin K35								14,5		
Betolin K42									14,5	
Glasmehl	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Weißkalkhydrat	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
										6
Kreide	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Wasser	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Kaolin	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	82,2
Blähtemperatur 800, 850, 800°C										
Blähverhalten	0	++	0	--	-	+++	--	-	-	0
Schüttgewicht Fraktion 250-600										
Temperaturbeständigkeit 15 min										
Schüttgewicht gesamt	640	470	740	590	650	440	880	590	680	550
Schüttgewicht XL	320	340	370	-	-	310	-	330	420	300
Schüttgewicht L	500	390	500	510	490	340	720	380	490	490
Schüttgewicht M	680	530	560	520	490	380	580	480	650	510
Schüttgewicht S	n. messbar	820	750	610	620	470	760	670	n. messbar	680
Schüttgewicht <100µm	>850	>850	700	730	700	630	680	740	>850	640
Menge XL	181,43	163,92	41,41	26,72	17,08	46,13	31,06	98,31	212,84	50,41
Menge L	164,33	135,48	87,26	68,74	84,32	79,91	84,44	112,5	148,53	87,55
Menge M	86,6	160,21	73,39	48,11	83,35	65,76	63,01	76,86	75,85	61,24
Menge S	33,2	153,35	132	112,6	231,2	248,1	306,9	212,5	46,56	198,76
Menge <100µm	93,7	59,63	210,7	161,6	144,6	136,8	110,4	140,2	124,72	215,94
Menge gesamt	559,26	672,59	544,8	417,8	560,6	576,8	595,8	640,3	608,5	613,9
Bemerkung	-	glänzend, sehr fein	-	Glasmehl?	-	viele kleine Kugeln	sehr fein	-		viele kleine Kugeln
gefühlte Härte	-	wesentlich besser	etwa gleich gut	etwa gleich gut	etwa gleich gut	sehr viel härter	extrem hart	etwas besser	wesentlich besser	extrem hart

Tabelle 2: Versätze zur Änderung der Granulatzusammensetzung

Der erste Arbeitsschritt betraf eine mögliche Änderung der Granulatzusammensetzung beginnend mit dem Austausch des Alkalisilicates bei der BUBBLEHerstellung. Für die Granulierung des Rohmaterials ist ein Bindemittel notwendig. In der Regel kommt ein Alkalisilicat (Wasserglas) zur Anwendung, welches gleichzeitig als Flussmittel wirken soll. Diese Flussmittelwirkung hat jedoch auch ebenso eine Verringerung der Reaktionstemperatur zur Folge. Bei Austausch des Alkalisilicates gegen Kieselsol wird die Flussmittelwirkung aufgehoben. Die Reaktionstemperatur steigt um ca. 50 K. Gleichzeitig steigt aber auch die Schüttdichte (entsprechend der Rohdichte) des Granulates, so dass die Isolationswirkung abnimmt.

Die Schüttdichten lagen für alle Versuche erwartungsgemäß über 300 kg/m^3 , die Vergleichswerte im Sinne der Aufgabenstellung sollen zwischen $230 - 250 \text{ kgm}^3$ liegen. Eine Änderung des Basisrezeptur der BUBBLES für die Spezifikation als Abdeckmittel ist unter Beachtung der Anwendungstemperatur und Wärmeleitfähigkeit $< 0,1 \text{ W/(mK)}$ so nicht sinnvoll.

Alternativ dazu könnte ein Austausch des Blähmittels die angestrebte Verbesserung bringen. Die Schäumwirkung des Granulates entsteht durch eine eingetragene Gasfracht als Rohstoffkomponente, welche sich nach pyroplastischer Erweichung der Glasphase thermisch zersetzt und CO bzw. CO_2 oder O_2 abspaltet. Zur Anwendung kommen anorganische oder organische Blähmittel. Omega BUBBLES beinhalten als Standardrezeptur das Blähmittel CaCO_3 .

Die anorganischen Blähmittel bilden höhere Korndruckfestigkeiten bei höherer Reaktionstemperatur (Anwendungsgrenze) aus. Organische Blähmittel liefern geringere Schüttdichten bei geringerer Festigkeit und niedrigerer Reaktionstemperatur (Anwendungsgrenze).

Es wurden entsprechende Versuche mit verschiedenen Blähmittel-Komponenten durchgeführt:

Siliziumcarbid	SiC	$d_{90} < 20 \mu\text{m}$
Kalkstein (Marmor)	CaCO_3	$d_{90} < 20 \mu\text{m}$
Glyzerin	C	flüssig
Manganoxid (Braunstein)	MnO_2	$d_{90} < 20 \mu\text{m}$

Tabelle 3: Blähmittel-Komponenten

Nach dem Vergleich kann die wirtschaftliche, technische Variante in der Standard-Rezeptur mit dem Blähmittel Kalkstein bestätigt werden. Alternativ kann auch SiC unter gleichen Bedingungen der Verarbeitung und Reaktion verwendet werden, verursacht aber den 3-4-fachen Einsatzpreis, ohne nennenswerte technische Vorteile.



Bild 1: BUBBLES hergestellt mit unterschiedlichen Blähmitteln

Blähmittel in Rezeptur	SiC	CaCO₃	Glyzerin (C)	MnO₂
Korngruppe / mm	4 – 6	4 – 6	4 – 6	4 – 6
Rezeptur-Anteil / %	3	3	1,5	3
Schüttdichte / kg/m³	225	220	160	210
Anwendungsgrenze / (°C)	805	800	770	790
Festigkeit / Finger-test	fest	fest	gering	fest
Richtpreis Einkauf / €/t	900	200	300	1.200

Tabelle 4: Vergleich der BUBBLES-Eigenschaften für verschiedene Blähmittelvarianten

Der Austausch von Reaktionskomponenten konnte keine wesentlichen Vorteile für die Schüttdichte und Temperaturbeständigkeit gegenüber dem bereits vorher optimierten Standardversatz der Omega BUBBLES liefern. Deshalb gab es die Entscheidung, alle weiteren Entwicklungsarbeiten auf der Basis der bewährten modifizierten Standardrezeptur durchzuführen und sich bezüglich der angestrebten Verbesserungen nun auf die Coatingschicht zu konzentrieren.

Die unbehandelten Standard-BUBBLES besitzen eine Temperaturbeständigkeit von ca. 800 °C. Höhere Kontakttemperaturen führen zur Erweichung und Kollabieren der Schaumstruktur. Die thermische Dämmwirkung nimmt über die Kontaktzeit stetig ab. Im Vorgängerprojekt bestand die Coating-Schicht aus Al₂O₃ (reine Tonerde) mit dem Bindemittel Na-Silicat-Lösung. Der Anteil der Alkalien im Bindemittel hat den Coating-Effekt der Tonerde zum Teil kompensiert, so dass die Temperaturbeständigkeit nicht

über 800 °C anzuheben war. Die BUBBLES sind zu einer krustenartigen Kontaktschicht verschmolzen und bildeten eine schwimmende „Schmelzhaut“

Durch Austausch des alkalischen Bindemittels gegen ein rein silicatisches Bindemittel in Form von Kieselsol kann die Flussmittelwirkung an der Oberfläche der BUBBLES aufgehoben werden. Die aufpanierte Tonerde geht nach einer Trocknungsphase mit dem Kieselsol ab 650 °C eine silicatische Verbindung mit der Glasoberfläche der BUBBLES ein. Ein Ablösen oder Abplatzen der Coating-Schicht ist nicht zu erwarten.

Das Auflegen des gecoateten BUBBLES auf die Alu-Schmelze erfolgte bei 850 °C Kontakttemperatur und bestätigte eine Temperaturbeständigkeit bis 850 °C. Die waren auch noch nach 0,5 h bei 900 °C nicht verschmolzen und rollten von der Metalloberfläche ab.



Bild 2: Tiegelproben bei 900 °C



Bild 3: Ofenraumtemperatur bei 900 °C

Die Veränderung der chemisch-mineralischen Zusammensetzung der Standard-BUBBLES von OMPT brachte für die Erhöhung der Temperaturbeständigkeit über 800 °C kein brauchbares Ergebnis. Die Schüttdichten (in Verbindung mit der Wärmeleitfähigkeit) werden erhöht, dadurch wird das Dämmverhalten verschlechtert. Die Änderung der Blähmittel-Varianten hat das Kalksteinmehl für die optimale Anwendung als Abdeckmittel bestätigt. Alternative mineralische oder organische Blähmittel senken die Temperaturbeständigkeit oder erhöhen die Rezepturkosten.

Das Granulat geht keine Reaktion mit der Alu-Schmelze ein, die Granulatschicht enthält Luftsauerstoff, welcher mit der Alu-Schmelzbad-Oberfläche reagiert.

3.1.2 kleintechnische Herstellung der Muster für die Entwicklungsgießerei

Für die oben ausgewählten Proben sind die Voraussetzungen für die kleintechnische Musterherstellung zu schaffen (Beschaffung und Aufbereitung der Rohstoffe, Mischung der Komponenten, Herstellung der Granulate). Die Muster sind zu

beproben und zu charakterisieren. Die kleintechnischen Ausrüstungen wurden konfiguriert und manuell im Chargen-Zustand betrieben. Nach Auswahl verschiedenartiger Rohstoffkomponenten als Fluss-, Bläh- und Bindemittel wurden die Rezepturvarianten erstellt, welche als Basis für die weiteren Laborversuche dienten. Auf der Grundlage der Ergebnisse im Labor wurde anschließend ein Versuchsprogramm zur Herstellung von gecoatetem Blähglas-Granulat (ohne Alkalizusatz an der Granulat-Oberfläche) erstellt. Dafür wurde folgender technologischer Ablauf festgelegt:

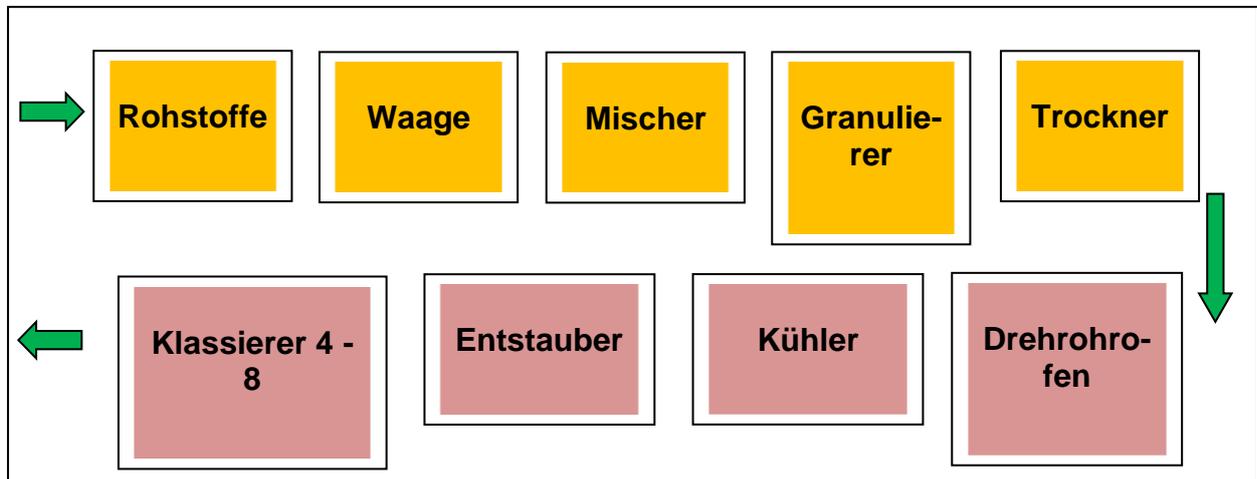


Bild 4: Technologieschritte zur kleintechnischen Musterproduktion der Omega BUBBLES



Bild 5: Granulatproduktion im kleintechnischen Drehrohrofen

Umfangreiche Versuche gab es zum Einfluss des Trennmittels auf die neue Fahrweise des Drehrohrofens. Dabei ist es unvermeidlich, dass bestimmte Anteile davon während des Blähprozesses an der Oberfläche des Blähglases gebunden werden. Deshalb waren Versuche notwendig, weil eine Änderung des Blähmittels auch ein darauf angepasstes, anderes Temperaturprofil beim Ofendurchlauf erfordert. Das/die Trennmittel haben die Aufgabe ein Zusammenbacken der BUBBLES beim Ofendurchlauf zu verhindern. Deshalb gab es Versuche, um das Trennmittel herauszufinden, das im jetzt veränderten Temperaturprofil optimale Ergebnisse zulässt.

Die abgekühlten Chargen wurden jeweils entstaubt, aus dem Blähglasprodukt repräsentative Proben entnommen und unter dem Mikroskop betrachtet, welcher Oberflächenanteil der BUBBLES mit Trennmittel bedeckt ist. Die Zuordnung der Ergebnisse erfolgt in Klassen.

Trennmittel	Tonmehl	calciniertes Kaolin	Schamotte-mehl	Naturkaolin
Anhaftungsgrad				
5% gut		x		
50% mittelmäßig	x			x
70% schlecht			x	

Tabelle 5: Bewertung der Trennmittelwirkung

Über die besten technologischen Eigenschaften verfügt das calcinierte Kaolin. Weiterführende Versuche mit Trennmittelmischungen erbrachten keine signifikante Verbesserung.

Um eine optimale Anhaftung der Coatingschicht bei gleichzeitig geringerem Verbrauch des Bindemittels gewährleisten zu können, war es notwendig, Entstaubungsversuche mit dem Ziel durchzuführen, den Anteil des anhaftenden Trennmittels zu minimieren. Dies gelang mittels einer Intensivierung der Entstaubung. Durch veränderte Maschinenparameter ließ sich der Anteil an Trennmittel von 8% bis auf 2% im Blähglasprodukt absenken. Damit war die Basis geschaffen, um das Coating durchführen zu können. Dies erfolgte in einem Trommelmischer mit Tonerde und Kieselöl als Bindemittel.

Auf 15 Liter Granulat wurde zunächst 0,5 Liter Kieselöl bei laufendem Mischbetrieb aufgetragen und anschließend 1 kg Tonerde aufpaniert. Die Klebwirkung des feuchten Bindemittels dünn auf die Granulatoberfläche aufgetragen bindet das Tonerdemehl als Panierung.



Bild 6: Trommelmischer mit Granulat



Bild 7: Eintrag des Bindemittels in den Mischer mit Schrägröhr

Nach Austrag aus dem Mischer wurde das erdfeuchte Granulat auf Folien zur Lufttrocknung ausgebreitet. Eine unmittelbare Wärmebehandlung bei 600 °C ist nicht möglich, weil das feuchte Granulat zerplatzt. Erst nach ca. 12 h Lufttrocknung konnte das gecoatete Granulat nochmals durch den Drehrohrofen bei 600 °C ohne Schädigung durchlaufen.



Bild 8: Sintern der Coatingschicht bei 600 °C

3.1.3 Ergebnisse der Versuche im Gießereitechnikum

Die Alu-Legierung 226 D wurde im Induktionstiegelofen bei 850 °C geschmolzen und in den Haltebetrieb überführt. Das gecoatete Blähglasgranulat wurde mit der Schichtdicke von ca. 6 cm manuell aufgelegt. Die Oberflächentemperatur des Abdeckgranulates betrug nach 4 h Haltezeit 236 °C (stationäre Temperaturdifferenz über die Abdeckschicht: 614 K). Das Abdeck-Granulat war nach 4 Stunden bei 850 °C Kontakttemperatur an der unteren Kontaktfläche zu einer ca. 6 mm dicken Schmelzhaut verschmolzen. Das darüber liegende Granulat blieb unverändert als lose Schüttung. Die Entnahme des Granulates und der Schmelzhaut erfolgte mechanisch mit Kratze und Kelle sowie die rückstandslose Reinigung der Metallbad-Oberfläche durch Abkratzen.

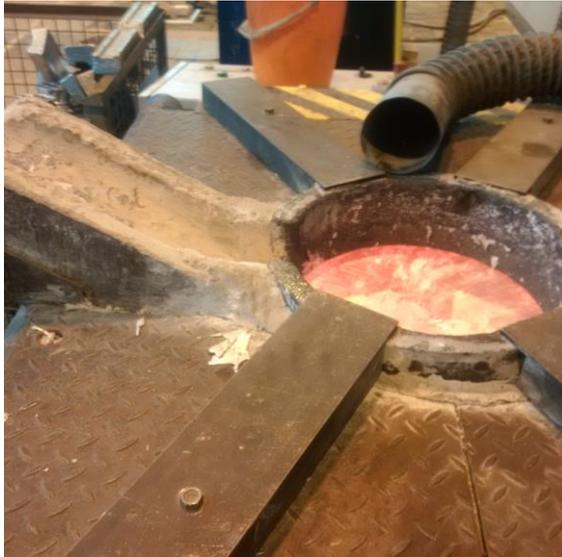


Bild 9: Alu-Schmelze bei 850 °C



Bild 10: Alu-Schmelze mit Abdeckung



Bild 11: Temperaturfühler bei 850 °C

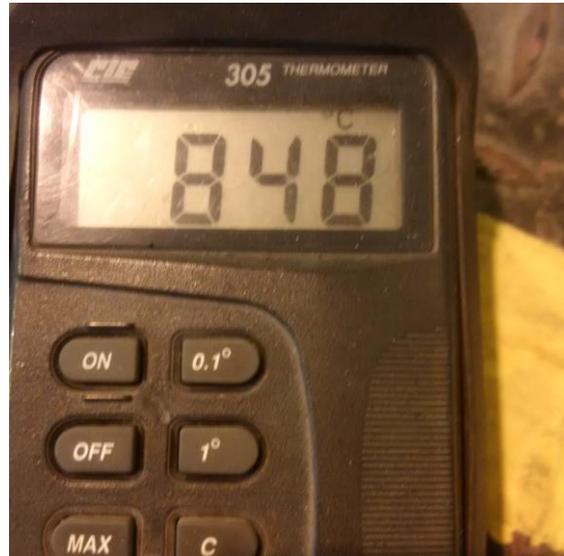


Bild 12: Temperatur Alu-Schmelze



Bild 13: gecoatete BUBBLES auf dem Metallbad



Bild 14: Abkrätzen Metallbad-Oberfläche



Bild 15: Bruchfläche der kalten Schmelzhaut



Bild 16: abgekrätztes Metallbad

Durch Ausbildung einer gewünschten Schmelzhaut auf der Metallbad-Oberfläche wird das Entfernen des Abdeck-Granulates wesentlich erleichtert. Die manuelle Aufnahme mit Kratze und Schaufel ist möglich, die Absaugung mit Industrie-Saugtechnik kann ebenso eingesetzt werden. Die Schmelzhaut verhindert das versehentliche Eintauchen des Saugrohres in die Schmelze. Die Schmelzhaut (pyroplastischer Zustand) wird nach Entfernen der Granulatschicht mit Haken und Kratze aufgenommen und verbleibende Rückstände beim nachträglichen, üblichen „Abkrätzen“ entfernt.

Die Versuche am Tiegel-Schmelzofen erfolgten mit einer provisorischen Absaugung der Rauchgase über der Schmelze, sowie auch mit einer passenden Absaughaube über dem Schmelzbad.



Bild 17: stationäre Absaughaube über dem Tiegelofen zur Absaugung der Rauchgase

Die Temperaturbeständigkeit der *coatierten BUBBLES* für die Aluminium-Kontakttemperatur bei 850 °C bestätigte sich nicht. Es bildete sich eine dünne Schmelzhaut auf der Badoberfläche aus. Damit ist der verschmolzene Anteil der BUBBLES zwar nicht mehr wiederein-setzbar, jedoch bietet die Schmelzhaut erhebliche Vorteile gegenüber dem vorhergehenden Zustand. Jetzt ist die Wasserstoffaufnahme reduziert und das Handling zum Entfernen der BUBBLES und der Schmelzhaut von der Schmelze wesentlich leichter. Die dauerhafte thermische Dämmwirkung hat sich im Technikum-Versuch für eine technologische Anwendung im industriellen Maßstab bestätigt. Die Ergebnisse zeigen auch eine verbesserte Entgasung der Alu-Schmelze durch die Abdeckung mit *coatierten BUBBLES*. Während des Versuches wurde außerdem der gelöste H₂-Anteil in der Schmelze messtechnisch über den sogenannten Dichte-Index als Maßstab der Entgasung verfolgt.

Technologie-Schritt	Zeitraum der Abdeckung (Std.)	Zustand Metallbad	Dichte-Index
vor der Abdeckung	0	Ausgangszustand	18,9
nach der Abdeckung	1	Abdeckung	17,6
nach der Abdeckung	2	Abdeckung	14,1
nach der Abdeckung	3	Abdeckung	3,4
nach der Abdeckung	4	Endzustand	3,3

Tabelle 6: Verlauf der H₂-Entgasung der Schmelze mit gecoatetem Abdeck-Granulat nach Messung des Dichte-Index bei 850 °C



Bild 18: Alu-Proben (links in Luft, rechts in Vakuum)

Die vollständige Abdeckung der Alu-Schmelze bei 850 °C mit einem gecoateten Schaumgranulat bietet energetische und qualitative Vorteile für den Schmelzbetriebes gegenüber einer freien Badoberfläche.

Aus der Gießereipraxis ist bekannt, dass die Schmelztemperatur über 750 °C für die Alu-Schmelze eine progressive H₂-Aufnahme bewirkt. Insofern ist immer mit einem erhöhten H₂-Anteil zu rechnen und der Aufwand zum sogenannten Impellern (nachträgliche Reinigung der Schmelze) ist entsprechend höher. Vordringliche Aufgabe ist es aber die Wasserstoffaufnahme als Folge des Schmelzprozesses zu begrenzen. Ungeachtet der Ofentechnik (elektrisch oder mit Gas beheizt) nimmt die Schmelze auch im Kontakt mit der Umgebungs-luft aus dieser Feuchtigkeit auf, die zur Freisetzung von Wasserstoff führt. Auch kann Wasserstoff in Form von Aluminiumhydroxid im Schmelzgut enthalten sein. Bei Altaluminium und länger gelagertem Blockmetall bildet sich an den Oberflächen stets eine Hydroxid-schicht [SCH 1967].

Für den normalen Alu-Guss wären 750 – 780 °C ausreichend. Höhere Temperaturen über 780 °C sind einer betriebsbedingten Technologie zuzuordnen, die ohne Abdeckmittel arbeitet.

3.1.4 Testergebnisse aus der Entwicklungsgießerei

Die Versuchsabläufe zur Untersuchung der coated OMEGA-BUBBLES mit höherer Temperaturbeständigkeit wurden so realisiert:

Ofen: SLEM 500 der Firma Hindenlang, Gewicht der Schmelze: 400 kg

0. Schüttdichte des beschichteten Blähglasgranulats bestimmen.

Durchgeführte Versuche (jeweils Abkühlung von 780 °C auf 600 °C)

1. Analyse 1 der Schmelze, offener Ofendeckel

2. Analyse 2 der Schmelze, geschlossener Ofendeckel

3. mit 2,5 kg beschichtetem Blähglasgranulat, entsprechend 2 cm Schichtdicke

4. mit 5,0 kg beschichtetem Blähglasgranulat, entsprechend 4 cm Schichtdicke

5. mit 7,5 kg beschichtetem Blähglasgranulat, entsprechend 6 cm Schichtdicke

6. dann Aufheizen auf 850 °C, Temperatur halten und Abkühlen auf 600 °C

Die Abkühlkurven wurden erfasst und zeigen den auf Bild 19 gezeichneten Verlauf.

Die Zeiten bis zum Erreichen von 750 °C, 700 °C, 650 °C und 600 °C wurden ermittelt.

Die mögliche Energieeinsparung pro Tag wurde ermittelt.

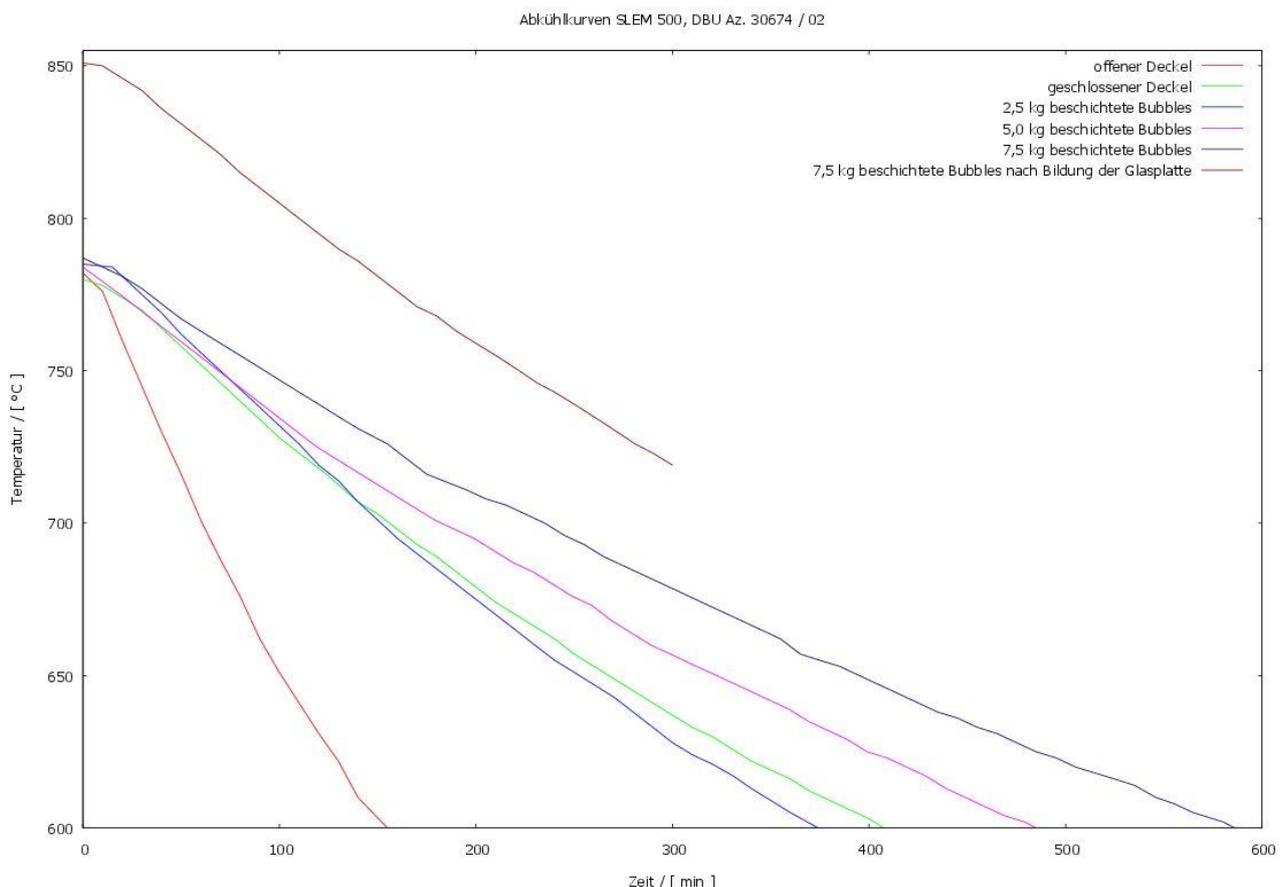


Bild 19 : Abkühlkurven

Bezüglich der nachfolgenden Tabellen 7 bis 11 gilt:

Die 1. Zeile betrifft das Abkühlen ohne Ofendeckel (Versuch 1).

Die 2. Zeile betrifft das Abkühlen mit Ofendeckel (Versuch 2).

Die 3. Zeile betrifft das Abkühlen mit 2 cm Blähglasgranulat ohne Ofendeckel (Versuch 3).

Die 4. Zeile betrifft das Abkühlen mit 4 cm Blähglasgranulat ohne Ofendeckel (Versuch 4).

Die 5. Zeile betrifft das Abkühlen mit 6 cm Blähglasgranulat ohne Ofendeckel (Versuch 5).

Die Versuchsreihe nach Ausbildung der Glasplatte wurde hier nicht berücksichtigt.

Es ergeben sich über den Wärmeinhalt der Schmelze aus den Abkühlkurven folgende mittleren Verlustleistungen pro Ofen in Kilowatt (kW), wobei für das Abkühlintervall die Wärmekapazität c_p als konstant angesetzt wurde:

Nr.	$P_{750\text{ °C} \rightarrow 700\text{ °C}}$	$P_{750\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$P_{750\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$P_{700\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$P_{700\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$P_{650\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$
1.	-10,6 kW	-9,7 kW	-8,5 kW	-9,0 kW	-7,7 kW	-6,7 kW
2.	-3,9 kW	-3,5 kW	-3,2 kW	-3,2 kW	-2,9 kW	-2,6 kW
3.	-4,4 kW	-4,0 kW	-3,6 kW	-3,6 kW	-3,3 kW	-3,0 kW
4.	-3,2 kW	-2,9 kW	-2,6 kW	-2,6 kW	-2,4 kW	-2,2 kW
5.	-2,5 kW	-2,4 kW	-2,2 kW	-2,3 kW	-2,1 kW	-1,9 kW

Tabelle7: Verlustleistungen in Kilowatt

Die Verlustleistungen berechnen sich über die Stromaufnahme, die zur Konstanthaltung der Schmelzetemperaturen notwendig waren.

Bezüglich der Tabellen 7 bis 11 sind die folgenden Schlüsse sind möglich:

- Das (Zeilen-)Verhältnis aus Tabelle 1 der Verlustleistungen zueinander ist für jedes betrachtete Temperaturintervall etwa gleich, nämlich 1 : 2 : 3 : 4 : 5. Zeile \approx 100 % : 37 % : 42 % : 30 % : 26 %.
- Dies bedeutet, dass der Hauptwärmeverlust in allen Fällen über die Badspiegeloberfläche und ihre Abdeckung geschieht.
- Der Ofendeckel isoliert etwas besser als 2 cm beschichtetes Blähglasgranulat.
- Nach dem Erhitzen von 6 cm Blähglasgranulat auf 850 °C und anschließendem Abkühlen wurde die Ausbildung einer Glasplatte aus Blähglasgranulat festgestellt, die die Isolationswirkung der Schicht leicht reduzierte (Kugeln isolieren optimal).

Die täglichen Verlustleistungen des Ofens sind in Kilowattstunden pro Tag (kWh/d):

Nr.	$P_{750\text{ °C} \rightarrow 700\text{ °C}}$	$P_{750\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$P_{750\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$P_{700\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$P_{700\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$P_{650\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$
1.	-254 kWh/d	-233 kWh/d	-203 kWh/d	-216 kWh/d	-184 kWh/d	-161 kWh/d
2.	-94 kWh/d	-85 kWh/d	-76 kWh/d	-78 kWh/d	-69 kWh/d	-62 kWh/d
3.	-106 kWh/d	-95 kWh/d	-86 kWh/d	-86 kWh/d	-78 kWh/d	-71 kWh/d
4.	-77 kWh/d	-69 kWh/d	-63 kWh/d	-62 kWh/d	-57 kWh/d	-53 kWh/d
5.	-61 kWh/d	-57 kWh/d	-53 kWh/d	-54 kWh/d	-49 kWh/d	-45 kWh/d

Tabelle 8: Verlustleistungen in Kilowattstunden pro Tag

Bei einem Preis von 0,20 €/kWh ergeben sich daraus Heizkosten pro Tag (€/d):

Nr.	$K_{750\text{ °C} \rightarrow 700\text{ °C}}$	$K_{750\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$K_{750\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$K_{700\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$K_{700\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$K_{650\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$
1.	-50,89 €/d	-46,70 €/d	-40,57 €/d	-43,14 €/d	-36,84 €/d	-32,14 €/d
2.	-18,73 €/d	-17,00 €/d	-15,13 €/d	-15,57 €/d	-13,80 €/d	-12,40 €/d
3.	-21,25 €/d	-19,02 €/d	-17,13 €/d	-17,21 €/d	-15,61 €/d	-14,28 €/d
4.	-15,31 €/d	-13,70 €/d	-12,52 €/d	-12,40 €/d	-11,47 €/d	-10,67 €/d
5.	-12,18 €/d	-11,47 €/d	-10,55 €/d	-10,85 €/d	-9,89 €/d	-9,09 €/d

Tabelle 9: Heizkosten pro Tag

Daraus ergeben sich Kostenersparnisse pro Tag (€/d) von bis zu:

Nr.	$\Delta K_{750\text{ °C} \rightarrow 700\text{ °C}}$	$\Delta K_{750\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$\Delta K_{750\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$\Delta K_{700\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$\Delta K_{700\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$\Delta K_{650\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$
1.	0,00 €/d					
2.	32,16 €/d	29,70 €/d	25,44 €/d	27,57 €/d	23,04 €/d	19,74 €/d
3.	29,64 €/d	27,68 €/d	23,44 €/d	25,93 €/d	21,22 €/d	17,86 €/d
4.	35,58 €/d	33,00 €/d	28,06 €/d	30,74 €/d	25,37 €/d	21,47 €/d
5.	38,71 €/d	35,22 €/d	30,02 €/d	32,29 €/d	26,95 €/d	23,05 €/d

Tabelle 10: Einsparpotential pro Tag

Einsparungen an Energiekosten durch Abdecken mit Granulaten gegenüber dem mit dem Deckel geschlossenen Ofen sind am Tag 6,55 €, im Jahr bei 320 d Betrieb 2096 €.

Der Ofen SLEM 500 hat eine Badspiegeloberfläche von 0,38 m² (Ø 70 cm).
Damit folgt das Einsparpotenzial pro Quadratmeter Badspiegeloberfläche und Tag (€/m²·d):

Nr.	$\Delta K_{750\text{ °C} \rightarrow 700\text{ °C}}$	$\Delta K_{750\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$\Delta K_{750\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$\Delta K_{700\text{ °C} \rightarrow 650\text{ °C}}$	$\Delta K_{700\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$	$\Delta K_{650\text{ °C} \rightarrow 600\text{ °C}}$
1.	0 €/d·m ²					
2.	84 €/d·m ²	77 €/d·m ²	66 €/d·m ²	72 €/d·m ²	60 €/d·m ²	51 €/d·m ²
3.	77 €/d·m ²	72 €/d·m ²	61 €/d·m ²	67 €/d·m ²	55 €/d·m ²	46 €/d·m ²
4.	92 €/d·m ²	86 €/d·m ²	73 €/d·m ²	80 €/d·m ²	66 €/d·m ²	56 €/d·m ²
5.	101 €/d·m ²	92 €/d·m ²	78 €/d·m ²	84 €/d·m ²	70 €/d·m ²	60 €/d·m ²

Tabelle 11: Einsparpotential je Quadratmeter und Tag

Nach dem Aufheizen der Schmelze mit 6 cm Blähglasgranulat auf 850 °C ergab sich beim Abkühlen eine leichte Verschlechterung der Isolierung und beim Abkrammen der Befund des Ausbildens einer Glasplatte (Bild 20).

Die Glasplatte besitzt eine Dicke von 5 mm bis 8 mm und ist auf der Unterseite blank (Abbildung 3 rechts), was bedeutet, dass keinerlei Reaktionen mit der Schmelze gemessen wurden.

Die Glasplatte schwimmt auf der Schmelze und kann mit einem Stahlprofil samt Schlegel zertrümmert und danach mit dem Krätzelöffel abgehoben werden.

Dieser Anteil der Granulate ist nicht wiederverwendbar.



Bild 20: Als Glasplatte ausgebildete Schicht nach Abräumen der Granulate

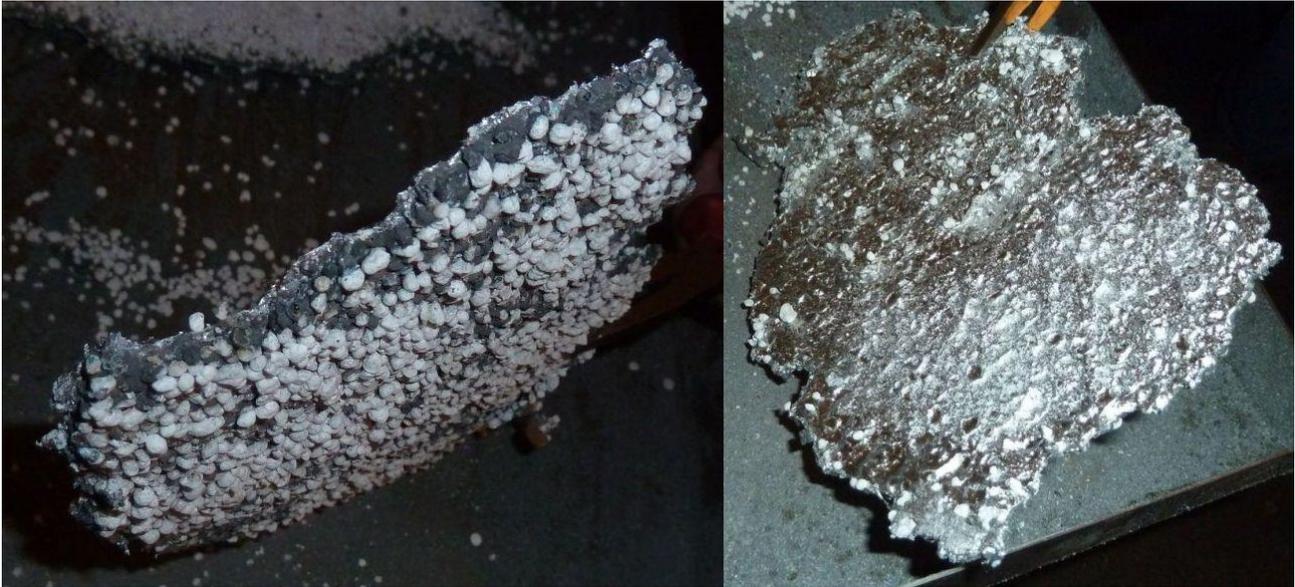


Bild 21: Glasplatte von oben (links) und unten (rechts)

3.2 Einbau funktionaler Schichten in die Oberflächen der Blähglasgranulate

3.2.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Ebenso wichtig, wie die Begrenzung einer Gasaufnahme (vorwiegend Wasserstoff) ist es, die beim Schmelzvorgang nicht zu vermeidende Oxidbildung als Folge partieller Überhitzung an Badoberflächen oder Ofenwandungen zu begrenzen. Oxidation von Legierungselementen bedeutet immer einen Verlust, sei es an Basisbestandteilen, oder wichtigen Legierungselementen, der sich qualitativ bemerkbar macht, sofern er nicht korrigiert wird. Sofern Oxide bereits mit dem Einsatzgut in die Schmelze gebracht werden, können oxidationsbegrenzende Maßnahmen keine Hilfe mehr sein, es geht nun um die Entfernung, zumindest Reduzierung der unerwünschten Oxide [SCH 1967].

- gecoatete Bubbles mit funktionaler Schicht

Als reduzierende Funktionsschicht wurde gesättigte Zuckerlösung aufgetragen. Dazu wurde die max. mögliche Wasseraufnahme bestimmt.

Granulat-Probe	Wasseraufnahme Ma-%	Aufnahme Zuckerlösung Ma-%
Bubbles gecoatet	ca. 15	ca. 20

Tabelle 12: Aufnahme von Wasser und Zuckerlösung an der Granulatoberfläche

Die Lösung hatte einen Zuckeranteil, der sich bis zur Ausfällung in Wasser einstellen ließ (gelöst: 203,9 g Zucker /100 ml Wasser; Dichte 1,316 g/cm³) Die Reaktionskom-

ponenten werden als Lösung oder Suspension oder Emulsion oder Schlicker aufgetragen und bilden entsprechend der Konzentration bzw. Schichtdicke ein Potential für die gewünschte Reaktion über der Oberfläche der Alu-Schmelze. Die Trocknung des behandelten Granulates erfolgte im Trockenschrank bei 120 °C über 2 Stunden.

Das Granulat wurde entsprechend vorheriger Labor-Versuchsbedingungen auf eine Alu-Schmelze im Tiegel bei 850 °C aufgelegt.



Bild 22: Gecoatetes Granulat bei 850 °C auf der Alu-Schmelze



Bild 23: Entfernen des gecoateten Granulates von der Alu-Schmelze

Das Granulat geht keine Reaktion mit der Alu-Schmelze ein, die Granulatschicht enthält Luftsauerstoff, welcher mit der Alu-Schmelzbad-Oberfläche reagiert.

➤ **Grünkorn mit funktionaler Schicht**

Als reduzierende Funktionsschicht kam wiederum eine gesättigte Zuckerlösung zum Einsatz. Dazu wurde die max. mögliche Wasseraufnahme bestimmt.

Granulat-Probe	Wasseraufnahme Ma-%	Aufnahme Zuckerlösung Ma-%
Grünkorn	ca. 20	ca. 25

Tabelle 13: Aufnahme von Wasser und Zuckerlösung an der Granulatoberfläche

Die Herstellung und Auftrag der Zuckerlösung fand wie bereits beschrieben statt. Das Granulat wurde entsprechend vorheriger Labor-Versuchsbedingungen auf eine Alu-Schmelze im Tiegel bei 850 °C aufgelegt.



Bild 24: Grünkorn-Granulat mit Zucker bei 850 °C auf der Alu-Schmelze



Bild 25: Entfernen der Schaumschicht von der Alu-Schmelze

Das aufgelegte Granulat beginnt sofort zu schwelen und verhindert den Zugang von Luftsauerstoff auf die Alu-Schmelze. Die Schwarzfärbung entsteht durch Verkohlung des Zuckeranteiles. Durch die Reduktionswirkung wird das Schäumen des Grünkornes beeinträchtigt. Die Dicke und Struktur der Schaumschicht im Vergleich mit dem unbehandelten Grünkorn ist geringer ausgebildet. Die Schwelreaktion betrug ca. 15 min entsprechend der aufgelegten Granulatmenge.

Der Anteil der Zuckerbeschichtung ist nach dem Bedarf der Reduktionsbedingungen und der gewünschten Reaktionszeit variierbar von 1 – 34 Ma-%.

3.2.2 kleintechnische Musterherstellung

Die kleintechnische Umsetzung umfasst die Stufen bis zum Trockner und den Einbau der Funktionsschicht. Dafür erfolgte in Abänderung der Laborarbeiten ein Austausch der Zuckerlösung gegen ein C-Haltiges Blähmittel. Die dazu durchgeführten Untersuchungen bestätigten die Möglichkeit auch ein Grünkorn mit funktionalen Eigenschaften über das Blähmittel erreichen zu können.

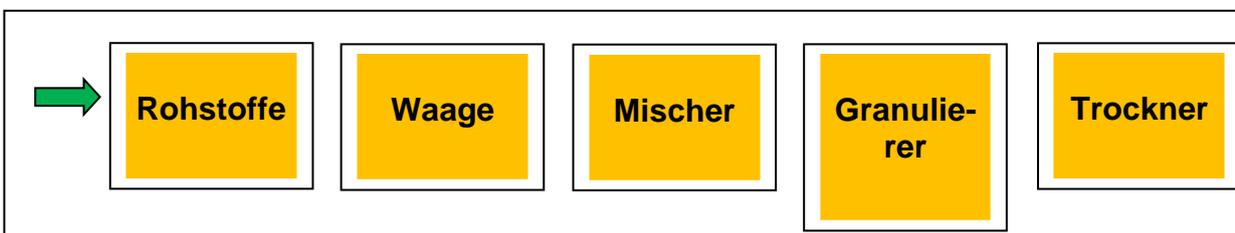


Bild 26: technologische Kette zur Herstellung des Grünkorns

3.2.3. Versuche im Gießereitechnikum

Der Schmelztiegel-Versuch im Technikum erfolgte nach gleichem Ablauf wie in Punkt 3.1.3 beschrieben. Beim Auflegen des Abdeck-Granulates auf die Schmelze entstand eine mäßige Rauchentwicklung durch Verschwelen der Zuckerbeschichtung auf der Granulat-Oberfläche. Die installierte Absaug-Vorrichtung konnte problemlos die Rauchschwaden ableiten. Das Granulat verfärbte sich durch Verkohlung der Oberfläche „braun-schwarz“. An der Unterseite entstand wieder eine Schmelzhaut, welche die Metallbad-Oberfläche vollständig versiegelte. Bis zur Ausbildung der geschlossenen Schmelzhaut (ca. 10 min.), wurde durch die reduzierende Granulat-Reaktion der Zugang von Luft (aus dem Haufwerk der Schüttung) vollständig ausgeschlossen. Die Entfernung des Granulates erfolgte nach gleichem Ablauf wie bereits beschrieben.



Bild 27: Zuckerbeschichtetes Granulat



Bild 28: Verkohlung des Granulat



Bild 29: Ausbrennen des Zuckers auf der Oberfläche nach 4 h



Bild 30: Entfernen des Granulates mit Granulat einer Kelle

Während des Versuches wurde ebenfalls wieder der gelöste H₂ –Anteil in der Schmelze messtechnisch über den sogenannten Dichte-Index als Maßstab der Entgasung verfolgt.

Technologie-Schritt	Zeitraum der Abdeckung (Std.)	Zustand Metallbad	Dichte-Index
vor der Abdeckung	0	Ausgangszustand	16,1
nach der Abdeckung	1	Abdeckung	15,6
nach der Abdeckung	2	Abdeckung	13,2
nach der Abdeckung	3	Abdeckung	7,4
nach der Abdeckung	4	Endzustand	6,3

Tabelle 14: Verlauf der H₂-Entgasung der Schmelze mit reduzierendem Funktionsträger auf dem Granulat nach Messung des Dichte-Index bei 850 °C

Ebenfalls tritt eine Abnahme des Dichte-Index für die Alu-Schmelze bei 850 °C ein.

Die Zersetzung der Zuckerbeschichtung bei Temperaturen über 600 °C erzeugt jedoch offensichtlich nicht nur reduzierend wirkende Kohlenoxid-Gase, sondern auch freien Wasserstoff aus der Vergasung. Dieser Wasserstoff- Anteil wird ebenso von der Alu-Schmelze absorbiert. Die Auswertung des Versuches zeigte, dass eine noch bessere reduzierende Funktionsreaktion bei niedrigerer Alu-Metallbad-Temperatur unter 800 °C erreichbar ist. Das hohe Potential der Wasserstoffaufnahme bei Schmelz-Temperaturen über 800 °C vermindert die Wirkung des Funktionsträgers.

Die wärmedämmende Wirkung des Abdeckgranulates mit 6 cm Schichtdicke ist vergleichbar. Die Oberflächentemperatur betrug 245 °C bei 850 °C Kontakttemperatur (Temperaturgradient 605 K).

Reduzierende Funktionsträger auf dem Abdeckgranulat können den Wasserstoff-Anteil in der Alu-Schmelze verringern. Es sollten aber reine Kohlenstoffverbindungen ohne Kohlenwasserstoff-Verbindungen zum Einsatz kommen, um eine Freisetzung von absorptionsfähigem H₂ zu vermeiden. Dafür geeignet wären Kohlestaub oder Holzstaub als Paniermehl.

➤ Einbau funktionaler Schichten ins Grünkorn

Für die Versuchsdurchführung wurde aus planungstechnischen Gründen ein Widerstand-Tiegelofen (Schmelz-Kapazität 30 kg, 50 kW) verwendet. Die Versuchsschmelze erfolgte mit gleicher Alu-Legierung (226 D) bis 750 °C im Haltebetrieb.

Hierbei wurde ein Blähmittel ausgewählt, das gleichzeitig die Funktion des Reduktionsmittels übernimmt und somit kein Auftrag einer Zuckerlösung mehr notwendig ist.



Bild 31: Widerstand-Tiegelofen bei 750 °C



Bild 32: Temperaturregler / Sollwert 750

Kurz vor dem Abdecken wurde eine Metall-Probe für die Bestimmung des Dichte-Index aus der Schmelze entnommen. Nach dem Auflegen des hellen Abdeck-Granulates auf das Metallbad verfärbte sich das Granulat zu dunkelgrauer bis schwarzer Farbe mit geringer Rauchentwicklung. Nach etwa 10 min schäumte das Granulat zu einer massiven Platte mit einer Dicke von ca. 5 cm auf. Die Kornstruktur an der Oberfläche ist noch erkennbar (Bild 25 – 28). Die Schaumplatte blieb über die gesamte Abdeckzeit unverändert. Nach 4 Stunden Haltebetrieb wurde die feste Schaumplatte mit einem Spieß problemlos ausgetragen. Die Unterseite war mit einer Alu-Schmelzhaut beschichtet. Nach dem Austrag erfolgte die erneute Probenahme für die Bestimmung des Dichte-Index.



Bild 33: Grünkorn-Granulat vor dem Schäumen auf dem Metallbad



Bild 34: Abdeckung der Alu-Schmelze bei 750 °C Kontakttemperatur



Bild 35: Austrag der Schaumplatte nach 4 Std. Abdeckzeit (verkohlt)



Bild 36: Schaumplatte nach dem Austrag (obere Ansicht und Randbereich)



Bild 37: Ansicht der Schaumplatte (Unterseite mit Aluhaut)



Bild 38: Bruchfläche der Schaumplatte

Technologie-Schritt	Zeitraum der Abdeckung (Std.)	Zustand Metallbad	Dichte-Index
vor der Abdeckung	0	Ausgangszustand	10,8
nach der Abdeckung	2	Abdeckung	7,6
nach der Abdeckung	4	Endzustand	6,0

Tabelle 15: Verlauf der H₂-Entgasung der Schmelze mit reduzierendem Funktionsträger im Grünkorn-Granulat nach Messung des Dichte-Index bei 750 °C

Die Aluminium-Schmelze bei 750 °C ohne die technologisch bedingte Überhitzung auf 850 °C enthält deutlich weniger gelösten Wasserstoff. Durch die vergleichbare Abdeckung mit einem reaktiven Schaum unter reduzierenden Bedingungen über der Alu-Schmelze ist zusätzlich eine deutliche Abnahme des H₂-Gehaltes in der Schmelze nachweisbar.

Die Schaumplatte kann problemlos ausgetragen werden. Ein Recycling der Schaumplatte ist nach Abtrennung der Alu-Haut an der Unterseite durch Rückführung an den Granulat-Lieferanten (OMPT) möglich.

3.2.4 kleintechnische Versuche in der Entwicklungsgießerei

➤ Einbau von Salzen

Der Einbau funktionaler Gruppen zur Reinigung und metallurgischen Behandlung von Aluminiumschmelzen kann unter folgenden Gesichtspunkten erfolgen:

1. Abbinden von Oxiden mittels Gemischen aus Natriumkarbonat, Natriumsilikofluorid und anderen Komponenten
2. Kornfeinung durch Zusatz von Titan und Bor, u.a. auch Titandiborid
3. Veredlung des eutektischen Gefüges mittels Na und Sr (rein in Kartuschen) oder durch Zugabe von Na- oder Sr-haltigen Salzen.

Das Aufbringen der funktionellen Gruppen auf die Grünkorngranulate erfolgte durch Abscheidung von Verbindungen an den Oberflächen der Granulate aus wässrigen Lösungen und anschließender Trocknung. Grünkorn kann bis zu 25 Ma-% an Flüssigkeit aufnehmen, die gecoateten Bubbles 10 – 15%. Wegen der großen Oberfläche der Granulate könnte eine kurze Reaktionszeit ausreichen, um den gleichen Effekt bei derzeitigen Behandlungsmethoden mit geringeren Temperaturverlusten erreichen zu können. Die so vorbehandelten Chargen wurden mittels Tauchglocke in die Schmelzen eingebracht.

Eine Beschichtung mit wasserlöslichen Gießereihilfsstoffen, etwa zur Wasserstoffreduktion, ist möglich, die Wirkung ist aber durch den vorübergehenden Kontakt mit

Wasser verändert. Die Beschichtung mit Salzen ergab, dass die funkenspektrometrische Analyse der Aluminiumproben nur atomares Natrium und keine Natriumionen nachweist. Kochsalz katalysiert die Oxidation vieler Stoffe, sogar bei Strontium war dadurch die Flammenfarbe gelborange. Das Verständnis der Kochsalzkatalyse bei der Oxidation mit gleichzeitiger Reinigung von Metalloberflächen kann so über die Bildung von atomarem Natrium besser verstanden werden, wobei auch aktivierte, gasförmige Salzsäure entsteht.

Dazu wurden Blähglasgranulate mit unterschiedlichen Salzen angesetzt und auf dem besagten Beistellherd getrocknet. Salzige Dämpfe gelten in der Medizin sogar als gesundheitsfördernd. Bei manchen für die Gießerei interessanten Salzen ist die Wasserlöslichkeit zu gering für eine Aufbringung auf die Oberfläche der Blähglasgranulate.

Von diesen Salzen wurde eine Fassung (Versuch 14) aus einer Mischung aus Natriumchlorid (NaCl) und Natriumkarbonat (Na_2CO_3) und eine Fassung (Versuch 21) aus reinem Natriumchlorid (NaCl) in die Schmelze mit einer Tauchglocke eingetaucht, wobei hier die Reaktion schon auf Grund der Ausdehnung des eingeschlossenen Gases vergleichsweise heftiges Blubbern der Schmelze bewirkt. Bei Versuch 14 wurde eine Salzmischung von 75 g, bei Versuch 21 eine Kochsalzzugabe von 300 g gewagt, die Heftigkeit der Reaktion (eventuell nur als Entweichen erhitzter Luft verstehbar) wurde im Verhältnis 1:2 eingestuft, weil Karbonat auch noch chemisch gebundenes Kohlendioxid (CO_2) in der Hitze abgeben kann.

Die vermutete metallurgische Reaktion zwischen Natriumchlorid und den Elementen der Schmelze, zum Beispiel Magnesium zur Bildung von Magnesiumchlorid blieb aus, wie sich an den funkenspektrometrischen Analysen eindeutig am Magnesiumgehalt zeigen lässt. Das Natriumchlorid verblieb in der Schmelze, was daran zu erkennen war, dass nach dem Einbringen von Strontium (Versuch 22) schließlich ein Rest aus der Tauchglocke aufschwamm, welcher beim Einrühren in die Schmelze an der Luft rasch mit Natrium-gelber statt Strontium-roter Flamme verbrannte.

Bei der Wiederaufbereitung von Aluminiumschmelzen wird mitunter Chlorgas (Cl_2) eingeleitet, wodurch sich Magnesiumchlorid (MgCl_2) und je nach Natriumgehalt des Materials auch Natriumchlorid (NaCl) bildet.

Zusammengefasst waren durch die Untersuchungen keine signifikanten Verbesserungen an den Aluminiumschmelzen nachweisbar. Sicherlich reichen die geringen Verweilzeiten der Granulate in der Schmelze doch nicht aus, um die erwünschten Wirkungen erzielen zu können.

➤ Einbau von kohlenstoffhaltigen Verbindungen

Dafür erfolgte analog zu den Laborversuchen wiederum eine Beschichtung der coatierten Bubbles mit Zucker.

Bei den Versuchsreihen bei der Aage GmbH wurde der Ofen so eingestellt, dass beim Aufheizen auf 850 °C Schmelzetemperatur höchstens 860 °C zugelassen wurden. Der Aufheizvorgang wurde dadurch entsprechend verlangsamt.

Die Abkühlkurven ergeben folgenden Verlauf:

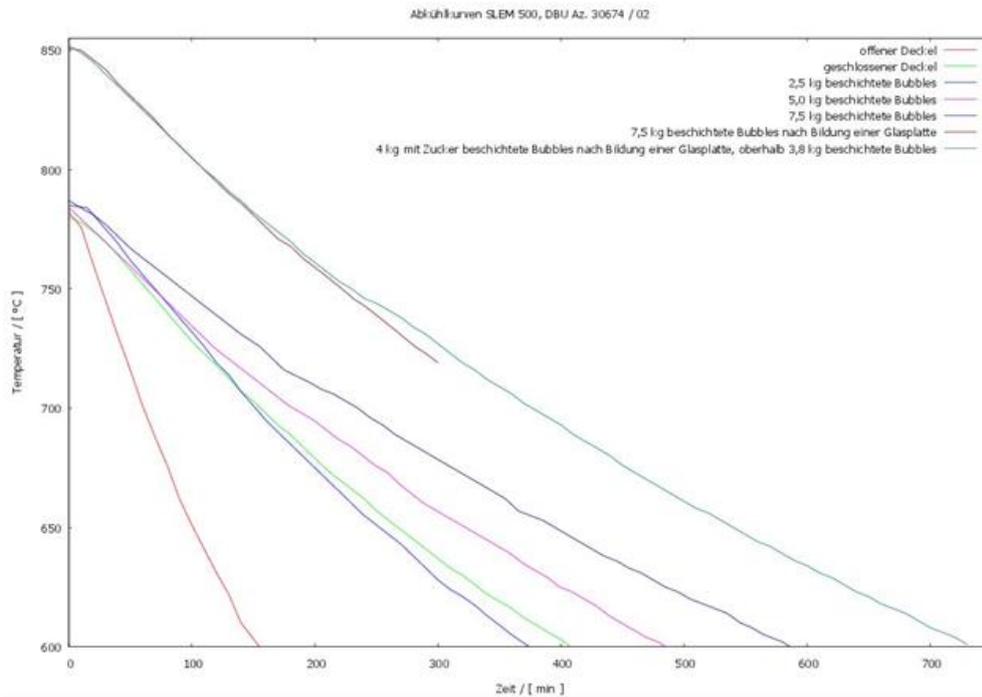


Bild 39: Abkühlkurven, zuletzt mit Zucker

Zur Ermittlung des logarithmischen Dekrementes wurden die Abkühlkurven binär logarithmisch dargestellt, und zwar so, dass jeweils nur die Temperaturdifferenz zur gemessenen Hallentemperatur logarithmiert wurde. Ohne Zucker betrug die Hallentemperatur 24 °C, bei den Versuchen mit Zucker ergab sich auf Grund des vorgeführten Herbstes eine Hallentemperatur von 15 °C.

Die logarithmische Auswertung ergibt folgendes Schaubild:

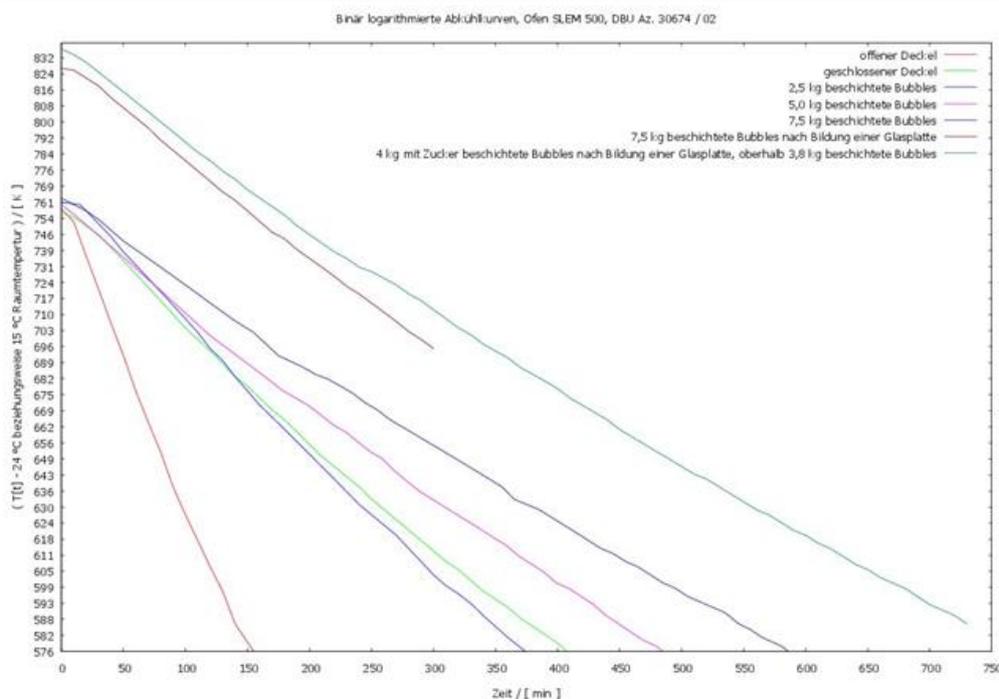


Bild 40: Logarithmierte Abkühlkurven, zuletzt mit Zucker

Auch in der bestmöglich logarithmischen Darstellung stellen diese Abkühlkurven kein reines Exponentialgesetz dar, denn der Abkühlungsverlauf weicht von einer Geraden ab.

Da der Energieverlust durch Strahlung eine Funktion der absoluten Temperatur ist und der Wärmeverlust durch Wärmeleitung und Konvektion mit der auftretenden Temperaturdifferenz zwischen warm und kalt zusammenhängt, kann hier im Rahmen der Messtoleranz keine signifikante Verbesserung der Dämmeigenschaften durch den Zuckerzusatz belegt werden.

Eine analoge Auswertung der Abkühlkurve mit Zucker ergab für die 6. Zeile (mit Zucker beschichtete Granulate) zu den Tabellen 1 bis 3 folgendes Verhältnis:

1. : 2. : 3. : 4. : 5. : 6. Zeile \approx 100 % : 37 % : 42 % : 30 % : 26 % : 25 %

Dies entspricht gerade den 7,8 kg Granulat statt 7,5 kg Granulat, so dass Zucker keine Verbesserung der Dämmwirkung begünstigt - auch nicht in einer Schaumschicht.

Es wurden 2 kg mit Zucker beschichteter Granulate zunächst mit etwa 1 kW auf einem Beistellherd so erwärmt, dass der Wassergehalt als beseitigt angesehen werden darf. Nachdem dieses Material bei etwa 700 °C aufgebracht war, wurden 2 kg weitere und unbehandelte Granulate (ebenfalls mit Zucker beschichtet) nachgelegt, nach Beendigung der Reaktionen wurden 3,8 kg coated Granulate aufgeschüttet. Auch diesmal bildete sich durch Erreichen einer Schmelztemperatur von höchstens 860 °C eine Glasplatte aus, allerdings von geringerer Dicke, welcher eine fest angebackene, etwa 3 cm dicke Schaumschicht aus den mit Zucker beschichteten Granulaten folgte, die als locker bezeichnet werden kann (Abbildung 41).



Bild 41: Schaumschicht ohne Glasplatte über erstarrter Aluminiumschmelze

Die mit Zucker beschichteten Blähglasgranulate können nach ihrem Einsatz nicht wiederverwendet werden. Es entsteht mindestens der Eindruck von mit flüssigem Zucker nach dessen Erstarrung verschmolzenen Blähglasgranulaten, die

zuckerfreien Granulate konnten wie gewohnt entfernt werden. An anderen Stellen bildete sich erneut die bereits bekannte Glasplatte aus.



Bild 42: Schaumschicht über erstarrter Glasplatte

Die Frage, ob die "Glasplatte" nur aus zusammengesinterten Blähglasgranulaten oder aus einer Reaktion zwischen Blähglasgranulaten und der Aluminiumschmelze stammt, wurde bislang nicht im Rahmen dieses Projektes untersucht. Auffällig ist, dass in beiden Fällen (mit und ohne Zucker) die Schmelze nach Ausbildung der Glasplatte fast kein Gas enthielt, obwohl dieses vorher vorhanden war. Dieser Befund wurde jeweils mit Hilfe der Unterdruckdichtepfung festgestellt.

Die Versuche mit den zusätzlich mit Zucker beschichteten coated Bubbles bestätigten die starke Rauchentwicklung und das Auftreten von Schwelbränden auf der Badoberfläche wie in den Laborversuchen. Zu beherrschen wäre dies zwar mit einer intensiven Absaugung über der Badoberfläche. Da sich jedoch bessere Alternativen für den Einbau in die Coatingschicht wie Holzmehl oder Holzkohlestaub anbieten, gab es dazu keine weiteren Versuche.

3.3 Entwicklung eines schäumfähigen Grünkorns zur Abdeckung der Schmelzen

3.3.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

➤ Grünkorn bei Aufschäumtemperatur 850°C

Nach inhaltlich technischer Abstimmung erfolgte nach kleintechnischer Technologie und Basis-Rezeptur die Herstellung des sogenannten „Grünkorns“ (ungeblähtes, trockenes Rohgranulat) für Laborversuche hergestellt. Dieses wurde auf die Alu-Schmelzbad-Oberfläche bei 850 °C aufgelegt und die Ausbildung einer geschlossenen Schmelzhaut im geschäumten Zustand untersucht.

Testversuche im Labor mit Grünkorn als Abdeckmittel mit alternativer Zusammensetzung im Temperaturbereich 800 – 900 °C führten zum Ergebnis, dass die Schmelzhaut nicht vollständig auf der Metallbad-Oberfläche ausgebildet ist. Es bilden sich sogenannte Inseln, welche die Oberfläche unvollständig bedecken.

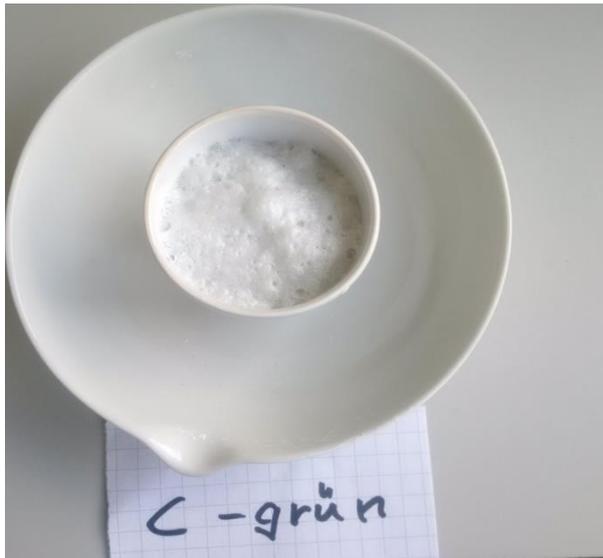


Bild 43: geschlossene Schaumschicht über der Alu-Schmelze

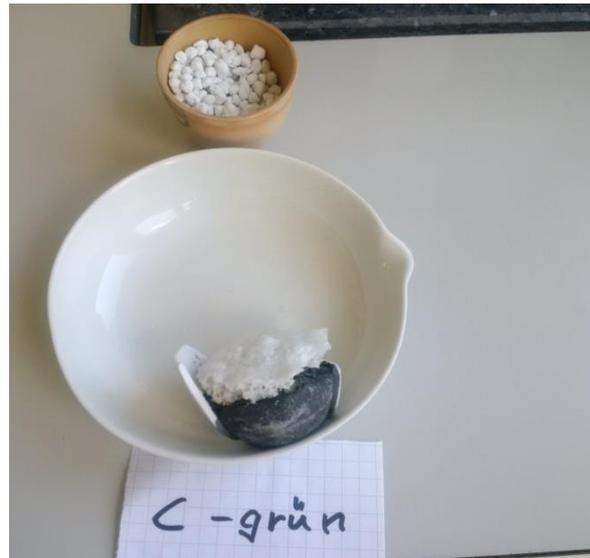


Bild 44: nach Aufbruch des Tiegels, Schaumschicht (1 cm dick) über dem Metall

Die Auflage von Grünkorn nach der Standard-Rezeptur von OMPT bildet eine geschäumte, vollständig geschlossene Trennschicht über der Alu-Schmelze ab 850 °C. Bei 900 °C ist diese Trennschicht unverändert. Sie kann in diesem Zustand von der Metallbad-Oberfläche problemlos mechanisch entfernt (abgekrätzt) werden.

Auf diese geschäumte Trennschicht kann zusätzlich eine 5 – 10 cm dicke Bubbleschicht aufgelegt werden. Die Trennschicht erzeugt für eine Schaumhöhe von ca. 1 - 3 cm einen Temperaturgradienten von ca. 50 – 70 K, so dass die aufgelegten Bubbles auf eine Kontakttemperatur von max. 850 °C eingestellt werden müssen. Die Geschäumte Trennschicht besitzt außerdem den Vorteil, dass beim Absaugen der Bubbles das unbeabsichtigte Eintauchen des Saugrohres in die Metallbad-Schmelze vermieden wird. Die Trennschicht selbst kann durch Abkrätzen nach dem Absaugen der Bubbles und vor dem Abguss entfernt werden.

➤ **Grünkorn zur Aufschäumung bei 750°C**

Während der Versuchsdurchführung bestätigte sich, dass eine Schmelztemperatur über 750 °C für die Alu-Schmelze eine progressive H₂-Aufnahme bewirkt. Insofern ist immer mit einem erhöhten H₂-Anteil zu rechnen und der Aufwand zum sogenannten Impellern (nach-trägliche Reinigung der Schmelze mit Cl-Gas) ist entsprechend höher. Für den normalen Alu-Guss wären 750 – 780 °C ausreichend. Höhere Temperaturen über 780 °C sind einer betriebsbedingten Arbeitsweise zuzuordnen. In Ergänzung zu den Versuchsergebnissen erfolgte deshalb noch eine nachträgliche Rezepturentwicklung für ein reaktives Abdeckgranulat, das als Grünkorn bereits bei der Kontakttemperatur von 750 °C aufschäumt. Die Grünkorn-Rezeptur wurde auf die Schäumtemperatur bei 750 °C durch Erhöhung des Flussmittelanteils im Granulat sowie Austausch des Blähmittels durch Polymer-Alkohol eingestellt. Dieser bewirkt gleichzeitig die reduzierende Wirkung auf die Badoberfläche.

Ziel der zusätzlichen Entwicklung ist die sofortige Bildung einer Schaumschicht bei Kontakt der Metallbad-Oberfläche mit den Funktionen bei niedrigerer Temperatur:

- Ausbildung einer luftdichten Abdeckung,

- Ausbildung einer reduzierenden Atmosphäre über dem Metallbad zum Verbrauch der Luft in den Haufwerksporen
- Ausbildung einer effektiven und dauerhaften Dämmschicht

Die Rezepturentwicklung im Labormaßstab wurde mit Erfolg abgeschlossen und die Reaktionstemperatur zu Schäumen im Erhitzungsmikroskop bei 750 °C nachgewiesen.

Bild-Analyse

Hesse-Instruments

Bezeichnung: **Choyna 20 % W-Glas 2,0**

Ausdruck vom:12.01.2016

Material: **Gruppe: Sample**

Meßdatum:12.01.2016

MESSPROTOKOLL

Heizprogramm:

Charakteristische Temperaturen:

Sinterbeginn:	n.b.	
Erweichungstemperatur:	703°C	Erweichungsbereich: n.b.
Sphärischtemperatur:	n.b.	
Halbkugeltemperatur:	n.b.	Fließbereich: n.b.
Fließtemperatur:	n.b.	

Segm.	Heizrate	Endtemp.	Haltezeit
1	5°C/min	1500°C	03:00
2			
3			
4			
5			
6			
7			

DIN 51730 (1998-4) / ISO 540 (1995-03-15) Sphärischtemperatur nach ISO nur für Kegelstumpf

Messungsparameter:

Aufgenommene Bilder:	63
Meßwerte:	667
Verfolgter Eckwinkel:	links
Operator:	Glatz
Gerät:	EMI 1
Verzeichnis der Meßdaten:	C:\EMI2\Daten\G0211251\W1601120
Anmerkungen:	Korundunterlage, Luftatm.

Aufnahmeeinstellungen:

Erstes Bild ab:	600°C
Bilder mindestens alle	20 sec
Flächenänderung:	5%
Eckwinkeländerung:	12%
Formfaktoränderung:	5%
Temperaturänderung:	12°C

('n.b.' = 'nicht bestimmt')

Erweichungspunkt

<p>19°C - 1 - 00:00:00 Fläche: 100% Höhe: 100% Eckwinkel links: 106° Benetzwinkel links: 76°</p> <p>Formfaktor: 0,68 Breite: 100,0% rechts: 76° rechts: 86°</p>	<p>660°C - 17 - 02:12:00 Fläche: 135,3% Höhe: 119,2% Eckwinkel links: 115° Benetzwinkel links: 76°</p> <p>Formfaktor: 0,677 Breite: 116,2% rechts: 80° rechts: 71°</p>	<p>703°C - 27 - 02:20:15 Fläche: 157,7% Höhe: 131,8% Eckwinkel links: 126° Benetzwinkel links: 88°</p> <p>Formfaktor: 0,691 Breite: 122,2% rechts: 106° rechts: 90°</p>
<p>726°C - 34 - 02:25:00 Fläche: 167,5% Höhe: 135,6% Eckwinkel links: 139° Benetzwinkel links: 100°</p> <p>Formfaktor: 0,703 Breite: 124,2% rechts: 130° rechts: 111°</p>	<p>742°C - 38 - 02:28:00 Fläche: 170,9% Höhe: 137% Eckwinkel links: 145° Benetzwinkel links: 113°</p> <p>Formfaktor: 0,71 Breite: 126,2% rechts: 136° rechts: 117°</p>	<p>756°C - 42 - 02:30:45 Fläche: 172,3% Höhe: 137% Eckwinkel links: 146° Benetzwinkel links: 115°</p> <p>Formfaktor: 0,72 Breite: 126,2% rechts: 137° rechts: 120°</p>
<p>780°C - 48 - 02:35:30 Fläche: 169,3% Höhe: 134,2% Eckwinkel links: 148° Benetzwinkel links: 111°</p> <p>Formfaktor: 0,747 Breite: 130,3% rechts: 157° rechts: 123°</p>	<p>805°C - 55 - 02:40:15 Fläche: 160% Höhe: 125,3% Eckwinkel links: 154° Benetzwinkel links: 106°</p> <p>Formfaktor: 0,781 Breite: 134,9% rechts: 157° rechts: 124°</p>	<p>834°C - 63 - 02:46:00 Fläche: 143,8% Höhe: 108% Eckwinkel links: 159° Benetzwinkel links: 109°</p> <p>Formfaktor: 0,845 Breite: 143,7% rechts: 165° rechts: 119°</p>

Bild 45: Untersuchungen der Erweichungstemperatur im Labor-Erhitzungsmikroskop

3.3.2 Kleintechnische Herstellung der Muster für die Versuche im Tiegelofen

Die Basis-Rezeptur für die Omega-Bubbles (Glasmehl, Bläh-, Fluss- und Bindemittel) wurde zur Herstellung der Mustermenge für die Versuche in der Versuchsgießerei modifiziert.

Die Rohstoffe wurden nach geforderten Eigenschaften ausgewählt, dosiert, verwogen, gemischt und im Granulator granuliert. Anschließend erfolgte noch das Trocknen in der Wirbelschicht bei ca. 250 °C. Das Unterkorn < 2 mm sowie das Überkorn > 8 mm wurde im Taumelsieb getrennt.



Bild 46: Musterproduktion „Grüngranulat“ für Versuchsgießerei

3.3.3 Ergebnisse der Versuche im Gießereitechnikum

Für die Versuche im Technikum wurden bereitgestellt:

- Aluminium-Legierung 226 D (Schrott)
- Induktionstiegel-Ofen (Schmelz-Kapazität 250 kg, 100 kW)
- Widerstand-Tiegelofen (Schmelz-Kapazität 30 kg, 50 kW)
- Vakuum-Prüfapparatur zur Bestimmung des Dichte-Index



Bild 47: Aluminium-Legierung 226 D



Bild 48: Induktionstiegel-Ofen (100 kW)



Bilder 49 + 50 Vakuum-Prüfgerät zur Bestimmung des Dichte-Index der Legierung

Die Versuche mit dem bereits bei 750°C aufschäumenden Grünkorn sind unter Punkt 3.2.4 Versuche im Gießereitechnikum zum Einbau funktionaler Schichten ins Grünkorn beschrieben worden, da bei Modifikation der Grünkornzusammensetzung gleichzeitig auch ein Kohlenstoffträger mit eingebaut wurde.

3.3.4 Ergebnisse der Versuche in der Entwicklungsgießerei

Die Versuche betreffen beide Grünkornqualitäten (mit niedrigerer und höherer Schäumtemperatur) gemäß folgendem Ablauf:

1. Aluminiumlegierung aufschmelzen (etwa 300 kg) und auf 750 °C erwärmen
2. Probe 1 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung bei etwa 40 mbar)
3. Granulatdeckel (circa 6 cm aufgebracht), zusätzlich Ofendeckel zu (14,2 h lang); Abdeckplatte ist danach schwarzgrün, circa 12 cm dick, nur die oberen 2 cm sind rieselfähig
4. Loch in Abdeckplatte, Probe 2 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung)
5. 3/4 der Granulatplatte zerstört, Nachchargieren (etwa 30 kg)
6. Probe 3 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung)
7. 6 kg (etwa 6 cm) Granulate aus Charge 11111 aufbringen

8. nach 2 h: keine Veränderung bei 750 °C
9. Probe 4 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung)
10. Erwärmung auf 800 °C
11. Probe 5 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung) bei 790 °C, Granulat zurück (leicht verklebt)
12. Probe 6 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung) bei 800 °C nach 14 h
13. Zugabe von 50 g Na mit Tauchglocke
14. Probe 7 (Analyse + Unterdruckdichteprüfung)
15. Zugabe Degasal T 200 mit Tauchglocke
16. Probe 8 (nur Analyse)

Bezüglich des Stromverbrauchs wurde 1,7 kW Grundlast abgezogen, dies ergibt bezüglich der beiden Abdeckungen:

Δt / [h]	ΔW / [kWh]	P / [kW]	ΔP / [kW]	Bemerkung
14,2	144	10,1	8,4	neues Granulat
14,6	144	9,9	8,2	altes Granulat

Tabelle 16: Vergleich Wärmedämmung der Grünkorngranulate

Das neue Granulat wurde bei 750 °C geprüft, das alte (Charge 11111) bei 800 °C mit zusätzlich etwa 30 kg mehr Metall. Bei beiden Versuchsreihen Fällen blieb der Deckel geschlossenen, um nicht unnötig viel Wärme zu vergeuden.

Das neue, verbesserte Grünkorn hat folgende Nachteile:

- Das Granulat wird bei 750 °C schwarzgrün und strahlt entsprechend mehr Wärme ab.
- Das Granulat schäumt auf etwa das doppelte Volumen auf und verkrustet so stark, dass es sich nicht mehr vom Tiegel trennen lässt. Deshalb ist es sinnvoll, im Bereich des Badspiegels eine Schichte aufzubringen und damit Schäden zu vermeiden.
- Die Isolationswirkung von 12 cm Platte (etwa 18,4 kg Material) bei 750 °C ist gegenüber der Charge 11111 (etwa 6 kg Material) bei 800 °C unterlegen.

Es bestätigte sich, dass die Schäumwirkung des verbesserten Grünkorns tatsächlich schon bei 750 °C auftritt und damit die Möglichkeit besteht, auf Aluminiumschmelzen bei diesen Temperaturen eine geschlossene Schicht zur Abdeckung der Schmelzbadoberfläche zu erzeugen. Diese kann so ausgelegt werden, dass diese wenige cm hoch ist und darüber dann zur Wärmeisolation die coatierten OMEGA-Bubbles aufgelegt werden.



Bild 51: Ring aus Kalziumsilikat zur Probenentnahme

Zur Probeentnahme war es notwendig, einen Weg zu finden, der auch später für die Produktion zur Schmelzeentnahme geeignet ist. Die Lösung besteht darin, einen Ring aus Kalziumsilikat einzusetzen, weil an diesem keine Schmelze anhaftet.

Die Analysen ergaben folgende Zusammensetzung bei Auswahl der Messreihen (Bedeutung der Zuordnung: Probennummer | Nummer der Messreihe), um der Verfälschung der Messwerte durch Seigerungen entgegen zu wirken:

Nummer	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Li
1 1	9,573	0,600	2,189	0,270	0,269	0,024	0,042	0,712	0,070	0,0014
2 1	9,560	0,592	1,996	0,284	0,217	0,028	0,037	0,701	0,068	0,0012
3 2	9,542	0,661	1,968	0,320	0,244	0,034	0,039	0,725	0,065	0,00070
4 1	9,619	0,664	1,965	0,320	0,220	0,033	0,038	0,726	0,067	0,00095
5 2	9,684	0,686	1,922	0,328	0,206	0,031	0,037	0,720	0,068	0,00075
6 1	9,645	0,697	1,878	0,337	0,216	0,036	0,037	0,721	0,064	0,00063
7 2	9,400	0,662	1,859	0,322	0,219	0,035	0,037	0,719	0,065	0,00060
8 3	9,410	0,693	1,834	0,335	0,219	0,037	0,036	0,723	0,063	0,00040

Nummer	Mo	Na	P	Pb	Sn	V	Zr	Al	ρ / [g/cm ³]
1 1	0	0	0,020	0,063	0,019	0,0074	0,0065	86,10	2,7277
2 1	0	0	0,022	0,053	0,017	0,0078	0,0061	86,38	2,7244
3 2	0,0023	0,0010	0,022	0,057	0,019	0,0079	0,0061	86,25	2,7261
4 1	0,0012	0,0018	0,022	0,058	0,019	0,0086	0,0063	86,20	2,7261
5 2	0	0,0022	0,022	0,055	0,019	0,0090	0,0064	86,17	2,7255
6 1	0,0023	0,0012	0,022	0,055	0,018	0,0086	0,0061	86,22	2,7251
7 2	0,0029	0,0051	0,022	0,056	0,018	0,0074	0,0061	86,53	2,7247
8 3	0,0035	0,0054	0,022	0,059	0,019	0,0078	0,0060	86,49	2,7251

Tabelle 17: Analysenergebnisse zur Ermittlung der Dichte

Bei Verwendung aller Messreihen zur Spektralanalyse ergaben sich folgende Dichten:

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8
ρ / [g/cm ³]	2,7244	2,7247	2,7252	2,7251	2,7213	2,7246	2,7255	2,7253

Tabelle 18: Dichtebestimmung gemäß Spektralanalyse

Der Unterschied zwischen beiden Auswerteverfahren ist hier gering.

Bezüglich der Unterdruckdichteprüfung wurden Dichte und Volumen nach Archimedes bestimmt für die Analysenprobe und für die unter 40 mbar erstarrten Proben. Es ergab sich:

Nummer Gussteil	V / [cm ³]	ρ / [g/cm ³]	1. $\Delta\rho/\rho$ / [%]	2. $\emptyset \Delta\rho/\rho$ / [%]
1 1	29,2	2,7233	0,2	0,0
1 2	58,8	2,3248	14,8	14,7
2 1	31,3	2,7333	-0,3	-0,3
2 2	48,0	1,9174	29,6	29,6
3 1	29,4	2,7283	-0,1	-0,1
3 2	53,9	2,0369	25,3	25,3
4 1	30,7	2,7350	-0,3	-0,4
4 2	53,1	2,1775	20,1	20,1
5 1	31,5	2,7351	-0,4	-0,5
5 2	48,9	2,2671	16,8	16,7
6 1	25,3	2,7354	-0,4	-0,4
6 2	52,2	2,2003	19,3	19,2
7 1	33,1	2,7012	0,9	0,9
7 2	56,3	2,0493	24,8	24,8
8 1	25,0	2,7153	0,4	0,4

Tabelle 19: Ergebnisse der Unterdruckprüfung

Es zeigt sich, dass durch das neue Granulat (Probennummer 2) der Gasanteil in der Schmelze gestiegen ist. Die Ursachen könnten in unterschiedlichen Qualitäten der Produkte gelegen haben. Die Abdeckung mit dem Granulat der Charge 11111 reduziert den Gasanteil kontinuierlich im Laufe der Zeit. Besonders bei Probennummer 5 ergab sich nach 14 Stunden eine klare Schmelze, deren Ausgasung erst nach etwa 2 Minuten Unterdruck auftrat.

Die Dichte des neuen Granulats änderte sich durch die Hitze von einer Schüttdichte von 0,81 g/cm³ in Hartschaum mit 0,46 g/cm³, was mit dem Anwachsen der Schicht von etwa 6 cm auf über 10 cm korreliert.

4. Fazit

Es konnten die angestrebten Projektziele erreicht werden. Es ist gelungen, eine Palette von Einsatzstoffen zur Abdeckung von Aluminiumschmelzen zu entwickeln, im kleintechnischen Maßstab herzustellen und im Schmelzbetrieb zu testen. So war es möglich, für die verschiedenen Anforderungen im Gießereibetrieb Lösungen anbieten zu können.

Die möglichen Effekte der erzielten Projektergebnisse sollen bezüglich einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Umweltentlastung am Beispiel der Kokillengießerei verdeutlicht werden.

In Kokillengießereien werden circa 35 % der Aluminiumgussteile hergestellt. Dies gilt insbesondere für Sicherheitsteile für die Automobilindustrie. Dazu gehören Zylinderköpfe, Kolben für Verbrennungsmotore, Ansaugkrümmer sowie tragende Teile. Die Teile werden im Gusszustand sowie im wärmebehandelten Zustand eingesetzt.

Die Produktivität einer Kokille ist im Vergleich zur Herstellung von Sandguss- und Druckgussteilen deutlich niedriger. Dies hängt damit zusammen, dass die Kokillentemperaturen von gewollten 350 °C bis 500 °C lange Erstarrungszeiten zur Folge haben. Die hohen Kokillentemperaturen sind notwendig, damit unter dem Einfluss der Schwerkraft während der Formfüllung keinerlei Erstarrungsvorgänge eintreten (Vermeidung von Kaltfließstellen und Grobkornbildung).

Die Produktivität je nach Größe von 10 bis 20 Abgüsse / Stunde erfordert aus Praktikabilitätsgründen ein ständiges Offenhalten des Warmhalteofens. Ein Warmhalteofen mit 500 kg Fassungsvermögen und einem Tiegeldurchmesser von 70 cm hat bei einer Schmelzbadtemperatur von 750 °C Verluste durch Strahlung und Konvektion an der Badspiegeloberfläche von 2,5 kWh/h (Messergebnisse des DBU-Projektes). Das Abdecken der gesamten Oberfläche des Schmelzbads mit 6 cm Dicke verhindert Verluste durch Strahlung und Konvektion von nahezu 100 %.

Um aus dem Ofen Schmelze entnehmen und auch wieder zuführen zu können, wurde aus einem Keramikmaterial ein Ring entwickelt, der zu einem Drittel in das Schmelzbad eintaucht (siehe Bild 51). Aus dem Innenbereich des Ringes kann ständig Schmelze entnommen beziehungsweise zugeführt werden. Durch den Ring wird es möglich, circa 95 % der Schmelzbadoberfläche abzudecken, 3 % bis 5 % sind offen. Die Verluste an Strahlung und Konvektion gegenüber dem vollständig abgedeckten Bad sind gering, nur circa 5 % höher. Anstelle einer Energieeinsparung bei vollständig abgedecktem Schmelzbad von 60 kWh/Tag ist dennoch mit einer Einsparung von circa 55 kWh/Tag zu rechnen. Bei 7000 h/Jahr Warmhalte- / Produktionszeiten pro Ofen entspricht dies einer Einsparung von mehr als 16.000 kWh/Jahr, das sind mehr als 3.300 €/Jahr. Schon bei einer kleinen Gießerei mit 20 Gießplätzen sind dies Einsparungen von circa 67.000 €/Jahr beziehungsweise mehr als 320.000 kWh.

Stand anfangs die Einsparung von Energie durch die Verminderung der Wärmestrahlung und der Konvektion durch das Abdecken der Badoberflächen im Vordergrund entwickelte sich dies hin zu den Effekten, die durch eine Ausbildung einer geschlossenen Schmelzhaut auf der Schmelze entstehen. Zunächst konnte eine verringerte Wasserstoffaufnahme nachgewiesen werden. Diese lässt sich weiter durch den Einbau funktionaler Schichten einschränken.

Der wesentlichste Nutzen entsteht, wenn durch den Einsatz eines Abdeckmittels das Impellern entfallen kann. Dann müssen die Aluminiumschmelzen nur auf ca. 750 °C statt auf ca. 850 °C aufgeheizt werden. Für einen Tiegel mit 500 kg Aluschmelze aufgeheizt mit Erdgas bedeutet dies eine Einsparung von 1,5 m³ Erdgas oder 3 kg

CO₂. Im industriellen Einsatz finden sich Tiegelgrößen von 100 kg bis 6 t. Eine mittlere Gießerei mit einer monatlichen Produktion von 120 t spart damit monatlich 360 m³ Erdgas und eine große Gießerei mit monatlich 1000 t 3000 m³ im Monat.

Zusätzlich hinzu kommt die Energieeinsparung durch die isolierende Wirkung der Schicht beim Transport in den Rinnen oder bei der Entnahme der Schmelze aus dem Tiegel zum Abguss oder dem Warmhalten. Dazu gab es eine Bewertung in

Ein weiterer wichtiger umweltrelevanter Nutzen besteht in der Einsparung der zum Impellern notwendigen Gase. Stand der Technik sind Argon-Chlor-Gemische, aber auch Chlorgas.

Zusätzlich profitiert der Anlagenbetreiber so von kürzen Produktionszyklen und erhöht seine Produktivität.

Die Untersuchungen erfolgten an der Al-Legierung 226, der meist eingesetzten Sekundärlegierung (betrifft ca. 60% der Al-Gussteile). Eine Übertagung der Ergebnisse auf in der Entwicklung befindlicher Cu- und Fe-freien Schmelzen scheint möglich.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht bei der Herstellung von reduzierend wirkenden Schichten auf den Bubbles.

5. Literaturverzeichnis

[SCH1967] Schmelzebehandlung in Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens, 17. Auflage, Schiele & Schön, Berlin, Düsseldorf 1997, ISBN 3-7949-0606-3

[OST2014] Osthoff, Thomas; Klein, Friedrich; Franke, Matthias; "Verminderung von Umweltbelastungen beim Gießprozess sowie zur Energieeinsparung durch ein innovatives Abdecksystem der Schmelzbadoberflächen und Schutz der Schmelzen gegenüber dem Angriff der umgebenden Atmosphäre, Abschlussbericht DBU-Projekt "Schwimmende Deckel" AZ 30674-21/2, 2014