

OMEGA MINERALS Production & Technology GmbH

"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

www.dbu.de

Autoren: Dipl.-Geol. Thomas Osthoff-Petrasch
Prof. Dr. Dr. h.c. Friedrich Klein
Dipl.-Ing. Matthias Franke

Norderstedt, 30.01.2015

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

DBU

Az	30674	Referat	21/2	Fördersumme	124.000 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel	Innovatives Abdecksystem der Schmelzbadoberflächen im Leichtmetallguss zur Energieeinsparung und zum Schutz der Schmelzen gegenüber dem Angriff der umgebenden Atmosphäre
--------------	---

Stichworte	
------------	--

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
2 Jahre	06.12.2012	05.12.2014	

Zwischenberichte	08.07.2013	20.01.2014	09.07.2014
------------------	------------	------------	------------

Bewilligungsempfänger	OMEGA Minerals Production & Technology GmbH Rugenbarg 63a 22848 Norderstedt	Tel <i>04052/8707-0</i> Fax <i>04052/8707-78</i> Projektleitung Dipl.-Geol. Osthoff-Petrasch Bearbeiter Naser Fayed
-----------------------	--	--

Kooperationspartner	
---------------------	--

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

In der Aluminium- und Magnesiumgießerei sind sehr häufig Tiegelöfen eingesetzt, Aus praktischen Gründen bleiben die Deckel der Ofen beim Abguss geöffnet mit den Folgen von Wärmeverlusten und Emissionen sowie vermehrter Krätzebildung.

Zur Vermeidung der beschriebenen Nachteile sollen schwimmende Deckel aus mineralischen Leichtgranulaten entwickelt und in einer Versuchsgießerei getestet werden. Neben der Reduktion der Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung soll die Reaktion der Schmelze mit der Umgebung (Sauerstoff- und Wasserstoffaufnahme) signifikant verringert werden. Eine Wechselwirkung zwischen Schmelze und mineralischem Leichtgranulat ist dabei auszuschließen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Es ist ein mineralisches Leichtgranulat zu entwickeln, das bis zu Temperaturen von 700 °C beständig ist. Neben einer extrem geringen Dichte des Granulates sind verschiedene Kornspektren herzustellen, um eine möglichst dichte Partikelpackung zu erreichen.

Die Versuchsmuster sind unter Laborbedingungen auf mögliche Wechselwirkungen mit Schmelzen unterschiedlichen Al-Legierungen zu testen.

Granulate, die die Labortests bestanden haben, sind im kleintechnischen Maßstab herzustellen

Diese wiederum werden auf ihr Langzeitverhalten in einer Versuchsgießerei getestet.

Dabei ist auch das Handling der schwimmenden Deckel zu entwickeln sowie das Recycling dieser bei einem Wechsel der Legierung zu untersuchen.

Ergebnisse und Diskussion

Nach vertiefenden theoretischen Betrachtungen bezüglich der optimalen Kornstruktur und einsetzbarer Rohstoffe für die Veränderungen an den OMEGA-Bubbles wurden umfangreiche Laborversuche mit dem Ziel einer Erhöhung der Temperaturstabilität durchgeführt. Im ersten Schritt gab es Änderungen an der Glasmatrix durch den Einbau weiterer mineralischer Komponenten. Damit lässt sich zwar eine höhere Temperaturstabilität erzielen, jedoch nur auf Kosten einer erhöhten Schüttdichte. Die Konsequenz davon ist eine erhöhte Wärmeleitung und damit eine verschlechterte Isolationswirkung. Damit scheidet dieser Weg aus, um eine effektive Senkung der Wärmeverluste auf der Badoberfläche erreichen zu können.

Erfolgreich dagegen war, die Glasmatrix nicht zu beeinflussen und die erhöhte Temperaturstabilität durch das Aufbringen einer Coatingschicht zu erreichen. Dazu wurden unterschiedliche Bindemittel und Mehle eingesetzt und dafür die optimalen Reaktionsbedingungen zur Ausbildung einer dünnen und geschlossenen Coatingschicht ermittelt. Die Schichten sind nach der Behandlung fest aufgesintert. Die auf diese Weise erzeugten Muster wurden im Muffelofen auf eine Aluminiumschmelze aufgelegt und die Wechselwirkungen mit den coated OMEGA-Bubbles beobachtet. Die Temperaturstabilität für den Bereich 700 - 770 °C ist sicher gewährleistet. Eine Haftverbindung zwischen Schmelze und Granulat ist nicht vorhanden. Das Granulat rollt auf der Oberfläche ab. Eine Wechselwirkung zwischen Aluminiumschmelze und coated OMEGA-Bubbles erfolgt nicht, wie dies auch durch EDAX-Analysen bestätigt ist. Eine Gefährdungsabschätzung bezüglich unerwünschter Reaktionen ergab auch keine Einschränkungen. Damit konnte die Freigabe für den Einsatz des Abdeckmittels erfolgen und die kleintechnische Umsetzung der Erkenntnisse für eine kleintechnische Musterherstellung beginnen.

Für die kleintechnische Produktion der coated OMEGA-Bubbles wurden die Prozesse Beschichtung, Trocknung und thermische Nachbehandlung optimiert und für die Versuche in der Versuchsgießerei Chargen von jeweils 500 l hergestellt.

In der Versuchsgießerei wurde in Tiegelöfen unter praxisrelevanten Bedingungen die Wirkung des Abdeckmittels im Temperaturbereich 680 bis 750°C untersucht. Diese umfassten die Ermittlung der Abkühlkurven bei verschiedenen Rahmenbedingungen, die Wechselwirkungen Aluminiumschmelze und coated OMEGA-Bubbles sowie die Abtrennung des Abdeckmittels von der Schmelze.

Eine optimale Wärmeisolation ist bereits bei Schichtdicken von 6 cm zu erreichen und die Verluste durch Strahlung und Konvektion über die Schmelzbadoberfläche auszuschließen. Die Energieeinsparung durch das Aufbringen der Abdeckschicht beträgt je nach eingesetzter Legierung 55 bis 64 %

Einen Abbrand von zur Veredlung eingebrachter Komponenten verhindert die Abdeckschicht jedoch nicht. Dazu ist der in der Schmelze vorhandene Sauerstoff verantwortlich

Eine Wechselwirkung zwischen Schmelze und coated OMEGA-Bubbles gibt es nicht, diese gehen keine Verbindung ein. Es wurde eine Variante zum Absaugen der Blähglasgranulate entwickelt, die noch zu verbessern ist. Die abgesaugten OMEGA-Bubbles (> 90% der eingesetzten Menge) ist erneut einsetzbar, der Rest mit Aluminiumanhaftungen ist recyclingfähig. Damit bestätigte sich, dass das Abdeckmittel bis 750°C in Aluminiumgießereien einsetzbar ist.

Ein abschließender Versuch in einer Umschmelzanlage zeigte die thermischen Grenzen des Abdeckmittels auf. Bei den hier produktionsbedingt herrschenden Temperaturen um 850°C schmilzt die unterste Schicht und bildet eine geschlossene Schicht aus. Die gute isolierende Wirkung der coated OMEGA-Bubbles bestätigte sich hier. Ebenfalls betätigt ist, dass es auch bei diesem Temperaturniveau keine Wechselwirkung zwischen Schmelze und Abdeckmittel gibt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse steht noch nicht an, da zuerst die Prüfung und Entscheidung über eine schutzrechtliche Sicherung nach der Validierung weiterer Produktideen ansteht.

Fazit

Die Entwicklung eines wiedereinsatzbaren Blähglasgranulates auf Al-Schmelzen mit dem Ziel der Energieeinsparung bei Produktionsbedingungen um 750°C war erfolgreich. In der Gießereipraxis im Umschmelzwerk sind jedoch Temperaturen um 850°C notwendig, die zu einem Schmelzen der unteren Lage des Blähglases führen. Deshalb ist es notwendig, durch eine veränderte Coatierung eine höhere Temperaturbeständigkeit zu erzielen.

Die im Lückenvolumen der Deckschicht enthaltene Luft reicht jedoch aus, um unerwünschte Reaktionen nicht zu unterbinden. Dafür wurden Ansätze entwickelt, durch eine geschlossene Deckschicht diesen Abschluss zu erreichen und mit den darüberliegenden Lagen die Verluste durch Abstrahlung und Konvektion zu minimieren.

Inhalt:

Projektkennblatt	2
I.Zusammenfassung	8
2. Einleitung	8
3. Darstellung der Untersuchungsmethodik und der erzielten Ergebnisse	12
3.1 Theoretische Ableitungen zu den geforderten Eigenschaften des Abdeckgranulats	12
3.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen	13
3.2.1 Erhöhung der Temperaturstabilität durch Einbau weiterer Komponenten in die Glasmatrix	13
3.2.2 Erhöhung der Temperaturstabilität durch Aufbringen einer Coatierung	16
3.2.3 Ergebnisse der Kontaktierung der coatierten OMEGA-BUBBLES mit der Aluminiumschmelze	16
3.3 Herstellung der Musterchargen für die Untersuchungen in der Versuchsgießerei	18
3.4. Ergebnisse vom Einsatz der coatierten OMEGA-BUBBLES in der Versuchsgießerei	20
3.5 Ergebnisse vom Einsatz der coatierten OMEGA-BUBBLES in einer Giesserei-Produktionsanlage	30
3.6 ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	38
4.Fazit	40
5.Literaturverzeichnis	41
6.Verzeichnis der Anhänge	42

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungen:

- Abbildung 1: technologisches Schema Blähglasproduktion
Abbildung 2: mikroskopische Aufnahme eines Schnitts durch ein Blähglaskorn
Abbildung 3: Labordrehrohrföfen mit Messtechnik
Abbildung 4: Labordrehrohrföfen mit Blähgranulat
Abbildung 5: Versatzvariante 1
Abbildung 6: Versatzvariante 2
Abbildung 7: Versatzvariante 3
Abbildung 8: Kontaktierung der Schmelze im Laborföfen
Abbildung 9: *Granulate*
Abbildung 10: Einsatz der Spritzpistole
Abbildung 11: Austrag aus dem Drehrohrföfen
Abbildung 12: Tiegelföfen Hindenlang SLEM-50
Abbildung 13: Zugehöriger Tiegel
Abbildung 14: Abkühlkurven bei unterschiedlicher Bedeckung
Abbildung 15: Abkühlung der Schmelze bei geschlossenem Deckel und geschlossenem Hallentor
Abbildung 16: Abkühlung der Schmelze bei geöffnetem Deckel
Abbildung 17: Abkühlkurven für die Legierung AlSi9Cu3 bei unterschiedlichen Schichtdicken des Abdeckmittels
Abbildung 18: Abdeckung mit 3 cm BUBBLES (Messung vom 22.08.2013)
Abbildung 19: Abdeckung mit 6 cm BUBBLES (Messung vom 30.08.2013)
Abbildung 20: BUBBLES und erstarrte Legierung
Abbildung 21: Unterdruckprüfung
Abbildung 22: Schnitte aus den gescannten Bildern
Abbildung 23: Absaugeinrichtung
Abbildung 24: Temperaturverlust in der Alu-Schmelze mit und ohne Abdeckmittel
1. Versuchstag
Abbildung 25: Industrie-Staubsauger der Firma Wieland
Abbildung 26: Abgesaugte Schmelzbad-Oberfläche bei 760 °C
Abbildung 27: Schmelzhaut aus verschmolzenen BUBBLES im Kontakt mit der Bad-schmelze
Abbildung 28: Alu-Tiegelschmelzöfen I-Ofen 3 mit Badtemperatur 852 °C
Abbildung 29: Abdeckung der Schmelze mit BUBBLES (Thermoelement von oben links)
Abbildung 30: Temperaturverlust in der Alu-Schmelze mit und ohne Abdeckmittel
2. Versuchstag
Abbildung 31: abgesaugte Schmelzbad Oberfläche (nachgereinigt durch Abkrätzen)
Abbildung 32: Restmaterial der Abdeckung nach dem Absaugen (Alu-Klumpen entstanden durch Abkrätzen)

Tabellenverzeichnis:

- Tabelle 1: Oberflächenenergien für verschiedene Elemente
Tabelle 2: Messtechnische Kontrolle der Alu-Oberflächenkontaminationen durch Glaskontakt
Tabelle 3: Legierungszusammensetzung (Analyse vom 09.04.2013)
Tabelle 4: Wirkung der Abdeckung auf die Abkühlung
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der 2. Versuchsserie
Tabelle 6: Vergleich der Wärmeverluste bei unterschiedlicher Abdeckung
Tabelle 7: Legierungszusammensetzungen für die 3. Versuchsreihe
Tabelle 8: Abkühlleistungen für verschiedene Legierungen

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Abkrätzen: Entfernen von Schlacke aus einem Metallschmelzbad

EDAX-Analyse: Die Energiedispersive Röntgenspektroskopie auch energiedispersive Röntgenanalyse zur Bestimmung der oxidischen Zusammensetzung

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 Zusatzeinrichtung gleichzeitig und in der Dosierung mit dem Gasstrom abgestimmt ein reaktives, oder inertes Gasgemisch, wie etwa Chlor/Argon, oder Stickstoff/Argon 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 nützlicher Elemente, vorwiegend solcher gefügebeeinflussender Art. Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Impeller>

TiB 2: Titanborid ist ein attraktives Material für die Aluminiumindustrie und bewirkt als Impfmittel die Verfeinerung Korngröße beim Gießen der Aluminiumlegierungen aufgrund seiner Benetzbarkeit und geringen Löslichkeit in geschmolzenem Aluminium sowie eine gute elektrische Leitfähigkeit. Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_diboride

Symbolverzeichnis

Symbol	SI-Einheit	Technische SI-Einheit	Bezeichnung
%	[1 / 100]	[1 / 100]	Prozent
$\sqrt{\quad}$	$\sqrt{[\text{Term}]}$	$\sqrt{[\text{Term}]}$	Quadratwurzel
a	[m]	[m]	Kantenlänge
A	[m ²]	[m ²]	Fläche
cp	[m ² / (S ² K)]	[J / (kg K)]	Wärmekapazität bei konstantem Druck
D	[m]	[m]	Außendurchmesser
d	[m]	[m]	Innendurchmesser
h	[m]	[m]	Tetraederhöhe
L	[m ² / S ²]	[J / kg]	Schmelzwärme
L	[kg m ² /(s ² mol)]	[J / mol]	molare Schmelzwärme
m	[kg]	[kg]	Gewicht, Masse
M	[kg / mol]	[kg / mol]	Molgewicht
n	[]	[]	natürliche Zahl
P	[kg m ² / S ³]	[J / s]	Leistung
p	[kg / (m S ²)]	[N / m ²], [J / m ³]	Druck
R	[m]	[m]	Außenradius
r	[m]	[m]	Innenradius
s	[m]	[m]	Schalendicke
S	[m]	[m]	Schüttungsdicke
T	[K]	[K]	absolute Temperatur
t	[s]	[s]	Zeit
Term ²	[Term] ²	[Term] ²	2. Potenz, Quadrat
Term ³	[Term] ³	[Term] ³	3. Potenz, Kubus
V, VO usw.	[m ³]	[m ³]	Volumen
ΔQ	[kg m ² / S ²]	[J], [Nm]	Wärmedifferenz
ΔT	[K]	[K]	Temperaturdifferenz
Δterm	[term]	[term]	Differenz
λ	[kg m / (S ³ K)]	[W / (m K)]	Wärmeleitfähigkeit
π	[]	[]	Kreiszahl Pi
ρ , rho	[kg / m ³]	[kg / m ³]	Dichte
σ	[kg / S ²]	[N / m]	Oberflächenenergie
σ	[kg / (S ³ K ⁴)]	[W / (m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante

1. Zusammenfassung

Das Projekt verfolgte das Ziel, ein innovatives Abdecksystem für Schmelzen in der Aluminiumgießerei zu entwickeln, das selbst keine Wechselwirkungen mit dem Aluminium eingeht, die Schmelzen gegen den Angriff der umgebenden Atmosphäre schützt und die Abkühlung der Schmelzen deutlich verzögert. Die dabei erzielte Energieeinsparung ist nachzuweisen.

Die Entwicklung beruht auf der Annahme, dass die von der OMEGA MINERALS Production & Technology GmbH produzierten Blähglasgranulate durch Modifizierung in ihren Eigenschaften so zu verändern, um die Anforderungen zum Einsatz in der Gießereiindustrie zu erfüllen.

Im ersten Schritt gab es dazu theoretische Überlegungen zur Abschätzung möglicher Gefahren durch den Einsatz der modifizierten Blähglasgranulate (OMEGA-BUBBLES), zum optimalen Körnungsaufbau und den Möglichkeiten der für die Modifizierung notwendigen Wege und der dabei einzusetzenden Rohstoffe.

Aus diesen Ergebnissen leitete sich das weiterführende Versuchsprogramm ab. In Laboruntersuchungen erfolgte einmal der Einbau zusätzlicher Komponenten in die Matrix mit der Maßgabe der Erhöhung der thermischen Langzeitstabilität auf die in der Aluminiumgießerei notwendige Temperatur von 750°C und zum anderen die Coatierung der Blähglasgranulate.

Die so erzeugten BUBBLES wurden im Laborofen auf eine Aluminiumschmelze aufgelegt und die Reaktionen mit der Schmelze sowie das Abkühlverhalten beobachtet.

Als zielführend erwies sich die Variante der Aufbringung einer geschlossenen Oberflächenschicht. EDAX-Analysen lieferten Abschätzungen bezüglich des Eindringens von Elementen aus der Glasmatrix in die Schmelze. Mittels Untersuchungen im Erhitzungsmikroskop gab es die Bewertung der Temperaturbeständigkeit.

Nach dem erfolgreichen Abschluss der Laborversuche und der damit verbundenen Freigabe der modifizierten OMEGA-BUBBLES für den Einsatz in der Versuchsgießerei startete die Entwicklung zur Umsetzung der Ergebnisse für die Coatierung für eine kleintechnische Herstellung von Mustern für die Versuchsgießerei und die Herstellung von Produktchargen.

Die Versuche in der Entwicklungsgießerei bestätigen die positiven Ergebnisse der Laboruntersuchungen und die Langzeitstabilität der OMEGA-BUBBLES bei Temperaturen bis 750°C. Bei Schichtdicken von ca. 6 cm als Auflage auf der Schmelze verzögert sich deren Abkühlung erheblich und es sind keine Wechselwirkungen mit der Schmelze aufgetreten. Das Granulat lässt sich einfach von der Oberfläche absaugen. Die energetischen Einspareffekte liegen bis zu 50% gegenüber einer nicht abgedeckten Oberfläche je nach Legierungs- und Ofentyp.

Eine Bestätigung der Einsatzfähigkeit der coatierten OMEGA-BUBBLES bis zu Temperaturen um die 800°C gelang in einer Industrieanlage. Hier schmolz die unterste Schicht der Blähglasgranulate und bildete eine geschlossene Schicht aus.

Ausgehend von dieser Erfahrung ist es notwendig, Veränderungen an der Coatierung zur Erschließung weiterer Einsatzbereiche vorzunehmen. Diese soll u.a. in einem Folgeprojekt gemeinsam mit einem Kooperationspartner entwickelt und getestet werden.

Die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt Aktenzeichen 30674 ermöglichte die Durchführung des Vorhabens.

2. Einleitung

Die Gießereiindustrie, die Funktionsteile aus Al- und Mg-Legierungen produziert, stellt in Deutschland einen wichtigen Wirtschaftsfaktor dar. Hauptabnehmer der Produkte sind vor allem der Automobilbau und der Maschinenbau. Brancheninterne Prognosen gehen von

einer Verdopplung der Produktion in den nächsten Jahren aus. Entgegen früherer Befürchtungen, dass diese Industrie in Länder mit niedrigeren Lohnkosten und Energiekosten sowie Umweltstandards abwandert, hat sich diese in Deutschland behauptet. Dies liegt vor allem in der Innovationskraft der Branche begründet, die die Wettbewerbsnachteile gegenüber diesen Ländern mehr als aufhebt.

Trotz dieser positiven Bilanz bleibt die Gießereiindustrie naturgemäß eine energieintensive Branche, die auch nicht frei von Umweltbelastungen ist. Zwischen 1992 und 2008 konnte in der Gießereiindustrie die Energieeffizienz als spezifischer Energieeinsatz je Tonne guter Guss von 10 % erzielt werden [Wal 2013]. Ziel des Förderantrages ist es, einen Beitrag zu leisten, um sowohl Energieverbrauch als auch Umweltbelastungen zu reduzieren. Das Projekt leistet bei erfolgreichem Abschluss einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von CO₂-Emissionen.

Im Bereich der NE-Schmelzen beläuft sich die Zahl der Öfen auf 3000-4000 Öfen allein in Deutschland, wobei der Großteil davon (ca. 87%) auf die Aluminiumgießereien entfällt [Wol 2013]. Den Kokillenguss betreiben 170 Nichteisenmetallgießereien [Wal 2013]. Dazu kommen noch die im Sandgussverfahren produzierenden Unternehmen als potentielle Anwender in Deutschland.

Nach Marktübersichten beträgt die Produktion von Al-Gussteilen weltweit ca. 5.000.000 UJahr [Kle 2012]. Erhebungen für Deutschland weisen für den Aluminium Sandguss/Kokillenguss eine Produktionsmenge für 2007 von 420.300 t und für 2011 von 385.060 t aus [Wal 2013]. Zusätzlich entfallen noch auf den Druckguss 400.000 t pro Jahr. Für diese Anwendung ist eine Abdeckung der Schmelzen über Stillstandszeiten (Wochenende, Feier- und Brückentage) ebenfalls sinnvoll.

Die Schätzungen von Prof. Klein für Al-Gießereien ergaben [Kle 2012], dass über die geöffneten Deckel ca. 4 bis 8 kWh/h Wärmeverluste je nach Ofengröße auftreten. Die oben genannten Zahlen betreffen die Gutteile. Erfahrungsgemäß wird dafür die doppelte Menge an Schmelzen benötigt. Daraus errechnet sich ein mittleres Einsparpotential von 48.000 MWh/a für Deutschland.

Die Wärmeverluste sind abhängig von der Badoberfläche, für die Versuche in der Versuchsgießerei ergaben sich bei 300 kg Legierung etwa 2 kWh/h Einsparung, dies entspricht pro Tag 50 kWh).

Der gewählte Ansatz zur Reduzierung der Energieverluste über die Schmelzbadoberfläche bezieht sich auf den Warmhalteprozess der Schmelzen vor der Verarbeitung zum Produkt und den Transport vom Schmelzofen zur Verarbeitungslinie. Zur Verarbeitung setzt die Branche vorwiegend Tiegelöfen ein. Wärmeverluste soll der Stahldeckel, der den Ofen verschließt, verhindern. Bei der praktischen Handhabung ergeben sich aber Behinderungen für den Folgeprozess. Folglich besteht in der Produktion die Notwendigkeit, über längere Zeiten den Deckel geöffnet zu halten. Dies erfordert einen zusätzlichen Wärmebedarf und verursacht Umweltbelastungen in der Gießereihalle.

Bisher gibt es zwar umfangreiche Veröffentlichungen zu den Möglichkeiten über eine Reduzierung der Energieverluste durch Aufbringen von Schutzschichten. Jedoch haben sich diese in der Aluminiumgießerei bisher nicht bewährt. Demgegenüber kommen Abdeckmittel mit anderen Wirkungen zum Einsatz.

Dazu zählen Abdeckmittel als grobstückiges oder körniges Schmelzhilfsmittel zur Verminderung des Abbrandes. Manchmal haben Abdeckmittel noch die zusätzliche Funktion

auch als Reinigungsmittel zu dienen [Gie 2008]. Abdeckmittel sind also in der Gießereindustrie altbekannt wie die Gießverfahren. Die bei Aluminiumschmelzen verwendeten Abdeckmittel von der Foseco GmbH, der Schäfer Chemie GmbH und mehreren anderen Lieferanten sind Salze. Aufgabe der Salze (Gemische aus Chloriden, Karbonaten und anderen) ist es, die Oxidation an der Oberfläche zu verhindern, sowie Oxide aus dem Innern der Schmelzen beim Impellern zu binden. Dazu ist eine teilweise Reaktion mit dem Aluminiumoxid hierfür notwendig. Die BUBBLES von OMEGA MINERALS sollen nicht reagieren. Die Salze werden nach der Reinigung der Schmelzen abgekrätzt, sie haben, wenn überhaupt, nur eine geringe isolierende Wirkung auf den Schmelzbadoberflächen. Die Zielrichtung des Einsatzes dieser Abdeckmittel entspricht nicht dem hier verfolgten Ansatz.

Es gibt weiterhin wärmeisolierende und wärmeabgebende Abdeckmittel meist in pulverförmig [Gie 2008]. Dabei handelt es sich um exotherme Abdeckmittel, mit denen man die Schmelzen im Speiser abdeckt. Als exothermes Material enthalten diese Mittel Magnesiumspäne. Deren Wirkung ist zeitlich nur sehr kurz.

Aus unseren Literaturrecherchen konnten wir keine aktuellen Entwicklungen bezüglich einer Weiterentwicklung der traditionellen Abdeckmittel mit dem Ziel einer Energieeinsparung finden. Auch in der UFORDAT-Datenbank haben wir zumindest keine FuE-Vorhaben dazu finden können.

Bereits im Handel befindliche Produkte eignen sich nicht für den Einsatz als Abdeckmittel im Sinne des Projektes. Eine Produktgruppe, die als "Schwimmende Deckel" einsetzbar wäre, sind die Cenospheren; ein Alumosilikatsilikat mit einer sehr hohen Temperaturbeständigkeit bis 1600 °C. Sie entstehen spontan bei der Verbrennung von Kohlen. Mit veränderter Prozessführung hin zu niedrigeren Temperaturen auf Grund umweltseitiger Auflagen fällt immer weniger Produkt an. Es ist bisher nicht gelungen, den Bildungsprozess der Cenospheren in einen effektiven technischen Prozess zu übertragen. Je nach Händler betragen die max. Korngrößen bis zu 1mm; größere existieren anfallsbedingt nicht. Die Dichten liegen 0,6 bis 0,8 g/cm³.

Ein Anbieter ist u.a. die Possehl Erzkontor GmbH Lübeck, deren Cenospheren die folgenden Eigenschaften besitzen:

- Inerte, nicht metallische Hohlkugeln
- Chemismus: ca. 21 - 39% Al₂O₃, 54 - 65% SiO₂
- Härte nach Mohs: ca. 6
- Korngröße: ca. 0,01 - 500 µm
- Schüttdichte: 0,26 - 0,45 g/cm³
- hitzebeständig: Schmelzpunkt > 1200°C
- nicht brennbar
- resistent gegen Säuren und Alkalien
- geringfügig löslich in Wasser
- reduzieren die Schwindung
- gute Isolationseigenschaften
- niedrige Wärmeleitfähigkeit

Zwar besitzen diese eine hohe Temperaturbeständigkeit, sind aber wegen der kleinen Teilchengröße und nicht ausreichender Wärmedämmung für den Einsatz als Abdeckmittel nicht geeignet. Eine Materialmodifizierung ist nicht möglich, weil die Cenospheren nur zufällig als nicht beeinflussbares Kuppelprodukt anfallen.

Eine andere Produktgruppe sind Mikroglasshohlkugeln. Ein typischer Vertreter davon sind die 3M -Mikroglasshohlkugeln, verfügbar bis 120 µm Größe. Als thermische Merkmale gibt der Produzent die Wärmeleitfähigkeit mit 0,05 - 0,26 W/m.K nach theoretischer Berech-

nung bei 0 °C an. Die Leitfähigkeit steigt mit Temperatur und Produktdichte. Die Erweichungstemperatur nach 2 Stunden liegt bei 600°C [Sol 2012].

Hier liegt die Wärmedämmung wesentlich verbessert vor, jedoch sind diese BUBBLES ebenfalls zu klein für einen Einsatz als Abdeckmittel.

Ansätze für eine erfolgreiche Produktentwicklung bietet das Blähglasgranulat der OMEGA MINERALS Production & Technology GmbH. Dazu ist es aber notwendig, die Temperaturstabilität des Produkts zu erhöhen.

Eine prinzipielle Darstellung des Produktionsablaufs zur Herstellung mineralischer Leichtgranulate bei der OMPT ist dem folgenden Schema zu entnehmen:

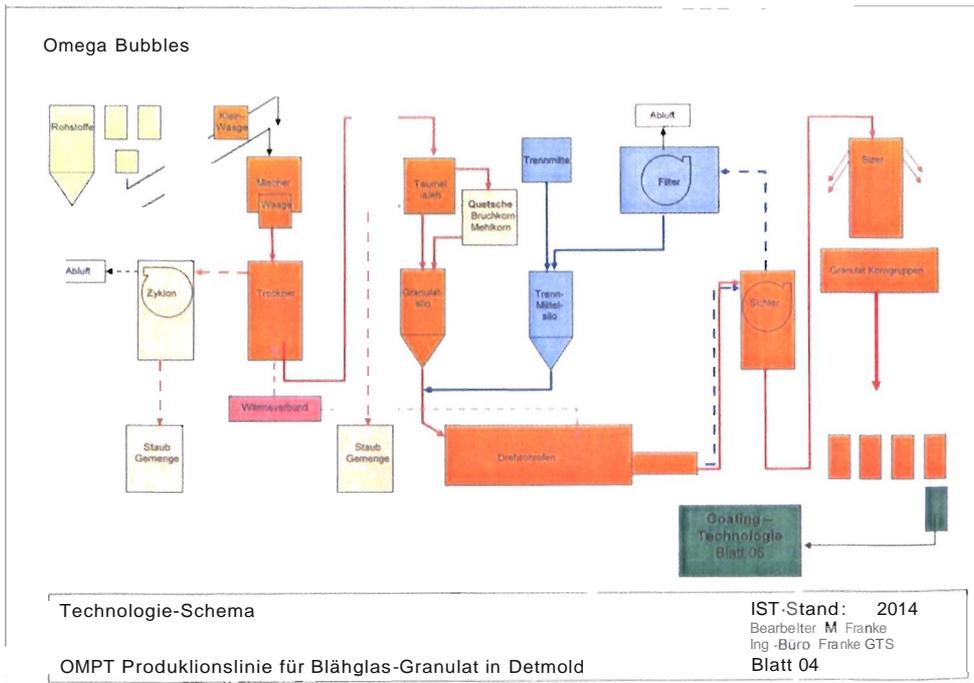
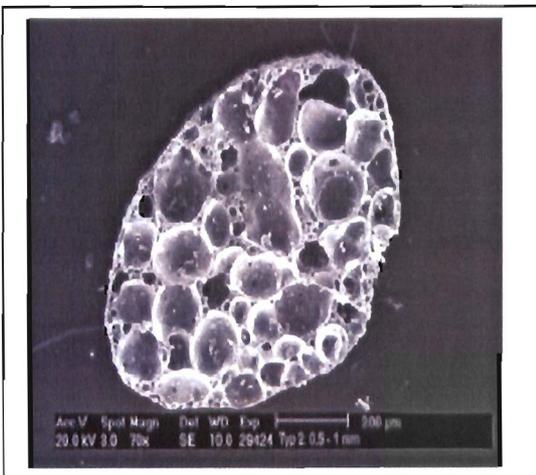


Abbildung 1: technologisches Schema Blähglasproduktion



Die Aufnahme zeigt einen Schnitt durch ein Blähglaskorn unter dem Mikroskop.

Abbildung 2: mikroskopische Aufnahme eines Schnitts durch ein Blähglaskorn

Die Technologiekette bleibt für die Abdeckmaterialien als "Schwimmende Deckel" erhalten, jedoch sind die Prozessbedingungen auf die neuen Zusatzstoffe abzustimmen, um die für den Einsatz in der Gießerei notwendigen Partikeleigenschaften generieren zu können. Dazu sind zwei unterschiedliche Ansätze zur Erhöhung der Temperaturstabilität zu überprüfen:

- Einbindung weiterer Komponenten in die Glasmatrix
- Aufbringung einer Coating zum Schutz der OMEGA-BUBBLES

3. Darstellung der Untersuchungsmethodik und der erzielten Ergebnisse

3.1 Theoretische Ableitungen zu den geforderten Eigenschaften des Abdeckgranulats

Die Alu-Schmelze besitzt an der Oberfläche eine Kontakttemperatur von ca. 750°C bei der Verarbeitung im Tiegelofen. Somit muss die Granulatoberfläche gegenüber dieser Temperatur eine Form- und Reaktionsstabilität aufweisen. Die Formstabilität wird gewährleistet, wenn das Granulat im genannten Temperaturniveau noch keine pyroplastische Erweichung, d.h. Temperaturstabilität aufweist. Reaktionsstabilität bedeutet, dass bei dieser Kontakttemperatur keine Komponenten der Glaszusammensetzung des Granulates mit der Aluminiumoberfläche reagieren und damit in die Alu-Schmelze eindringen.

Zur Erreichung der optimalen Dämmwirkung des Granulates soll eine möglichst niedrige Schüttdichte eingestellt werden. Aus der gegenwärtigen Produktion werden für die Korngruppe 2 - 6 mm Schüttdichten von 250 - 200 kg/m³ bereitgestellt. Sie entspricht der Fertigungsmöglichkeit der Technologie, ohne wesentliche Eingriffe in den vorhandenen Ausrüstungsbestand. Für diese Korngruppe und Zusammensetzung wird aus den technischen Eigenschaften der Produktionsüberwachung eine Wärmeleitfähigkeit von 0,1 W/(mK) angegeben.

Die optimale Schichtdicke der Schüttung kann für die bekannte Oberflächentemperatur der Schmelze und nach der gewünschten äußeren Oberflächentemperatur der Schüttung über die Wärmeleitfähigkeit" der Schüttung berechnet werden.

Die Korndruckfestigkeit liegt über 1 MPa (Vehn-Zylinder-Messung), so dass die mechanische Belastbarkeit der Schüttung für das Auflegen und Entfernen des Granulates auf die Schmelze vollkommen ausreichend ist.

Eine optimale Kornverteilung für die Abdeckschicht soll die notwendigen Versuche in der Versuchsgießerei und für die Musterproduktion minimieren. Dazu gab es detaillierte Berechnungen (siehe Anhang 1). Das Ergebnis lässt sich so zusammenfassen:

- Die unterste Schicht muss noch schwimmen.
- Bei einem Kugeldurchmesser von etwa 3 mm ergeben etwa 25 Schichten eine Deckschicht von 6 cm (siehe Anhang 1).

Die Schmelzen müssen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, der Begleitelemente mögliche Reaktionen mit den OMEGA-BUBBLES ausschließen. Aluminiumlegierungen werden weltweit in großen Mengen als Gusswerkstoffe eingesetzt. Neben dem Eisenwerkstoff sind Leichtmetallwerkstoffe auf der Basis der Aluminiumwerkstoffe die am meisten eingesetzten metallischen Werkstoffe. In Europa sind die Gusswerkstoffe in der DIN EN 1706 genormt, und zwar getrennt für Sand- und Kokillengusslegierungen von den Druckgusslegierungen.

Als Legierungselemente werden Si, Cu, Mn, Mg, Zn, unter anderem auch Ag, eingesetzt, zusätzlich kommen Fe und Ti vor. Daneben wird für die metallurgische Behandlung der Schmelze

1. Kornfeinung über TiB₂ Beingebracht,
2. für die Veredlung Na (Sandgusslegierungen) und Sr (Kokillengusslegierungen) verwendet, auch für Druckgusslegierungen.

Mit weiteren Elementen muss in Aluminiumlegierungen gerechnet werden, wie Sn, Pb, Bi, Sb (Veredlung). Im Grunde genommen kann /muss vor allem beim Einsatz von Recycling-

Legierungen damit gerechnet werden, dass ein Großteil der Elemente, wenn auch in geringer Verdünnung als Verunreinigungen in den Legierungen vorkommen,

Bei den Warmhalte- und Dosieröfen in Gießereien handelt es sich in der Regel um Tiegelöfen, die häufig elektrisch widerstandsbeheizt sind"

In der Schmelze vorhandene Legierungselemente und Begleitelemente, auch wenn diese in großer Verdünnung vorliegen, spielen in der Regel für die Eigenschaften keine bzw. eine untergeordnete Rolle, ausgenommen die Elemente, die zur metallurgischen Behandlung der Schmelze heran gezogen werden, wie TiB₂ zur Kornfeinung, bzw. Na, Sr zur Veredlung des eutektischen Gefüges in den Al-Si-Legierungen.

Bei fließenden Schmelzen ist die Grenzflächenenergie (Oberflächenspannung) entsprechend der Zusammensetzung, das heißt, alle Legierungselemente und Begleitelemente kommen in der fließenden Schmelze in der Oberfläche entsprechend ihren Anteilen in der Schmelze in der Oberfläche vor. Sie beeinflussen die Oberflächenenergie entsprechend ihrem Anteil in der Oberfläche.

Bei ruhenden Schmelzen reichern sich in der Oberfläche Atome der Elemente durch Diffusion an, die die Grenzflächenenergie herab setzen. Dies sind bei Aluminiumschmelzen vor allem Atome der Alkali- und Erdalkaligruppe, wie Na, K, sowie die Verunreinigungen, wie Sn, P, Bi, Sb, Ag usw. Auch die Legierungselemente Zn und Mg reichern sich in der Oberfläche an. Zum Teil brennen diese Elemente in der Oberfläche ab, z. B. Na in Reaktion mit dem Luftsauerstoff.

Element	M / [g/mol]	T / [K]	σ / [erg/cm ²]	σ / [mN/m]
Na	22,997	370,98	222	222
K	39,096	336,4	86	86
Rb	85,48	312	50	50
Cs	132,91	301,8	30	30
Cu	63,57	1357	1285	1285
Ag	107,88	1234	923	923
Zn	65,38	692	820	820
Cd	112,41	594	564	564
Hg	200,61	298,15	478	478
Al	26,97	932	914	914
Ga	69,72	302,9	735	735
In	114,76	429,3	555	555
Tl	204,39	577	496	496
Sn	118,70	505	622	622
Pb	207,21	600,6	473	473
Bi	209	544,5	376	376

Tabelle 1: Oberflächenenergien ([Kle 1967], Tabelle 8, Seite 40)

3.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

3.2.1 Erhöhung der Temperaturstabilität durch Einbau weiterer Komponenten in die Glasmatrix

Die Auswahl der Rohstoffe orientiert sich an den Glasbildungs- und Schäumeigenschaften in Verbindung mit den Anforderungen an Porosität, Oberflächendichtheit und chemische Resistenz gegen Feuchteangriff. Eine Veränderung der Rezepturen zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit beinhaltet eine nachteilige Veränderung der Viskosität zum Schäumen. Die Dichte steigt, die Wärmeleitfähigkeit steigt ebenfalls. Die Dämmeigenschaften verschlechtern sich, das Material nimmt zunehmend keramische Eigenschaften an.

Es wurde nach verschiedenen Labor- und Technikumversuchen festgestellt, dass eine derartige Rezepturveränderung der Granulate nicht zweckmäßig ist, weil die Vorteile der Dämmeigenschaften herabgesetzt werden.

In ersten Laborversuchen wurden nach vorheriger Rohstoffauswahl verschiedene Rezepturen auf ihre Blähfähigkeit untersucht. Als Zielgröße zur Bewertung der Leichtgranulate wurde eine Schüttdichte von 0,15 - 0,2 g/cm³ für eine Wärmeleitfähigkeit < 0,1 W/(mK) festgelegt.

Für diese Versuche wurde ein Labordrehrohrföfen genutzt (Abbildung 1 und 2).



Abbildung 3: Labordrehrohrföfen mit Messtechnik



Abbildung 4: Labordrehrohrföfen mit Blähgranulat

Folgende drei Versatzvarianten wurden getestet:

Variante 1 mit Glasmehl, Schiefermehl, Na-Silikat, mineralisches Blähmittel

Variante 2 mit Glasmehl, Schiefermehl, Na-Silikat, organische Blähmittel

Variante 3 mit Glasmehl, Schiefermehl, Na-Silikat, mineralisches Blähmittel, Eisenoxid

Die drei Versatzvarianten wurden in verschiedenen Mischungsverhältnissen zusammengestellt und diese bei unterschiedlichen Prozessbedingungen untersucht. Als Bewertung diente die Messung der Rohdichte im Quecksilber-Volumenometer. In den folgenden Diagrammen (Diagramme 1 bis 3) sind die Ergebnisse als Abhängigkeit der Rohdichte bei geänderten Blähmittelanteilen für die drei Versatzvarianten dargestellt.

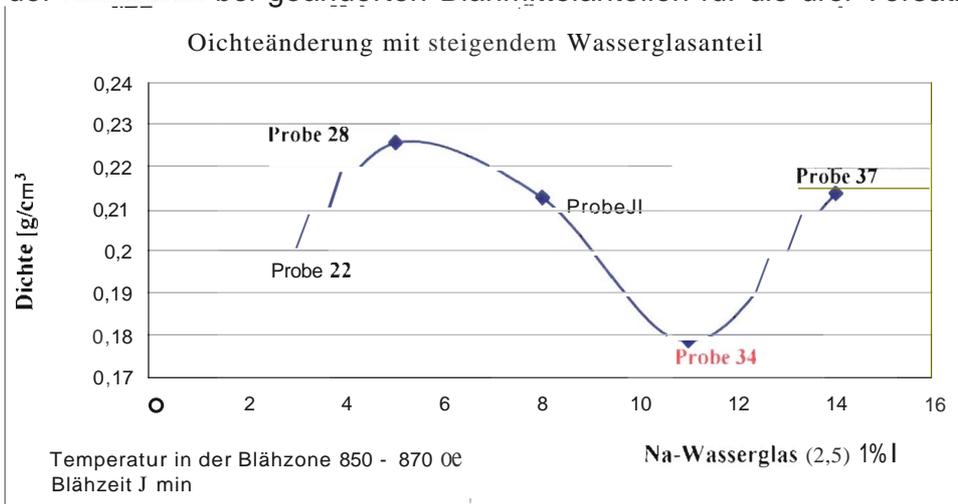


Abbildung 5: Versatzvariante 1

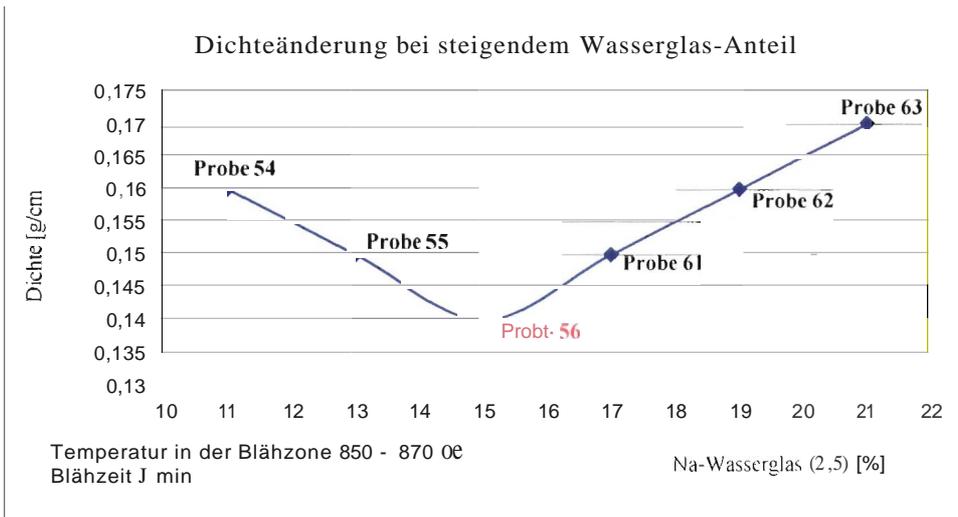


Abbildung 6: Versatzvariante 2

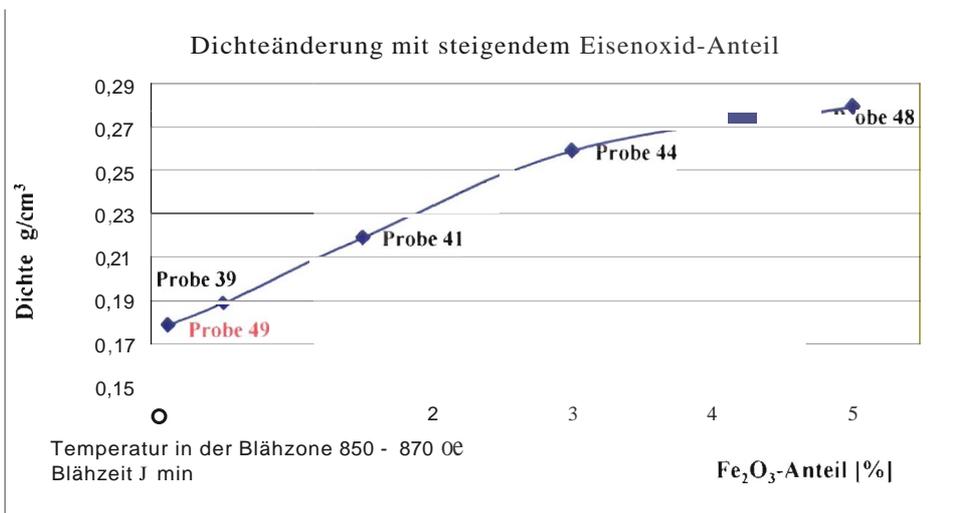


Abbildung 7: Versatzvariante 3

Die Zugabe von Eisenoxid (Fe_2O_3) bei Versatzvariante 3 brachte keine Verbesserungen und wurde somit nicht weiter in Betracht gezogen.

Das Ziel war eine niedrige Schüttdichte. Die Lambda-Werte fallen proportional, jedoch die Temperaturbeständigkeit fällt auch auf ca. $680\text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Ansatz wurde nicht weiter verfolgt.

3.2.2 Erhöhung der Temperaturstabilität durch Aufbringen einer Coating

Die Rezepturvariante der Blähglasgruppe Omega BUBBLES C XL wurde als Rezepturbasis festgelegt und für die kleintechnische Produktion am Standort in Detmold eingesetzt. Die Zusammensetzung entspricht einem Standard als Soda-Kalk-Glas. Zum Einsatz kam entsprechendes Glasmehl aus dem Behälter- und Flachglas-Recyclingaufkommen mit den Additiven als Fluss-, Bläh- und Trennmittel.

Diese Granulate entsprechen den wärmetechnischen Anforderungen als Dämmschicht auf der Alu-Schmelze (Schüttdichte 210 g/l). Die Reaktionsresistenz an der Oberfläche muss nur für den Oberflächenkontakt ausgebildet werden, die Granulatstruktur und Eigenschaften im Kern werden nicht verändert. Die chemisch - physikalische Veränderung der Oberfläche kann über ein Coating erfolgen. Für die Ausbildung der geforderten Oberflächeneigenschaften durch ein nachträgliches Coating-Verfahren am Granulatprodukt kamen zwei Varianten in Anwendung:

- Coating mit Methakaolin-Mehl
- Coating mit Tonerdemehl

3.2.3 Ergebnisse der Kontaktierung der coatierten OMEGA-BUBBLES mit der Aluminiumschmelze

Die Coating-Granulate wurden im Labor mit Alu-Schmelzen kontaktiert, um den Einfluss der Kontamination der Schmelze durch Granulatbestandteile zu bestimmen.

Die Oberflächen sollten die Reaktionstemperatur der Granulate erhöhen und die Reaktion löslicher Glaskomponenten mit dem Aluminium bei Temperaturen um $750\text{ }^\circ\text{C}$ verhindern. Die so gewonnen Muster werden im nächsten Schritt mit dem flüssigen Aluminium kontaktiert. Dies erfolgt in einem elektrisch beheizten Muffelofen ($800\text{ }^\circ\text{C}$). In einem Tonerde-Tiegel (50 - 100 ml) wird kompaktes Aluminium (Stab- bzw. Prismen-Material, ca. 50 g) bei ca. $750\text{ }^\circ\text{C}$ eingeschmolzen.



Abbildung 8: Kontaktierung der Schmelze im Laborofen

Nach Ausbildung der Alu-Schmelze im Tiegel bei 770°C wurden die Granulatvarianten:
 Standard - Glas: Bezeichnung S
 Kaolin Coating: Bezeichnung K
 Tonerde Coating: Bezeichnung A

auf die Schmelze bei 750 °C aufgelegt, 60 min. im Ofen belassen und anschließend nach Entnahme der Tiegel das am Granulat anhaftende Aluminium jeweils für die Variante S, K und A für eine geplante Materialanalyse als Probe entnommen. Als Vergleichsmaterial diente die unbehandelte Alu-Probe.

Nach den Versuchsschmelzen war erkennbar, dass das Coating-Granulat die Schmelzbadoberfläche abdeckt und dabei eine Oxidation des Aluminiums behindert. Die Temperaturstabilität für den Bereich 700 - 770 °C ist sicher gewährleistet. Eine Haftverbindung zwischen Schmelze und Granulat ist nicht vorhanden. Das Granulat rollt auf der Oberfläche ab.



Abbildung 9: anhaftende Aluminiumhaut

Die anhaftende Aluminiumhaut wird anschließend im Labor (EDAX-Analyse) auf ihre chemische Zusammensetzung im Vergleich mit der Aluminium-Zusammensetzung analysiert. Der Analysenvergleich soll Fragen über die Kontamination der Alu-Schmelzbadoberfläche durch das aufgelegte Blähglasgranulat ohne und mit Coating-Varianten klären.

	Element-Bestandteil	Na	Mg	Al	Si	S
	Wt-% (MW)					
Oberfläche	Aluminium Barren	0	0.19	80.67	15.20	0
Oberfläche	Al-Schmelze - Standard-Glas	0.11	0.78	73.50	21.53	0.00
Oberfläche	Al-Schmelze - Kaolin	0.04	0.18	72.05	22.98	0.02
Oberfläche	Al-Schmelze - Al2O3	0.00	0.11	70.83	23,10	0.00

	Element-Bestandteil	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn
	Wt-% (MW)					
Oberfläche	Aluminium Barren	0	0.23	1,15	2,08	0.48
Oberfläche	Al-Schmelze - Standard-Glas	0.22	0.23	1,49	1,89	0.26
Oberfläche	Al-Schmelze - Kaolin	0.03	0.50	2,32	1,80	0.07
Oberfläche	Al-Schmelze - Al2O3	0.02	0.44	4,11	1,26	0.13

Tabelle 2: Messtechnische Kontrolle der Alu-Oberflächenkontaminationen durch Glaskontakt

Die Ergebnisse geben Aussagen über Aluminium-Kontamination durch die Granulatoberfläche bei der Kontakttemperatur von 750 °C. Die Beschichtungen der Oberfläche der

Danach wird Kaolin-Mehl (Metastar: $d_{100} < 10 \mu\text{m}$) 0,55 kg/15 Liter Granulat bzw. Tonerdemehl (Nabalox: $d_{g5} < 20 \mu\text{m}$) 1 kg/15 Liter Granulat während des laufenden Mischbetriebes gleichmäßig auf die benetzte Granulatschüttung aufpaniert bis eine dünne, anhaftende Mehloberfläche auf allen Granulatkörnern ausgebildet ist. Mehllüberschuss und Schuppenbildung sollen unbedingt vermieden werden.



Abbildung 11 : Trocknung der beschichteten OMEGA-BUBBLES

Die optimale Trockenzeit für die panierte Granulatschüttung beträgt ca. 12 Stunden.

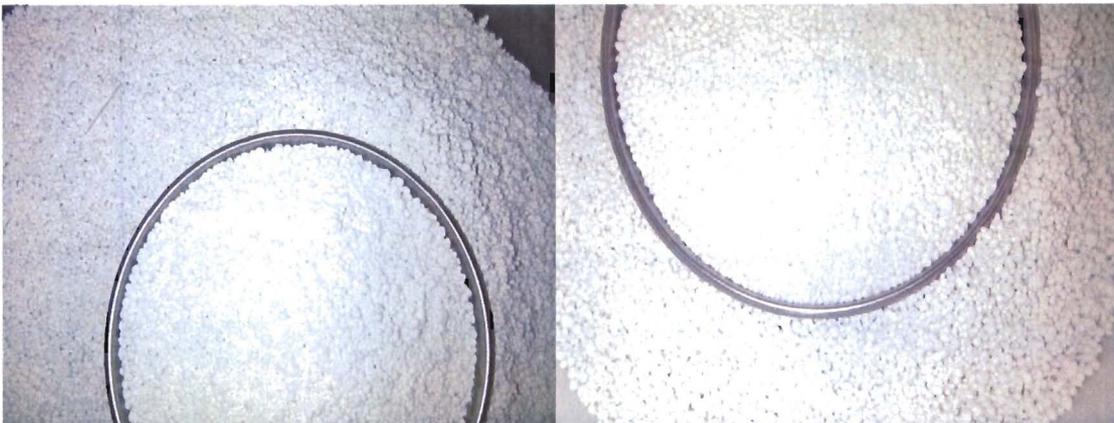


Abbildung 12: Panierung mit Metakaolin (links) und Panierung mit Tonerde(rechts)
Außen sind jeweils das coatede Produkte und innen das Ausgangsmaterial abgebildet.

Das coating-Granulat erfährt beim Durchlaufen eines beheizten Elektro-Drehrohr-ofen eine Oberflächen-Sinterung. Versuche ergaben als optimales Temperaturprofil folgende Einstellungen:

Eingangszone	ca.	230 oe
Mittelzone	ca.	330 oe
Austragszone	max.	600 oe



Abbildung 14: Tiegelofen Hindenlang SLEM-500 mit zugehörigen Tiegel

Die Legierung AISi9Cu3 wurde auf 700 °C aufgeheizt. Der Temperaturverlauf wurde mit handelsüblichen Thermoelementen, Basis Ni-CrNi, in dem Schmelzbad gemessen.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
9,1600 %	0,9230 %	2,0070 %	0,2300 %	0,1930 %	0,0190 %	0,0490 %	0,8330 %
Ti	Li	Na	Pb	Sn	V	Zr	Sb
0,0370 %	0,0015 %	0,0017 %	0,0570 %	0,0170 %	0,0087 %	0,0045 %	0,0072 %
Al							
86,4514 %							

Tabelle 3: Legierungszusammensetzung (Analyse vom 09.04.2013)

Nach Aufheizen der Schmelze auf 700 °C wurde die Abkühlkurve bei vollständig geöffnetem Deckel und folgenden Versuchsbedingungen gemessen:

- Messreihe 1, Badoberfläche abgekrätzt, ohne Abdeckung. Der Temperaturverlauf wurde ohne Abdeckung aufgezeichnet.
- Abdeckung der Badoberfläche mit 3 kg OMEGA-BUBBLES; Diese Masse wurde gleichmäßig auf die Badoberfläche der Schmelze aufgebracht. Bei 9400 cm³ Schüttvolumen und einer Badspiegeloberfläche (Ø 68 cm) von 3630 cm² ergibt dies eine Schichtdicke von ca. 2,6 cm. Die Schmelze wurde, wie in der Versuchsreihe 1, auf 700 °C aufgeheizt. Der Temperaturabfall in der Schmelze wurde über der Zeit halbstundenweise aufgetragen. Die isolierende Wirkung ist deutlich feststellbar (Schaubild 1).

- In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Schichtdicke der Abdeckung verdoppelt. Es wurden weitere 3 kg der OMEGA-BUBBLES gleichmäßig auf die Badoberfläche aufgebracht, Schichtdicke: 5,2 cm. Der Temperaturabfall bei geöffnetem Deckel ist identisch mit Versuchsreihe 2, das heißt, eine Verdoppelung der Schichtdicke ergibt keine weitere Verringerung des Temperaturabfalls.

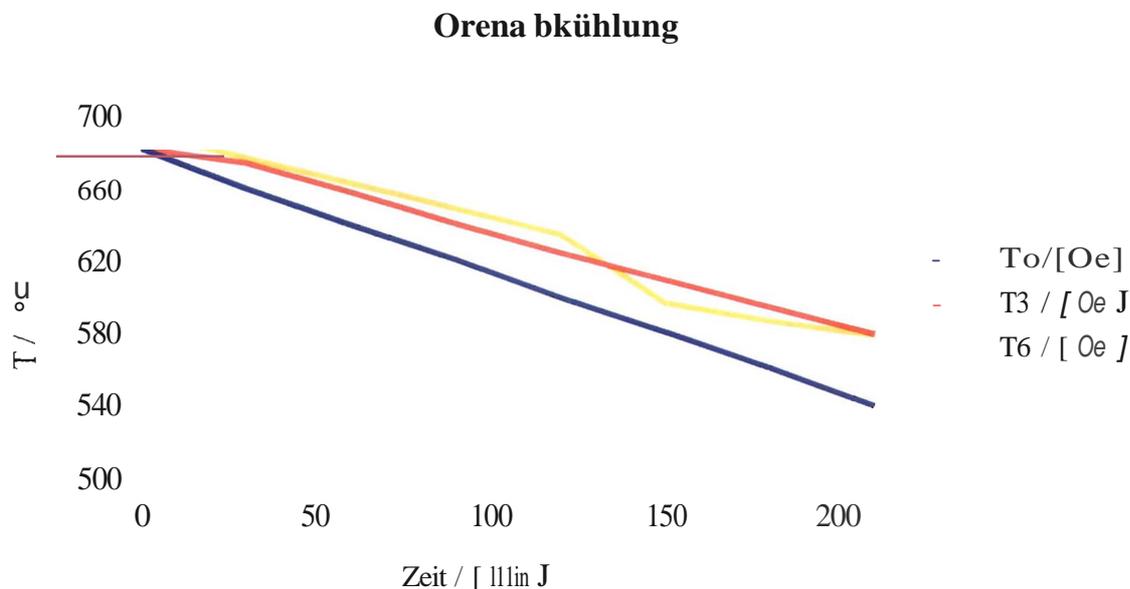


Abbildung 15 : Abkühlkurven bei unterschiedlicher Bedeckung

In einer zweiten Versuchsserie mit optimierter Coatingschicht gab es folgende Untersuchungen zur Wirkung des Abdeckmittels:

- mit geschlossenem Deckel ohne Abdeckung, bei geschlossenem Hallentor (Luftkonvektion)
- Abkühlung der Schmelze mit *geöffnetem* Deckel und *offenem* Hallentor, ohne Abdeckung
- Abkühlung der Schmelze mit einer 3 cm dicken Abdeckschicht (2,5 kg) offenes Hallentor
- Abkühlung der Schmelze mit einer 6 cm dicken Abdeckschicht (5 kg) BUBBLES und offenem Hallentor

Für die Versuche wurde ein widerstandsbeheizter Ofen der Firma Hindenlang eingesetzt, SLEM 250, mit einem handelsüblichen Tongrafittiegel der Firma MANIMUT-WETRO Schmelztiegelwerk GmbH mit einem Fassungsvermögen von 300 kg Schmelze. Der runde Tiegel hat einen Durchmesser oben von 580 mm und eine Tiefe von 680 mm. Die Badspiegeloberfläche beträgt 2642 cm².

Der Ofen hat einen Manteldurchmesser von 137 cm und eine Höhe von 106 cm. Die Mantelfläche beträgt 45622 cm², die Deck- und Bodenfläche jeweils 14741 cm². Die gesamte Wärme abführende Oberfläche des Ofens beträgt somit 75104 cm² bzw. 7,5 m². Die Schüttdichte des eingesetzten Abdeckmittels betrug 0,269 g/cm³.

Der Tongrafittiegel ist mit einem Mauerwerk aus Feuerfestmaterial umgeben, in dem die Widerstandselemente liegen. Die Wärme wird über das Feuerfestmaterial zum Ofenmantel, Decke und Boden geleitet und von dort an die Umgebung abgegeben.

Der Tiegel wurde mit Masseln bestückt, 280 kg (gleiche Legierungszusammensetzung wie in erster Versuchsserie). Die Schmelze wurde auf 680 °C aufgeheizt, die Heizung wurde dann abgestellt und die Abkühlung der Schmelze unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen über der Zeit aufgezeichnet.

Die Wärmemenge Q, die pro Stunde vom Schmelztiegel über das Ofenfutter, das Feuerfestmaterial, an den Mantel, den Boden und die Deckelschicht pro Stunde abgegeben wird, berechnet sich aus:

$$P = \Delta Q / \Delta t = m_{\text{Schmelze}} \cdot c_{p,\text{flüssig}} \cdot \Delta T / \Delta t$$

mit:

- P Leistung des Wärmeverlustes
- ΔQ an die Umgebung abgegebene Wärmemenge
- c_{p,flüssig} spezifische Wärme der Legierung im flüssigen Zustand
- ΔT/Δt Temperaturabnahme der Schmelze in einer Stunde
- Δt Bezugszeit

Die Schmelzmasse ist 280 kg, die spezifische Wärme der Legierung ist c_{p,flüssig} = 1050 J/(kg · K).

Bei geöffnetem Ofendeckel wird Wärme durch Konvektion und Strahlung über die Schmelzbadoberfläche an die umgebende Luft zusätzlich abgeführt.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

1,	<p>Abkühlung der Schmelze bei geschlossenem Deckel und geschlossenem Hallentor (Messung vom 26.08.2013): Die Abkühlkurve ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Schmelze kühlt in 4000 s um 40 K ab, was einer Abkühlung von 1 K in 100 s entspricht. Die Abkühlung ist nahezu linear. Durch Strahlung und Konvektion verliert die Schmelze: $P = 280 \text{ kg} \cdot 1050 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot \Delta T = 2940 \text{ J/s}$ $\Delta Q = 2,94 \text{ kWh je Stunde}$</p>
2.	<p>Abkühlung der Schmelze bei geöffnetem Deckel (Messung vom 21.08.2013): Die Abkühlkurve ist in Abbildung 12 dargestellt. Erwartungsgemäß kühlt die Schmelze schneller ab, nämlich von 665 °C auf 615 °C, das sind 50 K in 3000 s bzw. 1 K in 60 s. Die Abkühlung ist nahezu linear. Durch Strahlung und Konvektion verliert die Schmelze: $P = 280 \text{ kg} \cdot 1050 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot \Delta T = 4900 \text{ J/s}$ $\Delta Q = 4,9 \text{ kWh je Stunde}$</p>
3.	<p>Abdeckung mit 3 cm OMEGA-BUBBLES (Messung vom 22.08.2013): Die Abkühlkurve ist in Abbildung 13 zu erkennen. Die Schmelze kühlt in 9000 s um 80 K ab, was einer Abkühlung von 1 K in 113 s entspricht. Die Abkühlung ist nahezu linear. Durch Strahlung und Konvektion verliert die Schmelze: $P = 280 \text{ kg} \cdot 1050 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot \Delta T = 2602 \text{ J/s}$ $\Delta Q = 2,6 \text{ kWh je Stunde}$ Diese Schmelze ist effektiver isoliert, als durch den massiven Deckel, der mit Feuerfestmaterial an der Unterseite ausgekleidet ist.</p>

4. Abdeckung mit 6 cm OMEGA-BUBBLES (Messung vom 30.08.2013):
 Die Abkühlkurve ist in Abbildung 14 zu erkennen. Die Schmelze kühlt in 5200 s um 30 K ab, was einer Abkühlung von 1 K in 173 s entspricht.
 Die Abkühlung ist nahezu linear. Durch Strahlung und Konvektion verliert die Schmelze:
 $P = 280 \text{ kg} \cdot 1050 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot \Delta T = 1699 \text{ J/s}$
 $\Delta Q = 1,7 \text{ kWh je Stunde}$

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der 2. Versuchsserie
 Die Abdeckmasse wurde nach den Versuchen jeweils vollständig von der Badspiegeloberfläche entfernt.

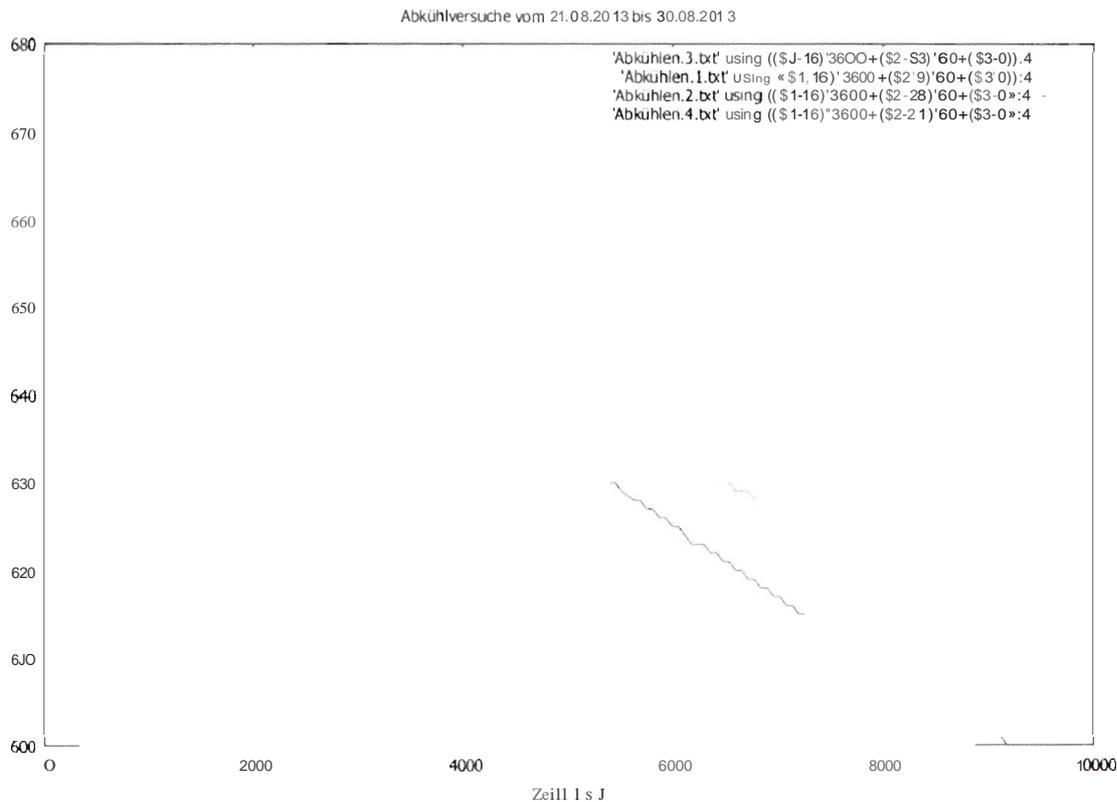


Abbildung 16: Abkühlung der Schmelze bei geschlossenem Deckel und geschlossenem Hallentor, bei geöffnetem Deckel, Abdeckung mit 3 cm und 6 cm OMEGA-BUBBLES
 Die Wärmeverluste der Schmelze ergeben im Vergleich (100 % sei bei offenem Deckel):

Versuch	alles offen	Deckel zu	3 cm BUBBLES	6 cm BUBBLES
P / [W]	4900	2940	2602	1699
P / [%]	100	60	53	35
P / [kWh / h]	4,9	2,94	2,6	1,7
Kosten / [€ / h]	0,98	0,59	0,52	0,34

Tabelle 4: Vergleich der Wärmeverluste bei unterschiedlicher Abdeckung
 Annahme für den Strompreis: 0,20 €/kWh

Eine dritte Versuchsserie umfasste Untersuchungen des Verhaltens der coateden OMEGA-BUBBLES nicht nur im Hinblick auf die isolierende Wirkung, sondern auch zum Schutz der Schmelzen gegenüber der Reaktion mit der umgebenden Atmosphäre. Die Untersuchungen der Schutzwirkung der Abdeckung, abhängig von der Temperatur der

Schmelze, der Zeit und der Zusammensetzung ist ein wichtiges Ergebnisziel für die Anwendung bei der Herstellung von Sand- und Kokillengussteilen.

Drei Legierungen wurden ausgewählt: AlSi9Cu3, AlSi10Mg und AlSi11 mit sehr niedrigem Eisengehalt. Die für die Versuche eingesetzten Schmelzen unterscheiden sich im Hinblick auf den Wärmeinhalt, bedingt vor allem durch den Siliziumgehalt. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der 3 Schmelzen unterscheiden sich diese in der thermischen Leitfähigkeit erheblich, sie ist für die AlSi11 (eisenfrei) deutlich höher als bei der AlSi9Cu3. AlSi10Mg und AlSi11 sind kupferfrei, AlSi9Cu3 ist kupferhaltig. AlSi10Mg und AlSi9Cu3 sind Recyclinglegierungen, AlSi11 ist eine Primärlegierung, hergestellt aus reinem, raffinierten Aluminium (Fe-Gehalt: < 0,1 %).

Die Legierungen haben folgende Zusammensetzung:

Nr.	Legierung	Si / [%]	Fe / [%]	Cu / [%]	Mn / [%]	Mg / [%]
1.	AlSi9Cu3	8,72	0,80	1,12*	0,19	0,18
2.	AlSi10Mg	9,18	0,67	0,03	0,07	0,39
3.	AlSi11	10,16	0,13	0,01	0,56	0,23

Tabelle 5: Legierungszusammensetzungen für die 3. Versuchsreihe

* Der Kupfergehalt sollte nach DIN EN 1706 mindestens 2,0 % sein. Der geringe Kupfergehalt stört jedoch die Untersuchungsergebnisse nicht.

Die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Schmelzen bewirken ihre unterschiedliche Reaktion vor allem bei der Aufnahme von Wasserstoff und Sauerstoff aus dem Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre. Untersucht werden sollte die Schutzwirkung der Abdeckung gegenüber der Atmosphäre. Die ist unter Umständen neben der isolierenden Wirkung ein erhebliches Argument für die Nutzung der OMEGA-BUBBLES.

Das Versuchsprogramm umfasste die Ermittlung der Wärmeverluste über der Zeit bei Tiegelöfen, abhängig von der Warmhaltetemperatur, sowie die Bestimmung der Abkühlungskoeffizienten für AlSi12, AlSi9Cu3, AlSi10Mg ohne Abdeckung und mit Abdeckungen, Schichtdicken 2, 4, 6, 8, 1 cm. Die Gasaufnahmen wurden mit und ohne Veredlung bestimmt.

Bei den bisherigen Versuchen hat sich gezeigt, dass bereits geringe Schichtdicken der coatingten OMEGA-BUBBLES eine sehr gute Isolierung gewährleisten. Es wurden Langzeitversuche (jeweils 1 Test) mit 0, 2, 5 und 10 cm Schichtdicke durchgeführt. Eingesetzt wurden die gecoateten OMEGA-BUBBLES. Verwendet wurde der Ofen SL 300, wie bisher, mit jeweils 300 kg Schmelze. Die Versuchsreihen wurden mit den Schmelzen aus Masseln im Ausgangszustand bei offenem Ofendeckel durchgeführt. Die Aufnahme von Wasserstoff wurde untersucht.

Ergebnisse der Abkühlversuche:

Experimentell zeigte sich, dass bei 6 cm Abdeckung auch nach Stunden die Hand aufgelegt werden kann, obwohl 6 cm tiefer mindestens 650°C herrschen. Berechnungen zur Luftkonvektion zwischen den Kugelschichten oder zur Erstarrung der Schmelze zwischen der untersten schwimmenden Schicht haben wir nicht durchgeführt. Die Wärmestrahlung

der weißen OMEGA-BUBBLES ist gering, das ist auch gut mit der darüber gehaltenen Hand fühlbar. Dies bedeutet, dass bei 6 cm dick abgedeckter Badspiegeloberfläche keine nennenswerten Verluste über die abgedeckte Oberfläche durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung gemessen werden.

Es wurden jeweils etwa $m = 280 \text{ kg}$ Schmelze abgekühlt, die zu Grunde gelegte spezifische Wärmekapazität beträgt jeweils $c_p = 1050 \text{ J / (kg * K)}$.
 Abkühlleistungen für die Legierung AlSi9Cu3:

Schichtdicke / I cm I	Δ Zeit / I s I	Δ Temperatur / I K J	Abkühlung / I mK/s J	Leistung / I kW I
0	5400	- 74	- 13,7	- 4,0
3	9900	- 80	- 8,0	- 2,4
6	11700	- 86	-7,4	- 2,2
9	12600	- 85	-6,7	- 2,0

Abkühlleistungen für die Legierung AlSi10Mg:

Schichtdicke / I cm I	Δ Zeit / I s I	Δ Temperatur / I K J	Abkühlung / I mK/s I	Leistung / I kW I
0	7064	- 94	- 13,3	- 3,9
6	10800	- 83	- 7,7	- 2,3

Abkühlleistungen für die Legierung AlSi7Mg:

Schichtdicke / I cm I	Δ Zeit / I s I	Δ Temperatur / r K J	Abkühlung / I mK/s J	Leistung / I kW j
0	5400	- 82	- 15,2	- 4,5
6	9000	- 80	- 8,9	- 2,9

Tabelle 6: Abkühlleistungen für verschiedene Legierungen

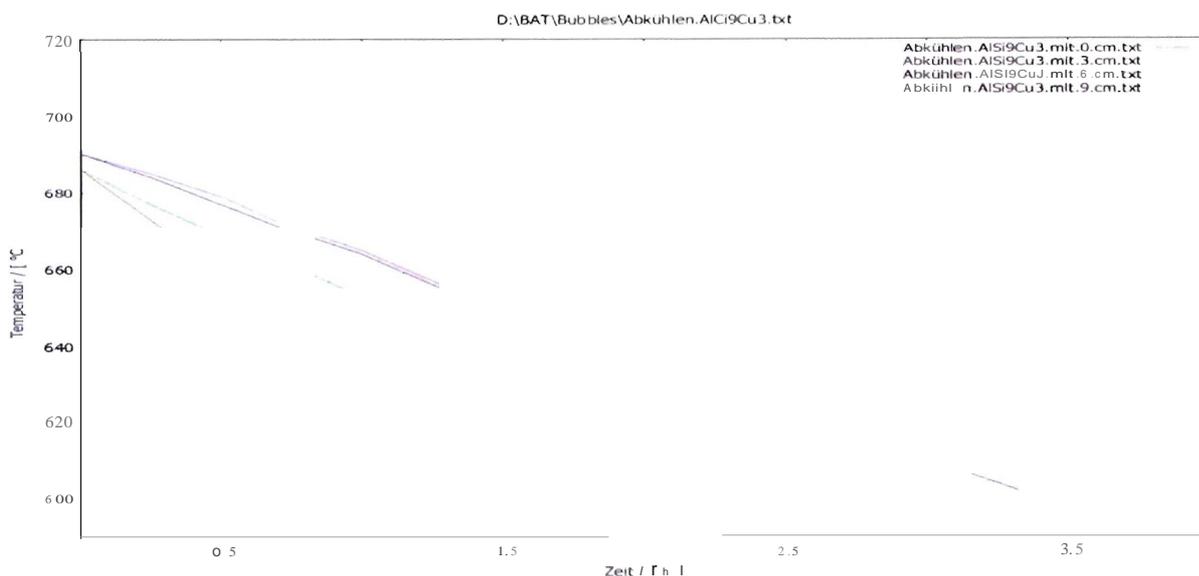


Abbildung 17: Abkühlkurven für die Legierung AlSi9Cu3 bei unterschiedlichen Schichtdicken des Abdeckmittels

Reaktionen der OMEGA-BUBBLES mit der Schmelze

Die OMEGA-BUBBLES reagieren bei den betrachteten Temperaturbereichen nicht mit der Schmelze. Die Benetzung der OMEGA-BUBBLES ist so schlecht, dass sie auch nach dem Erstarren der Schmelze leicht vom Metall gelöst werden können, siehe Abbildung.



Legierung AISi9Cu3

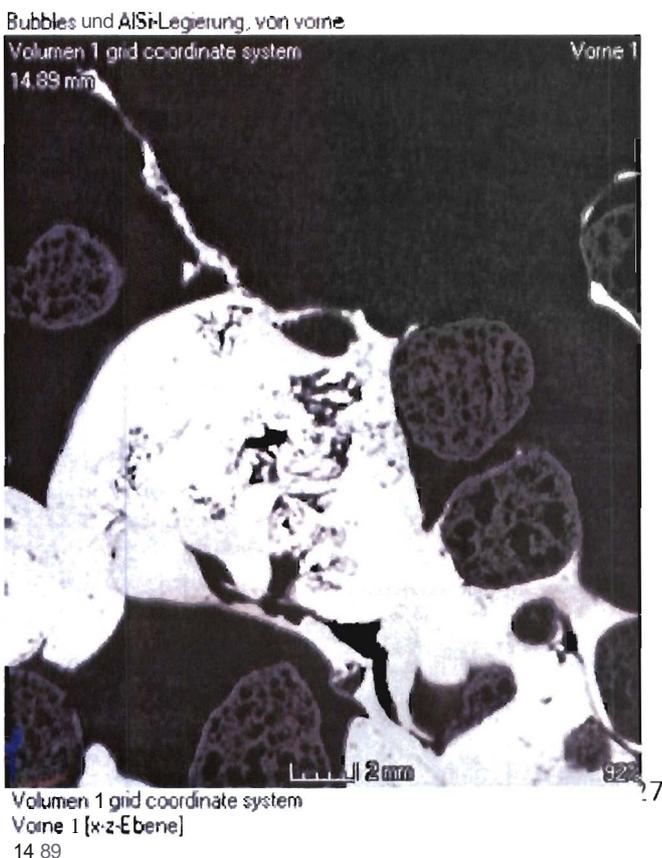
Legierung AISil OMg

Abbildung 17: OMEGA-BUBBLES und erstarnte Legierungen

Bei Abdeckung gehen die Wärmeverluste praktisch vollständig über das Ofengefäß und den Ofenmantel. Die ausreichende Abdeckung von 6 cm coated OMEGA-BUBBLES führt je nach spezifischer Wärmekapazität der Schmelze zu einer Verringerung der Energie-/ Temperaturverluste auf

AISi9Cu: 55 %, AISi10Mg: 59 %, AISi11: 64 %.

An zwei Metall-Bubble-Krätzen wurden 3D-CT-Aufnahmen angefertigt. Die Aufnahmen sollten nachweisen, ob es Reaktionen zwischen den Schmelzen und den Körnern gibt.



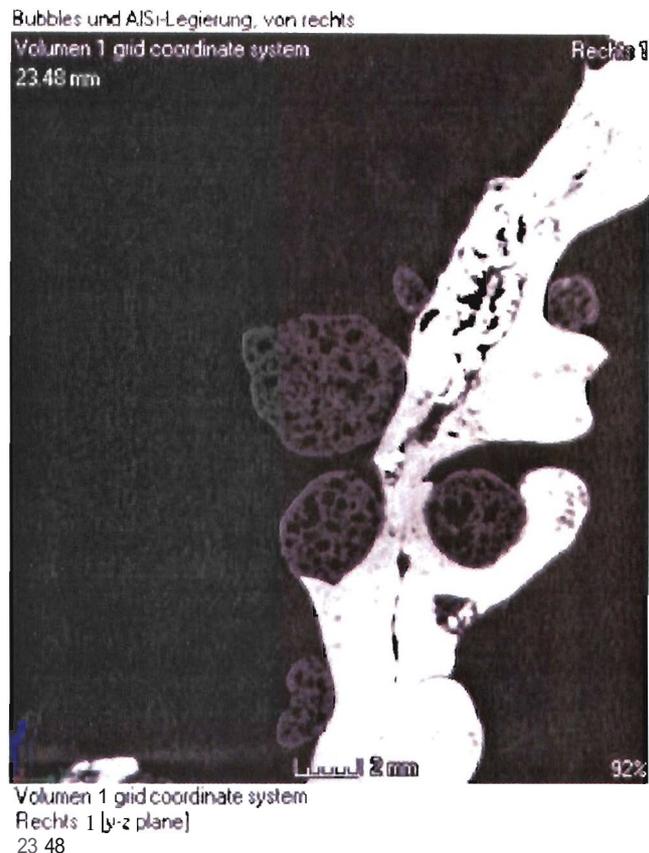


Abbildung 18: Schnitte aus den gescannten Bildern.

Auf den Schnitten, Abbildung 18, sind einzelne Körner weitgehend beziehungsweise teilweise von Schmelze umgeben. Auf der rechten Abbildung ist ein gelöstes Korn, das teilweise von einem Metallmantel umgeben ist. Der Metallmantel hat sich von dem Korn gelöst. Eine Reaktion der Schmelze mit dem Material der OMEGA-BUBBLES hat, soweit erkennbar, nicht stattgefunden.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Schmelzen im Ausgangszustand bei 680 °C mit Stickstoff abgebenden Tabletten jeweils circa 10 min entgast. Die Schmelzen wurden nach der Entgasung ohne Veredelung auf Temperaturverlust und Gasaufnahme untersucht. Danach wurden die Versuche wiederholt, wobei sie mit Natrium (Na) veredelt waren. Eine weitere Versuchsreihe wurde durchgeführt mit der Dauerveredelung durch Strontium (Sr).

Ergebnisse der Gasaufnahmen der Schmelzen

Die Versuchsreihen wurden mit den Schmelzen aus Masseln im Ausgangszustand bei *offenem* Ofendeckel durchgeführt. Die Aufnahme von Wasserstoff wurde untersucht.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Schmelzen im Ausgangszustand bei 680 °C mit Stickstoff abgebenden Tabletten jeweils circa 10 min entgast.

Die Schmelzen wurden nach der Entgasung ohne Veredelung auf Temperaturverlust und Gasaufnahme untersucht. Danach wurden die Versuche wiederholt, wobei sie mit Natrium (Na) veredelt waren. Eine weitere Versuchsreihe wurde durchgeführt mit der Dauerveredelung durch Strontium (Sr).

Abkühlversuche wurden für die Legierung AlSi9Cu3 mit Veredlung mit den Schichtdicken des Abdeckmaterials 0, 3, 6 und 9 cm gefahren.

Zur Veredlung mit Na wurde grundsätzlich metallisches Natrium (ca. 50 g) zugegeben, das in einer Aluminiumkapsel luftdicht eingeschlossen ist, um Reaktionen mit der Atmosphäre zu vermeiden. Nach dem Abkrätzen der Badspiegeloberfläche wurde die Kapsel mit einer Glocke in der Schmelze untergetaucht. Ein Teil des Natriums geht dennoch in die Badspiegeloberfläche und brennt dort ab. Die Schmelze wird nochmals abgekrätzt.

Vor und nach jeder Behandlung wurden Analysenproben gezogen. Der H₂-Gehalt wurde über der Zeit mit der Unterdruckdichteproofung ermittelt:



Abbildung 19: Unterdruckdichteproofung

Die Schmelze wird in Probetiegel gefüllt und bei Unterdruck (etwa 40 mbar) zum Erstarren gebracht. Wenn die Schmelze eingeschlossenes Gas enthält, so vergrößert sich im Unterdruck der erstarrende Körper durch Ausscheidung innenliegender Gasporen. Anschließend wird Volumen und Dichte der Probe mit der Auftriebsmethode nach Archimedes ermittelt und mit der Dichte einer Probe verglichen, die unter Normaldruck erstarrte.

Die Auswertung dieser Messreihen bestätigt, dass mit etwa 6 cm Schichtdicke der Abdeckung eine optimale Energieeinsparung erreicht wird.

Weiter zeigte sich, dass Natrium (Na) unabhängig von der Schichtdicke jeweils abhängig von der Zeit abbrennt. Somit ist für das Abbrennen des Na vor allem der in der Schmelze enthaltene Sauerstoff verantwortlich.

Sr brennt mit und ohne OMEGA-BUBBLES gleichmäßig und langsamer als Na ab. Da Sr elektronegativer als Al ist, bewirkt es eine Aktivität zur Verhinderung der Oxidation von Aluminium. Laut Legierungshersteller muss bei AlSi11 eine Mindestmenge Sr größer 80 ppm enthalten sein.

Aus diesem Grunde wurden die weiteren Versuchsreihen nur noch mit 0 cm und 6 cm coatierter OMEGA-BUBBLES Abdeckung durchgeführt.

Ergebnisse der Absaugversuche

Zum Einsatz kam die industrielle Sauganlage der Firma Wieland Lufttechnik GmbH & Co. KG

MaxVac Kompakt mit einer elektrischen Leistung von 11 kW, bestehend aus:

- dem eigentlichen Sauger,
- Vorabscheider und Sammelbehälter,
- Air Shock Filterreinigung,

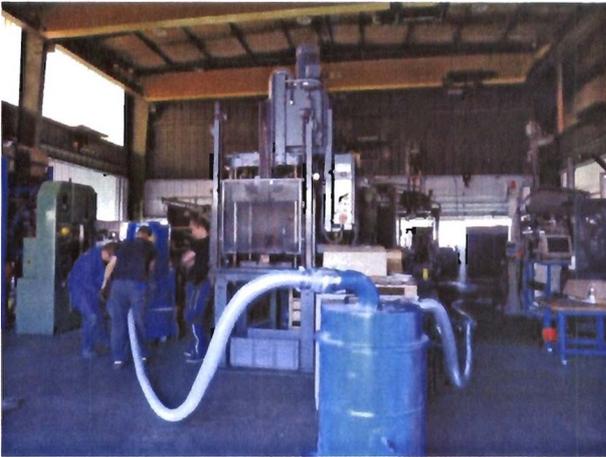


Abbildung 20: Absaugeinrichtung

Der Versuch erfolgte im Widerstandsbeheizter Schmelz- / Warmhalteofen der Firma Hindenlang vom Typ SLEM 250 mit einem handelsüblichen Tongrafittiegel der Firma MAMMUT-WETRO Schmelztiegelwerk GmbH. Eingeschmolzen waren 150 kg der Legierung AlSi9Cu31, Warmhaltetemperatur 600 °C. Abgedeckt wurde die Schmelze mit 3,8 kg coatierten OMEGA-BUBBLES, dies entspricht einer Schichtdicke von 5 cm.

Die coatierten OMEGA-BUBBLES ließen sich von der Schmelzbadoberfläche sehr zügig absaugen (mehr als 90 % nach ca. 5 cm) abgesaugt. Die gesamte abgesaugte Menge aus BUBBLES war im Sammelbehälter: Vereinzelt wurden mit den coatierten OMEGA-BUBBLES aus der Schmelzbadoberfläche feine, kleine Oxidhäute mitgesaugt, die jedoch mit den OMEGA-BUBBLES nicht verklebt waren. In der Absauganlage ist ein Behälter zum Auffangen des abgeschiedenen Filterstaubes. In dem Behälter gab es jedoch nur geringfügige Staubanteile.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Absaugtechnik auf die speziellen Anforderungen anzupassen ist und ein Wiedereinsatz der abgesaugten OMEGA-BUBBLES problemlos möglich ist.

3.5 Ergebnisse vom Einsatz der coatierten OMEGA-BUBBLES in einer Giesserei-Produktionsanlage

Die Versuche dienten dem Ziel, die in der Versuchsgießerei erhaltenen Ergebnisse in einer Anlage eines Aluminium-Umschmelzwerkes zu verifizieren.

Das Abdeckmittel (ca. 0,5 m³) besteht aus gecoatetem OMEGA-BUBBLES (Kalk-Natron-Schaumglas mit Al₂O₃-Beschichtung, Korngruppe 2 - 8 mm). Die Herstellung und Lieferung erfolgte durch OMEGA MINERALS Production & Technology GmbH in Detmold.

Die Schüttdichte beträgt ca. 250 kg/m³.

Das Abdeckmittel besitzt kein gesundheitliches Gefährdungspotential.

Das Abdeckmittel soll auf die Alu-Schmelze mit der Schichtdicke von ca. 6 cm aufgelegt werden, um die Wärmeabstrahlung von der Schmelzbadoberfläche zu verringern. Der Abkühlprozess nach Abschaltung der Beheizung soll zwischen 800 °C bis 650 °C zeitlich verfolgt werden.

Beim Einsatz soll keine Kontamination der Alu-Schmelze durch das Granulat nachweisbar sein. Dazu sind Analysen durchzuführen.

Der Versuchsdurchführung diene ein Induktionstiegelofen I-Ofen 3 mit den technischen Parametern:

Induktionsbeheizung	3 MW	
ehargenbetrieb	2-3 /Schicht	
Aluminium Inhalt	3,725 t	
Durchmesser innen:	900 mm	(Abstrahlfläche)
Badtiefe ca.	1,7 m	
Durchmesser außen:	1300 mm	
Wanddicke gesamt:	200 mm	
Untere Schmelztemperatur:	700 °C	
Aufheiztemperatur:	850 °C	
Abgießtemperatur:	800 °C	

Die Aufheiztemperatur wird nach technologischer Praxis auf ca. 850 °C angefahren, um für den Abstezeitraum und für den Abguss der Schmelze Temperaturreerven vorzuhalten.

Das Programm des ersten Versuchs umfasste diese Abfolge:

- I-Ofen 3 steht bei 777 °C mit Alu-Schmelze im Wartebetrieb
- Aufheizen innerhalb von 20 min auf 850 °C
- Auflegen der Abdeckschicht ca. 6 cm (entspricht ca. 60 l Granulat)
- Abschalten der Induktionsbeheizung
- Messung der Änderung der Schmelztemperatur über die Abschaltzeit von ca. 4 Std.
- Absaugen des Abdeckschicht

Der I-Ofen 3 wurde mit der Schmelze innerhalb von 20 min von 777 auf 868 °C Schmelzbad-Temperatur aufgeheizt. Das Thermoelement zur Temperaturmessung wurde ca. 10 cm unter der Oberfläche fixiert.

Anschließend wurden ca. 60 l gecoatete OMEGA-BUBBLES (manuell mit Eimer) auf die Schmelzbadoberfläche aufgetragen und gleichmäßig verteilt. Daraus ergaben sich etwa 6 cm Abdeckschicht. Der Temperaturverlauf wurde über die Versuchszeit stetig aufgezeichnet.

Als Vergleich dient der Temperaturverlauf ohne Abdeckung der Schmelze.

Am Ende des Versuches nach 240 min wurde festgestellt, dass es durch einen Fehler nicht zu einer vollständigen Abschaltung der elektrische Induktionsheizung kam, sondern in einem Haltebetrieb bei 10 % Heizleistung verblieben war.

Damit waren die Temperatur-Messergebnisse für den 1. Versuchstag nicht verwertbar.

Als Vergleich wurde vom Betreiber zusätzliche eine Temperatur-Verlustkurve für eine Abdeckung mit einer ca. 30 mm dicken Keramik-Faser (Fiberfax) zur Verfügung gestellt. Diese Abdeckmethode wird kann nur in Notfällen auf Grund fehlender Alternative praktiziert werden.

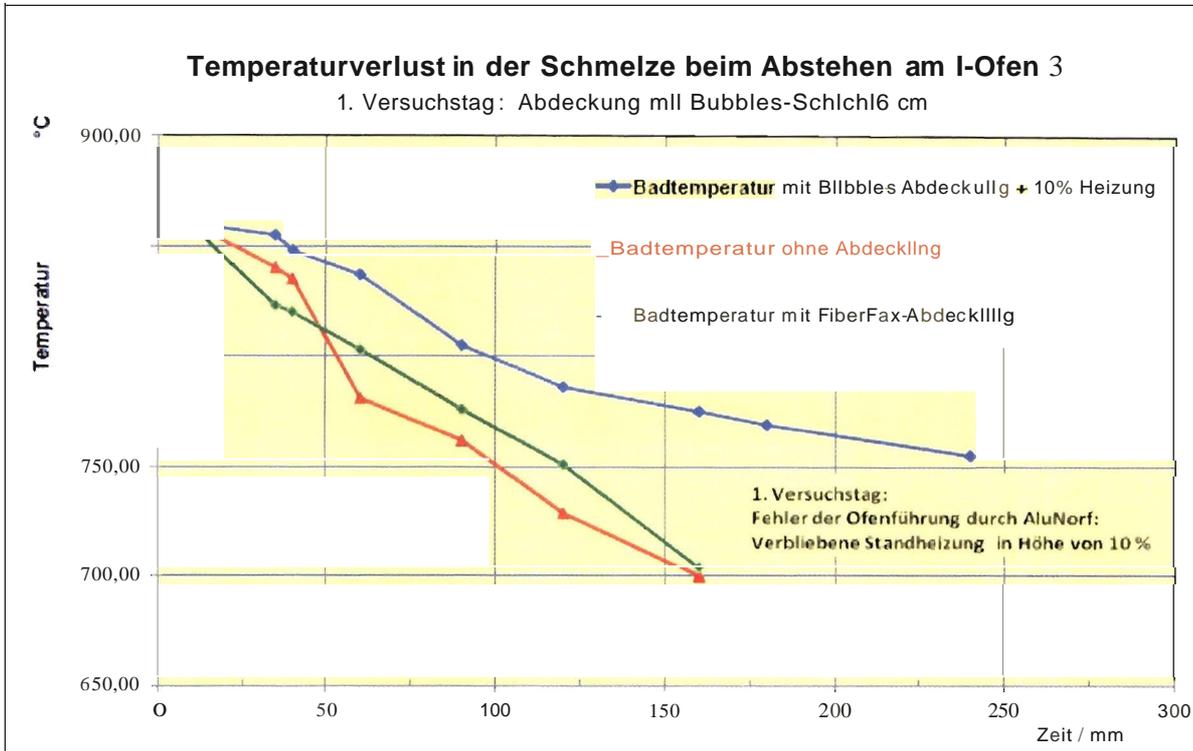


Abbildung 24: Temperaturverlust in der Alu-Schmelze mit und ohne Abdeckmittel
Erster Versuchstag

Zu Abschluss des Versuches wurde die Abdeckung mit dem Industriestaubsauger der Firma Wieland GmbH abgesaugt.



Abbildung 25: Industrie-Staubsauger der Firma Wieland

Die Absaugung erfolgte mit einem 1,5 m langen Metallrohr und anschließend über einen Wellrohrschlauch in einen Vorlage-Kübel. Das Granulat wurde darin gesammelt, die Absaugluft über einen integrierten Tuchfilter wieder nach außen geleitet.

Die Absaugung funktionierte entsprechend der provisorischen Methode problemlos. Zu beachten ist, dass ein vorbereitetes Absaug-Boot als Vorsatz am Saugrohr aus Fertigungsgründen für den Versuch noch nicht verfügbar war. Es sollte ein Eintauchen des Rohres in die Schmelze verhindern. Deshalb musste das Absaugen unter besonderer Vorsicht erfolgen, um keine Alu-Schmelze in das Absaugrohr zu saugen..

Die gecoateten OI'v1EGA-BUBBLES konnten, bis auf eine verschmolzene Restmenge auf der Schmelze, vollständig so separiert werden, dass diese erneut einsetzbar sind.



Abbildung 26: Abgesaugte Schmelzbad-Oberfläche bei 760 °C

Nach dem Absaugen der Abdeckschicht wurde eine ca. 1 cm dicke, zähflüssige "Schmelzhaut" auf der Schmelzbadoberfläche festgestellt. Diese Schmelzhaut konnte mit einem Haken abgezogen und entfernt werden. Sie besteht aus verschmolzenen OMEGA-BUBBLES, welche durch die Kontakttemperatur von mehr als 850 °C geschmolzen sind. Die Struktur der Schmelzhaut zeigt eine Dunkelfärbung, sie resultiert aus einer Verschlackungsreaktion zwischen den OMEGA-BUBBLES und dem Aluminium. Die Ursache ist die Überschreitung der Temperaturstabilität der BUBBLES über 800 °C.



Abbildung 27: Schmelzhaut aus verschmolzenen BUBBLES im Kontakt mit der Badschmelze

Die Temperaturstabilität kann durch Veränderung des coating auf der BUBBLES-Oberfläche weiter erhöht werden. Dabei sollte das Bindemittel (Na-Silicat) als Alkalitäger gegen Kieselol oder Aluminiumphosphat (Feuerfestbinder) ausgetauscht werden.

Dies ist im Folgeprojekt umzusetzen.

Der I-Ofen 3 wurde bei der Wiederholung des Versuchs mit der Schmelze von 777 auf 850 °C Schmelzbad-Temperatur aufgeheizt. Danach wurde die Induktionsheizung vollständig ausgeschaltet. Das Thermoelement zur Temperaturmessung wurde ca. 10 cm unter der Oberfläche fixiert.



Abbildung 28: Alu-Tiegelschmelzofen I-Ofen 3 mit Badtemperatur 852 °C

Anschließend wurden BUBBLES auf die Schmelzbadoberfläche aufgetragen und gleichmäßig verteilt. Daraus ergab sich eine Abdeckschicht von etwa 6 cm. Der Temperaturverlauf wurde wieder über die Versuchszeit stetig aufgezeichnet.



Abbildung 29: Abdeckung der Schmelze mit BUBBLES (Thermoelement von oben links)

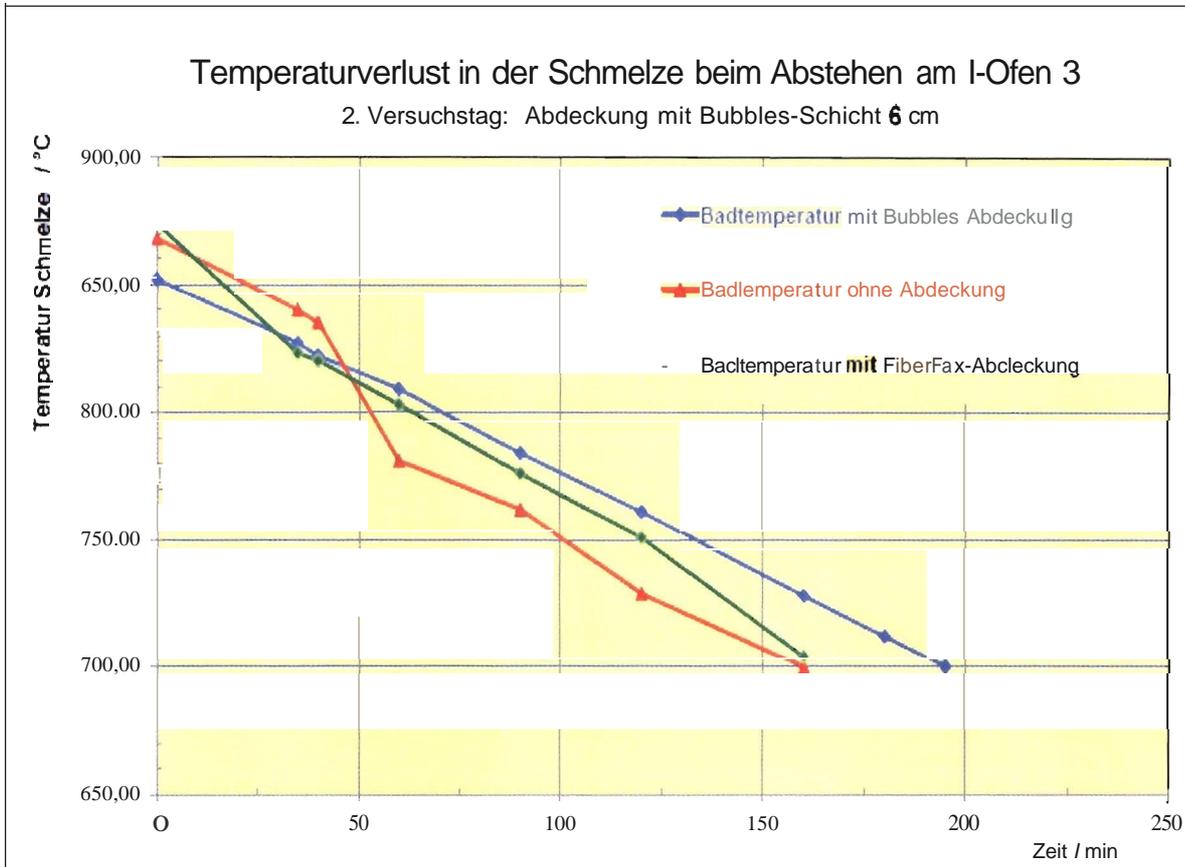


Abbildung 30: Temperaturverlust in der Alu-Schmelze mit und ohne Abdeckmittel
2. Versuchstag

Aus dem Temperaturverlauf ist zu erkennen, dass die Alu-Schmelze mit der BUBBLES-Abdeckschicht (6 cm) einen Zeitgewinn von ca. 30 min bis zum Erreichen der gleichen Badtemperatur von minimal 700 °C aufweist. Unter 700 °C wird das Abgießen der Schmelze beeinträchtigt. Eine Erhöhung der Abdeckschicht auf 10 cm Schichtdicke kann diesen Zeitraum zum Warmhalten der Schmelze weiter verlängern. Und dies erfolgt trotz des Einflusses der Kühlung der Induktionsspulen des Ofens.

Die Absaugung der OMEGA-BUBBLES-Abdeckschicht erfolgte nach gleichem Prinzip, wie am 1. Versuchstag. Es konnte festgestellt werden, dass die "Schmelzhaut" nicht in der Beschaffenheit wie am 1. Versuchstag ausgebildet war. Die Granulatkörner klebten zwar an der Unterseite der Abdeckschicht im Kontakt mit der Alu-Schmelze zusammen, waren aber nicht verschmolzen, sondern nur versintert.



Abbildung 31 : abgesaugte Schmelzbad Oberfläche (nachgereinigt durch Abkrätzen)



Abbildung 32 : Restmaterial der Abdeckung nach dem Absaugen (Alu-Klumpen entstanden durch Abkrätzen)

Die unterste Schicht der OMEGA-BUBBLES war vor dem Abkrätzen ca. 4 Stunden mit der Schmelze in direktem Kontakt. Von der Badoberfläche entnahm der Anlagenbetreiber Metallproben zur Analyse. Es konnte keine Beeinflussung nachgewiesen werden [Sim 2014].

Der Einsatz im Schmelzbetrieb lieferte folgende Erkenntnisse:

- Technologisch bedingt kann die Badoberfläche durchaus Temperaturen bis 850° C erreichen.
- Die Absaugung der Abdeckschicht funktionierte trotz provisorischer Ausstattung prinzipiell gut. Verbesserungen der Absaugleistung sowie des Absaugrohres sind erforderlich. Die Absauganlage muss wegen vorhandener Alu-Stäube eine ex-geschützte Ausführung nachweisen.
- Die Temperaturbeständigkeit der gecoateten OMEGA-BUBBLES war nur bis max. 800°C gewährleistet (Entwicklungsziel waren 700 °C). Darüber begann eine Versinterung bzw. Verschmelzung zu einer Schmelzhaut auf der Alu-Schmelzbad-Oberfläche. Eine Nachbesserung des Coating ist unbedingt erforderlich und möglich.
- Durch Austausch des Coating-Bindemittels gegen Bindemittel mit höherer Temperaturbeständigkeit (alkalifrei) lässt sich die Beständigkeit über 800°C erreichen.
- Der Temperaturverlauf am 2. Versuchstag zeigte einen Zeitgewinn von ca. 30 min bis zum Erreichen von 700°C gegenüber der Abdeckmethode mit Fiberfax-Matte. Bei einer Erhöhung der Abdeckschicht auf ca. 10 cm oder mehr würde dieser Zeitgewinn noch deutlicher auffallen bzw. die Auskühlung der Schmelze wird über 700 °C gestoppt. Voraussetzung dafür ist die sichere Temperaturstabilität bei mindestens 800 °C.

Beim Absaugen wurde die Versinterung bzw. Verschmelzen der BUBBLES im Kontakt mit der Alu-Schmelze festgestellt. Vorteilhaft war die Trennschicht gegenüber der Schmelze beim Absaugen. Das Eintauchen in die Alu-Schmelze konnte besser verhindert werden.

Eine Erhöhung der Temperaturbeständigkeit größer 850 °C, unter Beibehaltung der aktuellen Schüttdichte von ca. 250 - 270 kg/m³ (entsprechend niedrige Wärmeleitfähigkeit) ist nicht realistisch. Die thermischen Eigenschaften der speziellen BUBBLES befinden sich an der Anwendungsgrenze.

Weitere Steigerung der Temperaturbeständigkeit über 850 °C ist mit einem Anstieg der Schüttdichte und damit der Wärmeleitfähigkeit verbunden.
Die Isolierwirkung der Abdeckschicht wird schlechter!

- Unter dieser Betrachtung wird festgestellt, dass die Ausbildung einer dünnen "Schmelzhaut" zwischen Alu-Schmelze und Abdeckschicht keine Nachteile für die Qualität des Aluminiums brachte.

Das Absaugen über der Schmelzhaut bessere Bedingungen gegen das Eintauchen des Absaugwerkzeuges in die Schmelze zeigte.

Das Abkrätzen der Schmelzhaut auf der Schmelzbad-Oberfläche problemlos möglich ist.

Der Materialverlust an Abdeckmittel durch das Abkrätzen der Schmelzhaut beträgt wenige Prozent.

- Die Ausbildung einer Schmelzhaut bewirkt also keine nennenswerte Nachteile und wäre somit zulässig.

Auf dieser Grundlage sollte die Schmelzhaut Bestandteil des Abdecksystems werden.

Sie bildet einen Temperaturgradienten zwischen Alu-Oberfläche und Abdeck-Unterseite aus.

Die darüber liegende BUBBLES-Abdeckschicht wird niedrigeren Temperaturen als 800 °C ausgesetzt.

Eine Schädigung des Abdeckmittels tritt nicht ein.

- Mit der Schmelzhaut als "verlorenes Material" können auch höhere Anwendungstemperaturen einbezogen werden.
- Die Schichtdicke des BUBBLES-Abdeckmittels kann deutlich erhöht werden.

3.6 ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Die nachfolgenden Abschätzungen über die Energieeinsparungen durch Abdeckung der Badspiegeloberflächen bei Aluminiumschmelzen mit coatingten OMEGA-BUBBLES, "Schwimmender Deckel", wurde für 3 unterschiedliche Gießereien durchgeführt:

- Eine kleine Gießerei mit einer Produktion von monatlich 30 to,
- Eine mittlere Gießerei mit einer monatlichen Produktion von 120 to und
- Einer großen Gießerei mit monatlich 1000 to.

In Frage kommt eine Abdeckung vor allem in Kokillengießereien, bei denen die Ofendeckel zur Entnahme der Schmelze immer geöffnet sind. Aber auch für Sandgießereien, unter Umständen bei Druckgießereien mit mechanischen Schöpfleinrichtungen, kann eine Abdeckung sinnvoll sein.

In den Warmhalteöfen bleibt die Schmelze in der Regel 24 h am Tag flüssig, unabhängig davon, ob nur 1 oder 2 bzw. 3 Schichten, das heißt 24 h am Tag, gefertigt wird.

Die Schmelzen werden über das Wochenende in den Warmhalteöfen flüssig gehalten.

Den Berechnungen zugrunde liegen 250 Arbeitstage im Jahr. Zum Schmelzen und Warmhalten wird zusätzlich Schmelze für den Kreislaufanteil benötigt, das heißt, Schmelze für das Gießsystem und die Speiser, sowie für Ausschussteile, die immer wieder anfallen. In nachstehender Tabelle sind die Werte eingetragen. Der pro Stunde berechnete Schmelzbedarf berücksichtigt die Zahl der Schichten / Tag, aus der sich dann die pro Stunde benötigte Schmelzmasse ergibt. Daraus wurde die Kostenersparnis in Gießereien Sand / Kokille abgeschätzt:

Annahmen: 3-Schichtbetrieb (24 h / Tag) für Schmelz- und Warmhalten, elektrisch bei 250 Tagen, 24 h am Tag, sind dies 6000 h. 250 Arbeitstage / Jahr = 6000 h.

Benennung	Kleine Gießerei	Mittlere Gießerei	Große Gießerei
Produktion / Monat	30 to	120 to	1000 to
Kreislauf / Monat	45 to	120 to	750 to
Gesamtschmelze / Monat	75 to	240 to	1750 to
Schmelze / Gießen pro Stunde	445 kg	720 kg	3500 kg

Tabelle 7: Rahmenbedingungen für die Modellrechnung

Für die Kosten wurde ein Strompreis von 0,20 €/kWh zu Grunde gelegt.

Benennung	Kleine Gießerei	Mittlere Gießerei	Große Gießerei
Zahl der Öfen	3	5	12
Fassungsvermögen	300 kg	300 kg	500 kg
Warmhalten von	900 kg	1500 kg	6000 kg
Energieersparnis pro Tag	3 kWh / (h · Ofen)	3 kWh / (h · Ofen)	4,5 kWh / (h · Ofen)
im Jahr	216 kWh/d	360 kWh/d	1300 kWh
Ersparnis ohne Deckel	54000 kWh/a	90000 kWh/a	325000 kWh
Ersparnis mit Deckel	10.800,00 €	18.000,00 €	65.000,00 €
	5.400,00 €	9.000,00 €	32.500,00 €

Tabelle 8: Einspareffekte bei Einsatz der coateden OMEGA-BUBBLES

Die höheren Verluste über die Badoberfläche bei größeren Öfen resultieren aus dem ungünstigeren Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis. Tabelle 11 berücksichtigt noch nicht, dass Schmelzen auch über das Wochenende getempert werden müssen.

Die Einsparung an Energie beträgt bei einem Ofen mit einer Badspiegeloberfläche von 0,3 m². Schmelztemperatur 720 °C, 2 kWh/h, das heißt, am Tag 50 kWh. Da die Öfen übers Wochenende meist flüssige Schmelzen enthalten, erzielt man im Jahr zusätzlich eine Einsparung von 15.000 kWh. Bei Schmelzöfen / Warmhalteöfen, die übers Wochenende in der Regel flüssige Schmelze enthalten, sind dies bei Badspiegeloberflächen von 1,2 m² circa 400 kWh für ein Wochenende und 20.000 kWh pro Ofen und Jahr.

Das Abdeckmittel soll höchstens 500 € pro m³ kosten. Eine große Gießerei nach obiger Definition mit einer Schmelzbadoberfläche von 0,2 m² pro Ofen werden bei einer Schichtdicke von 6 cm und 30% Lückenvolumen ca. 80 l gecoatete OMEGA-BUBBLES benötigt. Gehen wir von 10 Ofenreisen pro Tag, einem 9-maligen Wiedereinsatz der abgesaugten BUBBLES und 220 Arbeitstagen im Jahr aus, hat die Gießerei einen Abdeckmittelbedarf pro Ofen von 1,8 m³ und damit verbundene Jahreskosten in einer Höhe von 900 € pro Ofen bzw. bei 12 Öfen von 10.800 €. Selbst bei geschlossenem Deckel beträgt die Ersparnis ca. 20.000 € und bei offenem Deckel ca. 50.000 € im Jahr. Im Regelfall ist der Nutzen höher, da nicht nach jedem Abguss ein Legierungswechsel erfolgt, der das Ab-

saugen des Abdeckmittels notwendig macht und der Einsparungseffekt durch das an den Wochenenden notwendige Warmhalten nicht in die Betrachtungen einbezogen wurde.

4.Fazit

Im Antrag wurden folgende Projektziele für die als Schwimmende Deckel zum Einsatz vorgesehen OMEGA-BUBBLES 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 Versuchsgießerei und in einem Schmelzbetrieb 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 zurückzugewinnen.

- 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.

- Die positiven Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse erlaubten es, auf dieser Basis einen Folgeantrag zu stellen.

5.Literaturverzeichnis

- [BSGZ 1987] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDAJEW, K. A.; GROSCHE, G., ZIEGLER, O. :
"Taschenbuch der Physik", Gemeinschaftsausgabe Verlag Nauka, Moskau
und BSB B. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1987
- [Gie 2008] Giesserei-Lexikon, Fachverlag Schiele & Schön, 2008; ISBN-10: 3794907531
- [Kle 1967] KLEIN, F.: Theoretische Untersuchungen über das physikalische Verhalten
einatomiger Metallschmelzen: Die Schallausbreitung und deren Temperatur-
abhängigkeit, die thermische Ausdehnung und die spezifische Wärme, Inau-
gural-Dissertation, Universität Saarbrücken, 1967
- [Kle 2012] persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. hc Friedrich Klein 2012
- [Sol 2012] [http://solutions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?
lmd=1320669573000&locale=de_DE&assetType=MMM_Image&assetId=1258
564149131 &blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1320669573000&locale=de_DE&assetType=MMM_Image&assetId=1258564149131&blobAttribute=ImageFile)
- [Stö 1998] STÖCKER, H.: "Taschenbuch der Physik", Verlag Harry Deutsch, Thun und
Frankfurt am Main, 3. Völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, 1998, ISBN
3-8171-1556-3
- [Wal 2013] WOLFF, H.: Innovative Techniken: Beste verfügbare Techniken (BVf) in aus-
gewählten industriellen Bereichen, Teilvorhaben 3: Giessereien, Volume 3:
Technikerhebung 2012, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3710 44316
TV3, November 2013

6. Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1: Berechnung der optimalen Körnung für die Abdeckschicht

1. Volumen der Hohlkugeln, abhängig vom Durchmesser und der Schalendicke

Volumenverhältnis / [Volumen der Schale / Volumen der Kugel]

Durchmesser / [mm]	Schichtdicke		
	0,3 mm	0,2mm	0,1 mm
2	0,650	0,488	0,271
4	0,386	0,272	0,143
6	0,232	0,190	0,078
10	0,169	0,115	0,059

Tabelle 1 Volumenverhältnisse Hohlkugel zu Vollkugel

2. Abdeckung einer Oberfläche durch Kugeln

Flächenabdeckung einer Schicht bei hexagonal dichtester Belegung:

Flächendeckung: $\frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,90690$

Durch Kugeln gleichen Außendurchmessers werden maximal 90,7% als Fläche bedeckt.

3.1. Gewicht der Hohlkugeln

3.1.1. Volumen

$$V_0 = \frac{4\pi R^3}{3} - \frac{4\pi r^3}{3} \quad (1)$$

$$s = \frac{1}{2}(D - d) = R - r \quad (2)$$

mit: $D = 2R$ Außendurchmesser, Radius R
 $d = 2r$ Innendurchmesser, Radius r
 s Schalendicke

3.1.2. Gewicht der Kugel

$$m = \rho \frac{4\pi}{3} (R^3 - r^3) \quad (3)$$

mit: m Gewicht oder Masse der Hohlkugel
 ρ Dichte des Materials der Hohlkugel

3.1.3. Einfluss der Schalendicke s auf m (2)

Siehe Tabelle 1. Es gilt:

$$2s + d = D \quad (2')$$

$$d = D - 2s \quad (4)$$

$$r = R - s \quad (5)$$

3.1.4. Belegung der Oberfläche durch verschiedene Lagen von Kugeln gleichen Durchmessers übereinander

Bei dichtester Kugelpackung (flächenmäßig) liegen in einer Fläche der Elementarzelle mit der Kantenlänge a , Fläche $A = a^2$, 2 Kugeln.

Kugeldurchmesser: D

Seitenfläche: $A = a^2$

Zusammenhang zwischen Kantenlänge a und Kugeldurchmesser D bei kubisch flächenzentrierter Kugelpackung:

$$a \sqrt{2} = 2D \quad (6)$$

$$a = \sqrt{2} D \quad (6')$$

$$A = a^2 = 2D^2 \quad (7)$$

Die Elementarzelle ist definiert als kleinste Volumeneinheit, die alle Symmetrieelemente enthält. Alternativ kann auch eine hexagonale dichteste Kugelpackung heran gezogen werden.

Flächenbelegung: 2 Kugeln in der Äquatorialebene, Fläche A .

$$A_2 = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (8)$$

Bei beiden dichtesten Kugelpackungen ist die Volumenausfüllung 74 %.

Belegung der Seitenfläche der Elementarzelle durch die beiden Kugeln:

$$\frac{2A_2}{A_1} = \frac{2\pi D^2}{4(2D^2)} = \frac{\pi}{4} = 0,78540 \quad (9)$$

Dieses Ergebnis (9) ist unabhängig vom Kugeldurchmesser D , aber *nicht* die Flächenabdeckung der dichtesten Schicht.

3.2. Raumfüllung bei kubisch flächenzentrierten Elementarzellen

Das Volumen der Elementarzelle beträgt a^3 , darin liegen 4 Kugeln.

Volumen V_1 von 4 Kugeln:

$$V_1 = 4 \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{2\pi}{3} D^3 \quad (10)$$

Volumen V_2 der Elementarzelle:

$$V_2 = a^3 = 2\sqrt{2} D^3 \quad (11)$$

Raumfüllung:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{2\pi D^3}{3(2\sqrt{2} D^3)} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0,740 \quad (12)$$

Die Raumfüllung beträgt 74 % und ist auch unabhängig von D

3.3. Raumfüllung auf unabhängigem Rechenweg

Eine dichteste Kugelpackung ist in jeder Schichtebene von einem hexagonalen Grundmuster geprägt. Die Elementarzelle ist deshalb rechteckig zu wählen, eine Kante dieser Elementarzelle hat die Länge D , die andere Kante die Länge $\sqrt{3}D$. In einer Elementarzelle befinden sich in Summe 2 Kreise.

Dies ergibt folgende Flächen:

$$A_3 = \sqrt{3} D^2 \quad (13)$$

$$A_4 = 2\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{\pi D^2}{2} \quad (14)$$

mit dem Packungsverhältnis, das auch für Zylinderpackungen gilt:

$$\frac{A_4}{A_3} = \frac{\pi D^2}{2\sqrt{3} D^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,90690 \quad (15)$$

Das hexagonale Muster setzt sich durch Tetraeder-Lage der Kugelmittelpunkte fort, so dass die 3-dimensionale Elementarzelle je Schicht die Tetraeder-Höhe h besitzt:

$$h = \sqrt{D^2 - \frac{D^2}{3}} = \frac{\sqrt{6}D}{3} = 0,81650 D \quad (16)$$

Daraus folgt die Schüttungsdicke s von n Schichten für $n \geq 1$:

$$s = D + (n-1)h = D + (n-1) \frac{\sqrt{6}D}{3} \quad (17)$$

Eine dichteste Kugelpackung ergibt sich bei weit fortgesetztem Packungsmuster und einer Elementarzelle inmitten dieser Packung:

$$s = nh = n \frac{\sqrt{6}D}{3} \quad (18)$$

In jeder Schicht befinden sich anschaulich 2 Kugeln. Das, was der Elementarzelle nun zur Vollendung des Kugeldurchmessers D fehlt, wird nun durch die darüber bzw. darunter liegende Schicht inhaltsgleich beige-steuert, und zwar als 2 halbe Kugelkappen und 1 ganze Kugelkappe, so dass pro Schicht in der Elementarzelle tatsächlich genau 2 Kugeln vollständig vorkommen.

Somit folgt für eine dichteste Kugelpackung mit mindestens $n+1$ Schichten, von denen n periodisch sind:

$$V_3 = s A_j = n \frac{\sqrt{6} \sqrt{3}}{3} D^3 = n \frac{\sqrt{2}}{3} D^3 \quad (19)$$

Das Volumen der $2n$ Kugeln in der entsprechenden Elementarzelle beträgt:

$$V_4 = 2n \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 = n \frac{\pi}{3} D^3 \quad (20)$$

Das Verhältnis dieser Volumina beträgt:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{n\pi D^3}{3n \frac{\sqrt{2}}{3} D^3} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 0,74048 \quad (21)$$

Dieses Ergebnis gilt also auch für eine beliebige Mischung aus hexagonal und kubisch dichtesten Kugelpackungen.

4. Dicke der Schüttung bei unterschiedlichen Lagen, abhängig vom Kugeldurchmesser D

Mit Formel (17) ergeben sich die Schüttungsdicken S in mm, wenn der Kugeldurchmesser 0 auch in mm vorgegeben ist:

D / [mm]	n / []				
	3	4	5	10	1000
2	5,27	6,90	8,53	16,70	1633,36
4	10,53	13,80	17,06	33,39	3266,72
6	15,80	20,70	25,60	50,09	4900,08
10	26,33	34,49	42,66	83,48	8166,80
S / (n D)	0,87766	0,86237	0,85320	0,83485	0,81668

Tabelle 2A der Schüttungsdicken S in mm

Es ist in Tabelle 2A offensichtlich, dass jeweils $s < nD$ gilt. Außerdem nähert sich

das Verhältnis von größeren Werten an den Grenzwert (16) $\frac{h}{D} = \frac{\sqrt{6}}{3} = 0,81650$ an.

Das spezifische Gewicht der Schichten ergibt sich durch Multiplikation der Volumina mit der Dichte des Materials.

4.1. Volumina der Lagen aus Hohlkugeln

Benötigt wird hier das Verhältnis vom Auflastvolumen zu dem Volumen der untersten Schichtkugeln, welche einen Auftrieb und eine Oberflächenspannung erzeugen können. Das Eintauchen mehrerer Schichten wird nicht angestrebt. Dies ergibt folgende Formel:

$$\frac{\frac{4\pi}{3} \left(\left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{D}{2} - d \right)^3 \right) n}{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2} \right)^3} = \frac{\left(\left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{D}{2} - d \right)^3 \right) n}{\left(\frac{D}{2} \right)^3} \quad (22)$$

D/[mm]	Dicke d der Kugelschale / [mm]											
	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1
2	1,97	1,46	0,81	1,97	1,46	0,81	1,97	1,46	0,81	1,97	1,46	0,81
4	1,16	0,81	0,43	1,16	0,81	0,43	1,16	0,81	0,43	1,16	0,81	0,43
6	0,81	0,56	0,29	0,81	0,56	0,29	0,81	0,56	0,29	0,81	0,56	0,29
10	0,51	0,35	0,18	0,51	0,35	0,18	0,51	0,35	0,18	0,51	0,35	0,18

Tabelle 3A der Materialvolumina von 2 Hohlkugeln je Elementarzelle

Die hier benötigten Dichten sind:

- Dichte der Kugeln: 0,5g/cm³, 1g/cm³, 1,5g/cm³, 2g/cm³
- Dichte einer Magnesiumschmelze: 1,6g/cm³
- Dichte einer Aluminiumschmelze: 2,4g/cm³

Die Kugeldurchmesser sind zum Beispiel 5mm, 10mm, 15mm, 20mm.

Die Flächenpressung bei unterschiedlicher Schüttung ergibt sich aus dem Kugeldurchmesser ϕ , der Schalendicke d und der Zahl n der übereinander liegenden Lagen.

4.2. Zahl der Lagen von Kugeln bei hexagonal dichtester Packung, geteilt durch den Kugeldurchmesser D

Tabelle 4 zeigt die Verhältnisse bei 2, 4, 6, 8, 10 Lagen, gemäß Formel (16) und (17):

Schichtanzahl n	2	4	6	8	10
$(n \cdot h / D) / []$	1,63	3,27	4,90	6,53	8,16
$(S / D) / []$	1,82	3,45	5,08	6,72	8,35

Tabelle 4A Verhältnis von Schüttungsdicke und Kugeldurchmesser

Aus der Dicke S der Abdeckung /Schüttung kann man gemäß Formel (17) die Zahl n der Schichten berechnen:

D / S	2	4	6	8	10
2	3,63	6,90	10,16	13,43	16,70
4	7,27	13,80	20,33	26,86	33,39
6	10,90	20,70	30,49	40,29	50,09
8	14,53	27,60	40,66	53,72	66,79
10	18,16	34,49	50,82	67,15	83,48

Tabelle 5A Schüttungsdicken S in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser D

4.3. Flächenbelastung der Abdeckung auf dem Badspiegel

Belegung bei hexagonaler Packung: 90,7 % der Oberfläche durch Kugeln.

Die Gewichtskraft der Abdeckung, die auf die Badspiegeloberfläche wirkt, ist gleich dem Gewicht einer Kugel, multipliziert mit dem Faktor 0,907 und der Zahl n der Lagen.

4.4. Eindringen in die Flüssigkeitsoberfläche und Auftrieb durch die Grenzflächenspannung

Bei ruhender Schmelze reichern sich Atome der Elemente in der Oberfläche an, die die Oberflächenenergie herab setzen, sie reduzieren dadurch den Anteil der Oberflächenenergie am Auftrieb und können auch zu Reaktionen führen.

Die Oberflächenenergie ist die Energie, die benötigt wird, um eine vorhandene Fläche um einen bestimmten Betrag zu vergrößern. Die genaue Berechnung der daraus resultierenden Kraft auf die Kugel ist in zwei gesonderten Abhandlungen [2012Süd], [2013Süd] verfügbar.

Literatur:

[2012Süd] (Norbert) Südland: *Das Volumen einer Kugelkappe*, Forschungsbericht der Aage GmbH, (2012)

[2013Süd] (Norbert) Südland: *Die Oberflächenspannung beim Eintauchen einer Kugel in eine Flüssigkeit*, Forschungsbericht der Aage GmbH, (2013)