



# Fortschritt- Berichte VDI

M.Sc. Marcel Becker,  
Eislingen / Fils

NR. 704

Hohle Aluminiumstruktur-  
bauteile durch Salzkerne  
im Druckguss

BAND  
1|1

VOLUME  
1|1



# Hohle Aluminiumstrukturbauenteile durch Salzkerne im Druckguss

## DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Marcel Becker

aus Stuttgart

genehmigt von der  
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

30.06.2021

## **Dissertation Clausthal 2021**

Dekan

Herr Prof. Dr.-Ing. Joachim Deubener

Vorsitzender der Promotionskommission

Herr Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners

Betreuerin

Frau Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn

Gutachter

Herr Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien

Herr Prof. Dr.-Ing. Franz Josef Feikus



**REIHE 02**  
FERTIGUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

M.Sc. Marcel Becker,  
Eislingen / Fils

**NR. 704**

Hohle Aluminiumstruktur-  
bauteile durch Salzkerne  
im Druckguss

BAND  
**1|1**

VOLUME  
**1|1**

VDI verlag

Becker, Marcel

## **Hohle Aluminiumstrukturbauenteile durch Salzkerne im Druckguss**

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 704. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

212 Seiten, 141 Bilder, 31 Tabellen.

ISBN 978-3-18-370402-6, ISSN 178-9406

71,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 63,90 EUR

**Für die Dokumentation:** Druckgießverfahren – Aluminiumdruckguss – Salzkerne – Hohlräume – Hinterschnitte – Strukturbauenteile – A-Säule – Rippenstrukturen

**Keywords:** High pressure die casting – aluminum high pressure die casting – salt cores – hollow structures – structural components – A-pillar – rib structures

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Herstellung hohler Strukturen im Druckgießverfahren durch die Verwendung von Salzkernen. Die Herstellung der Salzkerne erfolgt hierbei aus der schmelzflüssigen Phase im Druckgießverfahren. Dadurch können bisher nicht darstellbare Strukturen im Druckgießverfahren abgebildet und Bauteile mit hoher Funktionsintegration und Gewichtersparnis aus Leichtmetallen hergestellt werden. Unterschiedliche Salzzusammensetzungen und die Einflüsse signifikanter Prozessparameter bei der Herstellung von Salzkernen wurden untersucht. Einflüsse der Salzkerne auf das Gussgefüge der Aluminiumlegierung und die mechanischen Eigenschaften konnten nachgewiesen werden. Abschließend konnte ein Demonstrator für eine untere A-Säule entwickelt werden, die im Druckgießverfahren als Hohlprofil durch das Umgießen mit Aluminiumschmelze von Salzkernen hergestellt wurde.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)**

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

D 104 (Dissertation TU Clausthal, 2021)

---

## Danksagung

In Kooperation mit der Technischen Universität Clausthal wurde diese Arbeit an der Hochschule Aalen im Gießereilabor während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter verfasst. Ohne die großartige Unterstützung zahlreicher Personen hätte die vorliegende Arbeit nicht realisiert werden können.

Mein ganz besonderer Dank gilt an erster Stelle Frau Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn, für die Betreuung dieser Arbeit sowie der sehr freundlichen Hilfe und Unterstützung. Die Besuche in Clausthal waren jederzeit sehr angenehm. Insbesondere der konstruktive und regelmäßige Austausch waren stets eine große Hilfe.

Darüber hinaus gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien für sein entgegengebrachtes Vertrauen, der mir die Möglichkeit gab diese Arbeit zu verfassen und mich als wissenschaftlicher Mitarbeiter anzustellen. Seine konstruktive Kritik und wertvollen Hinweise sowie die persönlichen Gespräche trugen maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit bei.

Auch danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Josef Feikus für die Begutachtung dieser Arbeit und die hilfreichen Empfehlungen. Die wissenschaftliche Betreuung als Projektleiter im AMAP P10 Forschungsvorhaben und die wertvollen Anregungen waren mir stets eine große Unterstützung.

Mein Dank möchte ich dem „AMAP P10“ Konsortium für die gute Zusammenarbeit zum Ausdruck bringen. Speziell der NEMAK Europe GmbH sowie der MAGMA Gießereitechnologie GmbH möchte ich für die finanzielle Förderung des Projektes danken.

Nicht zuletzt gilt mein großer Dank allen Mitarbeitern, Doktoranden, Masteranden und Bacheloranden des Gießereilabors. Speziell dem Oberingenieur Herrn Thomas Weidler und Herrn Daniel Schwarz danke ich für die großartige Unterstützung bei den Gießversuchen und deren Auswertung.

Meiner Ehefrau Nadine danke ich von ganzem Herzen für ihre Liebe, uneingeschränkte Unterstützung und Motivation sowie ihrer Geduld und das entgegengebrachte Verständnis in anstrengenden Zeiten. Ebenso möchte ich meinen Eltern ganz besonders danken für die liebevolle und vielseitige Unterstützung während dem Verfassen dieser Arbeit und meines gesamten Studiums. Dies war stets ein großer Rückhalt für mich, der als wichtiger Teil zum Erfolg meines Studiums beigetragen hat.

Eislingen, Oktober 2020

Marcel Becker



## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	III
<b>Kurzfassung</b> .....	VI
<b>Abstract</b> .....	IX
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	1
<b>2 Stand der Technik</b> .....	4
2.1 Einsatz verlorener Kerne im Druckgießverfahren.....	4
2.1.1 Sandkerne im Druckguss .....	4
2.1.2 Keramische Kerne.....	6
2.1.3 Einsatz metallischer Hohlkörpereinlagen.....	7
2.2 Übersicht über Salzkerntechnologien .....	8
2.2.1 Salzsysteme.....	8
2.2.2 Gepresste und gesinterte Salzkerne .....	14
2.2.3 Kerngeschossene Salzkerne.....	16
2.2.4 Druckgegossene Salzkerne.....	16
2.2.5 Salzkerne im Warmkammerverfahren .....	23
<b>3 Validierung einer Salzzusammensetzung</b> .....	25
3.1 Aufbau und Struktur der Salze .....	25
3.2 Definition einer optimalen Salzzusammensetzung .....	27
<b>4 Salzkernherstellung im Druckgießverfahren und Umgussversuche</b> .....	43
4.1 Untersuchung des Einflusses eines Salzkerns auf das Gefüge der Aluminiumdruckgussteile .....	44
4.1.1 Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls mittels Resonanzfrequenzmethode .....	56
4.1.2 Herstellung von Aluminiumprobekörper unter Verwendung von Salzplatten als Einlegeteile .....	60
4.1.3 Metallographische Analyse der Aluminiumprobekörper .....	64
4.2 Entwicklung des Demonstrators „Salzkern Rippenstruktur“.....	68

4.3	Entwicklung des Demonstrators „Salzkern A-Säule“ .....	81
4.4	Herstellung hohler Aluminiumstrukturauteile unter Verwendung von Salzkernen im Druckguss .....	97
4.4.1	Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung.....	112
4.4.2	Herstellung und Auswertung von Salzkernen im Serienversuch .....	119
4.4.3	Ergebnisse der Umgussversuche der Salzkerne aus Versuchsplan und Serienversuch .....	121
4.4.4	Umgussversuche der Salzkerne aus dem Serienversuch.....	126
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>137</b>
5.1	Validierung einer Salzzusammensetzung für die Verwendung im Druckgießverfahren .....	137
5.2	Untersuchung des Einflusses eines Salzkerns auf das Gefüge der Aluminiumgussteile .....	138
5.3	Ergebnisse des Demonstrators „Salzkern Rippenstruktur“ .....	141
5.4	Ergebnisse des Demonstrators „Salzkern A-Säule“ .....	144
5.5	Ergebnisse der Umgussversuche des Demonstrators „Salzkern A-Säule“ .....	147
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>152</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>154</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>157</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>193</b>

## Kurzfassung

Sandkerne, sowie gepresste Salzkerne die im Kokillenguss eingesetzt werden, können den hohen Belastungen im Druckgießprozess nicht standhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Salzkerntechnologie zur Herstellung hohler Aluminiumstrukturbauten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Salzkernen im Druckguss bisher nicht darstellbare, Hohlprofile hergestellt werden können. Dadurch soll zukünftig der innovative Leichtbau durch die Substitution von Einzelteilen und Gewichtsreduktion durch den Einsatz von Leichtmetallen weiterentwickelt werden. Die hohen Strömungs-, Temperatur- und Druckbelastungen im Druckgießverfahren erfordern hohe mechanische Eigenschaften der Salzkerne. Ebenso sollen komplexe Rippenstrukturen zu Versteifung von Hohlprofilen und Hinterschneidungen durch Salzkerne abgebildet werden können. Die Salzkerne können neben anderen Verfahren ebenfalls im Druckgießverfahren aus der schmelzflüssigen Phase hergestellt werden, welches sich durch einen hohen Automatisierungsgrad auszeichnet und eine endkonturnahe Herstellung der Salzkerne ermöglicht. Dabei weisen gegossene Salzkerne eine sehr hohe Oberflächenqualität auf.

Um eine möglichst hohe Festigkeit der Salzkerne zu erzielen, wurden unterschiedliche Salze in unterschiedlichen Salzzusammensetzungen auf ihre Biegefestigkeit, Gießbarkeit, Porosität und Rissneigung untersucht. Die Untersuchung umfasste die anorganischen Salze Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ), Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), Natriumnitrat ( $\text{NaNO}_3$ ), Kaliumchlorid ( $\text{KCl}$ ), Kaliumcarbonat ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), Kaliumsulfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), Magnesiumchlorid ( $\text{MgCl}$ ) und Calcium-chlorid ( $\text{CaCl}_2$ ). Die Auswahlkriterien richteten sich nach dem Schmelzpunkt, der Umweltbelastung und der Arbeitssicherheit.

Dabei konnte eine ausreichende Festigkeit für die Verwendung der Salzkerne im Druckguss erreicht werden. Die Erstarrungsmorphologie des Salzwerkstoffes wurde untersucht und anhand von Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop analysiert. Zudem wurde der Einfluss eines Salzkerns auf das Aluminiumgussgefüge und die mechanischen Eigenschaften der Aluminiumdruckgussteile untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass durch die isolierende Wirkung

eines eingelegten Salzkerns und die dadurch langsamere Erstarrung der Aluminiumlegierung die mechanischen Eigenschaften reduziert werden.

Zur Darstellung einer komplexen Rippenstruktur wurde ein Demonstrator Salzkern entwickelt, der Rippen in unterschiedlicher Form, Tiefe und Wandstärke beinhaltete. Des Weiteren wurde das Schwindungsverhalten druckgegossener Salzkerne betrachtet. Dadurch konnten Konstruktionsrichtlinien für die Salzkernherstellung im Druckgießverfahren erarbeitet werden. Ein weiterer Demonstrator Salzkern stellt eine untere A-Säule dar. Dabei konnten die Prozessparameter bei der Herstellung der Salzkerne untersucht werden. Signifikante Effekte auf die Defekteigenschaften der Salzkerne durch die Prozessparameter Formtemperatur, Gießkolbengeschwindigkeit und Schmelztemperatur konnten in unterschiedlichen Versuchsserien durch statistische Methoden nachgewiesen werden.

Die Salzkerne wurden im Druckgießverfahren mit Aluminiumschmelze umgossen. Lagerungskonzepte der Salzkerne im Druckgießwerkzeug wurden erarbeitet, um eine Verschiebung des Salzkerns während des Füllvorgangs bei dem Druckgießprozess zu verhindern. Ebenso wurden kritische Formfüllgeschwindigkeiten ermittelt, die zum Kernversagen durch Infiltration oder Kernbruch führen. Abschließend wurden mehrere Demonstratoren erfolgreich mit Aluminiumschmelze umgossen.

## Abstract

Sand cores, as well as pressed salt cores used in permanent mold casting, cannot resist the high loads in the high pressure die casting process. In this work, salt core technology was investigated for the production of hollow aluminum structural components. It was demonstrated that the use of salt cores in high pressure die casting can produce hollow structural components that were previously impossible to produce. In the future, this will enable the further development of innovative lightweight construction through the substitution of individual parts and weight reduction through the use of light metals. The high flow, temperature and pressure loads in the high pressure die casting process require high mechanical properties of the salt cores. It should also be possible to use salt cores to cast complex rib structures for stiffening hollow sections and undercuts. In addition to other processes, the salt cores can also be produced from the molten phase by high pressure die casting, which is characterized by a high degree of automation and enables the salt cores to be produced close to the final contour. Cast salt cores have a very high surface quality.

In order to achieve the highest possible strength of the salt cores, different salts in different salt compositions were investigated for their bending strength, castability, porosity and cracking behaviour. The investigation included the inorganic salts sodium chloride (NaCl), sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), sodium nitrate (NaNO<sub>3</sub>), potassium chloride (KCl), potassium carbonate (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), potassium sulfate (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), magnesium chloride (MgCl) and calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>). The selection criteria were based on melting point, environmental impact, and occupational safety.

Sufficient strength was achieved for the use of the salt cores in high pressure die casting. The morphology of the salt core solidification was investigated and analyzed by using scanning electron microscopy. In addition, the influence of a salt core on the aluminum cast structure and the mechanical properties of the aluminum die castings was investigated. It was found that the insulating effect of an inserted salt core and the resulting slower solidification of the aluminum alloy reduce the mechanical properties.

To demonstrate a complex rib structure, a demonstrator salt core was developed which included ribs of different shape, depth and wall thickness. Furthermore, the shrinkage behavior of high pressure die cast salt cores was considered. This allowed design guidelines to be developed for salt core production using the high pressure die casting process. Another salt core demonstrator is a lower A-pillar. The process parameters for the production of the salt cores were investigated. Significant effects on the defect properties of the salt cores due to the process parameters mold temperature, casting plunger speed and melt temperature were demonstrated in different experimental series using statistical methods.

The salt cores were recast with molten aluminum in a high pressure die casting process. Support concepts for the salt cores in the high pressure die casting mold were developed in order to prevent displacement of the salt core during the filling process in the high pressure die casting process. Critical mold filling speeds leading to core failure by infiltration or core breakage were also determined. Finally, several demonstrators were successfully recast with molten aluminum.