

Strömungssimulation der Füllung einer Druckgussform mit Alumosilikatsuspensionen

Dissertation

zur Erlangung des Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jean-Christophe Legrix

Saarbrücken

2012

Tag der Einreichung: 15.03.2012
Dekan: Prof. Dr. Wilhelm F. Maier
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Saarbrücker Reihe

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 36

Strömungssimulation der Füllung einer
Druckgussform mit Alumosilikatsuspensionen

Jean-Christophe Legrix

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels

Prof. Dr. Eduard Arzt
Prof. Dr.-Ing. Christian Boller
Prof. Dr. rer. nat. Rolf Clasen
Prof. Dr. rer. nat. Ralf Busch
Prof. Dr.-Ing. Frank Mücklich
Prof. Dr. rer. nat. Martin Müser
Prof. Dr. rer. nat. Wulff Possart
Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel
Prof. Dr. rer. nat. Horst Vehoff

Shaker Verlag

Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1545-4

ISSN 1860-8493

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Forschungsarbeit als Werkstoffingenieur in der Modell- und Werkstoffentwicklung des Unternehmensbereiches Bad und Wellness der Villeroy & Boch AG. Das Projekt aus dem Bereich der Sanitärkeramik entstand in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität des Saarlandes.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels, Leiter des Lehrstuhls für Technische Mechanik, der mich über die gesamte Dauer der Promotion gefördert und unterstützt hat. Durch seine zahlreichen Ideen und Lösungsvorschläge hat er entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Ebenfalls ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk für das Interesse an der vorliegenden Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Bernd Thömmes, Leiter der Modell- und Werkstoffentwicklung der Villeroy & Boch AG, möchte ich mich für sein Forschungsinteresse und seine Offenheit gegenüber neuen Technologien bedanken. Unter seiner Leitung konnte ich mit Begeisterung lernen, wie Praxis und Forschung erfolgreich zusammengeführt werden können.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing Thierry Hartmann und Herrn Dipl.-Ing.(FH) Silvan Hunziker, die mich im Rahmen ihrer Studienabschlussarbeiten bei der Durchführung und Auswertung der rheologischen Untersuchungen sowie bei der Validierung der Computersimulation tatkräftig unterstützt haben.

Schließlich gilt mein ganz persönlicher Dank meiner Frau Judith, die mir während der gesamten Promotionszeit stets den Rücken gestärkt hat. Sie förderte mich durch ihr Interesse an meiner Arbeit und gab mir die Kraft und Energie diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Saarbrücken, im März 2012.

Jean-Christophe Legrix

Zusammenfassung

Das keramische Druckgussverfahren wird in der Sanitärindustrie erst seit den 1980er Jahren verwendet und ist somit ein noch relativ junges Verfahren mit viel Optimierungspotential. Insbesondere der Füllvorgang einer Druckgussform wurde bis heute nur wenig untersucht.

Die Optimierung des Füllvorgangs kann geometrischer Art sein (Design des Produktes, Eingussposition und Entlüftungsposition) oder durch die Anpassung der Prozessparameter (Formmaterial, Druck, Füllgeschwindigkeit und Temperatur) und der rheologischen Eigenschaften der keramischen Gießmasse (Viskosität, Thixotropie und Litergewicht) erfolgen. Diese Vielfalt an Parametern zur Steuerung des Druckgussprozesses sowie die Tatsache, dass experimentelle Messungen in einer Druckgussform während des Füllvorgangs so gut wie unmöglich sind, machen den Einsatz einer Computersimulation notwendig. Dies zu ermöglichen ist das Ziel dieser Arbeit.

Zunächst wird ein phänomenologisches Materialmodell präsentiert, das sich zur Beschreibung des thixotropen Verhaltens von Alumosilikatsuspensionen eignet. Anschliessend wird das Materialmodell in die Strömungssimulationssoftware FLOW3D implementiert und anhand von einfachen zweidimensionalen Geometrien sowie an einer produktionserprobten, komplexen dreidimensionalen Geometrie validiert.

Das Ergebnis dieser Arbeit trägt zum besseren Verständnis des Füllvorgangs einer Druckgussform bei und stellt der Sanitärindustrie, in Kombination mit der vorhandenen praktischen Erfahrung, ein sehr wirksames Werkzeug zur Optimierung des Druckgussprozesses zur Verfügung.

Abstract

The pressure casting process has been introduced in the sanitary ware industry since the 1980s and is therefore still a young technology with a high potential of optimization. Especially the filling of a pressure casting mould has been analysed poorly until today.

The filling of a sanitary mould is controlled through many different parameters like geometry parameters (product design, inlet position, inlet diameter, etc), process parameters (mould material, pressure in the mould, inlet velocity, temperature, etc) and material properties of ceramic slurry (viscosity, thixotropy, density, etc). The correct setting of the above listed parameters is extremely difficult, due to their influence on the filling which can not be measured directly. To better understand which influence the different parameters have on the filling of a pressure casting mould as well as to rapidly solve problems in the production, it appears necessary to use the computational fluid dynamics. This is the main objective of this thesis.

In a first step a macroscopic material model, able to describe the thixotropic behaviour of ceramic slurry, will be developed. Then the material model will be implemented in the commercial computational fluid dynamics software FLOW3D. Computer simulation of 2D-geometries and 3D-geometries will be used to validate the material model and the move of the slurry surface during the filling of a pressure casting mould.

The results of this thesis illustrate that the computer simulation of the filling of a sanitary mould, with a thixotropic slurry, help to better comprehend the filling process of pressure casting in the sanitary industry. In combination with the industrial practical experience about pressure casting, the computer simulation will be a very efficient tool to rapidly master casting production challenges.

Résumé

Le coulage sous pression est apparu dans le secteur de la céramique sanitaire dans les années 1980. Ce procédé est encore jeune et peut encore être optimisé, notamment en ce qui concerne le remplissage de la forme qui ne fut seulement le rare sujet d'études de recherche.

Le remplissage d'une forme dans la céramique sanitaire peut être optimisé par des changements géométriques (forme du produit, position des arrivées de barbotine, etc.) et par le réglage des paramètres du procédé (matériau de la forme, pression, débit de la barbotine pendant le remplissage, température, etc.) et des propriétés de la barbotine (viscosité, thixotropie, densité, etc.). L'ajustement de tous ces paramètres, nécessaire au bon fonctionnement du procédé de coulage, est très difficile à assurer. La détermination de l'influence de ces paramètres vis à vis du coulage et de la qualité du produit fini ne peut être prouvée expérimentalement qu'avec un effort considérable en temps et en argent. Pour remédier à ce problème et pour mieux comprendre le procédé de coulage sous pression, il s'avère nécessaire d'utiliser la simulation numérique. La simulation numérique du remplissage d'une forme avec de la barbotine céramique est l'objectif de cette étude.

En premier lieu un modèle matériau capable de décrire le comportement thixotrope de la barbotine céramique sera présenté. Ce modèle sera ensuite intégré dans le logiciel de simulation FLOW3D. Les simulations de problèmes 2D et 3D permettront finalement de valider le modèle matériau ainsi que le déplacement de la surface de la barbotine pendant le remplissage d'une forme.

Les résultats de cette étude montrent que la simulation numérique permet de mieux comprendre le fonctionnement du remplissage d'une forme de coulage avec une barbotine thixotrope. La simulation numérique combinée au savoir industriel sera un outil très efficace pour résoudre rapidement les problèmes de production provenant du coulage sous pression.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung	3
1.3	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	5
2	Stand der Forschung	7
3	Grundlagen der Sanitärkeramik	15
3.1	Moderne Gießtechnologie	16
3.2	Alumosilikatsuspensionen	23
3.2.1	Zusammensetzung und chemische Wechselwirkungen	23
3.2.2	Fließverhalten	29
3.3	Rheologie in der Sanitärindustrie	30

3.3.1	Grundbegriffe	31
3.3.2	Messgeräte und Methoden	33
3.3.3	Rotationsrheometer Bohlin CVO	42
4	Experimente	45
4.1	Testgießmasse	46
4.2	Probenpräparation	52
4.3	Rheologische Untersuchung	55
4.3.1	Untersuchung der Schubspannungen	55
4.3.2	Untersuchung der Normalspannungen	67
5	Modellierung	71
5.1	Materialmodell der Testgießmasse	71
5.2	Parameteridentifikation	74
5.3	Materialmodell für Sanitärgießmasse	80
6	Auswahl einer geeigneten CFD-Software	83
6.1	Kontinuumsmechanische Grundlagen	84
6.1.1	Kinematik	84
6.1.2	Bilanzgleichungen	89

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	iii
6.1.3 Konstitutive Gleichungen	91
6.2 Diskretisierungsverfahren	96
6.3 Darstellung einer freien Oberfläche	100
6.4 Strömungssimulationssoftware FLOW3D	106
7 Simulation des Füllvorgangs	109
7.1 Implementierung des Materialmodells	110
7.2 Thixotropes oder Newtonsches Materialmodell	116
7.3 Netzabhängige Wirbelanalyse	126
7.4 Bewegung der freien Oberfläche	132
7.4.1 Füllung eines Zylinders	133
7.4.2 Füllung einer Druckgussform	142
7.5 Numerische Ergebnisse des Füllvorgangs	151
8 Zusammenfassung und Ausblick	159
8.1 Zusammenfassung	159
8.2 Ausblick	161
Literaturverzeichnis	164