

**„Scale-Up“ Methoden zur Prozessführung von 2K Spritzgussteilen im
Hinblick auf ihre Verbundhaftung**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
ELMAR KAISER
aus Arnsberg

Tag des Kolloquiums: 15.06.2012

Referent: Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim

Schriftenreihe Institut für Polymere Materialien und Prozesse

Band 7/2012

Elmar Kaiser

**"Scale-Up" Methoden zur Prozessführung von 2K
Spritzgussteilen im Hinblick auf ihre Verbundhaftung**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

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.: Paderborn, 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 978-3-8440-1277-4

ISSN 2191-2025

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik der Universität Paderborn in den Jahren 2001 bis 2004.

Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Helmut Potente, dem ehemaligen Leiter des Instituts, für die Chance, unter seiner Anleitung als wissenschaftlicher Mitarbeiter zu arbeiten und mit der Dissertation zu beginnen. Für die Motivation zur Fertigstellung dieser Dissertation und die Übernahme der Betreuung danke ich besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer.

Für die freundliche Übernahme des Koreferats und die gute Zusammenarbeit in seiner Zeit als Oberingenieur am KTP danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim.

Darüber hinaus gilt mein Dank für die gute Zusammenarbeit allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, sowie studentischen Hilfskräften. Insbesondere möchte ich mich bei der Spritzgießgruppe mit H. Ridder, M. Schäfers und R. Kleeschulte für das besondere Arbeitsklima und die zahlreichen Diskussionen bedanken. Herr Schäfers und Herr Kleeschulte haben mit Ihren Studien- bzw. Diplomarbeiten in erheblichem Maß dazu beigetragen Forschungsergebnisse zu generieren, die die Grundlage dieser Arbeit bilden.

Bei der Firma Ferromatik Milacron GmbH möchte ich mich für die Bereitstellung der 2K Spritzgießmaschine bedanken, auf der sämtliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt wurden. Weiterhin gilt mein Dank dem „Verein zur Förderung der Kunststofftechnologie e.V.“ und der Firma Polarform Werkzeugbau GmbH, für die Unterstützung bei der Erstellung des Probekörperwerkzeuges, sowie den Firmen Bayer, DSM und Exxon Mobil für die Bereitstellung der Versuchsmaterialien.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meiner Frau Dr. Julia Kaiser bedanken. Sie hat mich trotz unserer geringen gemeinsamen Zeit immer unterstützt und motiviert diese Arbeit fertig zu stellen.

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung	6
2	Grundlagen	9
2.1	Verfahrenstechnische Grundlagen des Overmoulding	9
2.2	Schwindungsphänomene	13
2.3	Ausbildung von Verbunden	20
2.4	Grundlagen zur Ähnlichkeitstheorie	26
3	Bestimmung relevanter Einflussparameter	31
3.1	Maschinen- bzw. Prozessgrößen bei der Einspritz- und Kompressionsphase	31
3.2	Maschinen- bzw. Prozessgrößen bei der Nachdruck- und Abkühlphase	40
3.3	Stoffwerte	44
4	Ermittlung ähnlichkeitstheoretischer Zusammenhänge	47
4.1	Vorgehensweise zur Ermittlung der Π -Größen	47
4.2	Annahmen für die Modellübertragung	48
4.3	Relevanzliste	48
4.4	Kennzahlsatz	50
4.5	Ermittlung der Übertragungsregeln	51
4.6	Systematik zur praktischen Anwendung der Modellgesetze beim Verbundspritzgießen	55
5	Überprüfung anhand experimenteller Befunde und Übertragbarkeit auf andere Fälle	58
5.1	Ziel und Vorgehensweise	58
5.2	Untersuchte Materialkombinationen	59
5.3	Experimentelle Ausrüstung	60
5.4	Planung der Untersuchungen	64
5.5	Beispiel für eine Prozessoptimierung mittels statistischer Versuchsmethodik und anschließendes „Scale up“	72
5.6	Vergleich von freier und gebundener Schwindung	77
5.7	Vergleich von Modell- und Hauptausführung	79
5.8	Betrachtung des Einspritzvolumenstroms bei Temperaturvariation	83
6	Zusammenfassung	88

Inhaltsverzeichnis

7	Ausblick.....	90
8	Literaturverzeichnis.....	91
9	Anhang	97
10	Liste der Vorveröffentlichungen	105
11	Lebenslauf	106

Liste der Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

l_{FT}	Länge Abmessung Formteil
l_W	Länge Abmessung Werkzeug
n	Anzahl Prozessgrößen
m	Anzahl unabhängiger Π -Größen
r	Rang der Dimensionsmatrix
PE	Polyethylen
PS	Polystyrol
S	Schwindung
S_r	Radiale Verarbeitungsschwindigkeit
S_t	Tangentiale Verarbeitungsschwindigkeit
T_g	Glasübergangstemperatur
T_G	Grenzflächentemperatur
T_{Wz}	Werkzeugtemperatur
T_M	Massetemperatur
F_a	Äußere Kraft
F_I	Innere Kraft
A_K	Geometrische Kontaktfläche
A_W	Wahre Bruchfläche
\bar{v}	Mittlere Fließgeschwindigkeit
v_{xmax}	Maximale Fließgeschwindigkeit
Δp	Einspritzdruckbedarf
p_{max}	Maximaler Druck in der Grenzfläche

p_n	Nachdruck
t_n	Nachdruckzeit
t_v	Verzögerungszeit
t_k	Restkühlzeit nach Beendigung Einspritzvorgang
t_{RK}	Restkühlzeit nach Beendigung der Nachdruckzeit
H	Wanddicke
H_M	Wanddicke Hauptausführung
H_H	Wanddicke Hauptausführung
B	Breite
L	Länge
a	Temperaturleitfähigkeit
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
\dot{V}	Einspritzvolumenstrom

Griechische Buchstaben

σ_H	Haftfestigkeit
σ_v	Verbundfestigkeit
σ_{GM}	Grundmaterialfestigkeit
W_a	Adhäsionsarbeit
γ_{12}	Grenzflächenenergie zwischen Komponente 1 und 2
γ_1	Oberflächenenergie Komponente 1
γ_2	Oberflächenenergie Komponente 2

α_{ji}	Exponenten der aus den SI-Einheiten der Dimensionsmatrix
τ	Schubspannung
η	Viskosität
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit
ϵ	Dehnung
λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte