

„Modellierung der Verbundfestigkeit
von Hart-Weich-Kombinationen polymerer Werkstoffe“

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

genehmigte
DISSERTATION

von
RAINER KLEESCHULTE
aus Kassel

Tag des Kolloquiums: 02.03.2011

Referent: Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli

Schriftenreihe Institut für Polymere Materialien und Prozesse

Band 3/2011

Rainer Kleeschulte

**Modellierung der Verbundfestigkeit von
Hart-Weich-Kombinationen polymerer Werkstoffe**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0257-7

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik der Universität Paderborn in den Jahren 2005 bis 2010.

Mein Dank gilt 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 Übernahme der Betreuung und die Hilfestellung bei der Fertigstellung danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer.

Weiterhin möchte ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen Institutsmitarbeitern für das ausgesprochen gute Arbeitsklima bedanken, das sicherlich dazu beigetragen hat, dass diese Arbeit entstanden ist. Vor allem möchte ich mich aber bei meinen studentischen Hilfskräften und den Studienarbeitern bedanken. Durch ihre Arbeit haben sie in erheblichem Maß dazu beigetragen Forschungsergebnisse zu generieren, die die Grundlage dieser Arbeit bilden.

Die Arbeit fasst große Teile des von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) geförderten Projektes „Entwicklung von Verfahrensvarianten für das 2-Komponentenspritzgießen“ zusammen. Allen Vertretern der Industrieunternehmen die sich im Rahmen des Projektbegleitenden Ausschuss an der Forschungsarbeit beteiligt haben, danke ich herzlichst für die sehr gute Zusammenarbeit. Vor allem möchte ich Herrn Vettkötter als Vertreter des Verbands deutscher Maschinen- und Anlagenbaus (VDMA) für seine engagierte Betreuung und Hilfestellungen danken.

Sämtliche experimentelle Untersuchungen wurden auf einer 2K-Spritzgußmaschine der Firma Ferromatik Milacron Maschinenbau GmbH durchgeführt. Für die Maschine und die hervorragende Zusammenarbeit möchte ich mich bei dem Unternehmen und den Mitarbeitern bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Partnerin Vanessa Heimann danken. Durch ihr fortwährendes Verständnis, ihre tägliche Motivation und ihre uneingeschränkte Hilfsbereitschaft hat sie maßgeblich dazu beigetragen, dass ich dieses Buch fertig stellen konnte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Übersicht Mehrkomponentenspritzgießen	1
1.2 Stand der Technik	4
1.2.1 Prozessablauf nicht - drehender Werkzeugkonzepte	4
1.2.2 Prozessablauf drehender Werkzeugkonzepte	9
1.2.3 TPE-Werkstoffe	11
2. Problemstellung und Zielsetzung	15
3. Untersuchte Werkzeugkonzepte	18
3.1 Prozessanalyse Core-Back-Werkzeug	18
3.2 Prozessanalyse Drehtellerwerkzeug	21
4. Experimentelle Untersuchungen	26
4.1 Untersuchungen an der Zugstabgeometrie	26
4.1.1 Versuchsaufbau und verwendete Materialien	26
4.1.2 Einfluss der Schiebertemperatur auf die Verbundfestigkeit	30
4.1.3 Einfluss der Verfahrensparameter	36
4.1.4 FEM-Analyse der Spannungszustände beim Zugversuch	40
4.2 Untersuchungen an der Abschälprobekörpergeometrie	43
4.2.1 Versuchsaufbau und verwendete Materialien	43
4.2.2 Einfluss der Verfahrensparameter auf die Verbundfestigkeit unter Verwendung eines geschliffenen Kontureinsatzes	47
4.2.3 Einfluss der Verfahrensparameter auf die Verbundfestigkeit unter Verwendung beschichteter Kontureinsätze	50
4.2.4 Einfluss der Verfahrensparameter auf die Verbundfestigkeit unter Verwendung erodierter Kontureinsätze	54
4.2.5 Vergleich der Grenzflächenkonturen	57
4.2.6 Experimentelle Ergebnisse zur Zeitabhängigkeit der Verbundfestigkeit	58
5. Grenzflächenanalyse	61
5.1 Grenzflächenanalyse mittels Raman- und Infrarot-Spektroskopie	61
5.1.1 Infrarot-Spektroskopie	61
5.1.2 Raman-Spektroskopie	62
5.1.3 Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen	63
5.2 Temperaturverlaufsrechnung mittels FDM	67
5.2.1 Grundlagen zur Berechnung instationärer Wärmeleitvorgänge	68
5.2.2 Temperaturverlauf im konkreten Anwendungsfall	72
6. Modellierungsmethoden zur Beschreibung der Hart-Weich-Kombination	82
6.1 Adhäsionstheorien	82
6.1.1 Mechanische Adhäsion	82

6.1.2 Spezifische Adhäsion	83
6.2 Diffusionstheorie	85
6.2.1 Diffusionskoeffizient und die Fick'schen Gesetze	86
6.2.2 Modell auf Basis der Einstein-Gleichung	88
6.2.3 Reptationsmodell	89
6.3 Dimensionsanalytik	92
7. Festigkeitsmodellierung des Hart-Weich-Verbundes	94
7.1 Nachweis der thermodynamischen Verträglichkeit	94
7.2 Temperatur- und Zeitabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten	95
7.3 Modellierung der Festigkeit	99
7.3.1 Modellierung mittels der Einstein-Beziehung	100
7.3.2 Modellierung mittels Reptationsmodell	101
7.3.3 Modellierung mittels Dimensionsanalyse	102
8. Zusammenfassung / Abstract	107
9. Ausblick	109
10. Literaturverzeichnis	111
11. Anhang	119
12. Liste der Vorveröffentlichungen	131
13. Lebenslauf	132

Liste der Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

A	Nullviskosität
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
a_{eff}	effektive Temperaturleitfähigkeit
a_T	Temperaturverschiebungsfaktor
B	reziproke Übergangsgeschwindigkeit
b	Wärmeeindringzahl
c	Steigung
c	Wärmekapazität
c	Konzentration
c_1, c_2	Konstanten (WLF-Ansatz)
d	Dicke
D	Diffusionskoeffizient
D_0	Selbstdiffusionskoeffizient
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E	Aktivierungsenergie
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EPM	Ethylen-Propylen-Copolymer

F	Kraft
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Element-Methode
GPC	Gel-Permeations-Chromatographie
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
IR	Infrarot
j	Materialstrom
k	Zeitindex FDM
K_1, K_2, K_3	Regressionsparameter
LCP	Liquid Crystal Polymer
M	Molmasse
n	Ortsindex FDM
N_L	Avogadro-Konstante
p_{ND}	Nachdruck
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
R	universelle Gaskonstante
SB	Styrol-Butadien
SEBS	Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol-Copolymer
t	Zeit

T	Temperatur
T _G	Glasübergangstemperatur
T _{Gr}	Grenzflächentemperatur
T _{HS}	Temperatur der Hilfsschicht
T _M	Massetemperatur
TPE	Thermoplastisches Elastomer
t _{prüf}	Prüfzeitpunkt
t _r	Reptationszeit
t _{RK}	Restkühlzeit
T _S	Schiebertemperatur
t _{VZ}	Verzögerungszeit
T _{WZ}	Werkzeugtemperatur
u	Verschiebung
V	Volumen
$\bar{V}$	Molvolumen
VDI27	Erodierstruktur
VDI39	Erodierstruktur
v _{ein}	Einspritzgeschwindigkeit
W _{AB}	Adhäsionsarbeit
x	Raumkoordinate

y	Raumkoordinate
z	Raumkoordinate
Δt	Zeitdifferenz
Δx	Schichtdicke FDM
$\Delta \bar{x}^2$	mittlere Eindringtiefe

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient
β	Temperaturverschiebungskoeffizient
γ_{AB}	Grenzflächenspannung
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
$\dot{\varepsilon}$	Abzugsgeschwindigkeit
η	Viskosität
λ	Wärmeleitfähigkeit
ξ	Koordinate in Richtung des Einheitsvektors
ρ	Dichte
σ	Oberflächenspannung
σ^d	disperser Anteil der Oberflächenspannung
σ^p	polarer Anteil der Oberflächenspannung
$\sigma_{GM,weich}$	Grundmaterialfestigkeit der Weichkomponente

σ_v	Verbundfestigkeit
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$	Regressionskonstanten
Φ	Quellstärke