

**Mechanisches Kurzzeitverhalten von
thermoplastischen Konstruktionsschaumstoffen
unter mehrachsiger Beanspruchung**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

im Fachbereich Maschinenbau der
Universität Kassel

vorgelegt von
Markus Münch
aus Mayen

Braunschweig, 26.03.2004

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Maier

Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

Markus Münch

**Mechanisches Kurzzeitverhalten von
thermoplastischen Konstruktionsschaumstoffen
unter mehrachsiger Beanspruchung**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2004

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau – der Universität Kassel als Kasseler Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Maier

Tag der mündlichen Prüfung: 05.07.2004

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4119-1

ISSN 1613-3498

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schlimmer, danke ich für die Initiierung der Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Maier, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH / Universität Kaiserslautern, möchte ich für die Übernahme des Korreferats danken.

Mein Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitern des Instituts für Werkstofftechnik, die mich bei der Durchführung der Forschungsarbeiten unterstützt haben. Auch möchte ich mich bei Herrn Dr. Jürgen Häberle für engagierte Fachgespräche bedanken.

Ebenso möchte ich allen Studierenden danken, die als studentische Hilfskräfte, Studienarbeiter oder als Diplomanden an dem Forschungsthema mitgearbeitet haben.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sei für die finanzielle Unterstützung gedankt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung finanziert und mich stets bei meiner Arbeit unterstützt haben.

Braunschweig, im April 2005

Markus Münch

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde das phänomenologisch-makroskopische Werkstoffverhalten von polymeren Schaumstoffen unter einachsiger und kombinierter Beanspruchung experimentell untersucht. Für die Durchführung der dazu notwendigen komplexen Versuche musste eine neue Versuchsmethodik entwickelt werden, mit der ein- und mehrachsige Verformungszustände gezielt erzeugt werden konnten.

Bestandteil dieser Versuchsmethodik war zudem die Entwicklung einer gegenüber den üblichen, normierten Prüfkörpern werkstoffmechanisch sinnvollerer Probenform. Um auch bei Torsionsbeanspruchung einen weitgehend homogenen Schubspannungszustand im Probenquerschnitt zu erzeugen, erfolgten die Untersuchungen mit relativ dünnwandigen Hohlzylindern. Zur Erfassung der Dehnungen und Gleitungen im interessierenden Messbereich der Probe kamen sowohl berührende als auch berührungslose 1D- und 2D-Verformungsmesssysteme zum Einsatz. Entsprechend dem eingesetzten System, biaxialer Setzdehnungsaufnehmer, Laserextensometer oder Felddehnungsmesssystem, erhält man eine integrale, partielle oder lokale Verzerrungsinformation.

Die Interpretation des experimentell ermittelten makromechanischen Verformungs- und Versagensverhaltens erfolgte mittels der allgemein bekannten mikromechanischen Deformationsmechanismen von zellularen Werkstoffen. Aufgrund eines unsymmetrischen Zug/Druckverhaltens und unterschiedlicher Versagensmodi für Zug, Druck und Torsion sowie eines vom hydrostatischen Spannungszustand abhängigen Werkstoffverhaltens konnte deshalb das Versagensverhalten nicht mit herkömmlichen Festigkeitshypothesen beschrieben werden. Hierfür eignen sich jedoch bimodale Versagensbedingungen mit linearem Ansatz. Dagegen gelang die Überführung beliebiger Spannungszustände in einen fiktiven Vergleichsspannungszustand mit Anstrengungshypothesen auf Grundlage des Plastischen Potentials mit quadratischen Ansätzen nach SCHLIMMER.

Erste numerische Untersuchungen wurden mit dem FE-Programm „ABAQUS“ durchgeführt, wobei der Schaumstoff als ein homogenes, isotropes Kontinuum betrachtet wurde. Mit den dort implementierten Stoffgesetzen konnte nur das Zugverhalten gut abgebildet werden. Für den Fall torsionaler Beanspruchung gelang es weder mit einem inkompressiblen, hyperelastischen Materialgesetz noch mit dem die Kompressibilität berücksichtigenden Hyperfoam-Modell von OGDEN das versuchstechnisch ermittelte Schubspannung-Gleitungsverhalten mit degressiven Kurvenverläufen qualitativ abzubilden. Die numerischen Berechnungen führten stets zu progressiven Verläufen. Ferner ist in den Materialmodellen kein Nachversagensverhalten implementiert.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN, SYMBOLE, INDIZES.....	1
1 EINLEITUNG	7
2 AUSGANGSSITUATION	9
2.1 Technische Schaumstoffe	9
2.1.1 Herstellung von Schaumstoffen.....	9
2.1.2 Anwendung von Schaumstoffen.....	10
2.2 Problemstellung und Motivation.....	13
2.3 Stand der Technik.....	15
2.4 Zielsetzung und Lösungsweg	22
3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	25
3.1 Prüfkörper.....	25
3.1.1 Probenwerkstoff.....	25
3.1.2 Probengeometrie.....	28
3.1.3 Probenfertigung.....	29
3.2 Prüfeinrichtungen und Versuchstechnik	33
3.2.1 Prüfsystem	33
3.2.2 Verformungsmessung	34
3.2.2.1 Interne Prüfmaschinenaufnehmer.....	36
3.2.2.2 Biaxialer Verformungsaufnehmer.....	36
3.2.2.3 Felddehnungsmesssystem (ARAMIS/GOM).....	38
3.2.2.4 Laserextensometer	39
3.2.2.5 Querdehnungsaufnehmer.....	41
3.2.3 Hysteresemessverfahren.....	42
3.3 Versuchsmethodik	44
4 DEFORMATIONSMECHANISMEN VON ZELLULAREN WERKSTOFFEN	47
4.1 Druckbeanspruchung.....	49
4.2 Zugbeanspruchung.....	53
4.3 Dehnratenabhängiges Werkstoffverhalten.....	54

5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	57
5.1	Einfluss der Schäumrichtung	57
5.2	Zugversuche	57
5.3	Druckversuche	67
5.4	Torsionsversuche.....	70
5.5	Kombinierte Versuche.....	77
5.6	Festigkeitshypothesen	81
5.7	Querkontraktionszahl	97
5.8	FE-Untersuchungen	102
5.8.1	Grundlagen	103
5.8.2	Zugversuch	108
5.8.3	Torsionsversuch.....	111
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	113
7	LITERATURVERZEICHNIS	121