

Mechanische Eigenschaften metallischer und polymerer Schaumstoffe

Dissertation

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

im Fachbereich Maschinenbau der
Universität Kassel

vorgelegt von
Stephan Rohde

Knüllwald, den 28.02.2005

Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

Stephan Rohde

**Mechanische Eigenschaften
metallischer und polymerer Schaumstoffe**

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., 2005

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: 15.07.2005

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 3-8322-4577-4
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 Angestellter am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer für die Überlassung des Themas, die Betreuung der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Maier danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Instituts für Werkstofftechnik, die mich bei der Durchführung der Forschungsarbeiten tatkräftig unterstützt haben. Insbesondere möchte ich Herrn Dr.-Ing. J. Bornemann für die intensive fachliche Diskussion und kritische Durchsicht der Arbeit danken.

Ebenfalls möchte ich allen Studierenden danken, die als studentische Hilfskräfte, Studienarbeiter oder Diplomanden engagiert an der Aufgabenstellung mitgearbeitet haben.

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

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für das Verständnis und die liebevolle Unterstützung, die sie mir während dieser Zeit entgegengebracht hat.

Knüllwald, Oktober 2005

Stephan Rohde

Kurzfassung

Zur Auswahl eines geeigneten Schaumstoffs für mechanisch beanspruchte Bauteile ist die genaue Kenntnis der mechanischen Eigenschaften erforderlich. Je nach Versuchs- und Schaumart existieren für polymere Schäume verschiedene Prüfnormen, wobei für jede Beanspruchungsart eine andere Probenform verwendet wird. Für metallische Schäume existiert keine Prüfnorm. Die bisherigen Ergebnisse aus mechanischen Untersuchungen von zellularen Werkstoffen basieren überwiegend auf einachsigen Druckversuchen. Da aber das Werkstoffverhalten abhängig von der Beanspruchungsart ist, reichen die mechanischen Eigenschaften, die bei Druckbeanspruchung ermittelt werden, zur Dimensionierung eines Bauteils nicht aus.

Ziel der Arbeit war deshalb, eine Methode für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von metallischen und polymeren Schaumstoffen bei ein- und mehrachsiger Beanspruchung zu entwickeln. Dies erfolgte exemplarisch für Aluminiumschaum und expandiertes Polypropylen (EPP). Für die Versuchsdurchführung wurde für jeden Schaum je eine Probengeometrie entwickelt, mit der Zug-, Druck-, Torsions- und kombinierte Versuche durchgeführt wurden. Die Verformungen wurden lokal mit einem Laserextensometer und einem optischen Messverfahren ermittelt.

Der verwendete Aluminiumschaum zeigt große Inhomogenitäten in der Porenstruktur, was zu einer ungleichmäßigen Dichteverteilung führt. Dies hat zur Folge, dass lokal große Unterschiede bei den Verformungen auftreten und die ermittelten Eigenschaften sehr stark streuen. Mit der Standardabweichung der lokalen von der mittleren Dichte konnte aber ein direkter Zusammenhang zwischen der Inhomogenität der Porenstruktur und der Streuung der Ergebnisse bestimmt werden. Der E-Modul bei Zug- und Druckbeanspruchung ist identisch. Die Druckplateauspannungen sind dagegen 33 % höher als die Zugfestigkeiten. Versuche mit beschichtetem Aluminiumschaum zeigen, dass neben einer verbesserten Oberfläche auch höhere mechanische Kennwerte erreicht werden.

Im Gegensatz zum Aluminiumschaum ist die Streuung der ermittelten mechanischen Eigenschaften von EPP sehr gering. Dagegen unterscheidet sich das Verhalten bei Zug-, Druck- und Torsionsbeanspruchung deutlich voneinander. Der Zugmodul ist bei gleicher Dichte und Dehnungsgeschwindigkeit größer als der Druckmodul. Die Zugfestigkeit ist ebenfalls größer als die Druckplateauspannung. Noch deutlicher wird das unsymmetrische Verhalten bei der Querverformung. Während bei Druckbeanspruchung die Querszahl mit zunehmender Stauchung stark abnimmt, steigt sie bei Zugbeanspruchung mit zunehmender Dehnung.

Werden die bei Torsionsbeanspruchung ermittelten Spannung- und Dehnungskomponenten nach v. Mises in Vergleichsspannungen und -dehnungen umgerechnet, liegt die resultierende Spannung-Dehnung-Kurve zwischen denen aus Zug- und Druckbeanspruchung.

Die ermittelten mechanischen Eigenschaften von EPP und Aluminiumschaum unterscheiden sich deutlich. Dies liegt zum Teil am jeweiligen Grundwerkstoff, aber auch der unterschiedliche strukturelle Aufbau der beiden Schäume, der durch die Zellgröße und -art sowie der Homogenität bestimmt wird, hat einen entscheidenden Einfluss. Durch eine Kombination der beiden Schäume lässt sich das unterschiedliche Verformungs- und Energieabsorptionsverhalten vorteilhaft nutzen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Symbole, Indizes	ix
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Herstellungsverfahren	4
2.1.1 Metallische Schäume	4
2.1.2 Polymere Schäume	5
2.2 Schaumstruktur	9
2.3 Mechanische Eigenschaften	10
2.3.1 Zellmodelle	14
2.3.2 Deformationsmechanismen bei Druckbeanspruchung	16
2.3.3 Deformationsmechanismen bei Zugbeanspruchung	18
2.3.4 Deformationsmechanismen bei Schubbeanspruchung	19
2.3.5 Dehnratenabhängiges Werkstoffverhalten	19
2.3.6 Prüfnormen	21
2.4 Anwendung	22
2.5 Ziel der Arbeit	25
3 Prüfkörper	27
3.1 Probenwerkstoffe	27
3.1.1 Metallischer Schaumstoff	27
3.1.2 Polymerer Schaumstoff	27
3.2 Probenentwicklung und -fertigung	28
3.2.1 Aluminiumschaum	28
3.2.2 Expandiertes Polypropylen	32
3.3 Dichtebestimmung	33
4 Prüfeinrichtung und Versuchsdurchführung	35
4.1 Prüfmaschinen	35
4.2 Messsysteme	36
4.2.1 Induktiver Wegaufnehmer	36
4.2.2 Laserextensometer	36
4.2.3 Optisches Verformungsmesssystem	37
4.3 Prüfkörpervorbereitung	39
4.3.1 Aluminiumschaum	39
4.3.2 Expandiertes Polypropylen	40
4.4 Versuchsaufbau	41
4.5 Versuchsdurchführung	43
4.6 Versuchsauswertung	43
4.6.1 Laserextensometer	44
4.6.2 ARAMIS-System	46
4.6.3 Bestimmung des Elastizitätsmoduls	49

5	Versuchsergebnisse Aluminiumschaum	51
5.1	Integrale Auswertung der Zugversuche	51
5.2	Lokale Auswertung der Zugversuche	57
5.3	Integrale Auswertung der Druckversuche	63
5.4	Lokale Auswertung der Druckversuche	68
5.5	Vergleich von Zug- und Druckversuchen	74
5.6	Torsions- und kombinierte Versuche	81
5.7	Anstrengungshypothesen	84
6	Beschichteter Aluminiumschaum	87
6.1.1	Druckversuche	88
6.1.2	Zugversuche	90
7	Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen	93
7.1	Zugversuche	93
7.2	Druckversuche	103
7.3	Torsionsversuche	109
7.4	Vergleich der verschiedenen Versucharten	113
7.5	FE-Untersuchungen	119
7.5.1	Materialmodelle	120
7.5.2	Zugversuch	125
7.5.3	Druckversuch	128
7.5.4	Torsionsversuch	129
8	Vergleich von Aluminiumschaum und EPP	133
9	Zusammenfassung	139
10	Literatur	145