

Reihe 5

Grund- und
Werkstoffe/
Kunststoffe

Nr. 759

Dipl.-Ing. (FH) Rolf Winkler,
Aalen

Experimentelle und numerische Bestimmung strukturmechanischer und akustischer Eigen- schaften von metalli- schen Hohlkugelstruk- turen

**Experimentelle und numerische Bestimmung
strukturmechanischer und akustischer Eigenschaften
von metallischen Hohlkugelstrukturen**

Dissertation

zur Erlangung des

Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

des

Zentrums für Ingenieurwissenschaften
der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg,

vorgelegt

von Herr Dipl.-Ing. (FH) Rolf Winkler
geb. am 18. Mai 1983 in Aalen (Baden-Württemberg)

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Holm Altenbach
2. Prof. Dr.-Ing. Markus Merkel
3. Prof. Dr. rer. nat. Burkhard Heine

Tag der Verteidigung: 4. Juni 2015

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 5

Grund- und
Werkstoffe/
Kunststoffe

Dipl.-Ing. (FH) Rolf Winkler,
Aalen

Nr. 759

Experimentelle und
numerische Bestimmung
strukturmechanischer
und akustischer Eigen-
schaften von metalli-
schen Hohlkugelstruk-
turen

VDI verlag

Winkler, Rolf

Experimentelle und numerische Bestimmung strukturmechanischer und akustischer Eigenschaften von metallischen Hohlkugelstrukturen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 759. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

218 Seiten, 120 Bilder, 17 Tabellen.

ISBN 978-3-18-375905-7, ISSN 0178-952X,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

Für die Dokumentation: Zellulare Metalle – Metallische Hohlkugelstruktur – Homogenisierung – Strukturmechanik – Elastizitätsmodul – Anisotropie – Schallabsorption – Computertomografie – Schwingung – Stochastische Kugelanordnungen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung mechanischer und akustischer Eigenschaften von metallischen Hohlkugelstrukturen. Dieser relativ junge zelluläre Werkstoff kennzeichnet sich durch seine besondere Zellmorphologie aus. Im Gegensatz zu bisher bekannten Metallschäumen weist der Strukturaufbau mit Hohlkugeln geringere Abweichungen in der Zellgröße und -anordnung auf. Ausgehend von geringeren Unregelmäßigkeiten in ihrem Strukturaufbau werden die Eigenschaften der Hohlkugelstrukturen oftmals als isotrop angenommen. Die meisten bisherigen analytischen und numerischen Betrachtungen beschränkten sich auf ideale Hohlkugelanordnungen, während sich der Großteil der experimentellen Untersuchungen mit zufälligen Anordnungen beschäftigt. Aus dieser Diskrepanz heraus ergibt sich die Motivation dieser Arbeit. Der Schwerpunkt liegt in der Analyse des anisotropen mechanischen und akustischen Verhaltens unter dem Einfluss unregelmäßiger bzw. beliebiger Hohlkugelanordnungen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-952X

ISBN 978-3-18-375905-7

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für virtuelle Produktentwicklung der Hochschule Aalen.

Die Betreuung der Promotion übernahm Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Holm Altenbach. Ich danke Ihm für die Unterstützung und die konstruktive Zusammenarbeit. Prof. Dr.-Ing. Markus Merkel gab mir im Rahmen eines Forschungsprojektes (Baden-Württemberg Stiftung) die Möglichkeit, an den Inhalten dieser Dissertation zu arbeiten. Ihm danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheit, die ich in den letzten Jahren erfolgreich nutzen konnte. Die beiden oben genannten Professoren erstellten zusammen mit Prof. Dr. rer. nat. Burkhard Heine die Gutachten. Ihm gebührt ebenfalls besonderer Dank.

Ich danke alle Kollegen und Kolleginnen, die zum Gelingen dieser Arbeit mitgewirkt haben. Besonderen Dank gilt Dipl.-Inf. Janina Schulz von der Universität Freiburg für die Unterstützung im Bereich digitale Bildverarbeitung. Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. habil. Drs. h.c. Dietrich Stoyan und Dr.-Ing. Antje Elser von der Technische Universität Bergakademie Freiberg für die Bereitstellung eines Packungsalgorithmus. Dankenswerterweise unterstützte mich Prof. Dr. Wolfram Pannert im Bereich Akustik. Ein herzlicher Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. Burkhard Alpers für die mathematische Unterstützung in dieser Zeit. Darüber hinaus danke ich allen Korrekturleser und -leserinnen für ihr Engagement.

An dieser Stelle möchte ich fern der wissenschaftlichen Ausarbeitung all den Menschen meinen persönlichen Dank aussprechen, die an mich glaubten und mich in dieser Zeit unterstützten. Für die manchmal nötige Ablenkung von der Arbeit danke ich meinem Freundeskreis und den Kameraden der Freiwilligen Feuerwehr.

Ganz besonderer Dank gilt Veronika und unseren Familien. Ihr stetiger Rückhalt und ihre unendliche Geduld waren sehr wichtig für mich.

Aalen, im August 2015
Rolf Winkler

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zellulare Materialien	4
1.2.1	Zellulare Metalle	5
1.2.1.1	Offenporige zellulare Metalle	6
1.2.1.2	Geschlossenporige zellulare Metalle	6
1.2.2	Metallschäume	7
1.2.3	Hohlkugelstrukturen	8
1.3	Stand der Forschung	10
1.4	Ziel und Inhalt der Arbeit	15
2	Theoretische Grundlagen	17
2.1	Mechanische Grundlagen	17
2.1.1	Verzerrungen, Spannungen und Bilanzgleichungen	18
2.1.2	Materialgesetze	18
2.2	Mechanische Kontinuumschwingungen	18
2.3	Akustische Grundlagen	19
2.3.1	Schallwellenausbreitung und akustische Kenngrößen	19
2.3.1.1	Schallwellen	19
2.3.1.2	Schallfelder	20
2.3.1.3	Impedanz und Admittanz	20
2.3.1.4	Schallintensität und Schalleistung	21
2.3.1.5	Ebene und stehende Welle	21
2.3.2	Mechanismen der Schallabsorption	22
2.3.2.1	Schallabsorptionsgrad	22
2.3.2.2	Schallreflektionskoeffizient	23
2.3.2.3	Schalltransmissionsgrad	24
2.3.2.4	Schalldissipationsgrad	24
2.3.2.5	Wandimpedanz	24
2.3.2.6	Gesetz von Darcy	25
3	Methoden zur Charakterisierung	27
3.1	Geometriemodellbildung	27
3.1.1	Untersuchung realer Strukturen	27
3.1.1.1	Computertomografie	27
3.1.1.2	Rekonstruktion- und Rückführ-Algorithmus	28
3.1.2	Reguläre Packungen - Gitterstrukturen	29
3.1.3	Zufällige Kugelpackungen	31

3.1.4	Hohlkugel-Mesomodell	32
3.1.4.1	Geklebtes Modell	32
3.1.4.2	Gesintertes Modell	33
3.1.5	Stochastischer Kugelgenerator	34
3.1.5.1	Kugelmodelle	34
3.1.5.2	Kugelpackungsmodelle	34
3.1.6	Algorithmen zur Kugelpackungengenerierung	36
3.1.7	Kenngrößen zur Charakterisierung zufälliger Kugelpackungen	37
3.1.7.1	Lokale Dichte	38
3.1.7.2	Koordinationszahl	40
3.1.7.3	Bindungswinkel	40
3.1.7.4	Paarkorrelation	41
3.1.7.5	Kovarianz	42
3.1.8	Geometrisches Volumenmodell	42
3.1.8.1	Reguläres Modell	43
3.1.8.2	Stochastisches Modell	43
3.2	Elastizitätswerte	45
3.2.1	Homogenisierung	45
3.2.2	Materialsymmetrie	48
3.2.3	Negative Querkontraktion	50
3.2.4	Lastfälle	50
3.2.5	Periodische Randbedingungen	51
3.3	Schwingungsanalyse	54
3.3.1	Numerische Modalanalyse	55
3.3.2	RITZsches Verfahren	55
3.3.3	Experimentelle Modalanalyse	57
3.3.3.1	Versuchsaufbau und Messtechnik	58
3.3.3.2	Probenvorbereitung	59
3.3.3.3	Signalverarbeitung	59
3.4	Schallabsorption	59
3.4.1	Absorptionsmechanismus	60
3.4.2	Charakterisierende Materialeigenschaften und -größen	61
3.4.2.1	Porosität	61
3.4.2.2	Strömungswiderstand	61
3.4.2.3	Porenformfaktor und charakteristische Längen	62
3.4.2.4	Tortuosität	64
3.4.3	Äquivalentes Fluid-Modell	64
3.4.3.1	DELANY-BAZLEY-Modell	64
3.4.3.2	JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD-Modell	65
3.4.4	Akustische Messungen	67
4	Ergebnisse	71
4.1	Zufällige Kugelpackungen	71
4.1.1	Reale Kugelpackungen	71
4.1.2	Erzeugte Kugelpackungen	74
4.2	Statik	78
4.2.1	Einachsige Belastung	79
4.2.2	Mehrachsiges Belastung - Materialsymmetrien	85

4.2.3	Einfluss der Randbedingungen	92
4.2.4	Vergleich und Diskussion	94
4.3	Schwingungen	99
4.3.1	Versuchsdurchführung	99
4.3.2	Bestimmung der Materialkennwerte	100
4.3.3	Vergleich	102
4.4	Verifizierung	104
4.5	Akustik	108
4.5.1	Zwei-Mikrophon-Methode	108
4.5.2	Vier-Mikrophon-Methode	109
5	Schlussbetrachtung	113
5.1	Zusammenfassung	113
5.2	Modellerweiterungen und neue Einsatzgebiete	115
5.3	Ausblick	116
Anhang		117
A	Theoretische Grundlagen	117
A.1	Mechanische Grundlagen	117
A.1.1	Bezugssysteme, Verschiebungen und Verzerrungen	117
A.1.2	Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfelder	120
A.1.3	Belastungen und Spannungen	121
A.1.4	Gleichgewichtsbedingungen und Bewegungsgleichungen	122
A.1.5	Bilanzgleichungen	123
A.1.5.1	Massenbilanz	123
A.1.5.2	Impulsbilanz	124
A.1.5.3	Drehimpulsbilanz	124
A.1.5.4	Mechanische Energiebilanz	124
A.1.5.5	Thermomechanische Energiebilanz	125
A.1.6	Materialverhalten	126
A.1.6.1	Linear-elastische Festkörper	127
A.1.6.2	Ideales Gas	131
A.1.6.3	Linear-viskose Fluide	131
A.1.7	Anfangs-Randwertproblem und HAMILTONSches Prinzip	132
A.2	Plattenschwingungen	133
A.2.1	KIRCHHOFFSche Plattentheorie	134
A.2.2	MINDLINSche Plattentheorie	139
A.2.3	Weitere und höhere Plattentheorien	142
A.3	Grundlagen zur Akustik	143
A.3.1	Allgemeine lineare Wellengleichung in viskosen Fluiden	143
A.3.2	Schallgeschwindigkeit	146
A.3.3	Gesetz von Hagen-Poiseuille	147
A.3.4	Lineare Wärmeleitungsgleichung	149
A.3.5	Schallausbreitung in zylindrischen Röhren	149

B	Charakterisierungsmethoden	155
B.1	Homogenisierungstheorie	155
B.2	Periodische Randbedingung: FEM	157
B.3	Mindlin-Platte: PB2-RITZ-Methode	159
B.4	Kenngrößen geordneter Kugelpackungen	162
B.5	Akustische Messmethoden	164
B.5.1	Zwei-Mikrofon-Methode	164
B.5.2	Vier-Mikrofon-Methode	164
B.5.3	Two-Load-Methode	166
B.5.4	One-Load-Methode	167
B.5.4.1	Bestimmung der akustischen Parameter	167
B.6	JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD-PRIDE-LAFRAGE-Modell	168
C	Resultate	171
C.1	Sonderfall: Periodische Randbedingung für ideale Anordnung	171
C.1.1	Kubische Elementarzellen	171
C.1.2	Hexagonal dichtest gepackte Elementarzelle	171
C.2	Sinterstellenwinkel	172
C.2.1	Kubisch-Primitiv	173
C.2.2	Kubisch-Raumzentriert	173
C.2.3	Kubisch-Flächenzentriert	174
C.2.4	Hexagonal-Dichtest-Gepackt	174
C.3	Schallabsorption	178
C.4	Schallgeschwindigkeitskörper	183
	Literaturverzeichnis	196