

## 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 strukturemechanischer 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 zellulare 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>17</b>
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 Schallleistung . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Methoden zur Charakterisierung</b>	<b>27</b>
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
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> . . . . .	<b>71</b>
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
<b>5</b>	<b>Schlussbetrachtung</b> . . . . .	<b>113</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	113
5.2	Modellerweiterungen und neue Einsatzgebiete . . . . .	115
5.3	Ausblick . . . . .	116
<b>Anhang</b>		<b>117</b>
<b>A</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b> . . . . .	<b>117</b>
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>B</b>	<b>Charakterisierungsmethoden</b>	<b>155</b>
B.1	Homogenisierungstheorie . . . . .	155
B.2	Periodische Randbedingung: FEM . . . . .	157
B.3	Mindlin-Platte: PB2-RITZ-Methode . . . . .	159
B.4	Kenngößen 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
<b>C</b>	<b>Resultate</b>	<b>171</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>196</b>