Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik

Philipp Wahl

Simulation der Fluidströmung und Basilarmembranschwingung im menschlichen Innenohr

SHAKER VERLAG

Band 57 (2018)

Simulation der Fluidströmung und Basilarmembranschwingung im menschlichen Innenohr

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.–Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Philipp Wahl
aus Ostfildern-Ruit

Hauptberichter: Prof. Dr.–Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard
Mitberichter: Prof. Dr.–Ing. Michael Lauxmann

Tag der mündlichen Prüfung: 14. August 2018

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2018

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 57/2018

Philipp Wahl

Simulation der Fluidströmung und Basilarmembranschwingung im menschlichen Innenohr

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6268-7
ISSN 1861-1651

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 Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart und fasst die Ergebnisse meiner Forschungsarbeit zusammen.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard für das mir und meiner Arbeit stets entgegengebrachte Vertrauen und die Übernahme des Hauptberichts. Seine Ratschläge, vielfältige Unterstützung und die von ihm geprägte offene und vertrauensvolle Atmosphäre am Institut haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bei Prof. Dr.-Ing. Michael Lauxmann möchte ich mich für die Erstellung des Zweitgutachtens, die freundliche Übernahme des Mitberichts und sein Interesse an dieser Arbeit herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Pascal Ziegler, der durch sein vielseitiges fachliches Wissen und seine Bereitschaft, dieses in zahlreichen Diskussionen zu teilen, zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen sowie diese entscheidend geprägt hat. Sein Vertrauen und die damit verbundene Freiheit zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten haben diese Dissertation ermöglicht und gaben mir die Chance, mich fachlich weiterzuentwickeln. Weiter möchte ich vor allem meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Sebastian Ihrle herzlichst für die langjährige Zusammenarbeit, die vielen fachlichen Impulse, ehrlichen Einschätzungen und die große Hilfsbereitschaft sowie sein Interesse an dieser Arbeit auch nach seiner Tätigkeit am Institut danken.

Die Zeit am Institut war von einem kollegialen Arbeitsstil und einer freundschaftlichen Atmosphäre geprägt. Hierfür danke ich allen Kolleginnen und Kollegen. Auch all den Studierenden, die im Rahmen von studentischen Arbeiten wertvolle Beiträge eingebracht haben, möchte ich an dieser Stelle danken, besonders Patrick Schmid und Josef Sauer.

Ferner möchte ich Herrn Dr.-Ing. Johannes Baumgart, Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme Dresden, und Herrn Dr.-Ing. Mario Fleischer, Technische Universität Dresden, für die Bereitstellung des benutzerdefinierten Fluidelements sowie die zahlreichen fachlichen Diskussionen danken.

Ein ganz spezieller Dank gilt Julia für ihre Geduld, ihre Unterstützung in schwierigen Zeiten insbesondere zu Beginn der Promotion und die Ermutigungen während der Ausarbeitung dieser Dissertation sowie meinen Eltern für die Förderung meiner wissenschaftlichen Ausbildung.

Stuttgart, im August 2018
Philipp Wahl

Inhalt

Kurzfassung VII
Abstract XI

1 Einleitung **1**
1.1 Ziel und Inhalt der Arbeit 2

2 Grundlagen **5**
2.1 Anatomie und Physiologie des menschlichen Gehörs 5
2.2 Druck-verschiebungsbasierte Fluidformulierung 8
2.2.1 Erhaltungsgleichungen und Kinematik 8
2.2.2 Konstitutive Gleichungen für das Innenohrfluid 10
2.2.3 Bewegungsgleichungen für die Innenohrströmung 11
2.2.4 FE Formulierung und Fluid-Struktur Interaktion 16
2.3 Druckbasierte Fluidformulierung 20

3 Voruntersuchungen **23**
3.1 Instationäre Rohrströmung 23
3.1.1 Modellierung 24
3.1.2 Analytische Lösungen 26
3.1.3 Simulationsergebnisse 28
3.2 Balkenschwingung im viskosen Fluid 40
3.2.1 Modellierung 41
3.2.2 Analytische Lösung 43
3.2.3 Ergebnisse 44
3.3 Diskussion und Auswahl der Fluidformulierung 50

4 Modellierung **53**

4.1 Fluidvolumina 54

4.1.1 Geometrie 54

4.1.2 Materialeigenschaften und Fluidrandbedingungen 56

4.2 Basilarmembran 57

4.2.1 Geometrie 57

4.2.2 Materialformulierung und Randbedingungen 59

4.3 Angrenzende Strukturen und Anregung 64

4.3.1 Rundfenstermembran 64

4.3.2 Steigbügelfußplatte und Anregung des FE Modells 65

5 Ergebnisse **67**

5.1 Passive Wanderwelle der Basilarmembran 69

5.1.1 Schwingungsverhalten 69

5.1.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit 73

5.2 Geschwindigkeitsverteilung im Fluid 75

5.2.1 Longitudinale Fluidgeschwindigkeit 76

5.2.2 Transversale Fluidgeschwindigkeit 80

5.3 Druckverteilung im Fluid 83

5.3.1 Druckfeld 83

5.3.2 Druckdifferenz und Einfluss der Kompressibilität 89

5.4 Zusammenfassung 95

6 Untersuchungen zu physiologischen Fragestellungen **101**

6.1 Tonotopie 102

6.1.1 Ergebnisse und Auswirkungen auf den Höreindruck 102

6.1.2 Diskussion der Basilarmembranschwingung am Apex und Einfluss der spiralförmigen Anordnung der Fluidkanäle 106

6.2 Cochleare Verstärkung und Einfluss der Fluidviskosität 111

6.2.1 Cochleare Verstärkung 111

6.2.2 Auswirkungen der Fluidviskosität auf die Basilarmembranbewegung und den Höreindruck . . . 114

6.3 Kippbewegungen der Steigbügelfußplatte . . . 118

7 Zusammenfassung **127**

Anhang **133**

A.1 Instationäre Rohrströmung . . . 133

A.2 Balkenschwingung . . . 133

A.3 Druckverteilung . . . 134

Abkürzungen, Formelzeichen und Notation **135**

Literatur **138**