



Doctoral Thesis

Fluid-mechanical model for vestibular responses to sound in presence of a superior canal dehiscence

Author(s):

Grieser, Bernhard Johann

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010443913> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 22681

**FLUID-MECHANICAL MODEL
FOR
VESTIBULAR RESPONSES TO SOUND
IN PRESENCE OF A
SUPERIOR CANAL DEHISCENCE**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Bernhard Johann Grieser

Dipl.-Ing., Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
born on March 4, 1986
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. L. Kleiser, examiner
Prof. Dr. D. Obrist, co-examiner
Prof. Dr. J. Dual, co-examiner

2015

Abstract

Patients with a superior canal dehiscence (SCD) in the inner ear suffer from events of dizziness and vertigo in response to sound, also known as Tullio phenomenon (TP). To date, the mechanisms behind this phenomenon remain obscure. When risky surgical interventions appear to be the only means to cure the symptoms, it may be worthwhile to study the underlying mode of operation and possibly devise less invasive methods.

Approaching this medical condition from an engineering perspective, we are faced with an intertwined system of fluids (endolymph and perilymph), elastic structures (membranous labyrinth, cupula, dehiscence) and rigid bone (temporal bone, stapes). In accordance with the so-called ‘third window theory’, we assume that the vibrating stapes causes abnormal perilymph pulsations towards the pathologic ‘window’ in the superior canal of the balance sense. Based on this primary assumption, we developed a computational model in order to resolve fluid-structure interactions which we expect to arise from such a coupled system. We discretize our computational domain using the Finite-Volume Method and solve the fluid motion with the Navier-Stokes equations in the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation for moving grids. The dynamics of the embedded membranous labyrinth is considered by a linear-elastic shell model and coupled to the adjacent fluids by an iterative procedure using Aitken relaxation. The cupula dynamics follows a volume-based formulation. Our model is implemented in C++ by a tailor-made code using the open source libraries of OpenFOAM and Armadillo.

The simulation results confirm our hypothesis, revealing the occurrence of wave propagation phenomena along the deforming membranous canal. More specifically, we note that two substantially different flows are evolving. First, the deforming labyrinth causes pulsations of the endolymph which lead to rapid vibrations of the cupula, both in phase with the sound stimulus. Second, these primary pulsations feature a static component, the so-called steady streaming, such that endolymph is continuously driven through the canals in (mostly) ampullofugal direction. Reaching a quasi-steady balance with the opposing cupula, the latter maintains a constant deflection amplitude. Both findings are in agreement with clinical observations on the cupula response in patients with SCD.

Carrying out a sensitivity study and employing dimensional analysis, we are able to obtain an analytical fit to match our simulation results

in a relevant range of parameters. Through the vestibulo-ocular reflex, the eyes are moving at a speed and direction which corresponds to the cupula displacement and the plane of the superior canal, respectively. We thus coupled the inner-ear dynamics to the corresponding eye motion by means of lumped parameters. The results reveal a ‘sweet spot’ for the Tullio phenomenon within the audible spectrum which largely coincides with patient data from the literature. We find that the underlying mechanisms originate primarily from Reynolds stresses in the fluid, which are weakest in the lower sound spectrum. Additionally, natural variations in the membrane stiffness and the stapes motility are observed to shift the sweet spot on the frequency scale. Waves become evanescent at frequencies above about 4 – 6kHz, such that we cannot expect vestibular responses in that range.

Kurzfassung

Patienten, die eine Dehiszenz im oberen Bogengang des Innenohrs aufweisen, leiden gewöhnlich an Schall-induzierten Drehschwindelattacken, auch bekannt als Tullio-Phänomen. Bisher konnten dessen Hintergründe nicht ausreichend geklärt werden. Da die zur Behandlung notwendigen Operationen sehr risikoreich sind, könnte es sich lohnen, die Funktionsweise des Phänomens zu erforschen, um aus den gewonnenen Erkenntnissen möglicherweise weniger invasive Verfahren abzuleiten.

Indem wir das Krankheitsbild aus der Sichtweise eines Ingenieurs betrachten, identifizieren wir zunächst ein verwobenes System aus Flüssigkeiten (Endolymphe und Perilymphe), elastischen Strukturen (häutiges Labyrinth, Cupula, Dehiszenz) sowie festem Knochen (Schläfenbein, Steigbügel). In Einklang mit der sogenannten ‘Theorie des dritten Fensters’ vermuten wir, dass der Steigbügel die Flüssigkeitssäule der Perilymphe zum krankhaften ‘Fenster’ hin über das Gleichgewichtsorgan hinweg in Schwingung versetzt. Aufbauend auf dieser Grundannahme haben wir ein Rechenmodell entwickelt, das es ermöglicht, Fluid-Struktur-Interaktionen zu erfassen, welche wir in einem derartig gekoppelten System erwarten. Wir diskretisieren unseren Rechenbereich mittels der Finite-Volumen-Methode und lösen die Flüssigkeitsbewegungen mit den Navier-Stokes-Gleichungen anhand einer Formulierung für bewegliche Rechengitter (‘Arbitrary Lagrangian Eulerian’-Methode). Die Dynamik des eingebetteten, häutigen Labyrinths wird durch ein linear-

elastisches Schalenmodell berücksichtigt und mit den umgebenden Flüssigkeiten über eine iterative Prozedur gekoppelt, die auf der Aitken-Relaxation beruht. Die Dynamik der Cupula orientiert sich am Verdrängungsvolumen. Für unser Modell entwickelten wir einen massgeschneiderten C++-Code, der die frei zugänglichen Bibliotheken von OpenFOAM und Armadillo benutzt.

Die Simulationsergebnisse bestätigen unsere Hypothese, indem sie Wellenausbreitungsphänomene entlang der sich deformierenden Kanalhaut aufzeigen. Dabei treten zwei grundlegend verschiedene Strömungsarten auf. Erstens verursacht die bewegliche Kanalhaut eine pulsierende Bewegung der Endolymphe, welche in schnellen Cupula-Vibrationen in Phase mit der Schallanregung resultiert. Zweitens bewirken diese Primärschwingungen eine statische Strömung, so dass die Endolymphe kontinuierlich in (meist) ampulofugaler Richtung durch den Kanal bewegt wird. Sobald sich ein quasi-stationäres Gleichgewicht mit den gegengerichteten Cupula-Kräften einstellt, kann letztere eine konstante Auslenkung aufrechterhalten. Beide Erkenntnisse stehen in Einklang mit klinischen Beobachtungen zur Cupula-Reaktion in Patienten mit SCD.

Mittels Dimensionsanalyse und einer Parameterstudie fanden wir eine analytische Darstellung, welche unsere Simulationsergebnisse in einem sinnvollen Parameterbereich gut abbildet. Aufgrund des Vestibulo-Okular-Reflexes bewegen sich die Augen mit einer Geschwindigkeit und Richtung, welche durch die Cupula-Auslenkung und die Ebene des oberen Bogengangs bestimmt ist. Hierfür koppelten wir die Innenohrdynamik mit den zugehörigen Augenbewegungen anhand von in Reihe geschalteten Übertragungsfunktionen. Die Ergebnisse zeigen die Existenz eines Bereichs maximaler Schallsensitivität, welcher sich mit verfügbaren Patientendaten weitgehend deckt. Die zu Grunde liegenden Mechanismen werden primär von Reynoldsspannungen verursacht, welche im niederen Frequenzbereich besonders schwach sind. Zudem verschieben natürliche Variationen der Steifigkeit des häutigen Labyrinths sowie der Steigbügelempfindlichkeit die maximale Schallsensitivität in einen anderen Frequenzbereich. Die Wellenausbreitung verschwindet komplett in einem Frequenzbereich oberhalb von ca. 4–6kHz, so dass wir dort keine Reaktionen des Gleichgewichtsorgans erwarten können.