

Dynamische Analyse des Mittelohres

Mattia Ferrazzini; Urban Willi; Norbert Dillier

Universitätsspital Zürich, ORL-Klinik, Frauenklinikstr. 24, CH-8091 Zürich

Email: mattia.ferrazzini@orl.usz.ch

Einführung

Das Mittelohr kann sowohl statisch als auch dynamisch untersucht werden. Um das Schwingungsverhalten des Mittelohres bei dynamischer Anregung im hörbaren Frequenzbereich zu verstehen, werden einige Mittelohrkomponten mittels dynamischer Analyse untersucht.

Ziel der Arbeit ist es, folgende Frage zu beantworten:

1. Welche sind die Resonanzfrequenzen und die dazu gehörigen Schwingungsformen der Trommelfellmembran?
2. Verhalten sich die Ossikel als Starrkörper innerhalb des hörbaren Frequenzbereichs?

Die Fragen werden mittels Modal-Analyse beantwortet, indem die Schwingungsmoden (natürliche Resonanzfrequenzen, Dämpfungswerte und Schwingungsformen) hergeleitet werden. Da zu jeder Resonanzfrequenz eine einzige Schwingungsform gehört, und das Schwingungsverhalten der Struktur bei jeder Frequenz durch die lineare Kombination dieser Schwingungsformen definiert ist, ist das dynamische Verhalten dieser Strukturen vollkommen beschrieben.

Material und Methode

Messgerät

Das dynamische Verhalten der Strukturen wurde durch ein Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV) erfasst. Solche Geräte erlauben die berührungslose Analyse schwingender Oberflächen mit sehr kleiner räumlicher Auflösung (bis $5\mu\text{m}$) und hoher Messempfindlichkeit v_{min} : $0.3\mu\text{m/s}$.

Trommelfellmembran (TM)

TM von 8 frischen Felsenbeinen wurden innerhalb der ersten 24 Stunden post mortem gemessen. Die Mittelohrkavität wurde eröffnet, um die Integrität der Ossikelkette zu überprüfen. Der externe Kanal wurde durch eine Metallkammer mit Mikrophon- und Lautsprechereingang ersetzt.

Das TM wurde akustisch mit einem Periodic Chirp im Frequenzbereich von 0.2 kHz bis 4.5 kHz mit einer Frequenzauflösung von 3,125 Hz angeregt.



Bild 1: Messeinrichtung für die Untersuchung der Trommelfellmembran: das Felsenbein ist auf einem Repositionierungssystem fixiert (links), das TM wird mit dem SLDV (rechts) gemessen



Bild 2: Die isolierten Ossikel werden mit einem Metallstift auf einem Piezoelement fixiert. Unten ist der Zufuhrschlauch (schwarz) für den warmen und feuchten Luftstrom sichtbar.

Isolierte Ossikel (IO)

Das dynamische Verhalten von IO von 5 Felsenbeinen wurde innerhalb 48 Stunden post mortem untersucht.

Die IO wurden mittels Metallstift auf einen Piezoelektrischen Wandler geklebt und im Frequenzbereich von 2 kHz bis 70 kHz mechanisch angeregt.

Veränderungen der Materialeigenschaften durch Austrocknen während der Messungen wurden durch einen warmen (36°C) und feuchten (100%) Luftstrom vermieden.

Resultate: Trommelfellmembran

Messpunkte

Das Schwingungsverhalten von mehr als 100 Punkten pro TM wurde aufgenommen, **Bild 3**.

Im **Bild 4** ist eine typische "Frequency Response Function" (FRF) am Beispiel von Messpunkt 61 dargestellt.

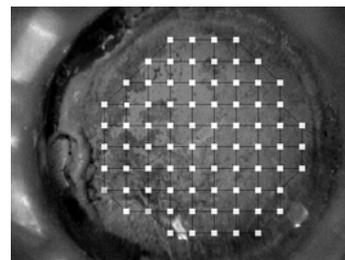


Bild 3: Verteilung der Messpunkte auf der Trommelfellmembran. Mehr als 100 Messpunkte wurden untersucht

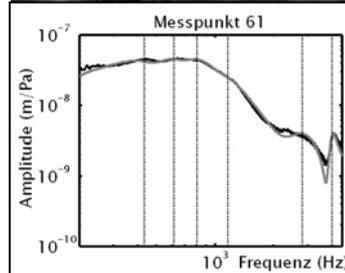


Bild 4: Frequency Response Function eines gemessenen Punktes (Nr. 61) auf dem TM.

Die schwarze Linie ist die gemessene FRF, die graue Linie ist die mathematisch rekonstruierte FRF und die vertikalen Linien sind die detektierten Resonanzfrequenzen

quenzen

Die schwarze Linie stellt den gemessenen Frequenzgang dar. Mittels Modal-Analyse wurden dann Resonanzfrequenzen (vertikale Linien) und Dämpfungswerte hergeleitet. Diese Daten wurden benutzt, um eine mathematische Kurve zu rekonstruieren. Wie zu sehen ist (**Bild 4**), überlappen die gemessenen und rekonstruierten Kurven gut, d.h. dass die wichtigsten Resonanzfrequenzen korrekt hergeleitet wurden. Als Folge der starken Dämpfung (bis 30%) sind die Schwingungsmoden stark gekoppelt.

Überprüfung der Unabhängigkeit der Moden

Um sicher zu sein, dass die detektierten Moden echte Moden sind, wurde das Auto-MAC Korrelationskriterium eingesetzt.

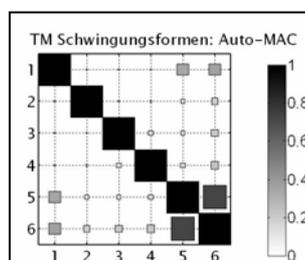


Bild 5: Auto-MAC Korrelationsmatrix. Die Schwingungsformen werden mit allen anderen verglichen, um die Auto-Korrelationswerte zu berechnen. Bsp.: Mode 1 korreliert

praktisch nur mit sich selbst, d.h. ist von den anderen unabhängig. Definitionsgemäss sind echte Moden unabhängig voneinander, was in der Autokorrelationsmatrix als totale Korrelation nur mit sich selbst resultiert (**Bild 5**). In der Tat korrelieren die ersten 4 Moden nur mit sich selbst, wobei Moden 5. und 6. auch gekreuzt korrelieren.

Schwingungsformen

Wenn man die Schwingungsformen betrachtet (**Bild 6**), sieht man, dass je höher die Resonanzfrequenz desto mehr Berge und Täler erscheinen und dass Wanderwellen auf der Membran entstehen, klare Zeichen von Komplexen Moden. Ab der 5. Resonanzfrequenz sind als Folge der starken Dämpfung die Schwingungsformen kaum zu erkennen, d.h. überhalb 3 kHz ist es nicht möglich die verschiedenen Moden auseinanderzuhalten, und damit sind die Korrelationsprobleme für Moden 5 und 6 erklärt.

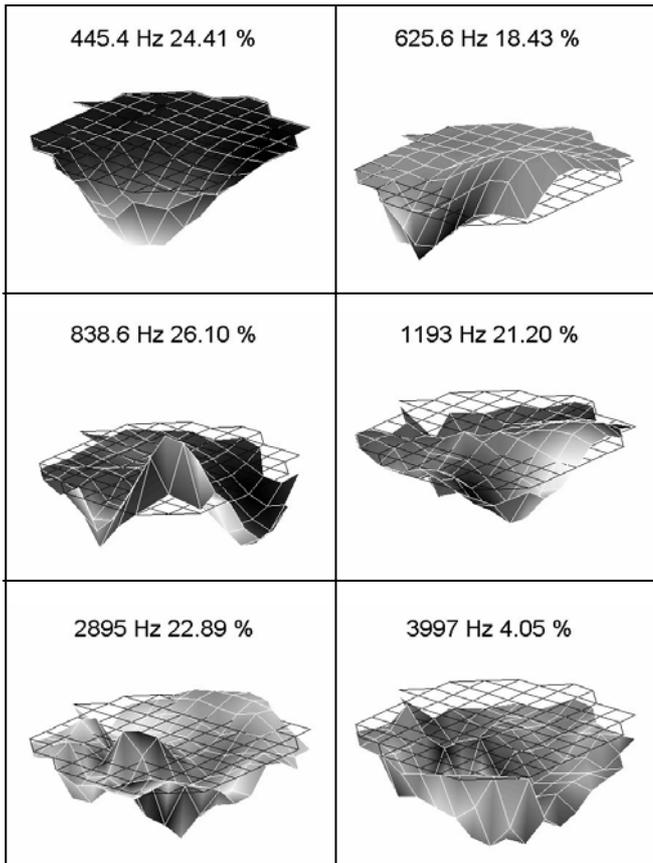


Bild 6: Graphische Darstellung der detektierten Schwingungsformen.

Resultate: isolierte Ossikel

Messpunkte

Die isolierten Ossikel wurden mit derselben Technik analysiert.

Bild 7 zeigt wieder einen typische FRF eines Messpunktes auf dem Amboss.

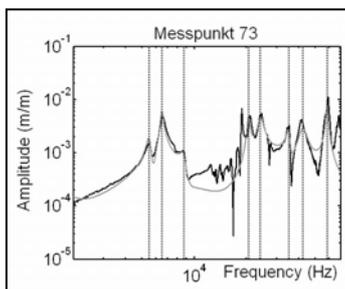


Bild 7: FRF eines gemessenen Punktes (Nr. 73) auf Amboss. Die schwarze Linie ist die gemessene FRF, die graue Linie ist die mathematisch rekonstruierte FRF und die vertikalen Linien markieren die detektierten Resonanzfrequenzen

Die verschiedenen Resonanzfrequenzen sind infolge kleiner Dämpfungswerte (1-3 %) sehr deutliche.

Ziel der Untersuchung ist, das dynamische Verhalten im hörbaren Frequenzbereich zu beschreiben. Daher müssen die anhand der FRF detektierten möglichen Resonanzfrequenzen genau untersucht werden: Stellen sie echte Schwingungsmoden dar?

Schwingungsformen

Da echte Schwingungsmoden durch eine Biegung der Struktur gekennzeichnet sind, kann man die obige Frage durch visuelle Betrachtung der Schwingungsformen beantworten. **Bild 8** zeigt zwei typische Schwingungsformen: bei 5.4 kHz ist keine Biegung der Struktur zu sehen, d.h. der Amboss verhält sich als Starrkörper mit Translationen und Rotationen um den Fixierungspunkt; bei 58.6 kHz ist eine Biegung der Struktur zu sehen, d.h. diese Frequenz gehört zu einer echten Schwingungsform.

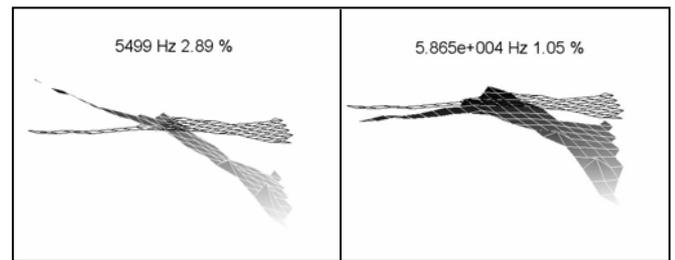


Bild 8: Graphische Darstellung der detektierten Schwingungsformen

Erste natürliche Resonanzfrequenz

Sucht man nach dem oben beschrieben Methode die erste natürliche Resonanzfrequenz für jeden untersuchte Ossikel, sieht man, dass unterhalb 30 kHz keine echten Resonanzfrequenzen auftreten. In **Tabelle 1** sind die Resultate für die 3 gemessenen Hammer und 5 Amboss und Steigbügel gezeigt.

| Malleus | Incus | Stapes |
|----------|----------|----------|
| 35.3 kHz | 41.4 kHz | 31.8 kHz |
| 30.0 kHz | 35.2 kHz | 35.4 kHz |
| 37.1 kHz | 35.0 kHz | 42.7 kHz |
| - | 48.5 kHz | 52.7 kHz |
| - | 35.1 kHz | 37.1 kHz |

Tabelle 1: erste Resonanzfrequenzen für die gemessenen Ossikel

Die relativ grossen Abweichungen sind Folge inter-individueller Variabilität in: Massenverteilung, Volumen und Dimensionen der internen Kavitäten.

Schlussfolgerungen

Trommelfellmembrane

Durch Vergleich der Resultate aller untersuchten Trommelfelle zeigt sich folgendes:

1. die Resonanzfrequenzen weisen eine grosse inter-individuelle Variabilität auf (Zum Bsp.: die Hauptresonanzfrequenz schwankt zwischen 793 Hz und 1272 Hz)
2. die Schwingungsmoden sind komplex und stark gedämpft.
3. die Schwingungsformen sind ähnlich für alle gemessene Felsenbeine.

Isolierte Ossikel

Die isolierten Ossikel verhalten sich innerhalb des hörbaren Frequenzbereichs als Starrkörper, denn die erste Resonanzfrequenz liegt überhalb 30 kHz.