

SAMENVATTING

STUDIE VAN DE MIDDENOORMECHANICA MET BEHULP VAN LASER DOPPLER INTERFEROMETRIE

Dit proefschrift behandelt de ontwikkeling en toepassing van een laser Doppler interferometer voor de meting van zeer kleine mechanische trillingen in het perifere gehoorzintuig. De werking van het instrument is gebaseerd op het dopplereffect. Dit houdt in, dat licht een frequentieverschuiving ondergaat wanneer het gereflecteerd of verstrooid wordt door een bewegend voorwerp. Deze dopplerverschuiving is evenredig met de snelheid van het voorwerp en kan gemeten worden met behulp van een interferometrische meetmethode. Het hiervoor ontwikkelde instrument wordt een laser Doppler snelheidsmeter of LDV (Laser Doppler Velocity meter) genoemd.

Trillingen met een amplitude kleiner dan 0.001 nanometer (10^{-12} meter) zijn bij de drempel van het gehoor verantwoordelijk voor de overdracht van geluid via trommelvlies en middenoor naar de mechanisch-electrische receptoren in het binnenoor. Het in dit onderzoek gebouwde en toegepaste instrument is in staat om amplituden te meten tot op 0.003 nanometer of minder. Het instrument wordt toegepast voor het meten van trillings-karakteristieken van trommelvlies en gehoorbeentketen in de mens en de kat. Resultaten worden gebruikt voor het construeren van een model waarmee de akoesto-mechanische functie van trommelvlies en middenoor beschreven kan worden. Doel hiervan is om bestaande modelbeschrijvingen te verfijnen. Dit leidt tot een akoesto-mechanisch model dat in vergelijking met bestaande modellen, beter toepasbaar is voor hogere frequenties. Dit wordt bereikt door het trommelvlies in twee of meer zones te verdelen met een onderlinge mechanische koppeling.

Een tweede hier besproken toepassing van het instrument is het testen van

de effectiviteit van protheses ter vervanging van de gehoorbeenteten. Hiertoe wordt de beweging van de voetplaat van de stijgbeugel bestudeerd voor en na het aanbrengen van de prothese. Nagegaan wordt hoe de prothese het best geplaatst kan worden.

In hoofdstuk 2 wordt de theorie van de laser Doppler snelheidsmeter behandeld. Gesteld wordt dat de toepassing van een optische heterodyne techniek te verkiezen valt boven een optische homodyne techniek. Het gebruik van de homodyne techniek heeft inherent slechtere eigenschappen ten aanzien van het onderdrukken van de gevolgen van omgevingstrillingen en storende fluctuaties in reflectiviteit. Dit in tegenstelling tot de hier toegepaste heterodyne techniek, die ook toegepast kan worden bij gebruik van diffuus verstrooid licht. Dit laatste maakt het niet noodzakelijk om een speciaal spiegelreflecterend voorwerp op het te meten object te plaatsen.

Verder wordt er ingegaan op de belangrijkste factoren die van invloed zijn op de gevoeligheid van het instrument. Uit metingen blijkt dat de ruis die gegenereerd wordt door de frequency tracker (demodulator) ongeveer in de zelfde orde is van de ruis gegenereerd door de foto-detector. Verbetering van gevoeligheid kan verkregen worden door verbetering van de frequency-tracker onder gelijktijdige verlaging van het effect van de ruis afkomstig van de foto-detector op de signaal-ruis-verhouding. Dit laatste is mogelijk door het vermogen van de laser te vergroten of door de reflecterende eigenschappen van het te meten object te verhogen door middel van het aanbrengen van een reflecterende structuur.

In het vervolg van hoofdstuk 2 wordt er ingegaan op de meetprocedures en wijze van geluidstimulatie. De uiteindelijke nauwkeurigheid van het instrument wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de geluidmeting. Totale onnauwkeurigheid is in de orde van 1 à 2 dB voor frequenties beneden de 5 kHz en toenemend tot circa 4 dB voor frequenties tot 10 kHz. De meetprocedures zijn grotendeels geautomatiseerd. Trillingskarakteristieken worden gemeten over een frequentiebereik van 100 Hz tot 10 kHz en hoger. De bovenstaande onnauwkeurigheden gelden bij toepassing van een (standaard) geluidsdruk van 80 dB SPL en geautomatiseerde meetprocedure. Een lagere geluidsdruk is mogelijk bij een handmatige bediening van het instrument. Voor sommige frequenties kan er vanaf een geluidsdruk van 30 dB SPL of lager gemeten worden.

In hoofdstuk 3 wordt het instrument toegepast voor het meten van trillingen aan trommelvlies en gehoorbeenteten van de mens, waarbij gebruik is

gemaakt van rotsbeen-preparaties (post-mortem). De stabiliteit van de preparaties is getest over meer dan 6 uur en blijft binnen +/- 3 dB. De voetplaat van de stijgbeugel blijkt een zuigerachtige beweging te maken die gehandhaafd blijft tot de hoge geluiddruk van 120 dB SPL of hoger. Damping en stijfheid van de gehoorbeentaken blijkt voor een groot deel veroorzaakt te worden door het binnenoor met het ovale venster. De middenoorholtes blijken weinig bij te dragen tot de stijfheid van het middenoorsysteem.

In hoofdstuk 4 wordt het instrument toegepast voor het testen van de effectiviteit van middenoorprothesen. Prothesen worden toegepast indien een deel van de gehoorbeentaken niet meer functioneel is. Er zijn twee soorten van prothesen getest.

De hamer-stijgbeugel-prothese dient ter vervanging van het aambeeld (incus). Deze prothese blijkt vrij gemakkelijk een kanteling van de stijgbeugel (stapes) te veroorzaken. In sommige gevallen kantelt de stijgbeugel om het midden van de voetplaat, waardoor de netto volumesnelheid van het ovale venster in het binnenoor nihil is. Indien het mogelijk is om de prothese gunstig te plaatsen, hoeft er geen of slechts weinig kanteling op te treden, waarbij de prothese over een breed frequentiebereik goed kan voldoen.

Een tweede type prothese genaamd TORP (Total Ossicular Replacement Protheses), ter vervanging van incus en stijgbeugelbovenbouw, veroorzaakt geen of slechts weinig kanteling. Voor frequenties onder 1 à 2 kHz voldoet deze prothese uitstekend. Voor de hogere frequenties kan een verlies in gevoeligheid resteren in de orde van 20 dB.

Hoofdstuk 5 rapporteert metingen aan de kat (in-vivo onder narcose). Naast de bepaling van trommelvliestrillingen onder normale condities wordt nagegaan wat het effect is van het aanbrengen van een onder- of bovendruk in de middenoorholtes. De stijfheid van het systeem blijkt hierdoor sterk toe te nemen waardoor de amplitude van de trillingen voor frequenties onder 2 kHz sterk afneemt. In tegenstelling tot het gevondene bij de mens, hebben de middenoorholtes bij de kat een grote invloed op de karakteristieken. De combinatie van bullaholte en trommelvliesholte met verbinding via een opening in de scheidingswand, blijkt verantwoordelijk te zijn voor een antiresonantie rond 4 kHz. Deze holtes dragen bovendien sterk bij tot de stijfheid van het middenoorsysteem. Bij opening van de holtes blijken de trillingen onder 1 kHz, gemiddeld 6.5 dB toe te nemen in amplitude. De stijfheid van het middenoor bij geopende holtes blijkt gedomineerd te worden door de stijfheid van het binnen-

oor met ovale venster, hetgeen vergelijkbaar is met de conclusie voor de mens. Verdere metingen aan de gehoorbeentketen leiden tot de conclusie dat de keten de trillingen met slechts geringe slip overdraagt aan de stijgbeugel. De voor-naamste slip is gelocaliseerd in de hamer-aambeeld-koppeling; de aambeeld-stijgbeugel-koppeling is daarentegen nagenoeg star.

In hoofdstuk 6 wordt de theorie voor het modelleren van het middenoor met behulp van een elektrisch analogon beschreven. Bestaande modellen worden besproken en vergeleken met mechanische meetgegevens. Het veel gebruikte model van Zwislocki blijkt de mechanisch metingen bij hogere frequenties niet voldoende goed te kunnen beschrijven. Opdeling van het trommelvlies in meerdere delen kan het niet gelijk in fase trillen van het trommelvlies beter simuleren. Hoewel het model van Zwislocki het trommelvlies in twee delen opdeelt, blijken deze twee delen niet mechanisch aan elkaar gekoppeld te zijn. In dit onderzoek wordt een akoesto-mechanisch model afgeleid waarbij het trommelvlies in twee of drie delen wordt opgedeeld, die mechanisch met elkaar gekoppeld zijn. Het model is uitbreidbaar tot meer delen. Het gebruikte model heeft als bijkomend voordeel dat de mechanische metingen direct gerelateerd kunnen worden aan het model, zonder conversie van akoestische naar mechanische grootheden.

In hoofdstuk 7 worden de parameters voor het model geschat met behulp van de mechanische metingen uit hoofdstuk 3 en 5. Dit levert een set van parameters op voor het oor van de mens en van de kat. Resultaten van modelsimulaties worden vergeleken met de gedane metingen. De overeenstemming blijkt, in vergelijking met het Zwislocki model, duidelijk verbeterd te zijn voor de hoge frequenties, met name voor het model afgeleid voor de kat. Voor de mens is de overeenstemming ten aanzien van de fasekarakteristieken wat minder goed voor frequenties boven de 7 kHz. Verbetering hiervan is wellicht mogelijk door uitbreiding van het model met meer zones. Dit is niet verder uitgewerkt vanwege de toenemende complexiteit en het groter aantal noodzakelijke metingen.

Resultaten van modelsimulaties zijn ook vergeleken met akoestische impedantiemetingen bekend uit de literatuur. De overeenstemming is goed voor lage frequenties, maar niet voor de hogere frequenties. Dit gebrek aan overeenstemming moet echter geweten worden aan de afnemende nauwkeurigheid van de impedantiemetingen bij toenemende frequentie. Dit wordt veroorzaakt door de enigszins indirecte meetwijze waarbij het gehoorkanaal tussen akoestische opnemer en trommelvlies een ongewenste bijdrage levert, waarvoor slechts in beperkte

mate gecorrigeerd kan worden. Het in dit onderzoek toegepaste LDV instrument heeft dit nadeel niet. De meetresultaten die geldig zijn tot 10 kHz en hoger, geven daarom een goede basis voor het uitbreiden van de geldigheid van de modellen tot hogere frequenties. De hier ontwikkelde 2- en 3-zone modellen blijken een redelijke tot goede overeenstemming met de meetresultaten te geven.