

CHARACTERISTICS AND MECHANISMS OF SPONTANEOUS OTOACOUSTIC EMISSIONS

Pim van Dijk

CHARACTERISTICS AND MECHANISMS OF SPONTANEOUS OTOACOUSTIC EMISSIONS

Pim van Dijk

Eerste promotor: Prof. Dr. Ir. H.P. Wit
Tweede promotor: Prof. Dr. Ir. H. Duifhuis

UNIVERSITY OF GRONINGEN
The Netherlands

CHARACTERISTICS AND MECHANISMS
OF
SPONTANEOUS OTOACOUSTIC
EMISSIONS

Thesis

submitted to fulfil the requirements of the Ph.D. degree in
Mathematics and Natural Sciences
on the authority of the
Rector Magnificus Dr. L.J. Engels
to be defended in public on
Monday, March 5th, 1990
at 4.00 p.m.

by

Pim van Dijk

born on november 4, 1960
in Delft, The Netherlands

Aan mijn ouders



The experiments described in this thesis were performed at the Institute of Audiology, University Hospital, P.O.Box 30.001, 9700 RB Groningen, The Netherlands (Chapter 1, 2, and 3), and the Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720, USA (Chapter 4).

This work was supported by the Netherlands Organization for Scientific Research (NWO) through the Foundation for Biophysics.

Contents

INTRODUCTION	1
<i>Chapter 1</i>	7
SYNCHRONIZATION OF SPONTANEOUS OTOACOUSTIC EMISSIONS TO A $2f_1 - f_2$ DISTORTION PRODUCT. P. van Dijk and H.P. Wit, submitted to J. Acoust. Soc. Am..	
<i>Chapter 2</i>	23
AMPLITUDE AND FREQUENCY FLUCTUATIONS OF SPONTANEOUS OTOACOUSTIC EMISSIONS. P. van Dijk and H.P. Wit, submitted to J. Acoust. Soc. Am..	
<i>Chapter 3</i>	65
SPONTANEOUS OTOACOUSTIC EMISSIONS IN THE EUROPEAN EDIBLE FROG (<i>RANA ESCULENTA</i>); SPECTRAL DETAILS AND TEMPERATURE DEPENDENCE. P. van Dijk, H.P. Wit and J.M. Segenhout, Hear. Res. 42, 273-282.	
<i>Chapter 4</i>	87
TEMPERATURE EFFECTS ON AUDITORY NERVE FIBER RESPONSE IN THE AMERICAN BULLFROG. P. van Dijk, E.R. Lewis and H.P. Wit, Hear. Res., accepted.	
SAMENVATTING	107
NAWOORD	113

- Schermuly, L. and Klinke, R. (1985) Change of characteristic frequency of pigeon primary auditory afferents with temperature. *J. Comp. Physiol.* 156, 209-211.
- Schloth, E. (1983) Relation between spectral composition of spontaneous otoacoustic emissions and fine-structure of threshold in quiet. *Acustica* 53, 250-256.
- Schloth, E. and Zwicker, E. (1983) Mechanical and acoustical influences of spontaneous oto-acoustic emissions. *Hear. Res.* 11, 285-293.
- Shofner, W.P. and Feng, A.S. (1981) Post-metamorphic development of the frequency selectivities and sensitivities of the peripheral auditory system of the bullfrog, *Rana catesbeiana*. *J. Exp. Biol.* 93, 181-196.
- Smolders, J.W.T. and Klinke, R. (1984) Effects of temperature on the properties of primary auditory fibres of the spectacled caiman, *Caiman crocodilus* (L.). *J. Comp. Physiol.* A155, 19-30.
- Stiebler, I. and Narins, P.M. (1988) personal communication.
- van Dijk, P. and Wit, H.P. (1987) Temperature dependence of frog spontaneous otoacoustic emissions. *J. Acoust. Soc. Am.* 82, 2147-2150.
- van Dijk, P., Wit, H.P. and Segenhout, J.M. (1989) Spontaneous otoacoustic emissions in the European edible frog (*Rana esculenta*): Spectral details and temperature dependence. Chapter 3 of this thesis, and *Hear. Res.*, accepted.
- Walkowiak, W. (1980) Sensitivity, range and temperature dependence of hearing in the grass frog and fire-bellied toad. *Behav. Processes* 5, 363-372.
- Wilson, J.P. (1980) Evidence for a cochlear origin for acoustical re-emission, threshold fine-structure and tonal tinnitus. *Hear. Res.* 2, 233-252.
- Wilson, J.P., Whitehead, M.L. and Baker, R.J. 1986 The effect of temperature on otoacoustic emission tuning properties. In: B.C.J. Moore and R.D. Patterson (Eds.), *Auditory Frequency Selectivity*, Plenum Press, London, pp.39-46.
- Wit, H.P., Langevoort, J.C. and Ritsma, R.J. (1981) Frequency spectra of cochlear acoustic emissions ('Kemp-echoes'). *J. Acoust. Soc. Am.* 70, 437-445.
- Ziss, C.A. and Glatcke, T.J. (1988) Reliability of spontaneous otoacoustic emission suppression tuning curve measures. *J. Sp. Hear. Res.* 31, 616-619.

SAMENVATTING

Eigenschappen en mechanismen van spontane otoakoestische emissies

Dit proefschrift beschrijft spontane otoakoestische emissies van mensen en kikkers. Met een gevoelige microfoon, aangesloten op een oor van b.v. een mens, kunnen in veel gevallen zachte fluittoontjes worden geregistreerd. De frequenties van deze spontane otoakoestische emissies liggen doorgaans tussen de 1 en 3 kHz, terwijl het geluidsniveau van emissies rond de gehoordrempel ligt. De meest gangbare opvatting over het ontstaan van een emissie is, dat deze gegenereerd wordt door een actief auditief filter. Instabiliteit van een dergelijk filter zou de oorzaak zijn van een mechanische oscillatie in het binnenoor, die een akoestische emissie in de gehoorgang tot gevolg heeft.

Hoofdstuk 1 behandelt synchronisatie van spontane otoakoestische emissies. Synchronisatie is karakteristiek voor de interactie tussen een oscillator en een periodieke kracht (stimulus). Deze interactie wordt gekenmerkt door een strijd tussen de oscillator, die zijn eigen frequentie f_0 in stand probeert te houden, en de kracht, die zijn frequentie f_s probeert op te dringen aan de oscillator.

Synchronisatie van spontane otoakoestische emissies kan bestuurd worden door een toon met frequentie f_s als stimulus aan te bieden aan een oor, dat een emissie met frequentie f_0 genereert. Als de stimulus voldoende sterk is, zal de emissiefrequentie verschuiven naar de synchronisatiefrequentie f_s . Een nadeel van een dergelijke aanpak is, dat emissie en stimulus (beide aanwezig in de gehoorgang) niet van elkaar gescheiden kunnen worden; b.v. door filtering van het microfoonsignaal. Daarom werd als synchroniserende periodieke 'kracht'

een toon gebruikt die in het oor werd opgewekt. Dit gebeurde met een stimulus bestaande uit twee tonen met respectievelijk de frequenties f_1 en f_2 . Een dergelijke stimulus genereert in het oor een combinatie-ton met frequentie $f_s = 2f_1 - f_2$. De frequenties f_1 en f_2 werden zo gekozen dat f_s dicht bij de emissiefrequentie f_0 lag. Omdat de stimulusfrequenties f_1 en f_2 aanzienlijk verschillen (~ 200 Hz) van de emissiefrequentie f_0 en de synchronisatiefrequentie f_s , kan nu door filtering van het microfoonsignaal de emissie gescheiden worden van de stimulus. Aan de hand van het gefilterde microfoonsignaal kan synchronisatie van de emissie in detail worden bestudeerd.

In Hoofdstuk 1 wordt vooral de analyse van de fase van een emissie t.o.v. de combinatie-ton met frequentie f_s uitgebreid beschreven. Bij deze analyse werd gebruik gemaakt van registratie van nuldoorgangen van het gefilterde microfoonsignaal. Bij voldoende intensiteit (~ 30 dB SPL) van de primaire tonen f_1 en f_2 , fluctueerde de emissiefase rond een constante waarde: de in het oor opgewekte combinatie-ton was voldoende sterk om de emissie te synchroniseren met frequentie f_s . Als de primaire tonen zachter waren (~ 20 dB SPL), bleken op onregelmatige momenten 2π -fasesprongen op te treden: af en toe ontglipt de emissie aan synchronisatie, om zijn eigen frequentie f_0 te herstellen. Blijkbaar was de combinatie-ton dan niet voldoende sterk om de emissie voortdurend te synchroniseren.

De interactie van een emissie met een kubisch vervormingsprodukt, zoals beschreven in Hoofdstuk 1, is analoog aan de interactie tussen een oscillator en een periodieke kracht. De onregelmatigheid van de fasesprongen kan verklaard worden, door aan te nemen dat de emissie-oscillator in contact staat met een ruisbron (b.v. thermische ruis).

Hoofdstuk 2 beschrijft de analyse van amplitude- en frequentiefluctuaties van spontane otoakoestische emissies. Een emissiesignaal kan beschreven worden als een harmonische trilling waarvan de amplitude en de frequentie fluctueren. Zoals al werd vermeld, kan één oor soms meerdere emissies met verschillende frequentie en luidheid uitzenden. Per oor (8 mensen- en 2 kikkeroren) werd voor de luidste emissie het amplitudesignaal $A(t)$ en de periode $T(t_i)$ bepaald. De periode (= inverse van de frequentie) werd bepaald door de tijd tussen opeenvolgende nuldoorgangen t_{i-1} en t_i te meten. Bij mensen bleek, dat respectievelijk amplitude en periode gemiddeld slechts

3% en 0.07% fluctueerden. Voor beide kikkeremissies waren de fluctuaties ongeveer 10 keer zo groot. Naast dit verschil tussen emissies bij kikkers en mensen, werden voornamelijk overeenkomsten gevonden: (1) De verhouding tussen de grootte van respectievelijk amplitude- en frequentiefluctuaties lag in de zelfde orde van grootte voor alle onderzochte emissies. (2) Uit spectra van $A(t)$ en $T(t_i)$ bleek dat amplitude en frequentie langzaam fluctueren t.o.v. de frequentie van de emissie: de afsnijfrequentie van deze spectra was in de orde van 10 Hz.

Naast de experimentele resultaten beschrijft Hoofdstuk 2 amplitude- en frequentiefluctuaties van een mathematische oscillator. Deze beschrijving spitst zich toe op de vraag "wat kan men over de oscillator te weten komen door bestudering van amplitude- en frequentiefluctuaties?" In het model worden de fluctuaties veroorzaakt door wisselwerking van de oscillator met een ruisbron. Omdat zowel de amplitude- als de frequentiefluctuaties veroorzaakt worden door dezelfde ruisbron, zal er een verband tussen beide fluctuaties bestaan. De wijze waarop amplitude- en frequentiefluctuaties verband houden is echter verschillend voor verschillende types oscillatoren en ruisbronnen. Bestudering van de fluctuaties kan dus inderdaad informatie opleveren over de oscillator, maar ook over de ruisbron.

Omdat de oscillator, waardoor een spontane otoakoestische emissie wordt gegenereerd, zich bevindt in het binnenoor van b.v. een mens, hebben we geen directe toegang tot die oscillator. Daarom vormt bestudering van amplitude- en frequentiefluctuaties van emissiesignalen een mogelijkheid om de eigenschappen van de emissiegenerator te onderzoeken. Uit vergelijking van de experimentele met de theoretische resultaten blijkt, dat een oscillator met lineaire stijfheid (b.v. een Van der Pol oscillator), die aangedreven wordt met witte Gaussische ruis, niet afdoende de emissiegenerator kan beschrijven. Andere oscillatoren (b.v. met niet-lineaire stijfheid) en ruisbronnen (b.v. smalbandige ruis), die mogelijk wel de experimentele resultaten kunnen verklaren, worden in Hoofdstuk 2 besproken.

Hoofdstuk 3 is in zijn geheel gewijd aan spontane otoakoestische emissies van kikkers (*Rana esculenta*). Spontane emissies werden gevonden in 71% van de onderzochte kikkeroren. Van alle tot nu toe onderzochte diersoorten blijken alleen de kikker en de mens (30%) frequent spontane emissies te genereren. In vergelijking met mensen

hebben kikkers een eenvoudig binnenoor. Blijkbaar is de complexe structuur van het mensenoar niet nodig om emissies op te wekken.

De frequentie van de geregistreerde kikkeremissies lag tussen 450 en 1350 Hz. Deze frequenties zijn verdeeld over twee gescheiden populaties: één boven en één beneden 1 kHz. Met één uitzondering traden hooguit twee emissies op in elk kikkeroor. Als twee emissies werden gevonden, lag er één boven en één beneden 1 kHz. Dit is opmerkelijk, omdat de twee gehoororgaantjes (de amfibische en de basilaire papilla) in het oor van de kikker *Rana esculenta* waarschijnlijk gevoelig zijn voor geluiden met frequenties resp. beneden en boven ongeveer 1 kHz.

Een emissiesignaal $V(t)$, dat geregistreerd werd in een kikkeroor, werd gedigitaliseerd tot een signaal V_i . Van de getallen V_i werd een histogram $P(V_i)$ bepaald. De vorm van $P(V_i)$ is gelijk aan die van de waarschijnlijkheidsverdeling van een sinusvormig signaal waaraan ruis is toegevoegd. Daarom is geconcludeerd dat, evenals emissies van mensen, ook emissies van kikkers gegenereerd worden door een actieve oscillator.

Omdat kikkers koudbloedig zijn, past de lichaamstemperatuur van een kikker zich aan bij de omgevingstemperatuur. In 4 kikkers werd de invloed van lichaamstemperatuur op de intensiteit en de frequentie van emissies onderzocht. Een emissie kon worden "in- of uitgeschakeld" door de temperatuur een paar graden te veranderen. Bij temperaturen beneden het "schakelinterval" was de emissie "uitgeschakeld"; bij hogere temperaturen, waarvoor de emissie was "ingeschakeld", werd geen duidelijk verband tussen temperatuur en emissieintensiteit gevonden. De frequentie van een emissie nam bij stijgende temperatuur toe (met 0.02 tot 0.04 octaaf per graad Celsius)

Hoofdstuk 4 beschrijft de temperatuurafhankelijkheid van neurale responsies in auditieve zenuwvezels van de Amerikaanse brulkikker (*Rana catesbeiana*). Stijgende en dalende temperatuur hadden een reversibel effect. Temperatuurstijging resulteerde in toename van zg. beste frequentie (f_{BF}) van zenuwvezels die in contact staan met de amfibische papilla ($f_{BF} < 1$ kHz; toenamen tot 0.06 oct/ $^{\circ}$ C). In zenuwvezels van de basilaire papilla ($f_{BF} > 1$ kHz) werd geen significante toename van de beste frequentie waargenomen. Dit betekent dat boven 1 kHz de beste frequentie van auditieve zenuwvezels en

de emissiefrequentie (zie Hoofdstuk 3) een verschillende temperatuurcoëfficiënt hebben. De beste frequentie van een zenuwvezel en de emissiefrequentie worden dus niet bepaald door hetzelfde afstemmechanisme. Vergelijking van de resultaten in de Hoofdstukken 3 en 4 levert dus geen ondersteuning op voor de hypothese, dat emissiegeneratie en frequentieselectiviteit van zenuwvezels door dezelfde auditieve filters worden veroorzaakt.