

SIMULATION DER EIGENSCHAFTEN OTO-AKUSTISCHER EMISSIONEN MIT HILFE EINES ANALOGEN UND EINES DIGITALEN INNENOHRMODELLS.

W. Peisl, E. Zwicker

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

Unter otoakustischen Emissionen versteht man Aussendungen des Innenohres, welche durch aktive Prozesse im Cortischen Organ verursacht werden und als akustische Schwingungen im abgeschlossenen Gehörgang von Versuchspersonen gemessen werden können /5/. Für alle drei Arten von Emissionen, spontane (SOAE), synchron evozierte (SEOAE) und zeitverzögerte evozierte (DEOAE) Emissionen, ist der minimale Frequenzabstand von Extremwerten im Spektrum charakteristisch /4/. In der Skala der Tonheit ergibt sich für diesen frequenzabhängigen Abstand ein konstanter Wert von etwa 0,4 Bark, der mit den hydromechanischen Eigenschaften des menschlichen Innenohres zusammenhängt /3,4,5/. Ein weiteres spezifisches Merkmal von SEOAE'n und DEOAE'n zeigt sich in der nichtlinearen Abhängigkeit der Emissions-Amplitude vom Evoziererpegel in Form einer Sättigungscharakteristik für Evoziererpegel SL_T größer als 40 bis 50 dB /5,6/. Emissionen können darüber hinaus durch simultan dargebotene Störtöne in ihrer Amplitude beeinflusst werden und beschreiben somit indirekt das spektrale Auflösungsvermögen (mittels Suppressions-Tuningkurven) und das zeitliche Auflösungsvermögen (mittels Suppressions-Periodenmuster) der peripheren Vorverarbeitung des Gehörs /1,5,7/.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, mit Hilfe eines analogen und eines digitalen innenohrmodells die Eigenschaften otoakustischer Emissionen zu simulieren, um den strukturellen Ansatz für das Funktionsschema der peripheren Vorverarbeitung nach /1/, auf welchem beide Modelle basieren, zu überprüfen und zu erhärten.

Ausgangspunkt der Simulation ist das analoge Innenohrmodell nach Zwicker /2/, welches den Frequenzbereich von 0,5 bis 8 kHz mit 150 Sektionen, die jeweils einer Länge von 130 μ m entlang der Basilarmembran (BM) entsprechen, nachbildet. Gemäß dem Ansatz nach /1/ enthält das Modell zusätzlich aktive, nichtlineare Rückkopplungskreise, die lateral über Widerstände verkoppelt sind und die Funktionsweise der äußeren Haarzellen realisieren. Das Digitalmodell basiert auf der Netzwerkstruktur des Analogmodells und bildet in Form eines Wellendigitalfilters den gesamten Frequenzbereich von 10 Hz bis 15 kHz bei gleicher Diskretisierung im Ortsbereich nach /6/. Das Rechnermodell arbeitet im Zeitbereich und bietet den zusätzlichen Vorteil, daß alle Parameter leicht variiert werden können, wobei Frequenzverläufe mittels eines FFT-Algorithmus berechnet werden.

Während im Analogmodell SEOAE'n infolge der Ungenauigkeit der Realisierung, insbesondere der nichtlinearen Kennlinien, immer auftreten, muß für die Simulation von SEOAE'n im Rechnermodell mindestens eine Störstelle vorgesehen werden, was z. B. durch eine Änderung der Werte aller Verkopplungswiderstände in einer Sektion geschieht. Fig. 1(a) zeigt den Pegel-Frequenzverlauf, der sich am Eingang des Modells ergibt, wenn die Störstelle in Schritten

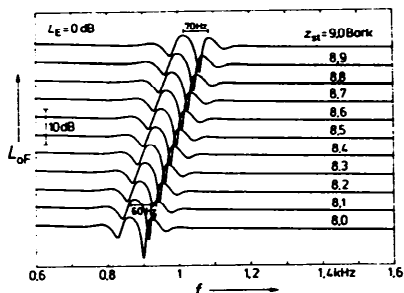


Fig. 1(a): Pegel-Frequenzverläufe $L_{of}(f)$ für eine simultan evozierte Emission, welche im Digitalmodell mittels einer einzigen, im Bereich zwischen 8,0 und 9,0 Bark vorgegebenen, lokalen Unstetigkeit simuliert wurde.

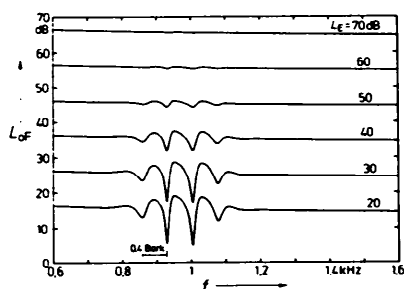


Fig. 1(b): Pegel-Frequenzverläufe $L_{of}(f)$ einer simultan evozierten Emission für verschiedene Eingangspegel L_E , welche im Digitalmodell für zwei vorgegebene, lokale Unstetigkeiten berechnet wurden.

von $130 \mu\text{m}$ ($\approx 0,1$ Bark) entlang der BM im Tonheitsbereich von 8,0 bis 9,0 Bark verschoben wird. Dieses Spektrum zeigt Maxima, die einen Abstand von 60 Hz bis 70 Hz aufweisen, was einem konstanten Tonheitsabstand von etwa 0,4 Bark entspricht. Somit lassen sich mit dem Modell an Versuchspersonen gemessene SEOAE'n simulieren, indem an geeigneten Stellen entlang der BM **einzelne Störstellen** vorgegeben werden. Fig. 1(b) stellt die nichtlineare Pegelabhängigkeit einer berechneten SEOAE dar, welche sich durch die Vorgabe zweier Störstellen im Abstand von 0,91 mm im Tonheitsbereich bei 8,0 Bark ergibt: für Eingangspegel $L_E \geq 60$ dB verschwindet die Welligkeit im Emissionsspektrum /5/.

Zwei Beispiele für SOAE'n sind in den Fig. 2(a,b) aufgetragen: dazu wurde am Analogmodell die Verstärkung in den Rückkopplungsschleifen erhöht, im Digitalmodell wurden zusätzlich entlang der BM statistisch gleichverteilte Störstellen hinzugefügt. In beiden Modellen ist eine deutliche Zunahme der Frequenzabstände zwischen den einzelnen Emissions-Maxima nach höheren Emissionsfrequenzen hin zu beobachten. Die Ursache hierfür liegt darin, daß der Tonheitsabstand von 0,4 Bark zwischen benachbarten SOAE'n im Frequenzbereich einem mit der Frequenz anwachsenden Frequenzabstand entspricht/3,4/.

Emissionen werden durch simultan dargebotene Störtöne in ihrer Amplitude beeinflusst. Als Beispiel hierfür ist in Fig. 3(a) ein am Digitalmodell berechnetes Suppressions-Perioden-Zeitmuster für eine simulierte DEOAE, welche durch einen tieffrequenten Störton mit der Frequenz $f_s = 25$ Hz und dem Pegel $L_s = 85$ dB abhängig von der zeitlichen Lage des

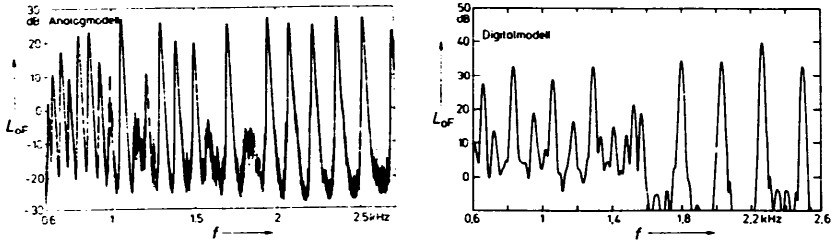


Fig. 2: (a) Am Analogmodell durch Erhöhung der Verstärkung in den Rückkopplungskreisen auftretende spontane Emissionen. (b) am Digitalmodell durch Hinzufügen von statistisch gleichverteilten, lokalen Unstetigkeiten berechnete spontane Emissionen.

Evoziererimpulses (Pegel $L_T^* = 6$ dB bei $f_T = 2000$ Hz) innerhalb der Periode des Störschalls unterdrückt bzw. sogar verstärkt wird, dargestellt /3,7/. Diese charakteristische Abhängigkeit der Größe der DEOAE, welche sich in einer mit der Suppressor-Periode zeitlich wiederkehrenden Anhebung bzw. Abschwächung der Emissions-Amplitude für Suppressor-Pegel $L_S \leq 85$ dB und in einer mit der **halben** Suppressor-Periode zeitlich wiederkehrenden Verminderung der Emissions-Amplitude für Suppressorpegel $L_S \leq 90$ dB zeigt, hat seine Ursache in der Asymmetrie der nichtlinearen Kennlinie: der Suppressor ton verschiebt den Arbeitspunkt der Rückkopplungsschaltungen periodisch /3/. Ein weiteres, am Analogmodell gemessenes Beispiel für Suppressions-Tuningkurven ist in Fig. 3(b) wiedergegeben: aufgetragen ist der Pegel L_S eines Suppressortones in Abhängigkeit seiner Frequenz f_S , der notwendig ist, um den Pegel einer SOAE bei $f_{SOAE} = 1270$ Hz um 3 dB zu reduzieren. Diese Suppressions-Tuningkurve charakterisiert die Frequenzelektivität des Gehörs bei kleinen Pegeln, welche durch die Frequenzgruppenbreite gegeben ist /3,5/.

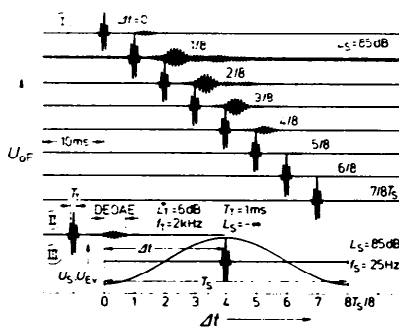


Fig. 3(a): Am Digitalmodell simuliertes DEOAE-Suppressions-Perioden-Zeitmuster: Zeitfunktionen $u_{OF}(t)$ der DEOAE, welche von gaußförmigen Testtonimpulsen mit einem Pegel $L_T^* = 6$ dB und einer Frequenz $f_T = 2$ kHz zu verschiedenen Zeitpunkten Δt innerhalb einer Periode T_S des Suppressors evoziert wurden (I), Teilbild (II) beschreibt die DEOAE ohne Suppressor, Teilbild (III) zeigt schematisch den verwendeten tief-frequenten Suppressortone (Pegel $L_S = 85$ dB, Frequenz $f_S = 25$ Hz) zusammen mit dem Evoziererimpuls.

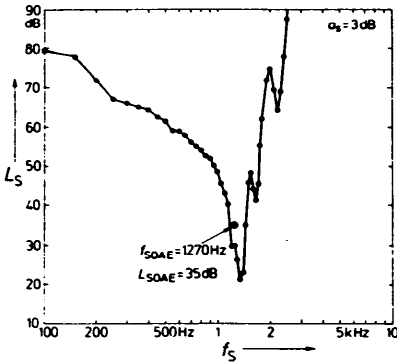


Fig. 3(b): Am Analogmodell gemessene SOAE-Suppressions-Tuningkurve, d.h. der Pegel L_S eines Suppressor-Tones in Abhängigkeit von seiner Frequenz f_S , der nötig ist, um den Pegel L_{SOAE} einer spontanen Emission (hier bei $f_{SOAE} = 1270 \text{ Hz}$) um 3 dB zu erniedrigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß durch die Einführung der lateralen Verkopplung sowohl im Analogmodell als auch im Digitalmodell die charakteristischen Eigenschaften otoakustischer Emissionen, welche sich aus den Messungen im abgeschlossenen äußeren Gehörgang von Versuchspersonen ergeben haben, im Detail nachgebildet werden können. Diese Modelle vermitteln somit ein adäquates Bild der peripheren Vorverarbeitung im Gehör.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des SFB 204 "Gehör", München, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Literatur

- /1/ Zwicker, E. (1979) : A model describing nonlinearities in hearing by active processes with saturation at 40 dB. *Biol. Cybernetics* 35, 243-250.
- /2/ Zwicker, E. (1985a) : A hardware cochlear nonlinear preprocessing model with active feedback. *J. Acoust. Soc. Am.* 80, 146-153.
- /3/ Zwicker, E. (1985b) : "Otoacoustic" emissions in a nonlinear cochlear hardware model with feedback. *J. Acoust. Soc. Am.* 80, 154-162.
- /4/ Zwicker, E. (1988a) : Otoacoustic emissions and cochlear travelling waves. *Mechanics of Hearing 1988*, University of Keele, (im Druck).
- /5/ Zwicker, E. (1988b) : The inner ear, a sound processing and a sound emitting system. *J. Acoust. Soc. Jpn.* (E) 9, 59-74.
- /6/ Peisl, W. (1988) : Simulation von zeitverzögerten evozierten oto-akustischen Emissionen mit Hilfe eines digitalen Innenohrmodells. *Fortschritte der Akustik, DAGA' 88*, 553-556.
- /7/ Scherer, A. (1987) : Beschreibung der simultanen Verdeckung mit Effekten aus Mithörschwellen- und Suppressionsmustern. *Fortschritte der Akustik, DAGA' 87*, 569-572.