

# Vergleich der Feinstruktur von Isophonen, Ruhehörschwelle und otoakustischen Emissionen

Manfred Mauermann<sup>†</sup>, Glenis Long<sup>‡</sup> und Birger Kollmeier<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, AG Medizinische Physik

<sup>‡</sup>Purdue University, Lafayette Indiana, USA; Hanse Wissenschaftskolleg, Delmenhorst

## Einleitung

Inwieweit ist die Lautheitswahrnehmung durch die cochleäre Vorverarbeitung beeinflusst?

Da otoakustische Emissionen (OAE) die einzige nicht invasive Möglichkeit zur Untersuchung der Cochlea darstellen ist die oben gestellte Frage eng verwoben mit der Frage nach gemeinsamen Eigenschaften von OAE und Lautheitswahrnehmung. Der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften von OAE und der Ruhehörschwelle wurde bereits in einer Reihe von Arbeiten untersucht (Long und Tubis, 1988; Zwicker und Schloth, 1991). Es gibt aber bisher nur wenig Daten die OAE mit dem Hören im überschwelligen Bereich vergleichen. OAE in gesunden Ohren zeigen zumeist eine ausgeprägte Feinstruktur. Es wurde untersucht, inwieweit sich diese objektiv meßbare Feinstruktur der otoakustischen Emissionen in Isophonen und damit in der Lautstärkewahrnehmung widerspiegelt.

## Methoden

Es wurden Isophonen in einem Frequenzbereich von 1600 bis 2000 Hz mit einer Frequenzauflösung von 25 Hz (adaptiv) bzw. 12,5 Hz (direktes Einregeln) gemessen. Die Messungen erfolgten für unterschiedliche Lautstärken bis zu 70 phon. Die so erhaltenen Isophonen wurden mit den Feinstrukturen von Ruhehörschwelle (12,5 Hz Frequenzauflösung) und simultan evozierten Emissionen (SFOAE) für verschiedene Anregungspegel verglichen (12 Hz Frequenzauflösung).

### Versuchspersonen

Messungen der SFOAE Feinstruktur sowie Hörschwelle und Isophonen nach der Methode des direkten Einregelns wurden für drei männliche und eine weibliche normalhörende Versuchspersonen (VP) durchgeführt. Die adaptiven Messungen für Hörschwelle und Isophonen erfolgten im vollen Umfang nur bei einer weiblichen VP (der Zweitautorin).

### Hörschwelle und Isophonen - adaptiv

Die Messung der Hörschwellen erfolgte mit einem durch die Messsoftware SI gesteuerten adaptiven 3 Alternative forced choice (AFC) Verfahren in einer 1 up 2 down Prozedur. Synchron zur Darbietung wurden die drei Intervalle optisch markiert. Die digital generierten Sinuspulse (250 ms, einschl. 25 ms Hanningflanken) wurden mit dem 16 bit DA-Wandler einer Indy Workstation (Silicon Graphics) gewandelt und dann nach Abschwächung durch ein computergesteuertes Audiometer über einen Etymotic Research ER2 Einsteckhörer dargeboten. Die adaptiven Messungen der Isophonen erfolgten über dieselbe Apparatur. Hierbei sollten die Versuchspersonen (VP) in einem adaptiven 2 AFC Verfahren entscheiden welcher von zwei dargebotenen Tonpulsen (Testton oder Referenzton) der lautere war. Um Bias-Effekte weitestgehend ausschließen zu können, waren die Reihenfolge von Test und Referenzton randomisiert. Darüber hinaus erfolgte die Darbietung der Frequenzen interleaved, d.h. alle Frequenzen wurden während eines Meßdurchgangs mit von trial zu trial zufälliger Darbietungsreihenfolge gemessen.

### Hörschwellen und Isophonen – direktes Einregeln

Auf Grund des von einem Großteil der Versuchspersonen nicht akzeptierten hohen Meßaufwandes wurde ein zweites Verfahren eingesetzt. Dieses wird im folgenden als „direktes Einregeln“ bezeichnet. Beim direkten Einregeln der Hörschwelle hatte die VP die Möglichkeit die Präsentation der Signale durch Anklicken einer „Play“-Taste auf einer Matlab-gesteuerten Meßoberfläche beliebig oft zu wiederholen. Über einen auf dem Bildschirm dargestellten Schieberegler konnte der Pegel der Darbietung variiert werden. Bei erneutem Drücken der „Play“-Taste wurde dann der Stimulus mit dem neuen Pegel dargeboten und der Schieberegler sprang in die Ausgangsposition zurück. Die VP war aufgefordert den Stimulus im Pegel so einzuregeln, daß er gerade eben wahrnehmbar ist und dann eine „-“-Taste anzuklicken um die Messung bei der nächsten Frequenz fortzusetzen. Die Messungen der Isophonen erfolgte analog. Bei der Darbietung wurden hierbei Referenzton und Testton in fester Reihenfolge angeboten und die VP war gehalten, den Testton auf gleiche Lautheit wie den Referenzton einzustellen. Die Ausgabe der hier verwendeten digitalen Sinuspulse (500 ms, einschl. 25 ms

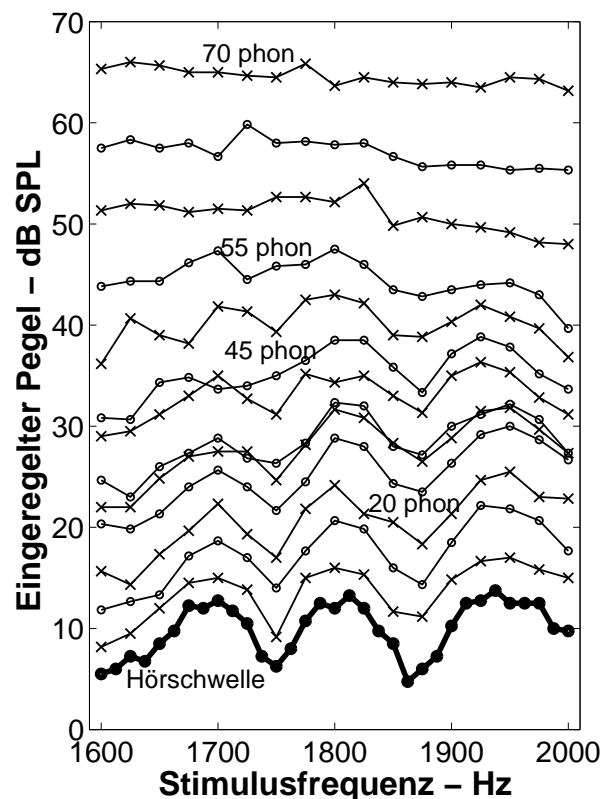
Hanningflanken, 16 bit) erfolgte optisch über eine RME Digi96 PAD Digitale I/O-Karte an einen SEKD 2496 (24bit) AD/DA-Wandler. Die Darbietung erfolgte nach Verstärkung (Behringer Kopfhörerverstärker) ebenfalls über ER2 Einsteckhörer.

### SFOAE

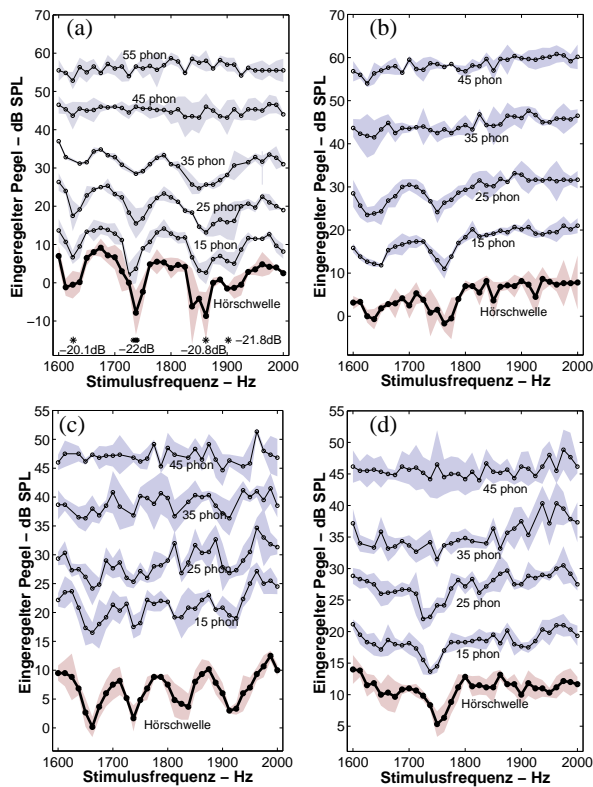
Die Messungen der SFOAE erfolgten zum einen nach einem von Brass und Kemp (1991) zum anderen nach einem von Keefe (1998) beschriebenen Paradigma. Beide Verfahren erlauben die Trennung von Stimulus und nicht linearer Antwort. Nach Brass und Kemp wird über einen Sondenkanal ein kontinuierlicher Sinuston dargeboten. Dessen Frequenz wird so gewählt, das der Sinus in vier sukzessiven Segmenten A, B, C und D gleicher Dauer (hier je 250 ms lang) wechselweise gerade gegenphasig verläuft. Über den zweiten Sondenlautsprecher wird in Segment C und D ein identischer Tonpuls (200 ms incl. 25 ms Hanningflanken) als Suppressor dargeboten. Durch Aufaddieren der vier aufgenommenen Segmente nach dem Schema (A-B)-(C-D) heben sich Dauerton, alle mit diesem in Phase verlaufenden Komponenten und der Suppressor vollständig heraus. Als Residuumsignal bleibt die Differenz zwischen supprimierter Antwort (C-D) und unsupprimierter Antwort (A-B). Dieses Residuum wird als SFOAE interpretiert. Für die SFOAE Messung nach Keefe wird in drei Signalsegmenten A, B und C (von je 250 ms Dauer) ein Tonpuls (200 ms incl. 25 ms Hanningflanken) zunächst über den einen Lautsprecher (A) der Sonde dann über den zweiten (B) und in Segment C schließlich über beide gleichzeitig dargeboten. Die Addition der Segmente gemäß A+B-C liefert ebenfalls die als SFOAE interpretierte nichtlineare Antwort des Ohres.

## Ergebnisse

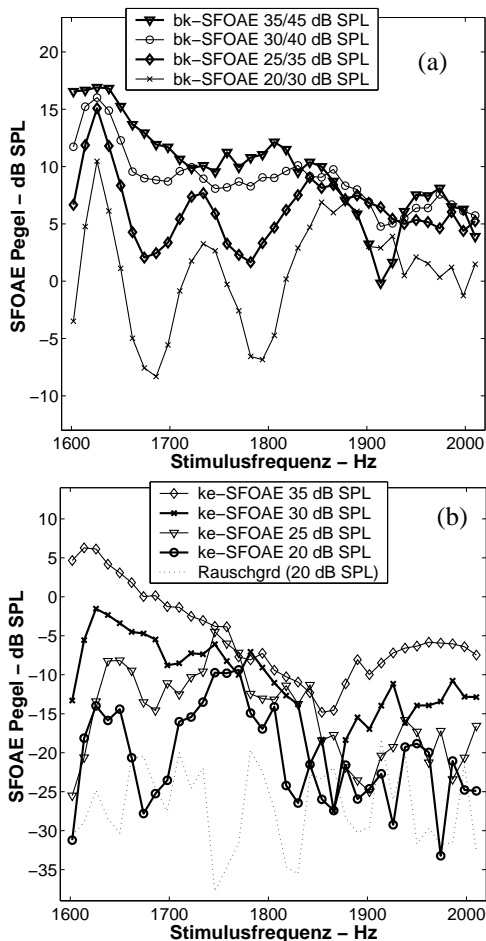
Abbildung 1 zeigt für eine weibliche normalhörende Versuchsperson die mit den adaptiven Methoden gemessenen Feinstrukturen von



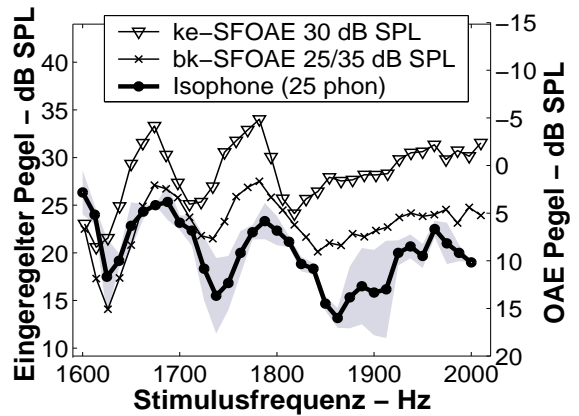
**Abbildung 1** Hörschwelle (dicke Linie) mit einer Auflösung von 12,5 Hz und Isophonen (dünne Linien von unten nach oben 10 bis 70 phon in 5 phon Schritten – Auflösung 25 Hz). Gemessen mit adaptiven AFC Methoden. VP gl – rechtes Ohr.



**Abbildung 2** Hörschwelle (dicke Linie) und Isophonen (dünne Linien) mit einer Auflösung von 12,5 Hz. Die Schatten geben die Standardabweichung für jeweils drei Messungen. Gemessen mit direktem Einregeln. (a) VP tb, linkes Ohr; (b) VP jo, linkes Ohr; (c) VP mm, linkes Ohr und (d) VP kw, rechtes Ohr.



**Abbildung 3** SFOAE-Feinstrukturen für verschiedene Stimulus Pegel (siehe Legenden). Mit ‚ke‘ gekennzeichnete Emissionen sind mit dem Paradigma nach Keefe gemessen mit ‚bk‘ gekennzeichnete nach Brass und Kemp. Die doppelten Pegelangaben für letztere bezeichnen die Pegel für Dauerstimulus bzw. die Suppressorpulse. (a) VP tb, linkes Ohr; (b) VP jo, linkes Ohr



**Abbildung 4** Vergleich von Isophonen und SFOAE Feinstruktur. Zu beachten ist die inverse Achse zur Darstellung der SFOAE. Maxima in dieser Darstellung der SFOAE Feinstruktur zeigen also kleine OAE Pegel. VP tb, linkes Ohr.

Hörschwelle und Isophonen bis in einen Bereich von 70 phon. Die Hörschwelle zeigt eine Feinstruktur mit einer Variation von bis zu 10 dB. Bis in den Bereich von 40 phon ist deutlich ein Erhalt der Feinstruktur zu beobachten charakterisiert durch Variation des als „gleichlaut“ einzuregelnden Pegels von ca. 5 dB. In Abbildung 2 sind die mit der Methode des direkten Einregeln gemessenen, Hörschwellen und Isophonen von vier Versuchspersonen gezeigt. Es zeigen sich sehr individuelle Feinstrukturen für die verschiedenen Versuchspersonen sowohl in Hinblick auf ihre Ausprägung als auch in Bezug auf die Lage von Maxima und Minima. Bei einigen der Versuchspersonen mit besonders ausgeprägter Feinstruktur (VP gl und tb) sind schwache spontane Emissionen (< 10 dB SPL) im Bereich der Minima der Hörschwellen meßbar. Die SFOAE Feinstrukturen zeigen ebenfalls für größere werdende Anregungspegel ein Ausglätten der Strukturen (Abbildung 3). Bemerkenswert ist, daß dieses Ausglätten für Anregungspegel zu beobachten ist, die in der gleichen Größenordnung liegen, in der auch ein Ausglätten der Isophonenmuster zu beobachten ist. Zu beachten ist auch die geringfügige pegelabhängige Verschiebung von Maxima und Minima der SFOAE-Feinstrukturmuster. Dabei zeigt sich im Bereich vergleichbarer Stimuluspegel eine gute Übereinstimmung der Lage von Minima für Isophonen und Hörschwelle und Maxima der SFOAE Feinstruktur (siehe Abbildung 4), d.h. Bereiche mit relativ starken OAE sind besonders sensitiv.

## Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Feinstruktur, die sich in Hörschwellen findet, setzt sich auch in der Lautheitswahrnehmung von Tönen bis in den Bereich moderater Pegel fort. Dabei zeigen diese Muster sowohl in Lage als auch in ihrer Ausprägung deutliche individuelle Variationen. Die gute Übereinstimmung mit den Eigenschaften der Feinstrukturen von Isophonen und SFOAE bezüglich des Ausglättens und der Lage von Maxima und Minima legt nahe, daß diese Variationen der Lautstärkewahrnehmung ihre Ursache in der jeweils individuellen cochleären Feinstruktur hat. Die hier gefundenen individuellen Feinstrukturen der Lautstärkewahrnehmung bieten darüberhinaus eine guten Erklärungsansatz für die starken interindividuellen Schwankungen von psychoakustischen Messungen im schwelennahen Bereich insbesondere natürlich für die interindividuelle Variabilität in Isophonenmessungen.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert von der DFG Ko-942/11-2. Die Zusammenarbeit mit G. Long wurde ermöglicht durch ein Fellowship des Hanse-Wissenschaftskollegs.

## Literatur

- Brass, D. und D. Kemp (1991). "Time-domain observations of otoacoustic emissions during constant tone stimulation." *J. Acoust. Soc. Am.* **90**: 2415-2427.
- Keefe, D. H. (1998). "Double-evoked otoacoustic emissions. I. Measurement theory and nonlinear coherence" *J. Acoust. Soc. Am.* **103**(6): 3489-3498.
- Long, G.R. und Tubis (1988), "A. Investigations into the nature of the association between threshold microstructure and otoacoustic emissions." *Hearing Research*, **36**: 125-136.
- Zwicker, E. und Schloth, E. (1984). "Interrelation of different oto-acoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* **75**: 1148-1154.