

MITHÖRSCHWELLEN-PERIODENMUSTER UND SUPPRESSIONS-PERIODENMUSTER  
TIEFFREQUENTER GAUSSFÖRMIGER DRUCK- UND SOGIMPULSE

Eberhard Zwicker

Lehrstuhl für Elektroakustik, Technische Universität München

Die verdeckende Wirkung sehr tieffrequenter Schalle ist leicht beobachtbar, beispielsweise wenn das durch ein geöffnetes Fenster bei einer PKW-Fahrt erzeugte "Wummern" den Sprachschall der Fahrgäste synchron mit dem tieffrequenten Störschall unterbricht, oder wenn ein forte gespielter Ton einer 16'-Orgelpfeife die Lautheit eines gleichzeitig gespielten Flötentones periodisch stark moduliert. Diese sehr tieffrequenten Maskierer üben demnach eine verdeckende Wirkung nicht nur im tieffrequenten Bereich, sondern auch bei mittleren Frequenzen aus, in denen wichtige Anteile von Sprache und Musik liegen.

Quantitativ wurde dieser Effekt in den Mithörschwellen-Periodenmustern [1], [2] beschrieben und ein Modell entwickelt [2], [3], demzufolge bei sehr tieffrequenten Maskierern der zweite Differentialquotient der Schalldruck-Zeitfunktion für die verdeckende Wirkung maßgeblich ist. Die Ergebnisse dieser speziellen Verdeckungsmessungen sind deswegen so wichtig, weil sie - im Gegensatz zu den üblichen simultanen und nichtsimultanen Verdeckungserscheinungen mit ihren integrierenden, d.h. über viele Perioden mittelnden Wirkungen - Aussagen über den direkten zeitlichen Ablauf der Verdeckung innerhalb einer Periode des maskierenden Schalldruckes zulassen.

Die von Kemp [4] beschriebenen, von kurzen Impulsen evozierten akustischen Emissionen hängen offenbar vom Erregungszustand des Innenohres ab. Gleichzeitig dargebotene tieffrequente Töne sind jedenfalls in der Lage, die Entstehung dieser Emissionen je nach zeitlicher Position innerhalb der Periode des tieffrequenten Schalles mehr oder weniger stark zu unterdrücken. Dieser Effekt wurde in Suppressions-Periodenmustern quantitativ ausgemessen [5]. Ein Zusammenhang zwischen den Mithörschwellen- und den Suppressions-Periodenmustern wurde bei den genannten Experimenten schon deutlich. Die vorliegenden Untersuchungen sollen insbesondere klären, ob die zweite Ableitung der Schalldruck-Zeitfunktion auch für die Suppressions-Periodenmuster maßgeblich ist.

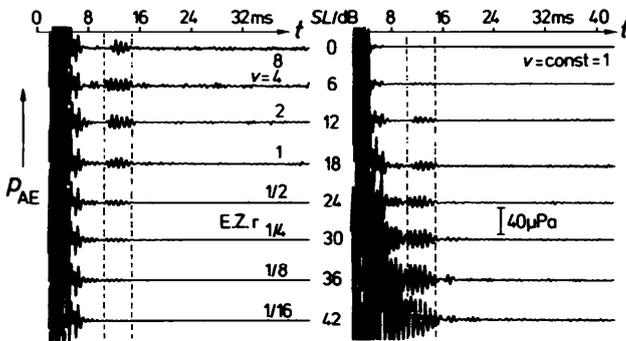


Fig. 1. Verlauf des Schalldrucks  $p_{AE}$  im abgeschlossenen Gehörgang nach Reizung mit kurzen 1,3 kHz-Tonimpulsen, deren Pegel (SL) über Schwelle Parameter ist (evozierte akustische Emission zwischen den beiden gestrichelten Linien). Rechts: Verstärkung  $v$  konstant; links: Produkt aus Verstärkung und Reizamplitude konstant.

Es wurden alternierende, annähernd gaussförmige Druck- und Sogimpulse mit einer Dauer von je 12 ms und einer Gesamtperiode von 140 ms als Maskierer bzw. Suppressor benützt. Kurze 1,3 kHz-Tonimpulse im Abstand von ebenfalls 140 ms ( $f_p=7$  Hz) dienten sowohl als Testschall (bei Maskierung) als auch als Emissionen evozierende Impulse (bei Suppression). Ihre zeitliche Lage  $\Delta t$  innerhalb der Periode der alternierenden Gaussimpulse wurde verändert. Sie ist in Fig. 2 als Abszisse angegeben.

Um die mit evozierten Emissionen gewonnenen Ergebnisse interpretieren zu können, muß ein Pegelbereich gewählt werden, innerhalb dessen die Amplituden der evozierenden Schallimpulse und die Amplituden der evozierten Emissionen proportional sind. In Fig. 1 sind die gemessenen Emissionen für evozierende Schallimpulse mit Pegel über Schwelle zwischen  $SL=0$  dB und  $SL=42$  dB im Abstand von je 6 dB aufgetragen. Im rechten Teil ist die Verstärkung konstant gehalten; im linken Bildteil ist die Verstärkung um den Faktor 2 reduziert, wenn der Pegel um 6 dB gesteigert wird. In beiden Darstellungen wird deutlich, daß die Amplitude der Emission bis zu Werten von etwa  $SL=20$  dB nahezu proportional mit der evozierenden Schalldruckamplitude wächst. Bei größeren Pegeln wächst die Emission nur noch wenig. Daher wurde der Wert  $SL=20$  dB für den eingangs beschriebenen Vergleich gewählt.

In Fig. 2 sind alle Ergebnisse zusammengestellt. Teil(a) zeigt das psychoakustisch gemessene Mithörschwellen-Periodenmuster. Zum Zeitpunkt der Sogspitze erreicht die Mithörschwelle ein ausgeprägtes Maximum. Bei der Druckspitze ist ein Maximum nur schwach ausgeprägt, jedoch von weiteren Maxima umgeben. Das Suppressions-Periodenmuster in Teil(e) ist eine Auswertung der in Teil(d) dargestell-

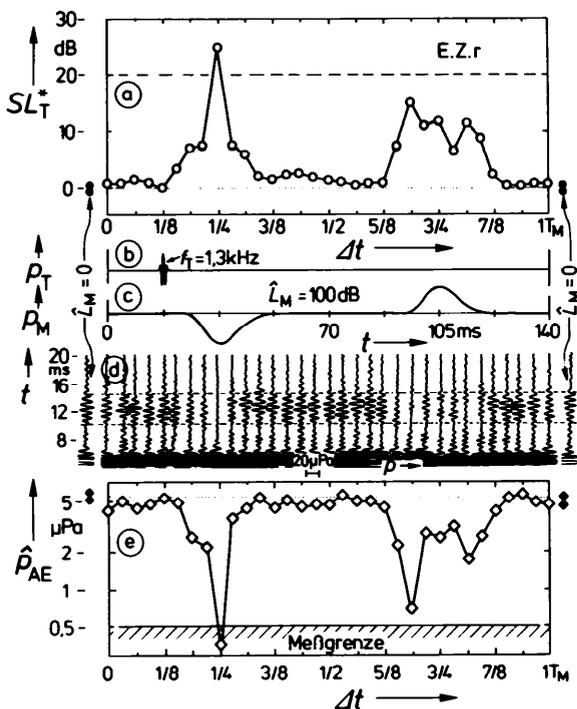


Fig. 2. Mithörschwellen-Periodenmuster (a), das die Verdeckung von kurzen 1,3 kHz-Tonimpulsen (b) in Abhängigkeit von der zeitlichen Lage  $\Delta t$  innerhalb der Periode  $T_M$  der maskierenden gaussförmigen Sog- und Druckimpulse (c) beschreibt. Wird der Tonimpuls mit dem Pegel  $SL_T^* = 20 \text{ dB}$  als evozierender Reiz benutzt, entstehen in Abhängigkeit von  $\Delta t$  die in (d) aufgetragenen evozierten akustischen Emissionen. Ihr mittlerer Spitzenwert ist in (e) als Suppressions-Periodenmuster dargestellt.

ten objektiv gemessenen Emissionen. Die für abgeschaltete Gaussimpulsfolge ( $L_M = 0$ ) gemessenen Werte sind links (vor der 1 1/2 Stunden dauernden Messung) und rechts (danach) aufgetragen. Das Suppressions-Periodenmuster gibt den zwischen  $t = 10,5 \text{ ms}$  und  $t = 14,5 \text{ ms}$  emittierten mittleren Spitzenwert des Schalldruckes  $\hat{p}_{AE}$  als Funktion von  $\Delta t$ , dem Zeitpunkt des Reizes innerhalb der Periode, an. Es ist erstaunlich genau spiegelbildlich zum Mithörschwellen-Periodenmuster: Große, d.h. ungestörte Emissionen gehören zu niedrigen Schwellen (Ruhehörschwellen  $SL_T^* = 0$ ). Die Emissionen verschwinden dagegen, wenn der Reizpegel unter der Mithörschwelle liegt (bei  $\Delta t = 1/4 T_M$  ist  $SL_T^* = 24 \text{ dB}$ , also größer als der gewählte evozierende Wert  $SL_T^* = 20 \text{ dB}$ ) bzw. werden kleiner, wenn sich die Mithörschwelle dem Wert  $SL_T^* = 20 \text{ dB}$  nähert.

In Fig. 3 ist unter dem Schalldruck-Zeitverlauf  $p_M$  und seiner ersten Ableitung  $\dot{p}_M$  (gestrichelt) die zweite Ableitung  $\ddot{p}_M$  des Schalldruck-Zeitverlaufs der alternierenden Gaussimpulse aufgetragen. Die anhand des Modelles [3] aus dem Mithörschwellen-Perioden-

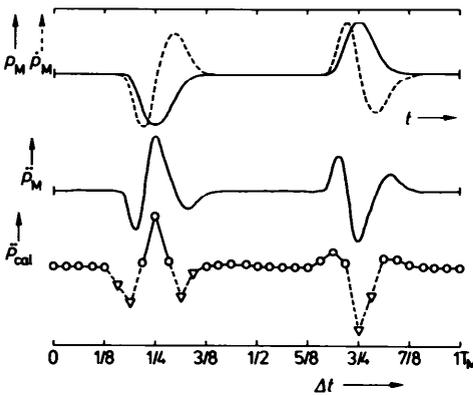


Fig. 3. Schalldruck-Zeitverlauf der gaussförmigen Sog- und Druckimpulse  $p_M(t)$  sowie erste Ableitung  $\dot{p}_M(t)$  und zweite Ableitung  $\ddot{p}_M(t)$  (Mitte). Im Vergleich dazu der aus dem Modell rückgerechnete Verlauf  $\ddot{p}_{cal}(t)$  mit seinen positiven (Kreise) und seinen negativen Werten (Dreiecke).

muster rückgerechneten Werte  $\ddot{p}_{cal}$  der zweiten Ableitung des Schalldruckes sind als Kreise für positive Werte und als nach unten zeigende Dreiecke (andere Berechnungsart!) für negative Werte im unteren Teilbild dargestellt. Die Übereinstimmung beider Zeitverläufe macht deutlich, wie genau der zweite Differentialquotient des Schalldruckes am Trommelfell die Erregung im Innenohr widerspiegelt.

Aus dem spiegelbildlichen Verlauf der Teilbilder (a) und (e) in Fig. 2 kann zusammen mit der letztgenannten Übereinstimmung geschlossen werden, daß die Bereitschaft des Innenohres, Emissionen auszusenden, in gleichem Maße abnimmt, wie die Mithörschwelle anwächst. Dabei wirken sich - wie bei den Mithörschwellen-Periodenmustern - Druckmaxima weniger stark aus als gleichgroße Sogmaxima. Für sehr tieffrequente Maskierer bzw. Suppressoren ist der zweite Differenzialquotient der Schalldruck-Zeitfunktion die maßgebliche Größe sowohl für Mithörschwellen- als auch für Suppressions-Periodenmuster. Eine Auslenkung der Basilarmembran in Richtung scala tympani erzeugt eine Hemmung (große Wirkung beim Sog), eine solche in Richtung scala vestibuli eine Vorerregung.

#### Literatur:

- [1] Zwicker, E. (1976): Psychoacoustic equivalent of period histograms. *J. Acoust. Soc. Am.* **59**, 166-175.
- [2] Zwicker, E. (1977): Masking-period patterns and hearing theories. In: *Psychophysics and Physiology of Hearing*, (E.F. Evans & J.P. Wilson, eds.), Academic Press, London, 393-402.
- [3] Zwicker, E. (1976): A model for predicting masking-period patterns. *Biol. Cybernetics* **23**, 49-60.
- [4] Kemp, D.T. (1978): Stimulated acoustic emissions from the human auditory system. *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1386-1391.
- [5] Zwicker, E. (1981): Masking-period patterns and cochlear acoustical responses. *Hearing Research* **4**, 195-202.