

Detektion transienter Signale - Ein Maß für Intensitätsintegration im Gehör?

Lutz Wiegrebe*, Katrin Krumbholz*
Wolfgang Schmid** und Sabine Schmidt*

*Zoologisches Institut LMU München, **Lehrst. für Mensch-Maschine Kommunikation, TU München

Einleitung:

Die Zeit, über die das Gehör Schallintensität integrieren kann, läßt sich durch die Messung der Detektionsschwellen für Ton- und Rauschimpulse in Abhängigkeit von ihrer Dauer bestimmen (z.B. Feldtkeller und Oetinger, 1956). Die Ergebnisse solcher Messungen zeigen, daß Schallintensität innerhalb eines Zeitfensters in der Größenordnung zwischen 70 und 350 ms integriert wird. Die Dauer des Zeitfensters der Intensitätsintegration verkürzt sich dabei mit steigender Frequenz des Tonimpulses. Viemeister und Wakefield (1991) benutzten wie Zwislocki (1960) einen anderen Ansatz, um die Integrationskonstante des Gehörs zu untersuchen: Sie bestimmten die Ruhehörschwellen (RHS) für zwei Rechteck-Klicks in Abhängigkeit von ihrem zeitlichen Abstand. Fallen beide Klicks in den Zeitbereich der Integrationskonstante, so sollten auch hier ihre Intensität addiert werden und sich die Detektionsschwelle gegenüber der eines einzelnen Klicks um 3 dB verbessern. Die so ermittelte Integrationskonstante liegt aber im Bereich weniger Millisekunden und ist damit um zwei Größenordnungen kleiner als die Ergebnisse aus den Integrationsexperimenten mit einzelnen Tonimpulsen variabler Dauer. Viemeister und Wakefield (1991) versuchten, die widersprüchlichen Zeitkonstanten als verschiedene Ausprägungen eines zweistufigen Verarbeitungsprinzips zu interpretieren. Nach ihrer Vorstellung ist die Intensitätsintegration - die erste Stufe in ihrem Modell - nur wenige Millisekunden lang. Die folgenden psychoakustischen Experimente adressieren diesen kurzen Integrationsvorgang:

Ist auch die Zeitkonstante für die Detektion von Paaren sehr kurzer Tonimpulse von ihrem spektralen Gehalt abhängig? Werden innerhalb dieses kurzen Zeitfensters tatsächlich Intensitäten addiert?

Dazu bestimmten wir zunächst die RHS für Paare von Gaußtonimpulsen mit Trägerfrequenzen von 4 und 12,5 kHz als Funktion ihres zeitlichen Abstandes. Ein zweites Experiment sollte untersuchen, welche Mechanismen im peripheren auditorischen System für die kurze Zeitkonstante verantwortlich sein könnten.

Material und Methoden:

Alle Experimente wurden im Freifeld in einem oberhalb von 100 Hz reflexionsarmen Raum durchgeführt. Die digital generierten Signale wurden den Versuchspersonen über einen magnetostatischen Lautsprecher (Technics EAS 10 TH 800C) mit einem oberhalb von 3 kHz annähernd frequenzunabhängigen Übertragungsmaß und extrem präzisen Ein- und Ausschwingverhalten in einem Abstand von 3,1 m dargeboten. Im zweiten Experiment wurde maskierendes Rauschen über einen elektrodynamischen Hochtoner (Dynaudio Esotec 260) präsentiert, der im Abstand von 12 cm unter dem Signallautsprecher montiert war. In allen Schwellenbestimmungen wurde mit einem adaptiven 2-AFC Paradigma der Signalpegel bestimmt, der zu 79% korrekter Signaldetektion führte. Beide Observationsintervalle wurden durch einen leisen, 200 ms langen 3 kHz Signalton angekündigt. Jede Schwellenangabe ist der Mittelwert von drei Meßdurchgängen, in denen die Versuchspersonen im Mittel je 60 Entscheidungen treffen mußten.

Experiment I

Abb. 1 zeigt die Änderung der Ruhehörschwelle für Paare von Gaußtonimpulsen mit 4 kHz Trägerfrequenz und einer äquivalenten Rechteckdauer von 443 μ s als Funktion ihres zeitlichen Abstandes, gemessen zwischen den Spitzenwerten der Umhüllenden. Bei Zeitabständen unter 5 ms nimmt die RHS der Impulspaare für abnehmende Abstände ab. Bei dem kleinsten ge-

messenen Abstand von 1 ms liegt sie im Mittel 2,8 dB unter der RHS für einen Impuls; bei Zeitabständen oberhalb von 2,5 ms liegt die RHS relativ konstant bei -1,7 dB. Diese von dem Abstand unabhängige Komponente wird von Viemeister und Wakefield (1991) als das Resultat einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, zumindest einen von zwei Impulsen zu detektieren, erklärt.

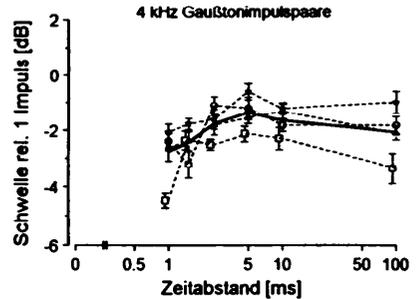


Abbildung 1: Änderung der Ruhehörschwelle von Gaußtonimpulspaaren mit 4 kHz Trägerfrequenz als Funktion ihres Zeitabstandes. Alle Schwellenangaben sind auf die RHS für einen einzelnen Impuls bezogen. Die offenen Symbole und gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse und Standardfehler für die vier Versuchspersonen; die durchgezogene Linie zeigt den Mittelwert.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der analogen Messung bei einer Trägerfrequenz von 12,5 kHz und einer äquivalenten Rechteckdauer von 265 μ s. Die Dauer der Impulse ist so gewählt, daß die äquivalente Rechteckbandbreite eines Impulses schmäler als die Frequenzgruppe um 12,5 kHz ist.

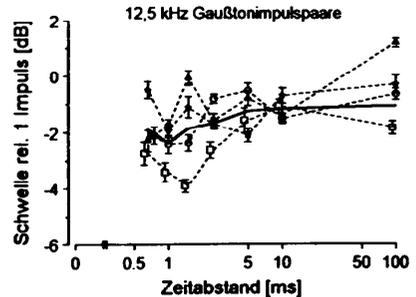


Abbildung 2: Wie Abb. 1 aber für Gaußtonimpulse mit 12,5 kHz Trägerfrequenz und einer Dauer von 265 μ s.

Im Vergleich zu den Ergebnissen bei 4 kHz Trägerfrequenz fällt auf, daß die mittlere Verbesserung der RHS für kleine Zeitabstände mit nur etwa 2 dB sehr gering ist. Außerdem sind die interindividuellen Schwankungen relativ groß. Der systematische Zusammenhang zwischen dem Zeitabstand und der RHS ist hier also weniger ausgeprägt als für die Ergebnisse bei 4 kHz Träger-

frequenz. Für Abstände oberhalb von 2,5 ms zeigt sich wiederum eine relativ konstante RHS Verbesserung um 1,5 dB. Die Meßergebnisse lassen sich durch kurze Zeitkonstanten beschreiben: Bei 4 kHz Signalfrequenz ist eine Verbesserung der RHS über den Wahrscheinlichkeitseffekt hinaus nur für Zeitabstände im Bereich weniger Millisekunden feststellbar. Bei 12,5 kHz ist auch diese kurzzeitige Beeinflussung kaum mehr nachzuweisen.

Diese Ergebnisse werfen die Frage auf, ob das Gehör hier tatsächlich *Intensitäten* integriert. Oder ist die Verbesserung der Detektionsschwelle für kurze Zeitabstände vielmehr das Ergebnis der zeitlichen Überlappung der beiden transienten Signale im Gehör? Die Überlappung zweier zeitlich getrennt dargebotener Impulse entsteht durch ihre Filterung in den scharf abgestimmten Frequenzkanälen der Cochlea. Das zweite Experiment soll zeigen, ob eine Überlappung der Impulse und die damit verbundene spektrale Interferenz in dem hier relevanten Zeitbereich um 1 ms im Gehör tatsächlich stattfindet.

Experiment II

Es wurden Mithörschwellen für Paare von 4 kHz Gaußtonimpulsen mit einer äquivalenten Rechteckdauer von 106 µs und einem festen Zeitabstand von 460 µs bestimmt. Der Maskierer war ein Bandsperrenrauschen mit einer 1,3 kHz breiten spektralen Lücke, die um 4 kHz zentriert war. Es wurde in zwei Phasenkonstellationen gemessen: Die Startphase des zweiten Impulses war einmal so gewählt, daß die in einem Überlappungsbereich stattfindende Interferenz der Impulse um 4 kHz konstruktiv wäre. In der anderen Konstellation wurde der zweite Impuls um 180° phasengedreht. Dies würde zu destruktiver Interferenz im Frequenzbereich der spektralen Lücke des Rauschmaskierers führen.

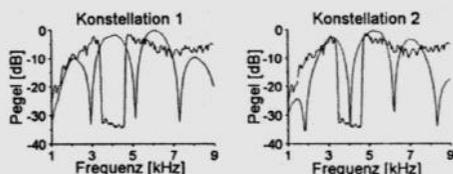


Abbildung 3: Spektren von Signal und Maskierer in den zwei Konstellationen. Das Kammfilterprofil der Signale entsteht durch die Interferenz der beiden zeitlich getrennt dargebotenen Impulse und setzt somit eine zeitliche Überlappung der Impulse durch ihre Filterung im Innenohr voraus.

Als Kontrolle wurden die Mithörschwellen für beide Signalkonstellationen auch vor Rauschen ohne spektrale Lücke bestimmt. Abb. 4 zeigt die gemittelten Mithörschwellen von drei Versuchspersonen für die zwei Phasenkonstellationen des Signals jeweils vor Bandsperrenrauschen und vor Rauschen ohne spektrale Lücke.

Die Meßergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied der Mithörschwellen für die beiden Signalkonstellationen vor Bandsperrenrauschen: Konstruktive Interferenz im Bereich der spektralen Lücke des Rauschmaskierers (Konstellation 1) führt zu einer um 7,6 dB verbesserten Detektion gegenüber dem Fall der destruktiven Interferenz (Konstellation 2). Eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Impulse auf dem Intensitätsniveau könnte diesen Mithörschwellenunterschied nicht erklären. Die Mithörschwellen vor Rauschen ohne spektrale Lücke zeigen dagegen keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Phasenkonstellationen.

Eine Wiederholung des Versuchs mit einem längeren Impulsabstand von 750 µs zeigt das gleiche Ergebnismuster. Aufgrund des feineren Kammfilterprofils betrug der Mithörschwellenunterschied vor Bandsperrenrauschen hier nur 3,6 dB.

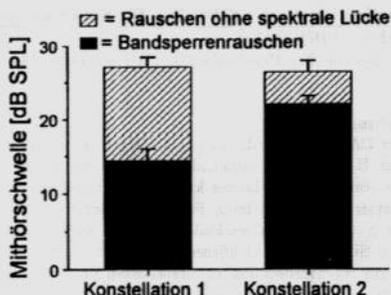


Abbildung 4: Gemittelte Mithörschwellen und Standardfehler von drei Versuchspersonen für Gaußtonimpulspaare in zwei Phasenkonstellationen (siehe Abb. 3) vor Bandsperrenrauschen (schwarze Balken) und vor Rauschen ohne spektrale Lücke.

Diskussion:

Die Ergebnisse des zweiten Experiments lassen die Schlußfolgerung zu, daß zeitlich getrennte transiente Signale im Gehör tatsächlich überlappen und miteinander interferieren.

Konstruktive Interferenz kann die Maximalamplitude von zwei aufeinanderfolgenden Signalen in bestimmten Frequenzbereichen vergrößern.

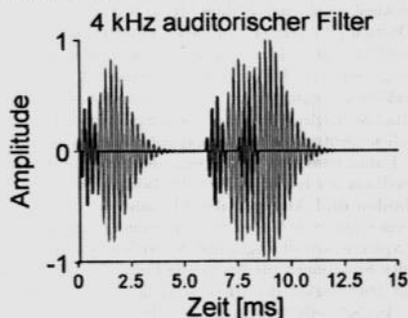


Abbildung 5: Eingangs- (starke Linie) und Ausgangssignal (feine Linie) eines auditorischen Filters (Patterson, 1994) am Beispiel eines einzelnen in Experiment 1 verwendeten 4 kHz Gaußtonimpulses (linker Teil) sowie eines Gaußtonimpulspaars mit einem Zeitabstand von 1,5 ms (rechter Teil).

Abb. 5 zeigt am Beispiel eines Gammatonfilters der Mittenfrequenz 4 kHz, wie die in Experiment I verwendeten Gaußtonimpulse in einem auditorischen Filter transformiert werden könnten. Die Maximalamplitude des Filterausgangs ist bei dem Impulspar (rechter Teil) relativ zur Ausgangsamplitude des einzelnen Impulses (linker Teil) erhöht. Die Abhängigkeit der Maximalamplitude vom Zeitabstand zwischen den transienten Signalen läßt Änderungen der Detektionsschwellen erwarten, die die experimentell gefundenen RHS-Änderungen ausreichend erklären können. Die Annahme von *Intensitätsintegration* ist also für die Interpretation von Detektionsschwellen für Paare transienter Signale nicht erforderlich.

Feldkeller R. und Oetinger, R. (1956) *Acustica* 6, 489-493.
Patterson, R.D. (1994) *JASA* 96, 1409-1418
Viemeister, N.F. und Wakefield, G.H. (1991) *JASA* 90, 858-865
Zwislocki, J.J. (1960) *JASA* 32, 1046-1060

Gefördert von der DFG, SFB 204 „Gehör“, München.