

Ein Modell zur Zeitintegration akustischer Reize im Infrashallbereich

Björn Friedrich¹, Holger Joost², Thomas Fedtke², Jesko L. Verhey¹

¹ Abteilung f. Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,

E-Mails: bjoern.friedrich@med.ovgu.de, jesko.verhey@med.ovgu.de

² Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig,

E-Mails: holger.joost@ptb.de, thomas.fedtke@ptb.de

Einleitung

Ein wesentlicher Aspekt des Hörens besteht darin, dass die Dauer eines Schalls Einfluss auf seine Hörbarkeit hat. So nimmt die Signalintensität an der Schwelle – im folgenden Detektionsschwelle genannt – mit zunehmender Signaldauer ab. Dieser Befund wird als Hinweis auf eine Zeitintegration des Gehörs genommen.

Wie genau die Detektionsschwelle mit zunehmender Dauer abfällt, hängt auch von der Form der Einhüllenden des Schalls ab. Als Beispiel aus dem Hörschallbereich zeigt Abbildung 1 die von [1] gemessenen und über jeweils 211 Ohren gemittelten Detektionsschwellen (farbige Punkte) in Schalldruckpegeln (SPL in dB) für drei verschiedene Reiztypen: Plateau-Burst-Reize (PB, gelb), Onset-Offset-Reize (OO, rot) und Multiple-Burst-Reize (MB, blau).

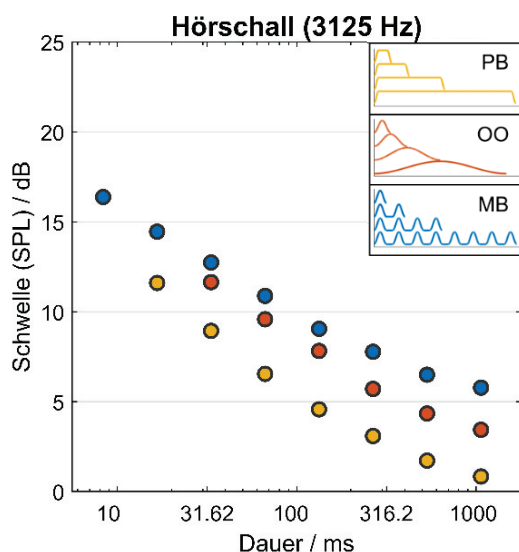


Abbildung 1: Daten von [1] für Reize im Hörschallbereich. Jeder farbige Kreis stellt die über 211 Ohren gemittelte Detektionsschwelle (als Schalldruckpegel, SPL, in dB) dar. Sie wurden für unterschiedlich lange Plateau-Burst-Reize (PB, gelb), Onset-Offset-Reize (OO, rot) und Multiple-Burst-Reize (MB, blau) gemessen. Für alle drei Reiztypen verringerte sich die Detektionsschwelle um etwa 5 dB bis 10 dB pro Dekade der Dauer.

Die Einhüllendenformen für die drei Reiztypen sind schematisch in der Legende der Abbildung gezeigt. Bei den PB-Reizen wurde die Dauer allein durch Verlängerung des Plateaus erhöht, wohingegen die Flankendauer konstant gehalten wurde. Bei den OO-Reizen, die kein Plateau besitzen, wurden die Flanken verlängert. Die Dauer der MB-

Reize wurde durch Aneinanderreihen einzelner Bursts verlängert. Für alle drei Reiztypen verringerte sich die Detektionsschwelle um etwa 5 dB bis 10 dB pro Dekade ihrer Dauer, im folgenden *Zeitdekade* genannt. Diese Daten können als Grundlage für die Modellierung dienen.

Für den Hörschallbereich gibt es verschiedene Modelle zur Beschreibung dieser Zeitintegration des Gehörs. Bei den meisten Modellen wird angenommen, dass die interne Repräsentation – möge es sich um neuronale Aktivität oder um eine andere Repräsentationsform handeln – proportional zur Reizamplitude (z. B. [2]) oder zur Reizintensität (z. B. [3]) sei, die über die Dauer integriert werde. Bei einer Amplitudenintegration betrüge die Verringerung der Detektionsschwelle demnach etwa 20 dB pro Zeitdekade; bei einer Intensitätsintegration wären es etwa 10 dB pro Zeitdekade.

Heil und Koautoren [1] schlugen ein physiologisch motiviertes Modell zur Zeitintegration vor, das auf einem Poisson-Prozess beruht und bei dem die Einhüllende des Reizes mit einem Exponenten, hier mit α bezeichnet, potenziert und anschließend über die Beobachtungsdauer integriert wird. Die Autoren fanden heraus, dass ihr HMN-Modell (HMN für Heil, Matysiak und Neubauer) mit einem Exponenten von $\alpha = 3$ die Daten zur zeitlichen Integration akustischer Reize im Hörschallbereich präziser beschreibt als Amplituden- oder Intensitäts-basierte Modelle (analog zu einem Exponenten von $\alpha = 1$ beziehungsweise $\alpha = 2$). Ein Exponent von $\alpha = 3$ entspricht in etwa einer Verringerung der Schwelle bei Verlängerung der Dauer von 6 dB bis 7 dB pro Zeitdekade.

In diesem Beitrag wird untersucht, ob das HMN-Modell auch zur Beschreibung der Zeitintegration von Infrashall herangezogen werden könnte. Eine Herausforderung sind hierbei die hohen Detektionsschwellen für Infrashall. Daher wird von uns hier ein für hohe Schalldruckpegel modifiziertes HMN-Modell vorgestellt und getestet. Die Parameter des Modells werden systematisch variiert, um die Auswirkungen auf die vorhergesagten Detektionsschwellen zu verdeutlichen. Anschließend wird das Modell mit verschiedenen festen Werten des Exponenten anhand der Daten aus Abbildung 1 validiert.

Das modifizierte HMN-Modell

Modellbeschreibung

Das HMN-Modell von [1] basiert auf einem inhomogenen Poisson-Prozess, wie er häufig zur Beschreibung von Feuerraten von Neuronen angenommen wird. Die interne Repräsentation ist demnach eine zeitabhängige Rate, die hier mit $\lambda(t)$ bezeichnet wird. Sie setzt sich aus einer Spontanrate

λ_{spont} und einer Rate, die proportional zur zeitabhängigen Einhüllenden des Reizes hoch dem Exponenten α ist, zusammen:

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{spont}} + g \cdot [Af(t)]^\alpha \quad (1)$$

In Abwesenheit eines Reizes ist der Poisson-Prozess homogen und allein von der Spontanrate abhängig. In Anwesenheit eines Reizes variiert die zeitabhängige Rate mit der Einhüllenden, wobei A die maximale Amplitude und $f(t)$ den normierten, zeitabhängigen Anteil der Einhüllenden darstellt.

Der Proportionalitätsfaktor g spiegelt die Verstärkung wider. Da er beim Anpassen des Modells an Detektionsschwellen mit dem Exponenten α interagiert, kann es, insbesondere bei hohen Schalldruckpegeln, zu unerwünschten numerischen Effekten kommen. Um das HMN-Modell auf Reize im Infraschallbereich anwenden zu können, wird daher im modifizierten Modell der Verstärkungsfaktor g durch ein Verstärkungsmaß L_{gain} ersetzt, für das der folgende Zusammenhang gilt:

$$L_{\text{gain}} = -\frac{20}{\alpha} \cdot \lg(g) \text{ dB} \quad (2)$$

Für die Ratengleichung ergibt sich mit dieser Modifikation:

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{spont}} + 10^{-\alpha/20 \cdot L_{\text{gain}}} \cdot [Af(t)]^\alpha \quad (3)$$

In beiden Modellvarianten wird die zeitabhängige Rate über die Dauer d integriert. Sofern das Ergebnis einen kritischen Wert n_{crit} überschreitet, gilt die Detektionsschwelle als erreicht:

$$\int_0^d \lambda(t) dt \geq n_{\text{crit}} \quad (4)$$

Dabei ist der kritische Wert eine monoton steigende Funktion von $\lambda_{\text{spont}} \cdot d$, deren Form von der konkreten Messmethode abhängig ist (für Details siehe [1] und [4]).

Die Detektionsschwelle errechnet sich aus der kritischen Amplitude, die der Reiz haben muss, damit der kritische Wert überschritten wird. Für die kritische Amplitude gilt

$$A_{\text{crit}}^\alpha = \frac{n_{\text{crit}} - \lambda_{\text{spont}} \cdot d}{\int_0^d f^\alpha(t) dt} \cdot 10^{\alpha/20 \cdot L_{\text{gain}}} \quad (5)$$

und die Detektionsschwelle ist

$$L = -20 \cdot \lg(A_{\text{crit}}) \text{ dB} = -\frac{20}{\alpha} \cdot \lg(A_{\text{crit}}^\alpha) \text{ dB} \quad (6)$$

Für Reize mit näherungsweise konstanter Einhüllenden ist die Änderung der Detektionsschwelle:

$$\Delta L \approx -\frac{20}{\alpha} \text{ dB pro Zeitdekade} \quad (7)$$

Parametervariation

Um zu verstehen, wie sich Änderungen der Modellparameter auf die vorhergesagten Detektionsschwellen auswirken, wurde jeder der drei Parameter systematisch variiert, während die jeweils anderen zwei konstant gehalten wurden. Testreize waren Sinustöne mit 31,5 ms langen Kosinus-Quadrat-Flanken und Reizdauern zwischen 100 ms und 10 s (zwei Zeitdekaden abgedeckt). Abbildung 2 zeigt die für diese Testreize vorhergesagten Detektionsschwellen in Abhängigkeit vom jeweils variierten Modellparameter. In Abbildung 2 A wurde der Exponent variiert; die Spontanrate und das Verstärkungsmaß blieben konstant ($\lambda_{\text{spont}} = 4 \text{ Hz}$, $L_{\text{gain}} = 0 \text{ dB}$). Je größer der Wert des Exponenten ist, desto flacher ist die Steigung der Kurve. In Abbildung 2 B wurde die Spontanrate variiert; der Exponent und das Verstärkungsmaß blieben konstant ($\alpha = 3$, $L_{\text{gain}} = 0 \text{ dB}$). Die Spontanrate beeinflusst die Krümmung der Kurve und deren Lage entlang der Ordinate. Je höher die Spontanrate ist, desto stärker ist die Krümmung und desto höher sind die Detektionsschwellen. In Abbildung 2 C wurde das Verstärkungsmaß variiert; der Exponent und die Spontanrate blieben konstant ($\alpha = 3$, $\lambda_{\text{spont}} = 4 \text{ Hz}$). Das Verstärkungsmaß verschiebt die Kurve um genau den Wert,

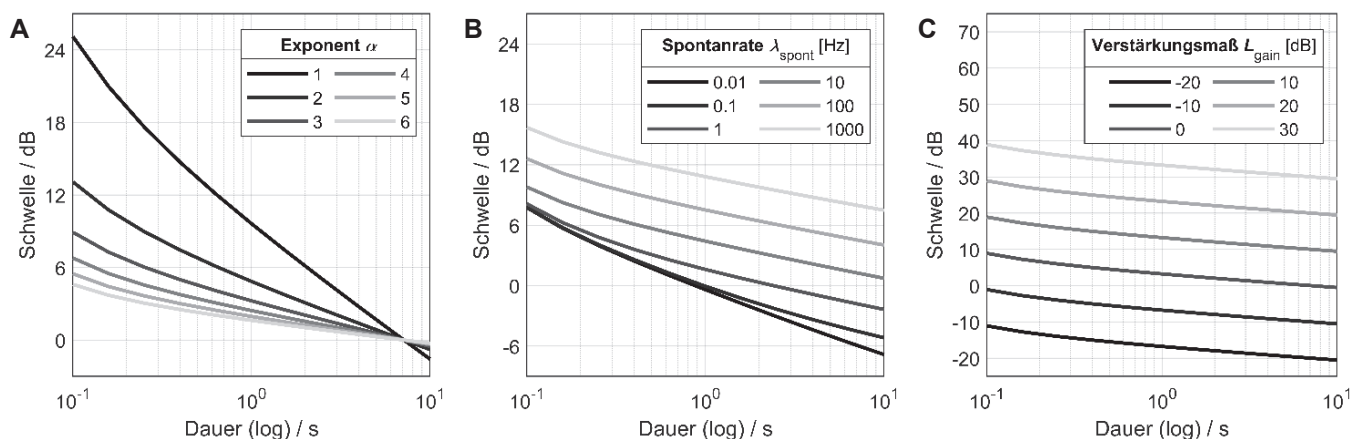


Abbildung 2: Variation der drei Parameter des modifizierten HMN-Modells für Testreize mit Dauern zwischen 100 ms und 10 s (siehe Text). Die jeweils anderen zwei Parameter blieben konstant. **A:** Variation des Exponenten. Er beeinflusst die Steigung der Kurve. **B:** Variation der Spontanrate. Sie beeinflusst die Lage der Kurve entlang der Ordinate aber auch, für kleine Spontanraten, die Krümmung der Kurve. **C:** Variation des Verstärkungsmaßes. Es verschiebt die Kurve um dessen Wert relativ zu 0 dB.

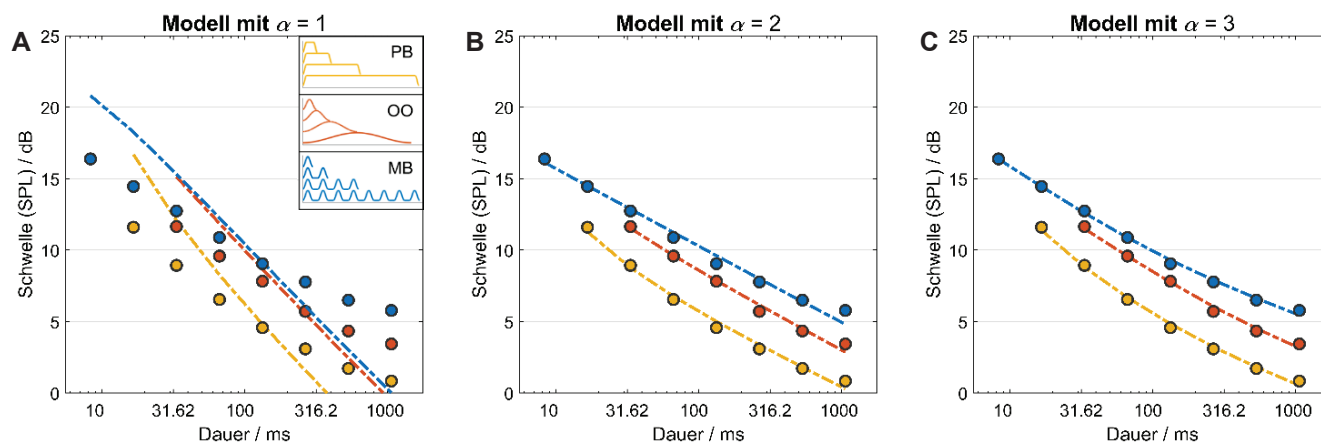


Abbildung 3: Simulation der in Abbildung 1 gezeigten Daten von [1] für Reize im Hörschallbereich. Die farbigen Punkte entsprechen denen der gemessenen Daten in Abbildung 1. Die farbigen gestrichelten Linien sind die Anpassungen des modifizierten HMN-Modells mit drei verschiedenen Exponenten (A bis C entspricht einem Exponenten α von 1 bis 3) an die Detektionsschwellen des jeweiligen Reiztyps.

den das Verstärkungsmaß relativ zu 0 dB hat. Dies gilt unabhängig davon, welche Werte die anderen Parameter haben (nicht gezeigt). Das Verstärkungsmaß ist demnach einfacher zu interpretieren als der in dem ursprünglichen HMN-Modell verwendete Verstärkungsfaktor g , dessen Interpretation vom Wert des Exponenten abhängig ist.

Anpassungen an HMN-Daten

Zur Verifikation des modifizierten HMN-Modells wurde es an die Hörschall-Daten aus Abbildung 1 angepasst, und zwar mit verschiedenen festen Werten des Exponenten. Mit einem Exponenten von $\alpha = 1$ sind die angepassten Kurven augenscheinlich zu steil. Wesentlich besser passt das Modell mit einem Exponenten von $\alpha = 2$. Für hohe Dauern weichen die Anpassungen jedoch von den gemessenen Detektionsschwellen ab. Am besten passt das Modell mit einem Exponenten von $\alpha = 3$. Dies spiegeln auch die Effektivwertfehler in Tabelle 1 wider, die als Güte der Anpassungen verglichen wurden. Bei allen drei Reiztypen weist das modifizierte HMN-Modell mit einem Exponenten von $\alpha = 3$ die geringsten Effektivwertfehler auf.

Tabelle 1: Effektivwertfehler der Anpassungen des modifizierten HMN-Modells mit verschiedenen festen Werten des Exponenten an die von [1] gemessenen Detektionsschwellen für Plateau-Burst-Reize (PB), Onset-Offset-Reize (OO) und Multiple-Burst-Reize (MB).

Exponent	PB	OO	MB
$\alpha = 1$	3,40 dB	2,51 dB	3,37 dB
$\alpha = 2$	0,33 dB	0,31 dB	0,44 dB
$\alpha = 3$	0,20 dB	0,21 dB	0,17 dB

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Modifikation eines Modells zur Beschreibung der Dauerabhängigkeit von Detektionsschwellen akustischer Reize vorgestellt. Das modifizierte Modell ermöglicht es,

auch die hohen Schalldruckpegel zu berücksichtigen, die im Infraschallbereich auftreten. Es kann als Grundlage für die Simulation der Abhängigkeit von Infraschall-Detektionsschwellen von der Reizdauer angewandt werden. Allerdings reichen die vorhandenen Daten, z. B. in [5], noch nicht aus, um statistisch abzusichern, ob der Exponent bei Infraschall dem bei Hörschall entspricht.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung unseres Projektes „Infraschall und seine Bedeutung für den Hörschall“ (FE 1192/3-2 | VE 373/4-2). Darüber hinaus danken wir Peter Heil vom Leibniz-Institut für Neurobiologie in Magdeburg für wertvolle Diskussionen.

Literatur

- [1] Heil, P., Matysiak, A., Neubauer, H.: A probabilistic Poisson-based model accounts for an extensive set of absolute auditory threshold measurements. *Hearing Research* 353, 2017, 135–161
- [2] Meddis, R., Lecluyse, W.: The psychophysics of absolute threshold and signal duration: A probabilistic approach. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (5), 2011, 3153–3165
- [3] Plomp, R., Bouman, M. A.: Relation between Hearing Threshold and Duration for Tone Pulses. *The Journal of the Acoustical Society of America* 31 (6), 1959, 749–758
- [4] Heil, P.: Comparing and modeling absolute auditory thresholds in an alternative-forced-choice and a yes-no procedure. *Hearing Research* 403, 2021, 10816
- [5] Jurado, C., Larrea, M., Patel, H., Marquardt, T.: Dependency of threshold and loudness on sound duration at low and infrasonic frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America* 148, 2020, 1030–1038