

Ein Computerprogramm zur Simulation der Nachverdeckung für Anwendungen in akustischen Meßsystemen

U. Widmann¹⁾, R. Lippold¹⁾, H. Fastl²⁾

¹⁾ Müller-BBM, D-82152 Planegg b. München, ²⁾ Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

EINLEITUNG

Ein Modell zur Berechnung der Lautheit stationärer Schalle, wie es von Zwicker vorgeschlagen wurde, nutzt als Zwischengröße die Verteilung der Spezifischen Lautheit entlang der Tonheit. Die Prozedur wurde als graphisches Verfahren in ISO 532B und DIN 4563 1 genormt. Vor einigen Jahren wurde in DIN 4563 1 ein BASIC-Programm aufgenommen, mit dem die Lautheit aus gemessenen Terzpegeln mit jedem PC berechnet werden kann. Wird die Lautheit zeitvariabler Schalle betrachtet, müssen in einem ersten Schritt die Spezifischen Lautheitswerte als zeitvariable Größen behandelt werden. In jedem Frequenzband muß der Einfluß der Nachverdeckung bei der Berechnung der zeitvariablen Spezifischen Lautheit berücksichtigt werden.

In dieser Untersuchung wird basierend auf veröffentlichten Daten zur Nachverdeckung ein einfaches Verfahren zur Simulation der Nachverdeckung vorgestellt. Das Berechnungsverfahren kann für Lautheitsmeßsysteme, aber auch für andere akustische Meß- und Auswertverfahren genutzt werden.

DATENZURNACHVERDECKUNG

Die Nachverdeckung wurde in mehreren Studien, in denen die Abhängigkeit der Nachverdeckung von der Verdeckungsdauer gemessen wurde, untersucht. Eine Aussage scheint allgemein anerkannt zu werden: Die Nachverdeckung nimmt bei einer geringeren Dauer verdeckender Schalle, die kürzer als etwa 100 ms ist, ab. Zwicker [4] veröffentlichte einige Daten, die zeigten, daß die Zeitkonstante des Abklingvorgangs mit sinkender Dauer des Maskierers kürzer wird. Die gemessenen Verdeckungsmuster können als Repräsentant für den Abfall der Erregung im Gehör bzw. der entsprechenden Spezifischen Lautheit verwendet werden.

Abb. 1 faßt die berechnete Spezifische Lautheits-Zeitfunktion $N'_{th}(t)$ (der Index 'th' steht für simulierte Nachverdeckungsschwelle) gemäß Zwicker [4] zusammen. Ein exponentieller Abfall in dieser Abbildung entspricht einer geraden Linie, wie in der Einfügung in Abb. 1 angegeben ist. Ungeachtet der Dauer fallen alle Kurven vom selben Ausgangspunkt bei kürzeren Verdeckungsdauern bei weitem schneller ab als bei langanhaltenden Impulsen. Bei Verdeckungsdauern von $T_M = 5, 10, 30, 200$ ms sind die Zeitkonstanten für den Abfall wie von Zwicker vorgeschlagen $T_M = 4; 4,5; 6,5$ und 11 ms. Bei längeren Zeiträumen fällt die Spezifische Lautheit eher langsamer ab. Eine Zeitkonstante von ca. 15 ms kann aus den Daten abgeleitet werden.

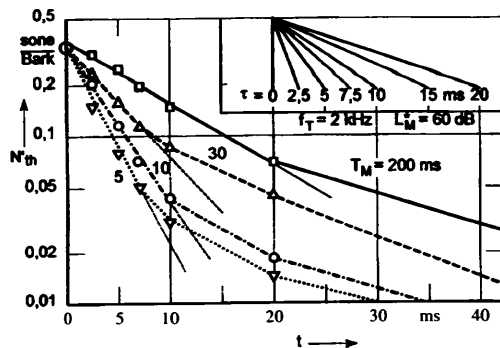


Abb. 1: Nachverdeckungskurven als Funktion der Verdeckungsdauer T_M gemäß [4] in Spezifische Lautheit N'_{th} umgerechnet. Einfügung: Zeitkonstanten für exponentiellen Abfall.

Das beschriebene Verhalten konnte in einem analogen nichtlinearen Modell simuliert werden. Abb. 2 zeigt das bereits von Zwicker [4] vorgeschlagene analoge Netzwerk.

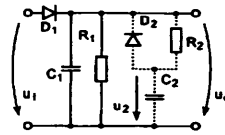


Abb. 2: Nichtlinearer Tiefpaß,

ZEITKONTINUIERLICHE BEHANDLUNG DES NETZWERKES

Das oben gezeigte Verhalten des Netzwerkes wird bestimmt von den Konstanten $\tau_{short} = R_1 \cdot C_1$, $\tau_{long} = R_1 \cdot (C_1 + C_2)$ und $\tau_{var} = R_2 \cdot C_2$. Wenn wir ideale Dioden annehmen, müssen mehrere Fälle unterschieden werden. Aufgrund der Diode D_1 , ist die Spannung u_0 am Ausgang des Netzes niemals niedriger als die Eingangsspannung u_1 . Wenn u_1 niedriger wird als u_0 (Fall 1), wird C₁ entladen. Je nach aktueller Spannung u_2 des Kondensators C_2 gibt es

- Fall 1.1 mit $u_0 > u_2$: C_1 wird über R_1 und über R_2 in C_2 entladen und von den Differentialgleichungen

$$\dot{u}_0 = -\frac{1}{C_2} \left(\frac{u_0}{R_1} + \frac{u_0 - u_2}{R_2} \right) \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{u_0 - u_2}{C_2 \cdot R_2} \quad (2)$$

erhalten wir

$$u_0(t) = (\tau_{var} \cdot \lambda_1 + 1) K_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + (\tau_{var} \cdot \lambda_2 + 1) K_2 \cdot e^{\lambda_2 t} \quad (3)$$

mit der Zeit t , seit der u_2 kleiner wurde als u_0 und den Abkürzungen

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{-2 \cdot \tau_{var} \cdot \tau_{short}} \left(-\tau_{var} - \tau_{long} \pm \sqrt{(\tau_{var} + \tau_{long})^2 - 4 \cdot \tau_{short} \cdot \tau_{var}} \right)$$

$$K_1 = \frac{u_0(t=0) - u_2(t=0) \cdot (\tau_{var} \lambda_2 + 1)}{\tau_{var} (\lambda_1 - \lambda_2)}$$

$$K_2 = \frac{u_0(t=0) - u_2(t=0) \cdot (\tau_{var} \lambda_1 + 1)}{\tau_{var} (\lambda_2 - \lambda_1)}$$

und

- Fall 1.2 mit $u_0 = u_2$: $C_1 + C_2$ werden entladen über R_1 , so gilt

$$u_0 = \frac{-u_0}{(C_1 + C_2) \cdot R_1} \quad (4)$$

und wir erhalten

$$u_0(t) = u_0(t=0) \cdot e^{-t/\tau_{long}}, \quad (5)$$

wobei t jetzt die Zeit angibt, seit $u_0 = u_2$ wurde.

Die Diode D_2 verhindert, daß u_2 größer wird als u_0 . Außer im Fall 1 ist es möglich, daß $u_0 = u_1$ (z.B. wenn u_1 angestiegen und dann konstant geblieben ist). Unter dieser Bedingung wird C_2 geladen (ohne C_1 zu entladen), wenn $u_0 > u_2$ (Fall 2.1). Die geltende Differentialgleichung im Fall 2.1 lautet

$$u_2 = \frac{1}{\tau_{var}} (u_0 - u_2) \quad (6)$$

und u_2 folgt

$$u_2(t) = (u_2(t=0) - u_0) \cdot e^{-t/\tau_{var}} + u_0 \quad (7)$$

wobei t die Zeit angibt, seit der u_0 gleich u_1 wurde.

Man muß $u_2(t)$ wissen, da dies ein Eingangswert ist, der für die Bestimmung von u_0 im Fall 1 (siehe Gleichungen 3 und 5) notwendig

ist. Wenn C_2 bereits mit derselben Spannung wie C. geladen ist (Fall 2.2), bleibt u_2 gleich. Wie oben erwähnt, kann $u_0 < u_2$ niemals eintreten.

Abb. 3 zeigt ein Beispiel für den zeitabhängigen Verlauf der Spannungen während des Abfallvorganges. Das Ausgangssignal folgt sofort auf einen Anstieg der Eingangsspannung. Nachdem das Eingangssignal abgeschaltet wurde, beginnt der Abfall des Ausgangssignals. Die Neigung des Abfalls folgt der Zeitkonstante $\tau_{\text{short}} = R_1 \cdot C_1$. Nachdem der Kondensator C_2 geladen ist, ändert sich die Neigung zum langsamen Abfall mit $\tau_{\text{long}} = R_1 \cdot (C_1 + C_2)$. $\tau_{\text{var}} = R_2 \cdot C_2$ bestimmt den Zeitpunkt des Übergangs zwischen beiden Zeitkonstanten.

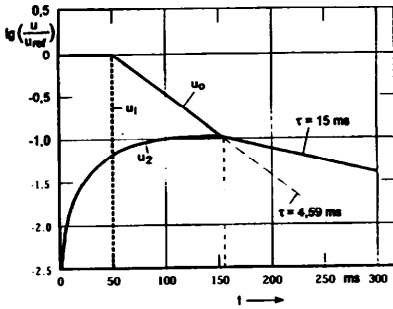


Abb. 3: Zeitliche Spannungsverläufe des Netzwerkes bei einem Eingangsimpuls mit einer Dauer von 50 ms.

ZEITDISKRETE BEHANDLUNG DES NETZWERKES

Zur Realisierung der Transfereigenschaften des o.g. Netzwerkes zu diskreten Zeitpunkten $f_s = 1/\Delta t$ können wir die zeitabhängigen Funktionen der Gleichungen (3), (5) und (7) zur Bestimmung des neuen $u_i(t)$ -Wertes aus dem Eingangswert $u_i(t)$ und den bekannten Werten $u_0(t-\Delta t)$ und $u_2(t-\Delta t)$ verwenden. Bei Angabe von

- $u_0(t) \rightarrow u_0$,
- $u_0(t-\Delta t) \rightarrow u_{00}$,
- $u_2(t) \rightarrow u_2$,
- $u_2(t-\Delta t) \rightarrow u_{20}$ und
- $u_i(t) \rightarrow u_i$

erhalten wir:

• Fall 1.1: ($u_i < u_{00}$ und $u_{00} > u_{20}$)

$$u_2 = u_{00} \cdot B_0 - u_{20} \cdot B_1, \quad (8)$$

$$u_0 = u_{00} \cdot B_2 - u_{20} \cdot B_3, \quad (9)$$

• Fall 1.2: ($u_i < u_{00}$ und $u_{00} = u_{20}$)

$$u_0 = u_2 = u_{00} \cdot B_4, \quad (10)$$

• Fall 2.1: ($u_i = u_{00}$ und $u_{00} > u_{20}$)

$$u_0 = u_i \quad (11)$$

$$u_2 = (u_{20} - u_i) B_5 + u_i, \quad (12)$$

mit den Konstanten

$$B_0 = \frac{1}{\tau_{\text{var}}(\lambda_1 - \lambda_2)} \left(e^{\lambda_1 \Delta t} - e^{\lambda_2 \Delta t} \right),$$

$$B_1 = \frac{1}{\tau_{\text{var}}(\lambda_1 - \lambda_2)} \left((\tau_{\text{var}} \lambda_2 + 1) e^{\lambda_1 \Delta t} - (\tau_{\text{var}} \lambda_1 + 1) e^{\lambda_2 \Delta t} \right),$$

$$B_2 = \frac{1}{\tau_{\text{var}}(\lambda_1 - \lambda_2)} \left((\tau_{\text{var}} \lambda_1 + 1) e^{\lambda_1 \Delta t} - (\tau_{\text{var}} \lambda_2 + 1) e^{\lambda_2 \Delta t} \right),$$

$$B_3 = \frac{(\tau_{\text{var}} \lambda_1 + 1)(\tau_{\text{var}} \lambda_2 + 1)}{\tau_{\text{var}}(\lambda_1 - \lambda_2)} \left(e^{\lambda_1 \Delta t} - e^{\lambda_2 \Delta t} \right),$$

$$B_4 = e^{-\Delta t / \tau_{\text{long}}}, \quad B_5 = e^{-\Delta t / \tau_{\text{var}}}.$$

Bei der diskreten Behandlung des Netzwerkes können wir nur zu ausgewählten Zeitpunkten die Bedingungen überprüfen, die zwischen den Fällen unterscheiden. Daher kann es bei der Lösung der Aufgabe in finiten Längsschritten At vorkommen, daß u_i größer als u_{00} wird. In diesem neuen Fall (Fall 3) folgt u_0 der Größe u_i und u_2 folgt Gleichung (12). Auch muß verhindert werden, daß u_0 in einem Schritt kleiner wird als u_2 (Fall 1.1.1). Es ist eigentlich nicht richtig $u_2 = u_0$ zu setzen, jedoch ist der Fehler bei dieser Näherung gering.

Obige Formeln wurden in einem C-Programm umgesetzt. Als Zeitkonstanten wurden $\tau_{\text{short}} = 5$ ms, $\tau_{\text{long}} = 15$ ms bzw. $\tau_{\text{var}} = 75$ ms gewählt.

Abb. 4 vergleicht das mit den Algorithmen für eine Verdeckungsdauer von 5, 10, 30 und 200 ms berechnete Abklingverhalten mit den gemessenen Daten (s. Abb. 1).

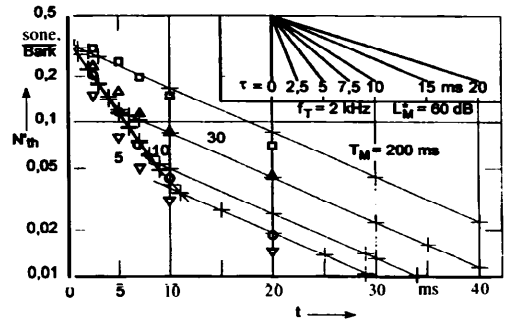


Abb. 4: Vergleich der ursprünglichen Daten aus Abb. 1 (durchgezogene Linien) mit den simulierten Nachverdeckungsdaten (Symbole): $T_M = 200$ ms (Vierecke), $T_M = 30$ ms (Dreiecke), $T_M = 10$ ms (Kreise), $T_M = 5$ ms (umgedrehte Dreiecke).

Bei längerer Dauer der maskierenden Schalle stimmen die simulierten Daten und die N'_th -Werte sehr gut überein. Bei kürzeren Verdeckungszeiträumen treten bei den gewählten Zeitkonstanten geringfügige Abweichungen auf.

ZUSAMMENFASSUNG

Wenn die Lautheit von zeitvariablen Schallen betrachtet wird, muß die Spezifische Lautheit als zeitabhängige Größe behandelt werden. Eine zeitliche Auflösung von 2 ms kann für praktische Anwendungen gewählt werden. Auch bei digitalen akustischen Meßsystemen müssen Nachverdeckungseffekte berücksichtigt werden. Nachverdeckung ist stark von der Dauer abhängig. Mit der oben beschriebenen digitalen Realisierung steht ein Verfahren zur Verfügung, das dieses zeitabhängige Verhalten der Nachverdeckung erklärt. Bei Dauern von 10 ms bis 200 ms stimmt das Algorithmusverhalten mit den veröffentlichten Daten ausreichend überein. Daher kann dieser einfache Algorithmus bei Lautheitsmeßgeräten oder anderen Vorverarbeitungsstufen verwendet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Zwicker, E., Fastl, H., Widmann, U., Kurakata, K., Kuwano, S., Namba, S. (1991): Program for Calculating Loudness According to DIN 45631 (ISO532B). J. Acoust. Jpn (E) 12, 39-42.
- [2] Widmann, U. (1993): Krach gemessen - Gehörbezogene Geräuschbewertung, c't 4/93 (including a C-listing for loudness acc. DIN 45631).
- [3] Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics - facts and models. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.
- [4] Zwicker, E. (1984): Dependence of post-masking on masker duration and its relation to temporal effects in loudness. J. Acoust. Soc. Am. 75, S. 219-223.