Über die Messunsicherheit fremdgeräuschkorrigierter Schalldruckpegel

Sergio Martinez

TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, 51105 Köln, E-Mail: Sergio.Martinez@web.de

Einleitung

Bei der Messung von Geräuschen aller Art ist der Quellenbezug ein spezifisches Merkmal zur Kennzeichnung und Beschreibung der erfassten Informationen. Deshalb ist eine Voraussetzung der korrekten, quellenbezogenen Auswertung von Schallpegelmessungen, die erforderliche Geräuschtrennung so zu durchführen, dass die beteiligten Geräuschanteile qualitativ und quantitativ ermittelt und zugeordnet werden können.

Wir betrachten in dieser Arbeit vor allem jene Signalüberlagerungen, die - mathematisch ausgedrückt - mittels einer Faltungsoperation der ursprünglichen Signale entstehen [1]. Dabei wird – vereinfachend – vorausgesetzt, dass die ursprünglichen Signale im statistischen Sinne voneinander unabhängig sind. Es interessieren hier vor allem Energiegrößen des Schallfeldes, die von einer *Schallquelle* „Q“ ausgesandt werden und gemeinsam mit einem gleichzeitig emittierten *Fremdgeräusch* „F“ auf einen Akzeptor einwirken und das *Gesamtgeräusch* „G“ erzeugen. Mit dem Parameter Zeit in Verbindung mit der Zufallsvariable Energie lassen sich demnach die üblichen Konzepte der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die Messaufgabe anwenden. Damit ist eine Verknüpfung von Energiegrößen möglich und ihre „Algebra“ beschreibbar. Das heutige Verständnis der Akustik und des Schallschutzes verweist auf diese statistische Betrachtungsweise.

Quellen-, Fremd- und Gesamtgeräusch

In der Praxis des Schallschutzes sind diese drei Begriffe geläufig. Mit weiteren Spezifizierungen werden diese Begriffe in vielen Normen, Regelwerken und auch gesetzlichen Bestimmungen verwendet. In dieser Untersuchung werden diese Geräuscharten als *statistische, stetige Zufallsvariablen* verstanden. Das bedeutet aber nicht, dass in den Realisationen der Basis-Geräuscharten, Quellen– bzw. Fremdgeräusche, keine Einflüsse von *diskreten* Zufallsvariablen vorliegen. Diese können z.B. die Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit (im Verkehrslärm) oder die Häufigkeit der Veränderung des Emissionszustandes einer Schallquelle sein.

Die o.a. Zufallsvariablen der Akustik werden meist als Zeitreihe dargestellt (vgl. [1]). Die statistische *Pegel-Verteilungsfunktion* $\Phi(L)$ der stetigen Zufallsvariable L(t) im betrachteten Zeitintervall $t = t_1$ bis t_2 ist zwischen zwei Grenzwerten L_{max} und L_{min} definiert und ihre erste Ableitung ist immer größer oder gleich Null, nie kleiner Null. Die dazugehörige *Pegel-Verteilungsdichtefunktion* φ (L) ist wie folgt definiert:

$$\varphi(L) = \frac{d\Phi(L)}{dL} \tag{1}$$

Des Weiteren lassen sich mit Hilfe der Pegel-Verteilungsdichtefunktion weitere Funktionalparameter bestimmen: im Pegelraum der arithmetische Mittelwert $\mathbf{L_{am}}$ (= arithmetische Erwartungswert) der Pegel-Verteilungsdichtefunktion und die dazugehörige Varianz $\boldsymbol{\sigma_{am}}$ (als quadratischer Streuungsparameter):

$$\sigma_{am}^2 = \int_{L_{max}}^{L_{min}} L^2 \cdot \varphi(L) \cdot dL - L_{am}^2 \tag{2}$$

Weitere Größen sind der Pegelmittelwert im Intensitätsraum $\mathbf{L_{eq}}$ und die dazugehörige arithmetische Varianz im Pegelraum (als quadratischer Streuungsparameter) $\boldsymbol{\sigma_{eq,m}}$:

$$\sigma_{eq,m}^2 = \int_{L_{max}}^{L_{min}} (L - L_{eq})^2 \cdot \varphi(L) \cdot dL \tag{3}$$

Nach dem Verschiebungssatz gilt:

$$\sigma_{am}^2 = \sigma_{eq,m}^2 - (L_{am} - L_{eq})^2 \tag{4}$$

In der VDI-Richtlinie 3723-1 [4] wird im Intensitätsraum die Standardabweichung $\mathbf{s_{eq}}$ der bezogenen Schalldruckquadrate berechnet:

$$s_{eq}^2 = \int_{L_{max}}^{L_{min}} (10^{0,1 \cdot L} - 10^{0,1 \cdot L_{eq}})^2 \cdot \varphi(L) \cdot dL \tag{5}$$

Nach den Veröffentlichungen [1] und [2] können die Größen $\mathbf{s_{eq}}$ nach Gl. (6) und $\boldsymbol{\sigma_{eq,m}}$ nach Gl. (3) ineinander umgerechnet werden. Es gilt näherungsweise (für $\boldsymbol{\sigma_{eq,m}}$ kleiner 2 dB):

$$s_{eq} \approx 0{,}1 \cdot \ln(10) \cdot 10^{0,1 \cdot L_{eq}} \cdot \sigma_{eq,m} \tag{6}$$

Die Verteilungsdichtefunktion (im Pegelraum) jeweils des **Quellengeräusches Q** und des **Fremdgeräusches F** können mit $\boldsymbol{\varphi_Q(L)}$ bzw. $\boldsymbol{\varphi_F(L)}$ bezeichnet werden. Die Überlagerung zum **Gesamtgeräusch G** führt zu der entsprechenden Pegel-Verteilungsdichtefunktion $\boldsymbol{\varphi_G(L)}$. Da aber die Überlagerung zum Gesamtgeräusch nichts anders ist als eine Summation von zwei statistisch unabhängigen Zufallsvariablen im Intensitätsraum, so muss die dazugehörige mathematische Faltungsoperation im Intensitätsraum erfolgen. Nachfolgend wird die Rücktransformation der erhaltenen Verteilungsfunktion für das Gesamtgeräusch vom Intensitätsraum in den Pegelraum durchgeführt. Es gilt:

$$\varphi_{IG}(I) = \int_0^I \varphi_{IQ}(I - I') \cdot \varphi_{IF}(I') \cdot dI' \tag{7}$$

wobei der Index „I“ darstellt, dass diese Verteilungsdichtefunktionen im Intensitätsraum definiert sind. Für die Rücktransformation in den Pegelraum gilt (vgl. [7]):

$$\varphi_G(L) = 0{,}1 \cdot \ln(10) \cdot \varphi_{IG}(10^{0,1 \cdot L}) \cdot 10^{0,1 \cdot L} \tag{8}$$

Die Basisgleichung der Überlagerung zum Gesamtgeräusch G im Pegelraum lautet, bekanntlich:

$$L_{G,eq} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot L_{Q,eq}} + 10^{0,1 \cdot L_{F,eq}}) \tag{9}$$

Mit Gl. (7) gilt im Intensitätsraum hinsichtlich der bisher behandelten Streuparameter und unter der Voraussetzung der **statistischen Unabhängigkeit vom Quellengeräusch und Fremdgeräusch** die Beziehung nach Gl. (10) (vgl. [5]):

$$s_{IG,eq}^2 = s_{IQ,eq}^2 + s_{IF,eq}^2 \tag{10}$$

Durch Anwendung von Gl. (6) oder alternativ nach GUM (vgl. [6]) und Gl. (9) gilt:

$$(10^{0{,}1\cdot L_{G,eq}} \cdot \sigma_{G,eq,m})^2 = (10^{0{,}1\cdot L_{Q,eq}} \cdot \sigma_{Q,eq,m})^2 + (10^{0{,}1\cdot L_{F,eq}} \cdot \sigma_{F,eq,m})^2 \qquad (11)$$

Geräuschtrennung

Die Grundgleichung zur Fremdgeräuschkorrektur lautet:

$$L_{Q,eq} = 10 \cdot \log(10^{0{,}1\cdot L_{G,eq}} - 10^{0{,}1\cdot L_{F,eq}}) \qquad (12)$$

oder auch, wie in vielen Normen bevorzugt:

$$L_{Q,eq} = L_{G,eq} + 10 \cdot \log(1 - 10^{-0{,}1(L_{G,eq} - L_{F,eq})}) \qquad (13)$$

Wenn **Gesamtgeräusch und Fremdgeräusch statistisch unabhängig** sind, dann gilt für **die Messunsicherheit** des fremdgeräuschkorrigierten **Quellengeräusches** ([3],[6])

$$\sigma_{Q,eq,m} = \sqrt{(c_{L_{G,eq}} \cdot \sigma_{G,eq,m})^2 + (c_{L_{F,eq}} \cdot \sigma_{F,eq,m})^2} \qquad (14)$$

Hierbei sind:

$$c_{L_{G,eq}} = \frac{\partial L_{Q,eq}}{\partial L_{G,eq}} = \frac{1}{1 - 10^{-0{,}1\cdot(L_{G,eq} - L_{F,eq})}} \qquad (15)$$

$$c_{L_{F,eq}} = \frac{\partial L_{Q,eq}}{\partial L_{F,eq}} = \frac{-10^{-0{,}1\cdot(L_{G,eq} - L_{F,eq})}}{1 - 10^{-0{,}1\cdot(L_{G,eq} - L_{F,eq})}} \qquad (16)$$

Wenn aber **Gesamtgeräusch und Fremdgeräusch NICHT statistisch unabhängig** sind, dann sollte die nachfolgende Gl. (17) zur Bestimmung der **Messunsicherheit** des fremdgeräuschkorrigierten **Quellengeräusches** verwendet werden. Voraussetzung ist die Gültigkeit von Gl. (9) und Gl. (11).

$$\sigma_{Q,eq,m} = \sqrt{(c_{L_{G,eq}} \cdot \sigma_{G,eq,m})^2 - (c_{L_{F,eq}} \cdot \sigma_{F,eq,m})^2} \qquad (17)$$

Numerische Verteilungsdichtefunktionen

Eine *Alternative zu diesen Näherungen* besteht darin, verteilungsgebundene Verfahren direkt anzuwenden. Durch rechnerische Simulation können z.B. Pegel-Verteilungsdichtefunktionen erstellt und durch Berechnungen überlagert werden. Die bereits angegebenen Gln. (7)-(10) bleiben in dieser Aufgabe grundlegend. Dabei ist zu beachten, dass in der Faltungsoperation nur die Funktionen für das Quellengeräusch „Q“ und das Fremdgeräusch „F“ untereinander ausgetauscht werden dürfen. Die experimentellen Messdaten lassen sich durch die *synthetisierten oder berechneten Verteilungsfunktionen bzw. Pegel-Verteilungsdichtefunktionen* annähern. Geeignet sind z.B. rationale Funktionen nach der Gl. (18).

$$\varphi(L) = b_1 \cdot \frac{(L - L_{\max}) \cdot (L - L_{\min})}{c1 \cdot (L_{\max} - L_{\min}) + (L - L_{c1})^2} \quad \text{und} \qquad (18)$$

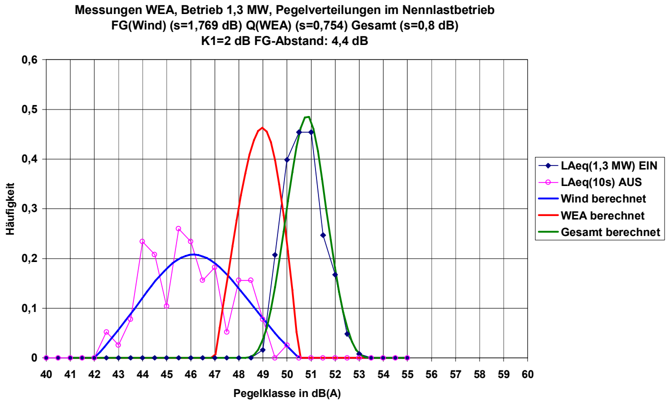
$$\varphi(L) = 0 \ \textit{für}\ L < L_{\min} \ \textit{und}\ \ L > L_{\max} \qquad (19)$$

Dabei sind:

- L_{max} und L_{min} Extremwerte der Messungen und Berechnungen.
- c1 ein frei wählbarer Parameter u.a. zur Anpassung der „Breite“ der Verteilung.
- L_{c1} ein Pegelwert (meist zwischen L_{max} und L_{min}) der die „Schiefe“ der Verteilung beeinflusst.
- b_1 ein rechnerischer Normierungsfaktor

Sind auf diesem Weg alle beteiligten Verteilungen bekannt, so können daraus unmittelbar nicht nur die Rechenergebnisse nachvollzogen werden, sondern auch die dazugehörigen Messunsicherheiten angegeben werden, ohne dabei auf Näherungen angewiesen zu sein, die sowohl Überschätzungen wie auch Unterschätzungen beinhalten können.

Im nachfolgenden **Beispiel** wird bei einer Windenergieanlage (WEA) die Pegel-Verteilungsdichtefunktion des Quellengeräusches rechnerisch aus dem Gesamtgeräusch und dem Fremdgeräusch getrennt. Die üblichen Näherungen nach [3] überschätzen dabei die Messunsicherheit des Quellengeräusches Q(WEA) (s). Die Gl. (17) ist in diesem Fall die korrekte Lösung.



Beispiel: Überlagerung von Fremdgeräusch (Wind, AUS) und Quellengeräusch (WEA, berechnet) zum Gesamtgeräusch L_G (1,3 MW, EIN). Das Quellengeräusch (WEA, berechnet) wird mit einer Verteilungsdichtefunktion nach Gl. (18) so berechnet, dass man eine möglichst exakte Nachbildung der Verteilungsdichtefunktion des Gesamtgeräusches L_G erhält.

Literatur

[1] Heiß, A. ; Krapf, K.-G.: Qualitätsmonitoring durch Online-Ermittlung von Vertrauensbereiche für Schallmessung und Geräuschtrennung, Lärmbekämpfung 4(2009), S. 127-134

[2] Heiß, A. ; Krapf, K.-G.: Quantification of uncertainty by real time confidence limits in separation of sound immission levels, Noise Control Eng. J. 55(2007), S. 149-158

[3] Hans G. Jonasson, SP Swedish National Testing and Research Institute, WP3 – Monitoring an Measurement methods, IMAGINE Project, 6th Framework Programme, Budapest, October 23-25,2006

[4] VDI 3723-1: Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen. Berlin: Beuth Verlag 1993

[5] Rinne, H.: Taschenbuch der Statistik, Verlag Harri Deutsch 1997

[6] DIN V ENV 13005: Guide to Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Berlin: Beuth Verlag 1999

[7] Heiß, A.: Verteilungsrelationen von Schallemission, Ausbreitungsdämpfung und Immission. Fortschritte der Akustik, CFA / DAGA’04, S. 787-788