

# Qualifizierung von Immissionsprognosen durch Abschätzung der Unsicherheit

U.J. Kurze, Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Str. 11, 82152 Planegg bei München

## 1. Einflüsse auf die Unsicherheit

Für Prognosen der Geräuschimmission in der Nachbarschaft von Anlagen sind nach TA Lärm Angaben zur Qualität erforderlich. Sie setzt sich zusammen aus dem Vorwissen des Gutachters über Mittelwerte und Streuungen von Emissionen und Ausbreitungsdämpfungen und aus der Beurteilung des Zusammenwirkens verschiedener Immissionsbeiträge. Ersteres wird mit Bezug auf bestehende Regelwerke diskutiert. Letzterem dient die Darstellung mathematischer Modelle. Dabei zeigt sich die überwiegende Bedeutung des stärksten Beitrags sowohl hinsichtlich des Gesamtpegels als auch hinsichtlich der Unsicherheit. Während der Gesamtpegel mit einer Vielzahl von Beiträgen ansteigt, nimmt die Unsicherheit der Immissionsprognose jedoch ab. Für untergeordnete Beiträge bestehen keine hohen Anforderungen an die Kenntnis von Standardunsicherheiten.

## 2. Regelwerke

Messnormen zur Bestimmung der Geräuschemission von Maschinen und Anlagen, wie z.B. die Reihe ISO 3740, sind in drei Genauigkeitsklassen unterteilt, die die Qualität der Messung durch unterschiedliche „Vergleichsstandardabweichungen“ beschreiben. Für weniger erprobte Messverfahren zum sekundären Schallschutz liegen jedoch anstelle gesicherter Zuordnungen vielfach nur Abschätzungen für die Unsicherheit vor. Sammlungen zur Geräuschemission von technischen Schallquellen, wie z.B. die Richtlinie VDI 3731, geben „Standardabweichungen“ von Messwerten für bestimmte Maschinengruppen an. Schließlich werden die Prognoseverfahren zur Schallausbreitungsrechnung nach ISO 9613-2, auf die die TA Lärm Bezug nimmt, für Mitwindbedingungen, zwei Abstandsbereiche und zwei Bereiche von Immissionshöhen durch „geschätzte Genauigkeiten“ qualifiziert. Je weiter sich die Aussagen von Laborbedingungen entfernen, desto unschärfer wird offenbar die Bezeichnung der Qualität. Trotzdem ist es überaus wünschenswert, durch realistische Aussagen zur Unsicherheit von Immissionsprognosen ein Gegengewicht zu scheinbar immer präziseren Software-Programmen zu schaffen. Eine allgemeine Grundlage dafür bildet die Vornorm ENV 13005, auch wenn sie wieder von der Laborqualität ausgeht und der Ingenieur weiterhin gefordert ist, die ihm verfügbaren Felddaten geeignet einzusetzen, um die Prognoseunsicherheit realistisch abzuschätzen.

## 3. Statistische Verteilungen

Betrachtet wird der Fall, dass auf einen Immissionsort mehrere Schallquellen einwirken. Die Teilimmissionen mit Pegeln  $L_1, L_2, \dots$  seien aufgrund von Maschineneigenschaften, Betriebsbedingungen und Schallausbreitungsbedingungen in einer Mitwindrichtung statistisch verteilt mit den energetischen Mittelwerten  $L_{e1}, L_{e2}, \dots$ , die sich nach ISO 9613-2 errechnen, und den Standardunsicherheiten  $s_1, s_2, \dots$ , die nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz aus unkorrelierten Einflüssen von den Teil-schallquellen bis zum Immissionsort hin auftreten. Eine Vielzahl von Einflüssen führt bekanntlich zu einer Normalverteilung der Pegel (und nicht der Intensität, die im Grenzfall auch nicht an das Definitionsintervall der Variablen von  $-\infty$  bis  $+\infty$  angepasst ist). Hier sei angenommen, dass zwei Normalverteilungen

mit hinreichender Genauigkeit für die Praxis zu einer resultierenden Normalverteilung zusammen gefasst werden können und dass deren Standardunsicherheit zur Beschreibung der Qualität des Ergebnisses geeignet ist. Diese Hypothese wird geprüft. Mit der weitergehenden Darstellung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird der Bezug zur Angabe von Quantilen gemäß VDI 3723 hergestellt, die weniger geeignet für die allgemeine Qualifizierung von Immissionsprognosen erscheinen.

## 4. Kombination von Normalverteilungen

Die Normalverteilung einer stochastischen Variablen  $x$ , die durch den Mittelwert  $m$  und die Standardunsicherheit  $s$  gekennzeichnet ist, lautet bekanntlich

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2s^2}\right] \quad (1)$$

Ist die Variable  $x$  ein Schalldruckpegel, so besteht zwischen dem Pegelmittelwert  $L_m$  und dem Pegel des energetischen Mittelwerts  $L_e$  die Beziehung

$$L_e = L_m + \frac{\ln(10)}{20 \text{ dB}} s^2. \quad (2)$$

Ist die Standardunsicherheit  $s = 2$  dB, so unterscheiden sich beide Mittelwerte nur um etwa 0,5 dB, bei Immissionsprognosen eine kleine Größe.

Die Verbundwahrscheinlichkeit für das auftreten zwei unabhängiger Beiträge mit den Pegeln  $L_1$  und  $L_2$  ist durch das Produkt

$$p(L_1, L_2) = \frac{1}{2\pi s_1 s_2} \exp\left[-\frac{(L_1 - L_{m1})^2}{2s_1^2} - \frac{(L_2 - L_{m2})^2}{2s_2^2}\right] \quad (3)$$

zu beschreiben. Zum Gesamtpegel

$$L = 10 \lg\left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}\right) \text{ dB} \quad (4)$$

liefert der Pegel  $L_2$  den Beitrag

$$L_2 = 10 \lg\left(10^{L/10} - 10^{L_1/10}\right) \text{ dB}. \quad (5)$$

In Gl.(3) kann danach  $L_2$  durch die funktionale Abhängigkeit von  $L$  und  $L_1$  ersetzt werden. Die Zusammenfassung aller Fälle, in denen ein Immissionsbeitrag mit dem Pegel  $L_1$  zum Pegel  $L$  auftritt, erfolgt durch das Faltungsintegral

$$p(L) = c \int_{-\infty}^L p(L, L_1) dL_1. \quad (6)$$

Die Proportionalitätskonstante  $c$  ergibt sich aus der Normierung

$$c \int_{-\infty}^{\infty} p(L) dL = 1. \quad (7)$$

Die kumulative Verteilung der Gesamtimmission wird beschrieben durch

$$P(L) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^L p(L) dL. \quad (8)$$

Die grafische Darstellung einer Normalverteilung ergibt eine Glockenkurve, deren Breite proportional zur Standardunsicherheit ist. Sehr aufschlussreich ist die grafische Darstellung der kumulativen Verteilung auf einer Skala, die gemäß der inversen Gaußverteilung verzerrt ist, sodass sich Normalverteilungen als Geraden mit der Steigung  $-1/s$  abbilden. Je flacher die Neigung, desto größer ist die Standardunsicherheit  $s$ . Im Bereich der Ordinatenwerte von  $-1$  dB bis  $+1$  dB liegen dann etwa 68%, im Bereich von  $-2$  dB bis  $+2$  dB etwa 95% der Pegel usw. Eine Skala von  $-10$  dB bis  $+10$  dB geht sicher weit über den Bereich des praktischen Interesses hinaus, macht jedoch Abweichungen extremer Pegel von der Normalverteilung besonders deutlich.

### 5. Beispiele

Betrachtet wird in Bild 1 der Fall von zwei Immissionsbeiträgen, die bei gleicher Standardunsicherheit einen um 5 dB unterschiedlichen Mittelwert besitzen. Aus zwei Glockenkurven für die Einzelbeiträge in Bild 1a resultiert eine Verteilung, deren Maximum um etwa 1 dB gegenüber  $L_{m1}$  verschoben und die kaum weniger schlank als bei den Einzelbeiträgen ist. Der Mittelwert und die resultierende Standardunsicherheit von 0,8 dB bilden, wie Bild 1b zu entnehmen, für praktisch alle auftretenden Pegel eine sehr gute Grundlage für die Annahme einer resultierenden Normalverteilung.

Etwas ungünstiger ist der Fall ungleicher Standardunsicherheiten  $s_2 > s_1$ . Bei gleichem Energiemittelwert der Teilimmissionen bestimmt, wie in Bild 2a und 2b dargestellt, der größere Wert von  $s_2$  die Verteilung der mittleren und hohen Gesamtpegel. Die Näherung der Gesamtpegelverteilung durch eine Normalverteilung bleibt im Bereich des resultierenden Energiemittelwerts zufriedenstellend.

### 6. Kombinierte Varianz

Die Qualitätsangabe von Gesamtpegeln

$$L = 10 \lg \left( \sum_i 10^{L_i/10} \right) \text{ dB}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (9)$$

ist danach hinreichend im Sinne von ENV 13005 durch die kombinierte Varianz

$$s^2 = \sum_i \left( \frac{\partial L}{\partial L_i} \right)^2 s_i^2 \quad (10)$$

vorzunehmen, wobei sich die Gewichtungsfaktoren aus Gl. (9) zu

$$\frac{\partial L}{\partial L_i} = \frac{10^{L_i/10}}{\sum_i 10^{L_i/10}} \quad (11)$$

errechnen. Sie kennzeichnen die relativen Energieanteile.

Die kombinierte Standardunsicherheit  $s$  von zwei Beiträgen ist in Bild 3 angegeben. Sie nimmt mit der Standardunsicherheit des kleineren Beitrags zu, abhängig von der Pegeldifferenz zwischen dem kleineren und dem größeren Beitrag. Etwa gleiche Beiträge verringern  $s$ , sehr kleine Beiträge  $L_2$  nehmen keinen Einfluss.

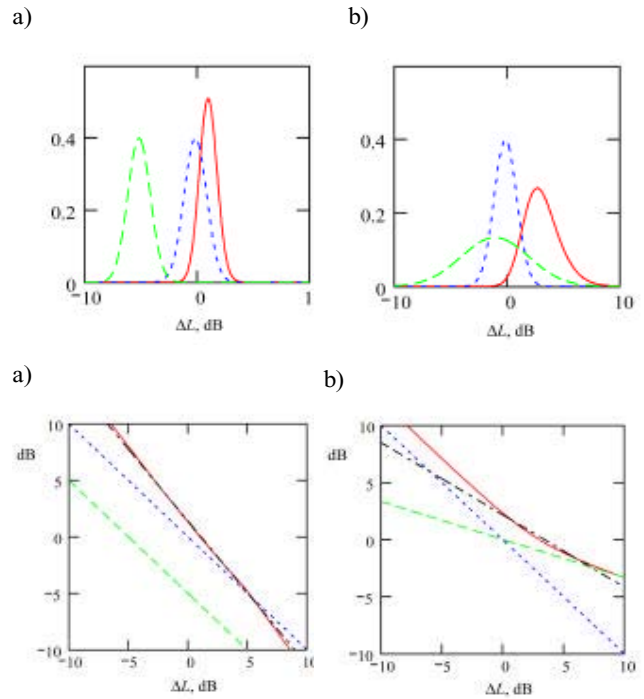


Bild 1a) Wahrscheinlichkeitsdichte einzelner Immissionsbeiträge  $p_1$  (...) und  $p_2$  (- -) für  $s_1 = 1$  dB,  $s_2 = 1$  dB,  $\Delta L_e = -5$  dB sowie der Gesamtimmission  $p$  (—) in dB als Funktion der Pegeldifferenz  $\Delta L = L - L_{e1}$  in dB

Bild 2 a) desgl. für  $s_1 = 1$  dB,  $s_2 = 3$  dB,  $\Delta L_e = 0$  dB

b) Pegelmaß der kumulativen Wahrscheinlichkeit für einzelne Immissionsbeiträge (...), (- -), für die Gesamtimmission (—) und für die Normalverteilung mit  $m = 1$  dB,  $s = 0,8$  dB (- -)

b) desgl. für einzelne Immissionsbeiträge (...), (- -), für die Gesamtimmission (—) und für die Normalverteilung mit  $m = 3,1$  dB,  $s = 1,6$  dB (- -)

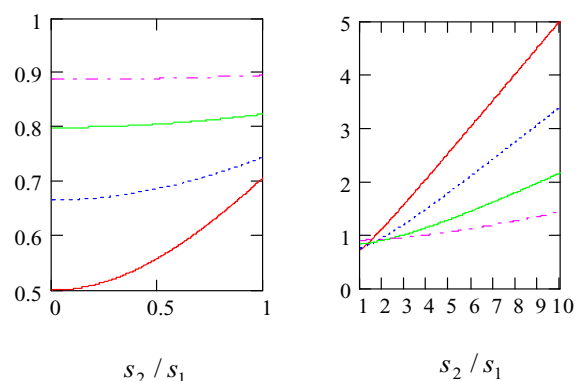


Bild 3: Kombinierte Standardunsicherheit  $s$  für zwei Beiträge als Funktion der Standardunsicherheit  $s_2$  des kleineren Beitrags, jeweils bezogen auf die Standardunsicherheit  $s_1$  des größeren Beitrags; Parameter ist die Pegeldifferenz  $L_{e2} - L_{e1} =$  (—) 0 dB, (...) -3 dB, (- -) -6 dB, (- . -) -9 dB

Herrn Dr. Probst, Accon sei für Hinweise zu Abschn. 6 gedankt.