

Verteilungsrelationen von Schallemission, Ausbreitungsdämpfung und Immission und Auswirkungen auf die Prognose- und Messunsicherheit der Immission

Alois Heiß

Bayerisches Umweltministerium, D-81925 München, Germany, Email: heiss-alois@t-online.de

Einleitung

Bei Prognose und Messung der Schallimmission ist die Aussagekraft der ermittelten Kenngrößen maßgebend von der Struktur ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilungen am Einwirkungsort bestimmt. Da nun von den zur Zeit gültigen Regelwerken zunehmend auch für schalltechnische Ergebnisse ein Qualitätsmanagement gefordert wird, sollen hier in Ergänzung vorhandener Fachbeiträge [1][2][3][4] wesentliche Elemente der quantitativen Beschreibung der bei Emission, Ausbreitung und deren Zusammenwirken zum Immissionsort hin wirksamen Verteilungsvorgänge dargestellt werden. Zur letztlich interessierenden Unsicherheit von Beurteilungsgrößen wird ein von Normalverteilungsvoraussetzungen unabhängiges Direktverfahren (Bootstrapmethode) aufgezeigt.

Verteilungsrelationen

Erfahrungsgemäß unterliegen sowohl die Schallemission als auch die Ausbreitungsdämpfung hin zum Immissionsort Verteilungen mit endlicher Breite für Pegel und Intensität $10^{0,1L}$. Wenn nun Verteilungsstrukturen am Immissionsort für Bewertungen genutzt werden sollen, ist von Interesse, den Einfluß der Emission und der Ausbreitung auf die Struktur der Immissionsverteilung zumindest so genau zu kennen, wie es die Beurteilung der Immission mit Berücksichtigung der verbleibenden Ergebnisunsicherheit erfordert.

Verteilungsdichte

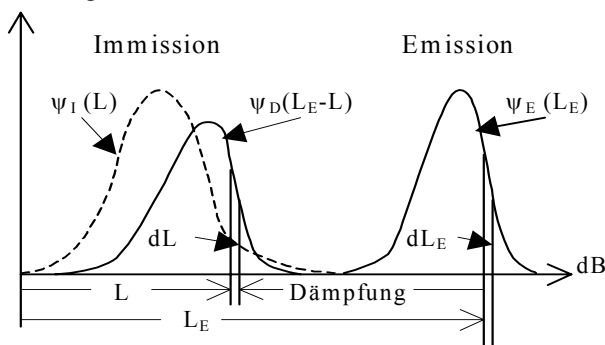


Bild 1 Entstehung der Verteilungsdichte $\psi_I(L)$ der Immissionspegel L aus der Verteilungsdichte $\psi_E(L_E)$ der Emissionspegel L_E und der Verteilungsdichte $\psi_D(L_E-L)$ für die Ausbreitungsdämpfung L_E-L .

Dazu läßt sich wegen der linearen Additivität der Pegel im Pegelraum aus Bild 1 mit den dort notierten Bezeichnungen ableiten, dass sich die Verteilungsdichte $\psi_I(L)$ der Immissionspegel L mittels

$$\psi_I(L) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_E(L_E) \cdot \psi_D(L_E - L) dL_E \quad (1)$$

aus der Emissions- und der Ausbreitungsdämpfung-Verteilung zusammensetzt. In $\psi_D(D)$ sind alle Ausbreitungsrand-

bedingungen "komprimiert", wie sie in [3] angedeutet sind. Die Gl. (1) ist generell, also nicht nur auf Normalverteilungen anwendbar, weil in Folge von $\psi_x(x)dx \equiv \psi_L(L)dL$ und der daraus ableitbaren Transformationsbeziehungen

$$\psi_L(L) = \alpha \cdot 10^{0,1L} \cdot \psi_x(10^{0,1L}); \quad \psi_x(x) = \frac{\beta}{x} \cdot \psi_L(10 \log x) \quad (2)$$

zwischen Pegel- und Intensitätsraum gewechselt werden kann. Das kann bei Modellrechnungen notwendig sein. Die Vorfaktoren in (2) betragen $\alpha = \ln(10)/10 = 0,23$ und $\beta = 1/\alpha = 4,3$. Gl. (1) besagt, dass bei Pegelnormalverteilung für Ausbreitungsdämpfung und Immission die Emissionspegel ebenso auf diese Art verteilt sein müssen. Die Pegelmittelwerte und die Pegelvarianzen verhalten sich dabei additiv. Sind die Eingangsgrößen der rechten Seite von Gl. (1) bekannt, so ist die Immission vollkommen bestimmbar. Für ψ_E kann z. B. eine (fremdgeräuschbereinigte) Kenngrößenverteilung von Stundenwerten im Anlagennahbereich eingesetzt werden.

Zur Verteilung der Emission

Bekanntlich kann die Schallemission je nach Quellenart und ihrer ggf. intermittierenden Aktivität über die Zeit ganz unterschiedlich verteilt sein. Eine prognostische Verteilungsmodellierung, um etwa über Gl. (1) eine Immissionsprognose durchführen zu können, dürfte daher in der Praxis nur begrenzt durchführbar sein. Deshalb sei hier sei nur auf den Falltyp stationärer technischer Quellen verwiesen, mit jeweils einer Vielzahl von Schallerregungen, die sich simultan überlagern. Diese addieren sich zu (frequenzabhängigen) Amplituden-Normalverteilungen auf. Der Übergang zur Schallintensität, d. h. zur Amplituden-Quadratsumme gibt damit zunächst eine im Argument positiv definite Verteilung vom χ^2 -Typ der Schallintensität (s. z. B. [6][5]). Hat die Quadratsumme viele Terme, so geht die χ^2 -Verteilung de facto in eine Normalverteilung über [5]. Somit ist die Intensität normalverteilt. Das läßt sich messtechnisch gut bestätigen. Für die Variationskoeffizienten $v \approx 0,23 \cdot \sigma_L$ können Werte im Bereich etwa von $v \approx 0,1$ bis $0,3$ beobachtet werden.

Zur Verteilung der Ausbreitung

Bei der Schallausbreitung ist bekanntlich zwischen Kurz- und Langzeit-Dämpfungsverteilungen zu unterscheiden. Die Einflüsse bei der Ausbreitung wirken multiplikativ, so dass hier mit Pegelverteilungen zu operieren ist (s. a. [4]). Bei konstanten, d. h. relativ kurzfristigen Wetterlagen stellen sich infolge vieler Dämpfungsfuktuationen auf dem Ausbreitungsweg Pegelnormalverteilungen ein. So kann sich z. B. bei Schallausbreitung über ca. 1000 m Entfernung eine sehr präzise Lognormalverteilung einstellen, nämlich mit nur 0,1 dB Abweichung zur exakten Normalverteilung zwischen ihrem 0,01 und 0,99-Quantil. Die Streubreite ist typischerweise mit einigen dB das Mehrfache im Vergleich zur Emission stationärer Einzelquellen.

Zur Verteilung der Immission

Die additive Überlagerung so verteilter Immissionsbeiträge kann erstaunlicherweise wieder zu sehr gut normalverteilten Summenpegeln führen, in Bestätigung von [1]. Das zeigt etwa eine Modellrechnung zur im Intensitätsraum vor-genommenen Faltung von zwei Pegelnormalverteilungen mit jeweils gleichem (Pegel-)Mittelwert und der Pegelstreuung $\sigma_L = 5$ dB. Die Abweichung der Verbundverteilung [2] von einer exakten Normalverteilung beträgt bei diesem Beispiel maximal nur 0,6 dB, im Bereich L_5 und darüber. In Bild 2 die ist Verbundverteilung dargestellt.

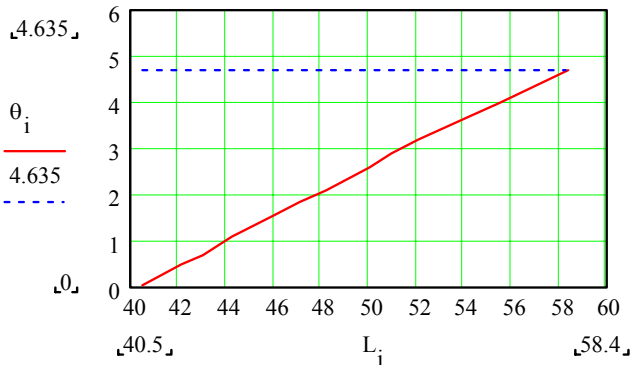


Bild 2 Summenhäufigkeit von 1% bis 99% einer Verbundverteilung [2] von zwei Pegelnormalverteilungen jeweils gleicher Lokation und Streuung $\sigma_L = 5$ dB. Die nichtlineare Skalierung der Summenhäufigkeitsachse ist so eingestellt, dass für eine Normalverteilung eine Gerade entsteht.

Zuordnungen: $\theta = 0$ entspricht L_{99} ; $\theta = 4.635$ entspricht L_1 .

In der Realität verschwindet aber dieses in [1] so betonte Phänomen, nämlich bei Langzeitbeobachtungen, auch bei praktisch konstanter Emission. Hier können z. B. annähernde Gleichverteilungen von Mittelwerten beobachtet werden. Aber gerade Zeitreihen von Mittelwerten erlauben eine qualitätsorientierte Beurteilung der Immissionsbelastung.

Es muß also zusätzlich von Verteilungstypen ausgegangen werden können, wie sie neben Normalverteilungen auch sonst noch in der Realität vorkommen. Zur Analyse des Streuverhaltens bedarf es dann ggf. der Modellierung, wie bereits in [2] empfohlen wird, etwa für vergleichende Strukturanalysen. Denn die Modellierung öffnet zumindest den Weg dazu, über eine Simulation von Messungen Unsicherheiten abzuschätzen.

Zur Unsicherheit von Mittelwerten

Zur Angabe der Signifikanz des Vergleichs eines Kennwertes mit einem Vorgabewert wird üblicherweise auf die Varianz des Endergebnisses, z. B. eines aus Stichprobenelementen gebildeten Mittelungspegels zurückgegriffen und diese mit einem Erweiterungsfaktor k versehen (s. z. B. [7][3]). Dieser Faktor ist nur zuverlässig bestimmbar, wenn letztendlich am interessierenden Immissionsort die Verteilung bekannt ist. Die immer gültige, in [3] angewandte Additivität der Varianzen im Intensitätsraum ist dazu nicht ausreichend, worauf in [3] auch sinngemäß hingewiesen wurde. Hier wäre zu bevorzugen, etwa für die Bestimmung des maßgebenden Beurteilungspegels gemäß DIN 45645-1 von der de facto-Verteilung einzelner (ge-

messener) Tages-/Nacht-Beurteilungspegel bzw. einer bereits hinreichend bekannten Verteilung auszugehen und daraus die Unsicherheit des maßgebenden Beurteilungspegels direkt anhand seiner Häufigkeitsverteilung und entsprechenden Quantilen als Vertrauensbereichsgrenzen zu quantifizieren.

Hierzu bietet sich die sogenannte Bootstrap-Methode an [8]: Dazu wird hier die primäre Verteilung als Funktion der auf 1 normierten Summenhäufigkeit parametrisch modelliert. Per Zufallszahlen werden daraus Stichprobenelemente erzeugt. Damit können in beliebiger Menge Kennwerte, z. B. Mittelwerte für jeweils gleichen Stichprobenumfang generiert werden. Deren Anordnung in aufsteigender Reihenfolge führt auf die Verteilung dieser Kennwerte. Aus dieser Verteilung folgen die Vertrauensbereichsgrenzen als Perzentile, z. B. das 10%- und das 90%-Perzentil. Bemerkenswert ist, dass diese Prozedur *immer beide* Vertrauensbereichsgrenzen angeben läßt und die Bestimmung der Varianz sowie der Erweiterungsfaktor als Hilfsgrößen entfallen können.

Zum Abschluß noch ein modellhaftes Anwendungsbeispiel dieser Methode mit praxisnahen Zahlenwerten:

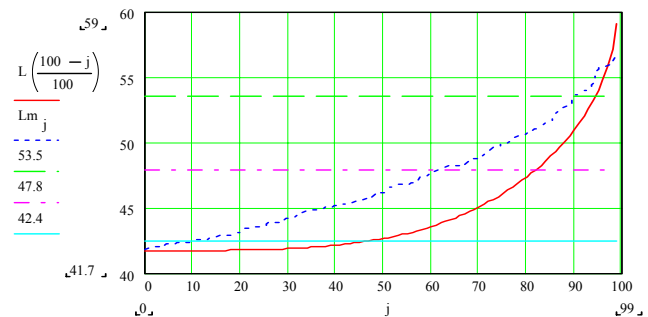


Bild 3 Summenhäufigkeit von Pegelwerten L , modelliert mit einer Weibull-Verteilung [5] der Schallintensität ab $10^{4,17}$, mit den Parameterwerten $\alpha = 0,0398$ und $\beta = 0,35$. Punktierte Kurve: Summenhäufigkeit von 100 energetischen Mittelwerten aus jeweils 5 Stichprobenelementen. Horizontale Linien: Mittelungspegel $L_m = 47,8$ dB sowie die Vertrauensbereichsgrenzen 53,5 und 42,4 dB.

Bei den hier modellierten Verhältnissen ist eine Normalverteilungs(ähnliche)-Struktur der Mittelwertverteilung, (noch) nicht erkennbar. Diese zeichnet sich hier erst ab mehr als ca. 100 Stichprobenelementen ab.

Literaturhinweise

- [1] Kurze, U. J.: Abschätzung der Unsicherheit von Immissionsprognosen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung **48** (2001), 166-171
- [2] Martinez, S. C.: Statistische Methoden bei Geräuschmessungen im Freien. Zeitschrift für Lärmbekämpfung **48** (2001), 43-55
- [3] Probst, W., Donner, U.: Die Unsicherheit des Beurteilungspegels bei der Immissionsprognose. Zeitschrift für Lärmbekämpfung **49** (2002), 86-90
- [4] Schmidt, L., Sagemühl, D.: Bestimmung und Berücksichtigung der Messunsicherheit in der betrieblichen Praxis. Fortschritte der Akustik, DAGA 2003, 486-487
- [5] Hartung, J.: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. Oldenbourg München Wien
- [6] Schlitt, H.: Systemtheorie für Stochastische Prozesse. Springer, 1992
- [7] DIN V ENV 13005: 1999 - 06, Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
- [8] Wilcox, R. R.: Fundamentals of Modern Statistical Methods. Springer, 2001.