

## Berücksichtigung der Berechnungsunsicherheit in der Lärmwirkungsstudie NORAH

Manfred Liepert<sup>1</sup>, Maximilian Mühlbacher<sup>1</sup>, Ulrich Möhler<sup>1</sup>, Maria Klätte<sup>2</sup>, Georg Thomann<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Möhler + Partner Ingenieure AG, 80336 München, E-Mail: [info@mopa.de](mailto:info@mopa.de); <sup>2</sup> TU Kaiserslautern

<sup>3</sup> Amt für Natur und Umwelt Kanton Graubünden, CH-7001 Chur, E-Mail: [Georg.Thomann@anu.gr.ch](mailto:Georg.Thomann@anu.gr.ch)

### Motivation und Anlass

In Lärmwirkungsstudien werden Expositions-Wirkungsbeziehungen häufig nur mit Angabe der Unsicherheiten in der Wirkung dargestellt. Dabei sind grundsätzlich auch Unsicherheiten bei der Bestimmung der Exposition vorhanden. Die als unabhängig betrachtete Expositionsgröße wird entweder messtechnisch oder rechnerisch ermittelt. Jede akustische Messung ist mit einer Unsicherheit behaftet und kann den wahren Wert der Messgröße nur annähern. Dies gilt für Berechnungen in mindestens dem gleichen Maße, da die Berechnungen von der Qualität des Modells und der Qualität der Eingangsdaten abhängig sind. Eine Unsicherheit bei der Ermittlung der Exposition ist daher unvermeidbar vorhanden.

Diese Unsicherheit der Exposition kann die Beziehung zwischen Exposition und Wirkung und damit das Ergebnis der Studie beeinflussen. Im Rahmen der Lärmwirkungsstudie NORAH [2] zu Flugverkehrs-, Straßen- und Schienenengeräuschen wurde die Unsicherheit der akustischen Pegelwerte quantifiziert, um zu einer höheren Transparenz beizutragen.

### Schalltechnische Modellierung

Die akustischen Daten in NORAH wurden mittels Berechnungen ermittelt, da aufgrund der Zahl der Probanden (bis zu 1.000.000 Adressen in einem Modul) Messungen nicht in Frage kamen. Die Berechnungen folgten den Rechenvorschriften nach AzB (Berechnung mit Einzelflugsimulation auf Basis von Radartspuren) für Flugverkehrsgeräusche, nach VBUS für Straßenverkehrsgeräusche und nach VBUSch für Schienenverkehrsgeräusche. Bei der Erstellung der für Schallberechnungen erforderlichen Modelle (dreidimensionale Modellierung der Ausbreitung des Schalls) treten Fehler oder Abweichungen von der realen Situation auf

- durch die Wahl der Eingabedaten (Detaillierungsgrad),
- durch bewusste Vereinfachungen bei der Modellierung der lokalen Gegebenheiten oder
- durch Fehler bei der Modellierung der lokalen Gegebenheiten.

### Modell zur Berücksichtigung der Unsicherheit

Bei der Ermittlung der Berechnungsunsicherheit wurde von einem Modell ausgegangen, das den berechneten Immissionspegel als Funktion

- der Beschreibung der Quelle (Emission),
- den Einflüssen auf dem Ausbreitungsweg (Transmission) und
- der Festlegung des Immissionsorts (Immission)

beschreibt:

$$L_{pi} = L_{pe} + K_Q + \sum A_i + K_{IO} \quad (1)$$

mit:

- $L_{pi}$  A-bewerteter Schalldruckpegel am Immissionsort
- $L_{pe}$  A-bewerteter Schalldruckpegel zur Beschreibung der Emission
- $K_Q$  Korrekturpegel zur Beschreibung der Quelle (Richtwirkung, Fahrbahn, etc.)
- $\sum A_i$  Dämpfungsterme aufgrund der Einflüsse  $i$  auf dem Ausbreitungsweg
- $K_{IO}$  Korrekturpegel zur Beschreibung der Einflüsse am Immissionsorte

Die Grundlage zur Bildung eines Modells zur Quantifizierung der Berechnungsunsicherheit ist durch die in DIN SPEC 45660-1 (2014) genannten Zusammenhänge gegeben. Demnach wird eine Kenngröße  $Y$  aus  $N$  Eingangsgrößen  $X_1, X_2, \dots, X_N$  durch eine funktionale Beziehung  $f$  berechnet

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2)$$

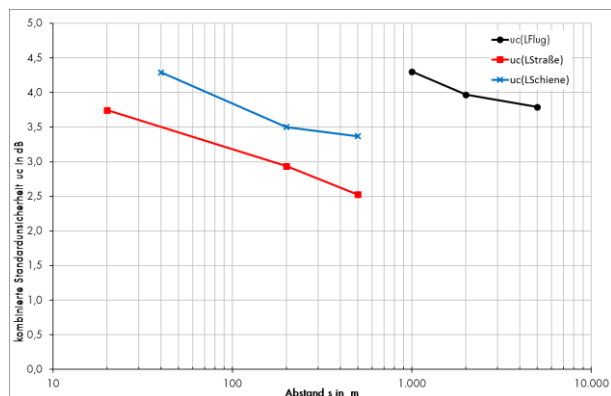
Als Maß für die Streuung der Eingangsgrößen wird die Standardabweichung oder Standardunsicherheit definiert. Sofern angenommen werden kann, dass die Eingangsgrößen nicht korrelieren – also unabhängig zu einander sind – berechnet sich die kombinierte Standardunsicherheit der Realisierung der Kenngröße  $y$  zu

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 * u^2(x_i)} \quad (3)$$

### Vorgehensweise bei NORAH

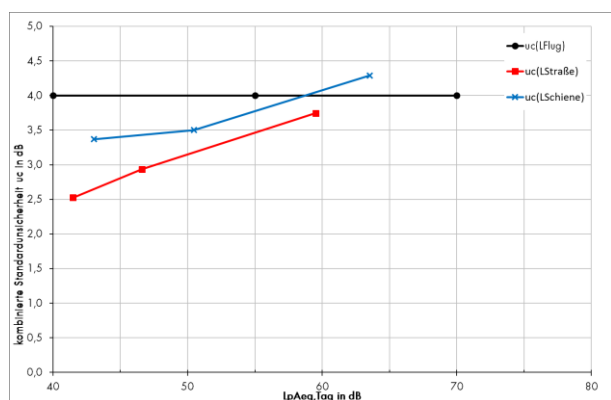
Bei der Ermittlung der Unsicherheit wird getrennt für jede Einflussgröße aus Gleichung (1) die Standardunsicherheit aufgrund von vorhandenen Wiederholungsmessungen (Unsicherheit Typ A / GUM) oder Erfahrungswerten (Typ B / GUM) abgeschätzt. Dabei werden die Zahlenwerte  $u_c$  für alle drei Quellenarten (Flug, Straße, Schiene) für jeweils drei typische Distanzen bestimmt. Die Sensitivitätsfaktoren werden in erster Näherung  $c_i = 1$  (Gleichgewichtung der Einflussgrößen) gesetzt. Tatsächlich können Korrelationen zwischen den Einflussfaktoren zu einer Reduktion der Gesamtunsicherheit führen, wenn sich einzelne gegenläufige Unsicherheiten untereinander aufheben. Das Ergebnis der

gewählten Vorgehensweise ist daher eine Abschätzung der maximalen Berechnungsunsicherheit. Aus den Standardunsicherheiten für jede Einflussgröße wird die kombinierte Unsicherheit nach Gleichung (3) gebildet:



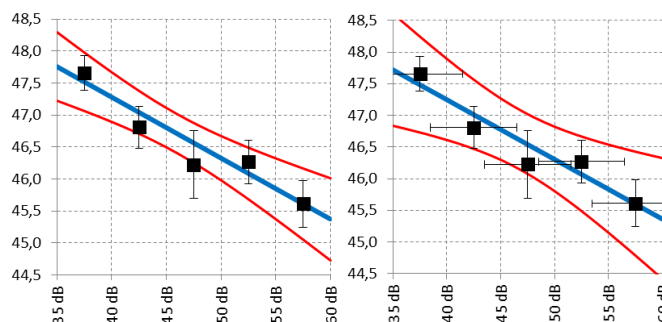
**Abbildung 1:** Kombinierte Standardunsicherheit  $u_c$  in drei typischen Abständen  $s$  für Flug-, Straßen- und Schienenverkehrsgeräusche

Üblicherweise wird die Wirkung der Geräuschbelastung in Funktion des Pegels in sogenannten "Expositions-Wirkungsbeziehungen" dargestellt. Diese Art der Darstellung enthält keinerlei Informationen zur Distanz. Die oben gezeigten Unsicherheiten sind jedoch eine Funktion des Abstands zur Quelle. Damit diese auf die Expositions-Wirkungsbeziehungen angewendet werden können, müssen sie in eine pegelhöhenabhängige Unsicherheit "transformiert" werden. Dies geschieht für die Straßen- und Schienenverkehrsgeräusche mit Hilfe einer Umrechnungsfunktion, welche anhand von Modellrechnungen den Pegel in Funktion der Distanz zeigt. Die Gesamtunsicherheit der Flugverkehrsgeräusche wird dagegen im Falle von Einzelflugsimulationen durch die Quellenunsicherheit dominiert und ist deswegen distanzunabhängig, während bei Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen die (Un-)Genauigkeit des Datensatzes bzgl. Abschirmungen zu höherer Unsicherheit in geringen Distanzen führt.



**Abbildung 2:** Zusammenhang zwischen der kombinierten Standardunsicherheit  $u_c$  und dem Mittelungspegel  $L_{pAeq,Tag}$  für Flug-, Straßen- und Schienenverkehrsgeräusche

Die Berücksichtigung der Berechnungsunsicherheit wird exemplarisch für die Wirkungsvariable Textverständnis bei Grundschulkindern in Abhängigkeit von der Belastung durch Flugverkehrsgeräusche aus Modul 3 der NORAH-Studie dargestellt:



**Abbildung 3:** Zusammenhang zwischen den Variablen Textverständnis (T-Werte) und Mittelungspegel der Flugverkehrsgeräusche an der Schule mit Berücksichtigung der Unsicherheit der Wirkungsvariable (links) sowie zusätzlich mit Berücksichtigung der Berechnungsunsicherheit der Exposition (rechts); schwarz: klassierte Ergebnisse, blau: Ausgleichsgerade mit 95%-Konfidenzbereich (rot)

Die Parameter für die Ausgleichsgeraden aus Abbildung 3 weisen folgende Werte auf:

**Tabelle 1:** Fitparameter sowie zugehörige Unsicherheiten für die Expositions-Wirkungs-Beziehung „Textverständnis“

Textverständnis	Parameter	Unsic herheit	Relative Unsicherheit
Ohne Berücksichtigung der Unsicherheit der Exposition			
Achsabschnitt A0	51,10	0,938	2%
Steigung A1	-0,10	0,020	21%
Mit Berücksichtigung der Unsicherheit der Exposition			
Achsabschnitt A0	51,00	1,500	3%
Steigung A1	-0,09	0,032	34%

### Resultat

Die Unsicherheit der ermittelten Pegelwerte liegt je nach Verkehrsgeräusch zwischen 3 und 5 dB. Der Einfluss der Unsicherheit der akustischen Pegelwerte auf die Lage der Ausgleichsgeraden der Expositions-Wirkungsbeziehung ist in den geprüften Fällen nur geringfügig. Die erweiterten Konfidenzintervalle bei der Berücksichtigung der Berechnungsunsicherheit sind jedoch bei dem Vergleich von Expositions-Wirkungs-Beziehungen relevant.

### Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung (2014). DIN SPEC 45660-1, Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen
- [2] NORAH, Noise-related annoyance, cognition, and health; Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld: Endbericht, Band 2: Erfassung der Verkehrsgeräuschexposition
- [3] Thomann, G. (2007). Mess- und Berechnungsunsicherheit von Fluglärmbelastungen und ihre Konsequenzen. Diss., ETH Zürich, Nr. 17433.
- [4] Hack, E. (2003): Unsicherheit von Fitparametern bei Ausgleichsrechnungen. Kursunterlagen, Empa, Abteilung Elektronik/Messtechnik.