

Schätzung der Messunsicherheit bei Erschütterungsmessungen aus dem Eisenbahnverkehr

Holger Heckelmüller; Laborleiter Akustik und Erschütterungen; DB Systemtechnik GmbH, Völckerstr. 5, 80939 München, Deutschland; Tel.: 0049 (0)89 1308 7680; Email: holger.heckelmüller@deutschebahn.com

1. Einführung

Das Thema Messunsicherheit wird für Prüfinstitute im Bereich Akustik und Erschütterungen immer wichtiger. Einerseits wird von Kunden die Angabe Messwert plus Messunsicherheit eingefordert, andererseits findet sich in vielen aktuellen Normen ein Bezug zur Angabe der Messunsicherheit.

Die Angabe der Messunsicherheit ist sinnvoll, wenn es um die Beurteilung von Minderungsmaßnahmen im Bereich der Akustik und Erschütterungen geht. Als Beispiel sei die Ermittlung der Einfügedämmung von besohlenen Schwellen genannt. Die Angabe von X dB Minderungswirkung ist nur sinnvoll verwendbar, wenn der Anwender weiß, mit welcher statistischen Verlässlichkeit dieser Messwert zu bewerten ist.

Speziell wenn es um den Vergleich eines Messwertes mit einem Grenzwert geht, ist die Angabe der Messunsicherheit unerlässlich. Vorbild aus dem Bereich Akustik ist dabei die Norm EN ISO 9612:2009 [1], die ein Messverfahren zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz unter Einbeziehung der Messunsicherheit vorgibt.

Des Weiteren müssen gemäß EN ISO/IEC 17025:2005 Kapitel 5.4.6.2 1 [2] akkreditierte Prüflabore ein Verfahren zur Schätzung der Messunsicherheit vorhalten:

„Prüflaboratorien müssen über Verfahren für die Schätzung der Messunsicherheit verfügen und diese anwenden. In bestimmten Fällen kann die Art der Prüfmethode eine strenge metrologische und statistisch gültige Schätzung der Messunsicherheit ausschließen. Das Laboratorium muss in solchen Fällen mindestens versuchen, alle Komponenten der Messunsicherheit zu ermitteln, und eine vernünftige Schätzung der Messunsicherheit vornehmen und sicherstellen, dass der Prüfbericht keinen falschen Eindruck bezüglich der Unsicherheit erweckt. Eine vernünftige Schätzung muss auf der Kenntnis der Durchführung des Verfahrens und auf der Art der Messung basieren und z. B. von vorhergehender Erfahrung und von Validierungsdaten Gebrauch machen. ANMERKUNG 1 Der Grad der Strenge, die bei der Schätzung der Messunsicherheit erforderlich ist, hängt von Faktoren ab wie z. B.:

- die Anforderungen der Prüfmethode;*
- die Anforderungen des Kunden;*
- das Vorhandensein enger Grenzen für die Entscheidung bezüglich der Einhaltung einer Spezifikation.*

ANMERKUNG 2 In den Fällen, wo ein bekanntes Prüfverfahren die Grenzwerte der Hauptquellen der Messunsicherheit und die Form der Darlegung des berechneten Ergebnisses festgelegt hat, wird angenommen, dass das Laboratorium diesen Abschnitt der Internationalen Norm durch Befolgen der Festlegungen für die Prüfmethode und die Form des Prüfberichtes erfüllt hat (siehe 5.10).“

Weiterhin heißt es z. B. in [3] „im allgemeinen ist das Messergebnis lediglich eine Näherung oder ein Schätzwert des Wertes der Messgröße und somit nur dann vollständig, wenn es von einer Angabe der Meßunsicherheit dieses Schätzwertes begleitet wird“.

Für die Messung von Erschütterungen (aus dem Eisenbahnwesen) nach den einschlägigen Normen existierten entweder keine [4] oder nur sehr pauschale [5] Angaben (15%) zur Messunsicherheit. Nachfolgend soll deshalb ein Verfahren zur Schätzung der Messunsicherheit vorgestellt werden.

2. GUM: Guide to the expression of uncertainty in measurement

Immer mehr Normen im Bereich Akustik geben die Angabe und die Berechnung der Messunsicherheit vor, wie z. B. in der EN ISO 3095:2013 [6] und in der EN ISO 9612:2009 [1]. Bei beiden Normen basiert die Berechnung der Messunsicherheit im Prinzip auf das Dokument GUM [7] bzw. auf der Europäische Vornorm ENV 13005 [3]. Beiden Dokumenten liegt folgendes mathematisches Modell zu Grunde:

Der Schätzwert y der Messgröße Y wird aus den Schätzwerten x_i der Eingangsgrößen X_i berechnet. Eingangsgrößen können ebenfalls als Messwerte betrachtet werden, die ihrerseits mit Unsicherheiten behaftet sind.

$$y = f(x_i) \quad (\text{Gl. 1})$$

y Schätzwert der Messgröße

x_i Schätzwerte der Eingangsgrößen, z.B. abgelesene Werte von Messgeräten

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$$

Es gibt Einflussgrößen, die während der Messung auftreten: z. B. die Ablesegenauigkeit, die Feuchte, die Temperatur oder externer Natur sind, wie beispielsweise die Unsicherheit der Kalibrierung des Messgerätes. Die Beziehung zwischen Messgröße und Eingangsgrößen kann sehr komplex sein und möglicherweise auch nicht explizit als Formel angegeben werden [3].

Die Unsicherheit der Einflussgrößen des Schätzwertes können nach GUM [7] mit zwei unterschiedlichen Methoden (A und B) bestimmt werden.

2.1. GUM-Methode A

GUM [7] unterscheidet zwei gleichberechtigte Typen von Berechnungen der Messunsicherheit. Die Methode A schätzt die Unsicherheit mit Hilfe der statistischen Analyse einer Reihe von Stichproben.

Für unkorrelierter Eingangsgrößen gilt:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (\text{arithmetisches Mittel}) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$u^2(x_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_k - x_i)^2 \quad (\text{Varianz}) \quad (\text{Gl. 3})$$

Die Varianz u^2 ist bei der Methode A die Unsicherheit. Je nach Messreihe kann damit die Unsicherheit der Messgröße selbst oder einer oder mehrerer Eingangsgrößen bestimmt werden.

Bei korrelierten Eingangsgrößen kommen spezielle statistische Verfahren zum Einsatz (s. [3 Kap 5.2]).

2.2. GUM-Methode B

Bei der Methode B zur Abschätzung der Unsicherheit kommen nicht-statistische Methoden zum Einsatz. $u(x_i)$ wird über wissenschaftliche Erfahrung abgeschätzt, z.B. aus vorherigen Daten, Allgemeinwissen oder Herstellerangaben. Die Typ B Methode kann ebenso zuverlässige Ergebnisse liefern wie die Typ A Methode, insbesondere für relativ kleine, unabhängige Datensätze [3].

Ein Beispiel für eine Berechnung nach Methode B wird in Kapitel 3 dieses Tagungsberichts gezeigt.

Um alle Einflussgrößen der Messunsicherheit auf den Schätzwert zusammenzuführen, gibt es nach GUM [7] die kombinierte Standardunsicherheit.

2.3. GUM: Kombinierte Standardunsicherheit

Die kombinierte Standardunsicherheit [3] umfasst alle relevanten Eingangsgrößen X_i .

Für korrelierte Eingangsgrößen gilt:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (\text{Gl. 4})$$

u_c kombinierte Standardabweichung

$\left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)$ Sensitivitätskoeffizient: Beschreibt bei einer Variation von X_i die Veränderung von Y .

Der Sensitivitätskoeffizient ist bei unkorrelierten Eingangsgröße = 1 [3]

Damit ergibt sich aus Gleichung (4) für unkorrelierte Eingangsgrößen:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} \quad (\text{Gl. 5})$$

Mit der kombinierten Standardunsicherheit wird ein für den ingenieurmäßigen Einsatz zu geringer Vertrauensbereich erreicht. Um den für die ingenieurmäßige Anwendung notwendigen Bereich von 95% bis 99% zu erreichen, gibt GUM [7] die erweiterte Unsicherheit vor.

2.4. GUM: Erweiterte Unsicherheit

Die erweiterte Unsicherheit [3] ist die Größe, die ein Intervall um das Messergebnis festlegt, von dem erwartet werden kann, dass es einen großen Teil der Verteilung der Werte umfasst, die zweckmäßig der Messgröße zugeordnet werden können. Sie ist wie folgt definiert:

$$U = k * u_c(y) \quad (\text{Gl. 6})$$

k Erweiterungsfaktor (coverage factor)

U erweiterte Unsicherheit

k wird in der Regel zwischen 2 und 3 gewählt [3], sodass das Intervall $[y - U; y + U]$ ein Vertrauensniveau von annähernd 95% respektive 99% erreicht.

Der gewählte Wert für k muss bei der Dokumentation angegeben werden [3].

3. Praktische Anwendungen für die Schätzung der Messunsicherheit bei Erschütterungsmessungen nach GUM-Methode B

In der folgenden Tabelle werden die Kennwerte für die Ermittlung des Messunsicherheitsbudgets bei Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen gemäß [9] & [11] beschrieben.

Eingangsgröße	Bezug	u_i [%]	u_i [dB]	$c_i^2 \cdot u_i^2$ [dB]	$c_i^2 \cdot u_i^2$ [%]
Team	nach [8]	4	0,3	0,1	16
Streuung des Messobjektes	nach [8]	5	0,4	0,2	25
Kalibrierung	geschätzt	0,5	0,0	0,0	0,25
Erdschleifen	nach DIN 45672-1 [9] durch Prüfanweisung ausgeschlossen	0	0,0	0,0	0
Masseneinfluss	nach DIN 45672-1 [9] Praktisch ausgeschlossen: Aufnehmer wiegt weniger als 1/10 der Masse des Prüfobjekts	0	0,0	0,0	0
Leistungsverbindungen	nach DIN 45672-1 [9]; durch Verwendung von Koaxialkabeln und Anbringung von Kabel- Zugentlastungen ausgeschlossen	0	0,0	0,0	0
Pyroelektrischer Einfluss	nach DIN 45672-1 [9] geschätzt	0	0,0	0,0	0
Elektromagnetischer Einfluss	nach DIN 45672-1 [9] geschätzt	5	0,4	0,2	25
Störschwingungen	nach DIN 45672-2 [9] geschätzt	2,5	0,2	0,0	6,25
Umwelteinflüsse auf den Schwingungsmesser Schwingungsmesser Klasse 1: Effektivwerte	Schwingungsmesser Klasse 1 nach DIN 45669-1 [10]	7,5	0,6	0,4	56,25
Ankopplung Erdreich	geschätzt	25	1,9	3,8	625
Querempfindlichkeit des Schwingungsaufnehmers gegenüber die Hauptmessrichtung	nach DIN 45672-2 [11] geschätzt	1,5	0,1	0,0	2,25
Feuchte, Temperatur	nach DIN 45672-2 [11] geschätzt	0,5	0,0	0,0	0,25

Tab. 1: Messunsicherheitsbudget bei der Messungen nach DIN 45672 [9] [11] (Ankopplung Erdreich, Messung von Effektivwerte, Klasse 1 Schwingungsmesser gemäß [10])

Aus dem in **Tab. 1** aufgeführten Messunsicherheitsbudget ergibt sich nach Gleichungen (4 - 6) eine geschätzte erweiterte Messunsicherheit bei der Messung nach DIN 45672 8 [7] [11] (Ankopplung Erdreich, Spitzenwerte, Klasse 1) von 4 dB.

Für Angabe von Effektivwerten gemäß [11] ändert sich die erweiterte Unsicherheit für den Umwelteinfluss für den angenommenen Klasse 1 Schwingungsmesser [10] wie folgt:

Eingangsgröße	Bezug	u _i [%]	u _i [dB]	c _i ² *u _i ² [dB]	c _i ² *u _i ² [%]
Umwelteinflüsse auf den Schwingungsmesser Schwingungsmesser Klasse 1: Spitzenwerte	Schwingungsmesser Klasse 1 nach : 45669-1 [10]	10	0,8	0,7	100

Tab. 2: Messunsicherheitsbudget bei der Messungen nach DIN 45672 [9] [11] (Ankopplung Erdreich, Messung von Spitzenwerte, Klasse 1 Schwingungsmesser gemäß [10])

Somit ergibt sich eine geschätzte erweiterte Messunsicherheit von 4 dB (Ankopplung Erdreich, Spitzenwerte, Klasse 1).

Bei der Messung von KB-Werten gemäß DIN 4150 Teil2 [5] wurde für die Zusammenstellung des Messunsicherheitsbudget neben den Einflussgrößen *Team* und *Streuung des Messobjektes* die generelle Angabe zur messtechnisch bedingten Unsicherheit gemäß [5] berücksichtigt:

Eingangsgröße	Bezug	u _i [%]	u _i [dB]	c _i ² *u _i ² [dB]	c _i ² *u _i ² [%]
Team	nach [8]	4	0,3	0,1	16
Streuung des Messobjektes	nach [8]	5	0,4	0,2	25
Messtechnisch bedingte Unsicherheit bis 15% (DIN 4150 Kap. 5.4)	Schwingungsmesser Klasse 1 nach : 45669-1 [10]	7,5	0,6	0,4	56,25

Tab. 3: Messunsicherheitsbudget bei der Messungen nach DIN 4250-2 [5]

Die geschätzte erweiterte Messunsicherheit bei der Messung von KB-Werten Teil 2 [5] ergibt sich somit zu 16%.

Bei allen Berechnungen zur Messunsicherheit wurde angenommen, dass die Einflussgrößen untereinander unkorreliert (Sensitivitätskoeffizient = 1) und normalverteilt sind.

Die erweiterte Unsicherheit U ergibt sich durch die Gleichung (6), wobei k der Erweiterungsfaktor ist, der von dem Vertrauensbereich abhängt. Hier wird ein einseitiger Vertrauensbereich mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % betrachtet, entsprechend einem k = 1,65. Das bedeutet, dass 95 % der Werte unter der oberen Grenze Messwert + U liegen.

4. Fazit

Es wurde gezeigt, dass für Erschütterungsmessungen mit der Methode B des GUM [4] sich relativ schnell ein belastbarer Schätzwert für die Messunsicherheit für Erschütterungsmessungen berechnen lässt.

Über das Messunsicherheitsbudget lassen sich die maßgeblichen Einflussgrößen auf die Messunsicherheit identifizieren. Mit dieser Kenntnis lässt sich der Wert der Messunsicherheit (ggf. durch die Verwendung der Methode A) gezielt optimieren.

5. Quellenangaben

- [1] Akustik –Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren) (ISO 9612:2009); Deutsche Fassung EN ISO 9612:2009
- [2] Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2005
- [3] Europäische Vornorm ENV 13005 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen Mai 1999
- [4] ÖNORN S 9012 Beurteilung der Schwingungsemission des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden – Schwingungen und sekundärer Luftschall Februar 2010
- [5] DIN 4150-2 Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden Juni 1996
- [6] Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013); Deutsche Fassung EN ISO 3095:2013
- [7] ISO/BIPM-Leitfaden GUM Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement September 2008
- [8] Th. Schenk, F. Gillmeister Ermittlung der Messunsicherheit bei der Anwendung von Prüfverfahren für die Schwingungsemission von handgehaltenen vibrierenden Geräten.
- [9] DIN 45672-1 Schwingungsmessung in der Umgebung von Schienenverkehrswegen – Teil 1: Messverfahren Dezember 2009[10] DIN 45669-1 Messung von Schwingungsimmissionen – Teil 1: Schwingungsmesser - Anforderungen und Prüfungen September 2010
- [11] DIN 45672-2 Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen - Teil 2: Auswerteverfahren Juli 1995
- [12] DIN 45669-2 Messung von Schwingungsimmissionen Teil 2: Messverfahren Juni 2005