

**Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und
Schwingungstechnik –
Teil 2: Unsicherheit schwingungstechnischer Größen**

Guide for dealing with uncertainty in acoustics and vibration –
Part 2: Uncertainty of vibration quantities

Guide pour traiter l'incertitude en acoustique et vibrations –
Partie 2: L'incertitude des quantités de vibrations

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer Vornorm erstellt.

Gesamtumfang 46 Seiten

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung.....	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Aufgabenstellungen für Unsicherheitsbetrachtungen bei Schwingungsmessungen	9
5 Einflussgrößen als Quellen der Unsicherheit bei Messungen im Arbeits- und Immissionsschutz.....	9
5.1 Allgemeines	9
5.2 Messobjekt	10
5.3 Messdurchführung	11
6 Auswertung (Ermittlung der Unsicherheit)	13
6.1 Ermittlung der Unsicherheit durch mathematische Modellbildung	13
6.2 Ermittlung der Unsicherheit aus Ringversuchen	14
6.3 Ermittlung (Abschätzung) der Unsicherheit aus Erfahrungswerten	14
7 Ergebnisdarstellung	15
8 Verwendung der Unsicherheit.....	17
8.1 Allgemeines	17
8.2 Verwendung der Unsicherheit bei Vergleichen	17
Anhang A (informativ) Unsicherheit bei der Messung von Hand-Arm-Vibrationen am Arbeitsplatz – Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit der Vibrationsexposition bei tätigkeitsbezogenen Messungen nach DIN EN ISO 5349-2.....	19
Anhang B (informativ) Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit bei Emissionsmessungen an handgehaltenen und handgeführten Maschinen	31
Anhang C (informativ) Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit im Bereich Immissionsschutz.....	34
Literaturhinweise	45

Vorwort

Eine DIN SPEC nach dem Vornorm-Verfahren ist das Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt oder wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens vom DIN noch nicht als Norm herausgegeben wird.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Diese DIN SPEC ist ein Leitfaden, der auf Anregung des Beirats des Normenausschusses Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI entstand und vom Beiratssonderausschuss NA 001 BR-04 SO „Unsicherheit schwingungstechnischer Größen“ erarbeitet wurde.

Die vorliegende DIN SPEC enthält Anhänge mit Beispielen zum praktischen Umgang mit der Messunsicherheit auf den Gebieten Hand-Arm-Schwingungsbelastung am Arbeitsplatz, Hand-Arm-Schwingungskennwerte von Maschinen sowie Erschütterungen im Immissionsschutz. Weitere Anhänge mit Beispielen aus anderen Anwendungsgebieten sind für eine zukünftige Ausgabe vorgesehen.

DIN SPEC 45660 mit dem Titel *Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik* besteht aus folgenden Teilen:

- Teil 1: *Unsicherheit akustischer Kenngrößen*
- Teil 2: *Unsicherheit schwingungstechnischer Größen*

Einleitung

Diese DIN SPEC beschreibt in Form eines Leitfadens den Umgang mit der Unsicherheit schwingungstechnischer Größen (Schwingungskenngrößen, Vibrationskenngrößen).

Die Unsicherheit rührt von verschiedenen Einflussgrößen her, die in Abschnitt 5 genannt sind. Davon zu unterscheiden sind Fehler, etwa beim Einsatz der Messgeräte oder der Auswahl der Messstrategie, die die Messgröße verfälschen und deren Einfluss in diesem Leitfaden jedoch nicht behandelt wird.

1 Anwendungsbereich

Dieser Leitfaden legt Verfahren zur Ermittlung der Unsicherheit von gemessenen, berechneten oder prognostizierten schwingungstechnischen Größen (Schwingungskenngrößen, Vibrationskenngrößen) fest, die

- zur Beurteilung der Gefährdung durch Schwingungen am Arbeitsplatz,
- zur Beurteilung von Erschütterungen im Immissionsschutz,
- zur Beurteilung von Maschinenschwingungen

verwendet werden. In den Anhängen wird die Anwendung der einzelnen Verfahren exemplarisch im Detail gezeigt.¹⁾

Darüber hinaus gibt dieser Leitfaden an, wie beim Vergleich von ermittelten Werten mit Anforderungswerten mit der Unsicherheit umzugehen ist.

Dieser Leitfaden kann bei der Ermittlung der Unsicherheit von schwingungstechnischen Größen in der Praxis sowie bei der Erarbeitung von Normen auf den verschiedenen Anwendungsgebieten angewendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN V ENV 13005, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*²⁾

DIN ISO 5725-1:1997-11, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen — Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1:1994)*

DIN ISO 5725-2, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen — Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN V ENV 13005 und die folgenden Begriffe.

3.1 Einganggröße
Einflussgröße
 X
Größe, die gemessen oder auf andere Weise erhalten wird, um einen Messwert einer Messgröße (Ausgangsgröße Y) zu ermitteln

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Schätzwert für X ist x .

¹⁾ Siehe Vorwort.

²⁾ Das ist die deutsche Ausgabe des ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*.

3.2

Ausgangsgröße

eine (zufällige) Größe Y , die von L Eingangsgrößen $X_1, X_2, \dots, X_L$ durch eine funktionale Beziehung f (Modell) abhängt:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_L) \quad (1)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Ausgangsgrößen können z. B. Messgrößen oder abgeleitete Größen sein. Jede der Eingangsgrößen kann wiederum von anderen (Mess-)Größen abhängig und durch eine Verteilungsfunktion charakterisiert sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein Schätzwert für Y ist y .

Anmerkung 3 zum Begriff: DIN V ENV 13005 beschreibt mit den Begriffen C.2.24 bis C.2.26 die Zuordnung eines Stichprobenwerts zu einer Ausgangsgröße als Schätzung. Davon unterschieden wird die Schätzung oder Prognose, die neben der Messung eine Möglichkeit ist, den Stichprobenwert zu ermitteln.

3.3

arithmetischer Mittelwert

bester Schätzwert für den Erwartungswert der Einzelmesswerte, wenn für die Eingangsgröße X_i die N unabhängigen Beobachtungen $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N}$ vorliegen:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_k^N x_{i,k} \quad (2)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Der arithmetische Mittelwert der Ausgangsgröße ist bei N unabhängigen Beobachtungen:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_k^N y_k \quad (3)$$

3.4

Varianz der Messwerte

s^2

Maß für die Streuung der Messwerte, wenn N einzelne Messwerte für die Größe X_i vorliegen:

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_k^N (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2 \quad (4)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Gleichung gibt einen Schätzwert für die Varianz der *Messwerte* an.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein Schätzwert für die Varianz des *Mittelwerts* ist:

$$s^2(\bar{x}_i) = \frac{s_i^2}{N} \quad (5)$$

Die Varianz des Mittelwerts ist stets kleiner als die Varianz der Messwerte.

3.5

empirische Standardabweichung

s

positive Quadratwurzel der Varianz

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Standardabweichung der einzelnen *Messwerte* ist damit:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_k^N (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \quad (6)$$

Die Standardabweichung der Messwerte ist ein Maß für die Streuung der Messwerte in einer Stichprobe (Messreihe) um ihren (arithmetischen) Mittelwert. Sie wird in Normen zur Schwingungskennwertermittlung an Maschinen auch mit s_{n-1} bezeichnet (siehe Anhang A).

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Standardabweichung des *Mittelwerts* ist:

$$s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_k^N (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \quad (7)$$

Die Standardabweichung des Mittelwerts ist ein Maß für die Genauigkeit von Wiederholungsmessungen. Gleichung (7) wird verwendet, wenn Ermittlungsmethode A angewandt wird (siehe 6.1).

3.6 Sensitivitätskoeffizient

c_i
partielle Ableitung der Ausgangsgröße nach X_i am Ort der Schätzwerte der Eingangsgrößen:

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{x_1, \dots, x_N} \quad (8)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn die Ausgangsgröße linear von der Eingangsgröße abhängt, ist c_i eine Konstante, die beliebig klein oder groß sein kann. Die Abhängigkeit von X_i kann im Modell auch so gewählt werden, dass $c_i = 1$ ist.

3.7 Unsicherheit

dem Ergebnis einer Messung oder Berechnung zugeordneter Parameter, der eine festgelegte Überdeckungswahrscheinlichkeit (Vertrauensniveau, Grad des Vertrauens) hat und die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der gemessenen oder berechneten Größe zugeordnet werden können

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Unsicherheit braucht nicht notwendigerweise eine Standardabweichung zu sein.

3.8 Standardunsicherheit

u
als Standardabweichung ausgedrückte Unsicherheit des Ergebnisses einer Messung oder Berechnung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Standardunsicherheit $u(x)$ einer Größe x hat dieselbe Einheit wie x . Die relative Standardunsicherheit $u(x)/x$ ist dimensionslos.

3.9 kombinierte Standardunsicherheit

u_c
Standardunsicherheit eines Ergebnisses y , das aus L Werten anderer Größen X_i gewonnen wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die kombinierte Standardunsicherheit ist gleich der positiven Quadratwurzel einer Summe von Gliedern, wobei die Glieder Varianzen oder Kovarianzen dieser anderen Größen X_i sind, gewichtet mit den Sensitivitätskoeffizienten c_i .

Für ein mathematisches Modell der Messgröße $Y = f(X_i)$ mit unkorrelierten Eingangsgrößen X_i gilt in erster Näherung (siehe DIN V ENV 13005):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^L c_i^2 u^2(x_i)} \quad (9)$$

Die Standardunsicherheiten $u(x_i)$ können nach zwei Methoden ermittelt werden (Ermittlungsmethode A und Ermittlungsmethode B, siehe DIN V ENV 13005).

3.10**Erweiterungsfaktor** k

Faktor, mit dem die kombinierte Standardunsicherheit u_C multipliziert wird, um die erweiterte Unsicherheit U zu erhalten

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Erweiterungsfaktor k kann bei bekannter Verteilung der Werte nach der geforderten Überdeckungswahrscheinlichkeit ausgewählt werden, mit der die erweiterte Unsicherheit U die Verteilung der Werte umfassen soll. Der Wert von k hängt von der Verteilung und der Überdeckungswahrscheinlichkeit ab.

3.11**erweiterte Unsicherheit** U

Produkt aus dem Erweiterungsfaktor k und der kombinierten Standardunsicherheit u_C , das den Bereich $y \pm U$ um das Ergebnis y kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Teil der Verteilung derjenigen Werte umfasst, die dem Ergebnis vernünftigerweise zugeordnet werden können:

$$U = k u_C \quad (10)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: In DIN EN 12096 wird die erweiterte Unsicherheit mit dem Buchstaben K bezeichnet. Sie wird bei der Ermittlung des gemessenen Schwingungswerts a verwendet und gibt im Fall von Maschinenlosen auch die Streuung bei der Fertigung wieder. Der Wert K enthält jedoch nicht alle Unsicherheitskomponenten.

3.12**Proband**

Person, die denjenigen Schwingungen ausgesetzt ist, die von einer Messstelle ermittelt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Proband wird auch Bediener, Bedienungsperson oder Versuchsperson genannt.

3.13**Messpersonal**

Personen, die für die Messdurchführung verantwortlich sind bzw. die Messgeräte bedienen

3.14**Messstelle**

organisatorische Einheit, die alles umfasst, was für die Messung notwendig ist, vor allem Messgeräte und Messpersonal

3.15**Vergleichbedingungen**

Bedingungen bei der Gewinnung von voneinander unabhängigen Ermittlungsergebnissen, bestehend in der Anwendung desselben Verfahrens an identischen Untersuchungsobjekten bei verschiedenen Messstellen durch verschiedenes Messpersonal mit verschiedenen Geräteausrüstungen

[QUELLE: DIN ISO 5725-1:1997-11, 3.18, modifiziert – „Labor“ ersetzt durch „Messstelle“, „Bearbeiter“ ersetzt durch „Messpersonal“]

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Verfahren kann z. B. Betriebszustände, Art und Anzahl der Probanden oder Messumgebungen festlegen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Je nach Fragestellung bzw. Ziel der Messungen können auch die Untersuchungsobjekte (Messobjekte) variieren oder der Zeitpunkt der Messung; z. B. wenn das Messobjekt ein Werkstück ist, das sich während der Messung verändert oder wenn der Einfluss der Alterung einer Maschine ermittelt wird.

3.16**Vor-Ort-Bedingungen**

Vergleichbedingungen bei derselben Messumgebung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Messumgebung wird z. B. durch die Umgebungstemperatur beeinflusst, die die Bedingungen sowohl der Messeinrichtung als auch des Messobjekts beeinflussen kann.

3.17

Wiederholbedingungen

Bedingungen bei der Gewinnung von voneinander unabhängigen Ermittlungsergebnissen, bestehend in der Anwendung desselben Verfahrens am identischen Untersuchungsobjekt bei derselben Messstelle und Messumgebung durch dasselbe Mitglied des Messpersonals mit derselben Geräteausrüstung in kurzen Zeitabständen

[QUELLE: DIN ISO 5725-1:1997-11, 3.14, modifiziert – „Labor“ ersetzt durch „Messstelle und Messumgebung“, „Bearbeiter“ ersetzt durch „Mitglied des Messpersonals“]

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Verfahren umfasst dieselben Betriebszustände und dieselben Probanden.

3.18

Vergleichstandardabweichung

Messstellenstandardabweichung

σ_L

Standardabweichung von Ergebnissen, die unter Vergleichbedingungen erzielt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Messstellenstandardabweichung wird auch als Messstellen- oder Laborabweichung oder -streuung bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Je nach Messverfahren können nicht immer gleiche Bedingungen geschaffen werden, so legt beispielsweise DIN EN ISO 20643 für Emissionsmessungen drei verschiedene Probanden fest. Die Vergleichstandardabweichung beinhaltet dann die Probandenstandardabweichung.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Messstellenstandardabweichung setzt sich im Wesentlichen aus der Standardabweichung des Messgerätes (siehe 5.3.3) und der Standardabweichung, die aus der verwendeten Messstrategie (siehe 5.3.2) resultiert, zusammen. Sie beinhaltet damit auch Interpretationen der Messnorm z. B. bzgl. der Punkte der Aufnehmerankopplung und Orte des Messpunktes.

3.19

Vor-Ort-Standardabweichung

σ_S

Standardabweichung von Ergebnissen, die unter Vor-Ort-Bedingungen erzielt werden

3.20

Wiederholstandardabweichung

σ_r

Standardabweichung von Ergebnissen, die unter Wiederholbedingungen erzielt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Nach DIN EN ISO 5349-2 sollten mindestens drei einzelne Messungen erfolgen.

3.21

Ringversuch

Reihe von Messungen unter Vergleichbedingungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Ringversuche können sehr unterschiedliche Ziele haben, z. B. die Überprüfung eines Messverfahrens, die Ermittlung von Messunsicherheiten (siehe 6.2) oder der Nachweis über die Eignung einer Messstelle.

3.22

Anforderungswert

gesetzlich oder anderweitig vorgeschriebener oder geforderter und einzuhaltender Wert einer schwingungstechnischen Kenngröße

Anmerkung 1 zum Begriff: Je nach Zusammenhang wird der Anforderungswert Grenzwert, Auslösewert, Richtwert oder Garantiewert genannt.

3.23

Fertigungsstandardabweichung

Standardabweichung von Ergebnissen, die unter gleichen Bedingungen von verschiedenen neuen Produkten desselben Typs eines Gerätes oder einer Maschine einer Serie erzielt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Bis auf das zu messende Produkt (z. B. Maschine, Fahrzeug) sind alle anderen Bedingungen (Messgerät, Messstelle, Messpersonal, Probanden, Messbedingungen sowie das Messverfahren und, wenn relevant, auch die Vor-Ort-Bedingungen) dieselben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Fertigungsstandardabweichung wird in DIN EN 12096 auch Produktstreuung genannt. Die Produktstreuung kann jedoch auch die Abweichung durch Alterung enthalten.

3.24

Probandenstandardabweichung

Standardabweichung von Ergebnissen, die unter gleichen Bedingungen, aber mit verschiedenen Probanden erzielt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Bis auf den Probanden (z. B. Maschinenbenutzer, Fahrzeugführer, siehe auch 5.2.3) sind alle anderen Bedingungen (Maschine, Fahrzeug, Messgerät, Messstelle, Messpersonal, Messbedingungen sowie das Messverfahren und, wenn relevant, auch die Vor-Ort-Bedingungen) dieselben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Werden die einzelnen Messungen nicht zeitnah durchgeführt, kann es zu Veränderungen beim selben Probanden kommen, z. B. Gewichtsveränderung, Verhaltensänderung oder besserer Übungsgrad.

4 Aufgabenstellungen für Unsicherheitsbetrachtungen bei Schwingungsmessungen

Schwingungstechnische Kenngrößen dienen zur Beschreibung der Entstehung, Übertragung und Einwirkung von mechanischen Schwingungen. Zu unterscheiden sind dabei direkt messbare Größen, wie die Schwingbeschleunigung, und daraus abgeleitete oder berechnete Größen, wie z. B. bewertete Signale und Beurteilungsgrößen.

Im Allgemeinen werden die schwingungstechnischen Kenngrößen mit ihren physikalischen Einheiten, wie z. B. m/s^2 , angegeben. Die Berechnung der Unsicherheit kann sowohl für die direkt gemessene Größe als auch für abgeleitete oder berechnete Größen durchgeführt werden. Das Ergebnis der Unsicherheitsbetrachtung sollte mit der physikalischen Einheit der Ausgangsgröße (z. B. m/s^2) oder prozentual angegeben werden. Sofern in den Anhängen nicht ausdrücklich anderslautend angegeben, wird davon ausgegangen, dass die ermittelten Werte der Schwingungsmessung einer Normalverteilung unterliegen.

Bei der Bestimmung der Unsicherheit von abgeleiteten oder berechneten Größen ist darauf zu achten, dass alle für die Messaufgabe nötigen Einflussgrößen (siehe Abschnitt 5) berücksichtigt werden. Das beinhaltet neben der Unsicherheit der direkt gemessenen Größe auch die Unsicherheitsanteile der bei der Ermittlung der Unsicherheit zusätzlich verwendeten Komponenten, z. B. Frequenzbewertung oder Beurteilung.

Die Ermittlung der Unsicherheit wird in Abschnitt 6 beschrieben, die auch über gegebene Orientierungswerte nach konkreten Handlungsanweisungen (Erfahrungswerte) erfolgen kann.

Die Befolgung dieses Leitfadens führt dann zu einem Zahlenwert der Unsicherheit, der der Kenngröße beigegeben wird. Dieser ist dem Ergebnis der Messung zu seiner Beurteilung beizustellen (siehe Abschnitt 7).

5 Einflussgrößen als Quellen der Unsicherheit bei Messungen im Arbeits- und Immissionsschutz

5.1 Allgemeines

Die hier genannten Einflussgrößen beeinflussen nicht nur die Unsicherheit des Messwerts unter Wiederholbedingungen, sondern auch die Unsicherheit, die dadurch entsteht, dass sich die Messbedingungen ändern. Bei der Festlegung der Messaufgabe, die eine vielschichtige Struktur haben kann, müssen daher die Einflussgrößen so ausgewählt werden, dass die verbleibende Unsicherheit bei der Messung ausreichend ist, um die gewünschten Aussagen noch treffen zu können.

BEISPIEL Je nach Messobjekt, Probanden und Arbeitseinsatz kann sich die Verteilung der Messwerte im Arbeitsschutz über mehrere Vielfache des Messwerts erstrecken [2]. Werden bei Messungen im Immissionsschutz die Emissionsquelle, der Übertragungsweg oder die Immissionsstruktur verändert, können ähnliche Effekte auftreten.

5.2 Messobjekt

5.2.1 Allgemeines

Messungen im Rahmen dieses Leitfadens zeichnen sich meist dadurch aus, dass das Messobjekt nicht ein einfacher Gegenstand ist. Meist sollen die Kennwerte beschreiben, wie sich eine komplexe Schwingungsquelle in einem Prozess in einer komplexen Umgebung verhält. Im Folgenden sind einige Einflussgrößen, die sich aus dem Messobjekt ergeben, exemplarisch dargestellt.

5.2.2 Schwingungsquelle

Beispiele für Schwingungsquellen sind.

a) Arbeitsschutz

Eine Schwingungsquelle (Vibrationsquelle) kann z. B. eine stationäre Anlage, ein handgehaltenes oder handgeführtes Gerät oder ein Fahrzeug sein. Die Schwingungseigenschaften der Vibrationsquelle und ihrer Komponenten unterliegen in der Fertigung einer Streuung, die zum Teil nach DIN EN 12096 ermittelt wird.

Nach der Fertigung altert und verschleißt die Vibrationsquelle im täglichen Gebrauch, was ebenso die Messwerte beeinflusst.

b) Immissionsschutz

Für den Immissionsschutz kommen Anregungen von Einzelereignissen (Sprengungen, fallende Massen), Anregungen aus dem Baubetrieb (impulsförmige Erschütterungsquellen, wie Schlagrammen, Fallmeißel, fallende Massen, Sprengungen, oder stationäre Erschütterungsquellen, wie Vibrationsrammen, Verdichtungsgeräte), Anregungen aus dem Verkehr (Schienenverkehr, Straßenverkehr) oder Anregungen aus Maschinenbetrieb (Industrie- und Gewerbeanlagen) in Betracht.

5.2.3 Probanden

Einflüsse von Probanden sind.

a) Arbeitsschutz

Die Probanden beeinflussen den Schwingungskennwert durch

- ihre Impedanz und Ankopplungskraft, was mit anthropometrischen Daten beschrieben werden kann (Größe, Gewicht, Körperbau, Greifkraft usw.),
- die Art und Weise, wie sie den Arbeitsprozess der Messaufgabe gestalten (SitzEinstellung, angepasste Fahrweise, richtiges Führen von Motorsägen usw.).

ANMERKUNG Die Fähigkeiten und Fertigkeiten der Probanden haben einen direkten Einfluss auf das Messergebnis, aber auch auf seine Standardabweichung. Ungeübte Probanden handhaben Maschinen nicht immer in der gleichen Weise oder fahren im Gelände oder auf unbefestigten Fahrbahnen anders als versierte Fahrer. Ungünstige Arbeitspositionen (z. B. Arbeit mit einer handgehaltenen Maschine über Kopf) zwingen aufgrund muskulärer Beanspruchung zu ständigem Wechsel von Körper- oder Armhaltungen. Derartige Einflussgrößen können ggf. durch Aufschläge für einen ungeübten Probanden, ungünstige Körperhaltung oder ungünstigen Griff usw. berücksichtigt werden.

b) Immissionsschutz

Einflüsse von Probanden liegen in der Regel nicht vor.

ANMERKUNG Personen in einem Gebäude können jedoch Störgrößen erzeugen.

5.2.4 Umgebung

Hier ist relevant, wie die Quelle an ihre Umgebung angekoppelt ist und wie die Umgebung beschaffen ist.

a) Arbeitsschutz

Bei stationären Anlagen ist die Beschaffenheit des Gebäudes und die Auslegung von Dämpfern von Bedeutung, bei handgehaltenen Geräten Art und Material des Werkstücks und bei Fahrzeugen die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche.

b) Immissionsschutz

Bei Messungen im Immissionsschutz ist auf relevante Störquellen im Umfeld, besonders aber auf Störungen im Gebäude selbst (z. B. Trittschall, Türeenschlagen) zu achten.

5.2.5 (Arbeits-)Prozess

Je nach Prozess werden niedrigere oder höhere Schwingungskennwerte erzeugt, oft ist dies abhängig von der beim Prozess umgesetzten Energie.

a) Arbeitsschutz

Beispiele für Arbeitsprozesse sind: Leerlauf oder Volllast bei einer Anlage, Bohren mit oder ohne Schlagwerk bei einer Schlagbohrmaschine, Kehren oder Fahren bei einer Kehrmaschine.

b) Immissionsschutz

Für die Erfassung der Immission ist von einer üblichen, durchschnittlichen Anlagenauslastung auszugehen.

5.3 Messdurchführung

5.3.1 Allgemeines

Aufbauend auf der Analyse des Messobjektes ist es das Ziel, die Unsicherheit auf der Seite der Messdurchführung durch die geeignete Auswahl einer Messstrategie und eines Messgerätes so weit wie möglich zu verringern. Die Beiträge zur Unsicherheit des Messwertes durch die Messdurchführung sind durch die Messstellenstandardabweichung gegeben.

5.3.2 Messstrategie

Sofern die Messbedingungen nicht durch Normen vorgegeben sind, müssen sie so gewählt werden, dass die Messaufgabe erfüllt wird. Ausgehend vom Wissen über das Messobjekt sollte die Messstrategie die Schwingungsquelle, die Messumgebung, den Prozess und falls nötig die Probanden festlegen.

a) Arbeitsschutz

Falls die Unsicherheit zu untersuchen ist, die von einer dieser Einflussgrößen ausgeht, müssen Kennwerte z. B. an mehreren Quellen (Geräten), mit verschiedenen Probanden (drei Probanden nach DIN EN ISO 5349-2) oder bei unterschiedlichen Arbeitsprozessen ermittelt werden. Andererseits sind durch die Messaufgabe oft Einflussgrößen festgelegt und müssen nicht weiter betrachtet werden.

BEISPIELE

- Bei Arbeitsplatzmessungen ergibt sich die Auswahl der Vibrationsquellen durch die am Arbeitsplatz vorhandenen Geräte und Maschinen. Die Arbeitsprozesse und Umgebungen können dann so gewählt werden, dass sie repräsentativ sind oder eine obere Grenze der Belastung darstellen.

- Werden Schwingungskennwerte nach der Maschinenrichtlinie bestimmt, kommen meist genormte Laborverfahren zur Anwendung (Messumgebung konstant), die einzelne Exemplare (Maschinenlose) fabrikneuer Maschinen nach DIN EN 12096 benötigen.

Eine besondere Bedeutung kommt bei der Messstrategie der Messdauer zu, die so gewählt sein muss, dass sie den zu untersuchenden Arbeitsprozess ausreichend erfasst. Bei langen Prozessdauern kann die Messdauer kürzer als die Prozessdauer sein, wenn der Prozess quasi-stationär ist. Bei diskontinuierlichen Prozessen muss entschieden werden, ob prozessbedingte Pausen miterfasst werden oder nicht.

b) Immissionsschutz

Um Fehlereinflüsse möglichst gering zu halten, sind vor Messbeginn Informationen über das Messobjekt (Lage, Art der Erschütterungsquelle, gegebenenfalls weitere Quellen, Betriebszeiten und -ablauf), den Messort (Lage, Entfernung, Art des Gebäudes, zu erwartende Schwingungsamplituden, Frequenzbereich, Aufstellung bzw. Befestigungsmöglichkeiten des/der Aufnehmer, Störquellen) sowie den Ausbreitungsweg (Störeinflüsse) einzuholen.

Neben der Beachtung der Vorgaben von Normen sind Entscheidungen hinsichtlich Messzeitpunkt, Messdauer, Betriebsregime sowie Störeinflüsse zu treffen. Der Messablauf ist so zu wählen, dass der tatsächliche Betriebszustand erfasst wird. Bei Langzeitmessungen ohne anwesendes Messpersonal ist sicherzustellen, dass Störeinflüsse in geeigneter Weise erfasst und nachträglich eliminiert werden können.

5.3.3 Messgeräte und Messpersonal

Durch regelmäßige, rückführbare Kalibrierung der Messgeräte wird die Einhaltung der nach den Messgerätenormen maximal zulässigen Abweichungen der Messgeräteeigenschaften überprüft; und die im Kalibrierprotokoll benannten Abweichungen können für die Betrachtung der Standardunsicherheit durch Messgeräte genutzt werden.

a) Arbeitsschutz

Hier sind im Gegensatz zum Messobjekt die Unsicherheiten, die sich durch die Eigenschaften der Messgeräte ergeben, gering, sofern die bestehenden Normen für die Messaufgabe beachtet werden (z. B. DIN EN ISO 8041). Die erweiterte Unsicherheit (mit $k = 2$) aufgrund der Messgeräteeigenschaften wird für Messungen im Arbeitsfrequenzbereich mit bis zu etwa 10 % bei Labormessungen und bis zu etwa 15 % bei Feldmessungen abgeschätzt (siehe DIN EN ISO 8041/A1).

ANMERKUNG 1 Eine Unterscheidung von Schwingungsmessgeräten nach Genauigkeitsklassen hat sich nicht durchgesetzt.

ANMERKUNG 2 Geräte, die keine normgerechte Messung ermöglichen (Indikatoren oder Schätzhilfen), sind zur Ermittlung schwingungstechnischer Kennwerte ungeeignet.

Neben den Eigenschaften der Messgeräte selbst trägt auch das Messpersonal durch unterschiedliche Anwendung der Messgeräte zur Unsicherheit bei.

ANMERKUNG 3 Eine DIN-Norm mit Anforderungen an die Qualifizierung von Messpersonal und die Fachkunde zur Durchführung und Beurteilung von Schwingungsmessungen am Arbeitsplatz ist derzeit in Vorbereitung.

b) Immissionsschutz

Nach DIN 4150-2 treten bei der Ermittlung von KB_F -bewerteten Größen mit Messgeräten nach DIN 45669-1 erfahrungsgemäß messtechnisch bedingte Unsicherheiten bis zu etwa 15 % auf.

6 Auswertung (Ermittlung der Unsicherheit)

6.1 Ermittlung der Unsicherheit durch mathematische Modellbildung

Eine detaillierte Unsicherheitsbilanz auf der Grundlage eines mathematischen Modells der Messauswertung einschließlich der Störgrößen ist aus verschiedenen Gründen anzustreben. Ein Grund ist, dass eine solche Bilanz verwendet werden kann, um die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge zu ermitteln und gegebenenfalls zu reduzieren. Weiterhin spiegelt die durch ein solches mathematisches Modell ermittelte Unsicherheit die konkreten Bedingungen wider, die bei der Ermittlung der Messgröße tatsächlich vorlagen. Damit ist sie individuell an die Messgröße angepasst. Dieser Abschnitt gibt eine Anleitung, wie solche Unsicherheitsbilanzen ermittelt werden können.

Oft ist der funktionale Zusammenhang f zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße nicht bekannt. Dann kann angenommen werden, dass die einzelnen, unkorrelierten Größen X_i linear in die Ausgangsgröße eingehen und die zugehörigen Sensitivitätskoeffizienten $c_i = 1$ sind. Eine mögliche Formulierung dieser Annahme ist:

$$Y = \bar{y} + \sum_i X_i \quad (11)$$

In Gleichung (11) sind die Eingangsgrößen X_i Zufallszahlen, die aus einer Verteilung mit einer gegebenen Standardabweichung s_i und dem Mittelwert $\bar{x}_i = 0$ gewonnen werden. Wenn keine anderen Informationen vorliegen, kann angenommen werden, dass die Eingangsgrößen einer Normalverteilung unterliegen. Gleichung (9) für die kombinierte Standardunsicherheit vereinfacht sich dann zu:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^L u^2(x_i)} \quad (12)$$

Die Summanden in Gleichung (12) können nach zwei Methoden ermittelt werden (Ermittlungsmethode A und Ermittlungsmethode B, siehe DIN V ENV 13005).

Der Summand, der in Gleichung (12) die Varianz bei Wiederholungsmessungen beschreibt, wird nach Ermittlungsmethode A bestimmt. Für die n Wiederholungsmessungen wird die Varianz durch die Standardabweichung des Mittelwerts $s(\bar{x}_i)$ beschrieben. Bei Messreihen mit weniger als etwa 30 Wiederholungsmessungen sollte die Standardabweichung des Mittelwerts noch mit dem Bayes-Term korrigiert werden:

$$s_{\text{kor}}(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} s(\bar{x}_i) \quad (13)$$

Die Unsicherheit beträgt in diesem Fall $u(x_{\text{Wiederholung}}) = s_{\text{kor}}$.

Alle anderen Unsicherheiten $u(x_i)$ können nach der Ermittlungsmethode B berechnet werden. Hier kommen zwei Fälle häufig vor:

- Falls ein Schätzwert und seine Unsicherheit $u(x_i)$ bekannt sind (z. B. aus einem Kalibrierprotokoll), wird diese Unsicherheit eingesetzt. Es wird eine Normalverteilung angenommen.
- Falls bekannt ist, dass der Schätzwert zwischen zwei Werten liegt, kann eine Rechteckverteilung angenommen werden. Bei einer symmetrischen Verteilung der Eingangsgrößen um einen Mittelwert, d. h. $X_i = \bar{x}_i \pm a$, beträgt die Unsicherheit:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

Beispiele für die Modellierung von Messvorgängen sind in den Anhängen angegeben.

Neben diesem analytischen Zugang zur kombinierten Standardunsicherheit über Gleichung (9) lässt sich auch ein numerischer wählen (siehe DIN V ENV 13005 Beiblatt 1). Wird angenommen, dass die Eingangsgrößen unkorrelierte Zufallszahlen sind, kann die Unsicherheit der Ausgangsgröße durch eine Monte-Carlo-Rechnung bestimmt werden. Dabei können, anders als bei Gleichung (9), beliebige Verteilungen und beliebig große Standardabweichungen verwendet werden.

6.2 Ermittlung der Unsicherheit aus Ringversuchen

Wenn die Unsicherheit nur auf die Vergleichstandardabweichung σ_L und die Wiederholstandardabweichung σ_r eingeschränkt ist, kann die kombinierte Standardunsicherheit u_c als Standardabweichung σ_R aus einem Ringversuch angegeben werden als

$$u_c = \sigma_R = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_r^2} \quad (15)$$

Das grundlegende Konzept und das Verfahren zur Ermittlung dieser Standardabweichungen sind in DIN ISO 5725-1 und DIN ISO 5725-2 angegeben. Beide Standardabweichungen werden in Ringversuchen ermittelt, an denen so viele Messstellen wie möglich teilnehmen sollten, um verlässliche Ergebnisse zu bekommen. Die Wiederhol- und Vergleichstandardabweichungen beschreiben die mit einem Verfahren verknüpfte kombinierte Standardunsicherheit. Allen Ergebnissen, die unter Einhaltung desselben festgelegten Verfahrens ermittelt wurden, wird diese kombinierte Standardunsicherheit beigemessen. Sie kann somit auch als Schätzwert für eine Vor-Ort-Standardabweichung genutzt werden.

Das Verfahren, dessen Vergleich- bzw. Wiederholstandardabweichung zu ermittelt ist, muss exakt beschrieben werden, z. B. in einer Norm. Jede teilnehmende Messstelle muss das Verfahren so anwenden, dass bei den Wiederholungsmessungen die im Rahmen des Verfahrens möglichen Spielräume so weit wie möglich ausgenutzt werden. Insbesondere sollte die Ankopplung der Schwingungsaufnehmer für jede Wiederholung erneut vorgenommen werden.

Die Messergebnisse dürfen von den teilnehmenden Messstellen keiner Vorauswahl unterzogen werden.

Die Wahl des Versuchsobjekts für einen Ringversuch hängt nicht nur von der zu ermittelnden Messgröße ab, sondern auch von den spezifizierten Randbedingungen, wie z. B. Aufstellungs- und Betriebsbedingungen. Außerdem sind praktische Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Idealerweise sollte von allen Messstellen dasselbe Versuchsobjekt verwendet werden, das am Ende des Ringversuchs von der ersten Messstelle auf etwaige Veränderungen untersucht wird. Es ist jedoch auch möglich, dass alle Teilnehmer nominell identische Versuchsobjekte erhalten, z. B. aus einem Produktionslos. In diesem Fall sollte ein Homogenitätstest vor und eventuell auch nach dem Ringversuch durchgeführt werden.

6.3 Ermittlung (Abschätzung) der Unsicherheit aus Erfahrungswerten

6.3.1 Allgemeines

Liegen keine ermittelten Werte zu Unsicherheiten aus Messungen vor und ist das mathematische Modell nicht bekannt, so können orientierend aus anderen Untersuchungen ermittelte Unsicherheiten auf die betrachtete Aufgabe übertragen werden. Zum Teil sind solche Werte auch in Normen angegeben.

ANMERKUNG 1 Dies ist nur möglich, wenn die jeweiligen Bedingungen und die Untersuchungsobjekte so gewählt sind, dass durch die Übertragung der Ergebnisse kein Widerspruch in der Aussage entsteht.

ANMERKUNG 2 Für elektrisch betriebene Handwerkzeuge (siehe DIN EN 60745) und transportable motorbetriebene Elektrowerkzeuge (siehe DIN EN 61029) wird ein konstanter Wert für die erweiterte Unsicherheit genannt, der einer Emissionsmessung zugeordnet wird. DIN EN 12096 gibt einen Schätzwert der erweiterten Unsicherheit für die Fertigungsstandardabweichung an. In beiden Fällen werden keine Angaben zu einer Unsicherheitsbilanz oder einem mathematischen Modell gemacht.