

	DIN 45660-2	
ICS 17.140.01	Entwurf	Einsprüche bis 2024-03-19 Vorgesehen als Ersatz für DIN SPEC 45660-2:2018-01
Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 2: Unsicherheit schwingungstechnischer Größen Uncertainty in acoustics and vibration – Part 2: Uncertainty of vibration quantities L’incertitude en acoustique et vibrations – Partie 2: L’incertitude des quantités de vibrations Anwendungswarnvermerk Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-01-19 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten – vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben; – oder als Datei per E-Mail an nals@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden; – oder in Papierform an den DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin. Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen. Gesamtumfang 78 Seiten DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS)		

Inhalt

	Seite
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Aufgabenstellungen für Unsicherheitsbetrachtungen bei Schwingungsmessungen	13
5 Einflussgrößen als Quellen der Unsicherheit bei Messungen im Arbeits- und Immissionsschutz	14
5.1 Allgemeines, Ziel der Messung	14
5.2 Messobjekt	15
5.2.1 Allgemeines	15
5.2.2 Schwingungsquelle	15
5.2.3 Probanden	16
5.2.4 Umgebung	16
5.2.5 (Arbeits-)Prozess	16
5.3 Messdurchführung	17
5.3.1 Allgemeines	17
5.3.2 Messstrategie	17
5.3.3 Messgeräte und Messpersonal	17
6 Auswertung (Ermittlung der Unsicherheit)	18
6.1 Ermittlung der Unsicherheit durch mathematische Modellbildung	18
6.2 Ermittlung der Unsicherheit aus Ringversuchen	19
6.3 Ermittlung (Abschätzung) der Unsicherheit aus Erfahrungswerten	20
6.3.1 Allgemeines	20
6.3.2 Eingangsdaten für Abschätzungen	20
7 Ergebnisdarstellung	21
8 Verwendung der Unsicherheit	24
8.1 Allgemeines	24
8.2 Verwendung der Unsicherheit bei Vergleichen	24
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	27
A.1 Einleitung	27
A.2 Grundlagen der Berechnung	27
A.2.1 Allgemeines	27
A.2.2 Einflussfaktoren	27
A.2.3 Unsicherheit unter Wiederholbedingungen (Ermittlungsmethode A)	28
A.2.4 Unsicherheit der Messgeräte (Ermittlungsmethode B)	30
A.2.5 Unsicherheit aufgrund der Wahl der Messpunkte und der Ankopplung (Ermittlungsmethode B)	30
A.2.6 Unsicherheit durch Einfluss der Messstelle (Messstellenstreuung nach Ermittlungsmethode B)	30
A.2.7 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Arbeitsplätze (Ermittlungsmethode B)	31
A.3 Beispiel zur Berechnung der Tages-Schwingungsbelastung und der Messunsicherheit für tätigkeitsbezogene Messungen	31
A.3.1 Schritt 1: Arbeitsanalyse	31
A.3.2 Schritt 2: Auswahl der Messstrategie	32
A.3.3 Schritt 3: Berechnung und Darstellung der Ergebnisse und der Wiederholstandardabweichung (Praxisbeispiel nach Ermittlungsmethode A)	32
A.3.4 Schritt 4 und alle weiteren nach Ermittlungsmethode B	33

Anhang B (informativ) Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit bei Emissionsmessungen an handgehaltenen und handgeführten Maschinen	39
Anhang C (informativ) Beispiel zur Ermittlung der Messunsicherheit im Bereich Immissionsschutz	42
C.1 Einleitung	42
C.2 Modellbildung	42
C.2.1 Mathematisches Modell	42
C.2.2 Sensitivitätskoeffizienten und kombinierte Standardunsicherheit	43
C.2.3 Erweiterungsfaktor und erweiterte Unsicherheit	43
C.2.4 Streuung der Eingangsgrößen	43
C.2.5 Gesamtmodell	44
C.2.6 Abweichungen in der Einkopplung bei Messungen innerhalb von Gebäuden	45
C.2.7 Einflussgrößen in der Messkette	45
C.3 Unsicherheitsbilanz	46
C.4 Beispiel: Erschütterungsmessung	47
C.4.1 Ermittlung der Beurteilungsgrößen und der zugeordneten Unsicherheiten	47
C.4.2 Zahlenbeispiel	50
Anhang D (informativ) Beispiel für die Ermittlung der Unsicherheit im Bereich Maschinenschwingungen	54
D.1 Einleitung	54
D.2 Gesamtmodell	54
D.2.1 Allgemeines	54
D.2.2 Abweichungen bei der Einkopplung $\Sigma X_{\text{Verfahren}}$	55
D.2.3 Einflussgrößen in der Messkette $\Sigma X_{\text{Messkette}}$	55
D.3 Unsicherheitsbilanz	56
Anhang E (informativ) Mathematische Modelle und Monte-Carlo-Simulationen zur kombinierten Standardunsicherheit an Beispielen aus dem Arbeitsschutz	57
E.1 Einleitung	57
E.2 Probleme bei mathematischen Modellen	57
E.2.1 Allgemeines	57
E.2.2 Erstes Beispiel: Effektivwerte von Beschleunigungen	58
E.2.3 Zweites Beispiel: Divisionen	59
E.3 Anpassungen im mathematischen Modell	60
E.3.1 Allgemeines	60
E.3.2 Die Log-Normalverteilung	60
E.3.3 Produktmodell	61
E.3.4 Vergleich der Modelle für a_w	63
E.4 Programmcode	65
E.4.1 Allgemeines	65
E.4.2 Mögliche Erweiterungen des Programmcodes	67
Anhang F (informativ) Beispiel zur Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit bei Emissionsmessungen an handgehaltenen und handgeführten Maschinen im Rahmen von Ringversuchen	69
F.1 Einleitung	69
F.2 Grundlagen und Rahmenbedingungen	69
F.3 Weitere Hinweise aus der DIN ISO 5725 Normenreihe	70
F.4 Beispielhafte Anwendung: Forschungsbericht BAuA Fb 830 [1]	70
F.5 Beispielhafte Anwendung: Berechnungen der Messunsicherheit	71
Anhang G (informativ) Typische Fehler am Beispiel von Messungen am Arbeitsplatz	73
Literaturhinweise	76

Bilder

Bild 1 — Beispiel zur Erläuterung zum Erweiterungsfaktor: Aus der exemplarischen Darstellung der Verteilung der Messwerte wird über Mittelwert und Varianz die Form der

angenommenen Verteilungsdichtefunktion geschätzt, woraus sich der notwendige Erweiterungsfaktor k ergibt, um die Überdeckungswahrscheinlichkeit p zu erreichen . .	24
Bild 2 — Beispiel zur Vermeidung einer Entscheidungsunsicherheit	26
Bild E.1 — Beispiel aus dem Bereich Ganzkörper-Vibrationen	59
Bild E.2 — Differenz aus erwarteten und simulierten Werten ($M = 10^6$ Werte) für $\bar{a}_w = 0,50/s^2$ und $\bar{T} = 6$ h	61
Bild E.3 — Beispiel für das Produktmodell mit drei Einflussgrößen	63
Bild E.4 — Vergleich verschiedener Modellansätze	64

Tabellen

Tabelle 1 — Typische Budgetanteile für Messungen der Vibration am Arbeitsplatz	14
Tabelle 2 — Darstellung der Einflussfaktoren für Unsicherheitsdaten bei Arbeitsplatzmessungen	21
Tabelle 3 — Erweiterungsfaktor für verschiedene Überdeckungswahrscheinlichkeiten bei ein- und zweiseitigen Tests bei einer Normalverteilung	22
Tabelle A.1 — Orientierungswerte der Messunsicherheitsbeiträge	28
Tabelle A.2 — Beispiel einer Messreihe	30
Tabelle A.3 — Mittelwert und Standardabweichung des Mittelwerts	32
Tabelle A.4 — Mit dem Bayes-Term korrigierte Werte	32
Tabelle A.5 — Mittelwert und korrigierte Standardabweichung des Mittelwerts	33
Tabelle A.6 — Expositionsdauer und ihre Unsicherheit	36
Tabelle B.1 — Beispielwerte zur Bestimmung der Messunsicherheit	39
Tabelle B.2 — Zusammenstellung der Einzelkomponenten der Standardunsicherheit nach Ermittlungsmethode A	40
Tabelle B.3 — Zusammenstellung der Einzelkomponenten der Standardunsicherheit nach Ermittlungsmethode B	40
Tabelle C.1 — Beispiel für die Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit bei einer Immissionsmessung auf Decken in einem Gebäude auf Grundlage der Messgröße a_{eff} in m/s^2	46
Tabelle C.2 — KB -Werte und abgeleitete Größen	50
Tabelle C.3 — Unsicherheitsbeiträge für die Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr}	51
Tabelle C.4 — Anhaltswerte nach DIN 4150-2 für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen	52
Tabelle D.1 — Beispiel für die Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit bei einer Schwingungsmessung auf Grundlage der Messgröße v_{eff} in mm/s	56
Tabelle G.1 — Typische Fehler und wie man sie vermeidet	73

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 001-03-12 AA „Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Hand-Arm-Schwingungen“ im DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) erarbeitet.

Dieses Dokument enthält Anhänge mit Beispielen zum praktischen Umgang mit der Messunsicherheit auf den Gebieten Hand-Arm-Schwingungsbelastung am Arbeitsplatz, Hand-Arm-Schwingungskennwerte von Maschinen, Erschütterungen im Immissionsschutz, Maschinenschwingungen, Ringversuche sowie mathematische Modelle und Monte-Carlo-Simulationen. Weitere Anhänge mit Beispielen aus anderen Anwendungsgebieten sind für eine zukünftige Ausgabe vorgesehen.

DIN 45660 besteht unter dem allgemeinen Titel *Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik* aus den folgenden Teilen:

- DIN SPEC 45660-1, *Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen*
- DIN 45660-2, *Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 2: Unsicherheit schwingungstechnischer Größen*

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN SPEC 45660-2:2018-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Begriffe Überdeckungsintervall, Überdeckungswahrscheinlichkeit, Unsicherheitsbudget und Messgröße in Abschnitt 3 ergänzt;
- b) Tabelle 1 mit einem Beispiel, wie der Zweck der Messung das Unsicherheitsbudget beeinflusst, in Abschnitt 5 ergänzt;
- c) Tabelle 2 mit detaillierten Erläuterungen, wie mit Einflussfaktoren aus anderen Messungen umgegangen werden muss, um sie auf die eigene Situation zu übertragen (Abschnitt 6.3), ergänzt;
- d) Präzisierung der Anforderungen für die Ergebnisdarstellung (Abschnitt 7);
- e) Anhang G mit Beispielen zur besseren Abgrenzung von Messunsicherheiten zu Messfehlern eingefügt;
- f) Bereitstellung der in Anhang E beschriebenen Programme bzw. Funktionen als digitale Dateien.

Einleitung

Dieses Dokument beschreibt 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 Dokument jedoch nicht behandelt wird. Zum besseren Verständnis von Messunsicherheit und Fehlern sind Beispiele von Fehlern in Anhang G aufgelistet.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument 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.

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

Dieses Dokument 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 werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 4150-2, *Erschütterungen im Bauwesen — Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden*

DIN EN ISO 5349-2, *Mechanische Schwingungen — Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen — Teil 2: Praxisgerechte Anleitung zur Messung am Arbeitsplatz*

DIN EN ISO 8041-1, *Schwingungseinwirkung auf den Menschen — Messeinrichtung — Teil 1: Schwingungsmesser für allgemeine Anwendungen*

ISO 2631-1, *Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements*

ISO/IEC Guide 98, *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*¹

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO/IEC Guide 98 und die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term/>

1 DIN V ENV 13005:1999-06 ist die deutsche Ausgabe des ISO/IEC Guide 98:1993, *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, der durch ISO/IEC Guide 98-3:2008 ersetzt wurde. DIN V ENV 13005 ist zwar zurückgezogen, aber als deutsche Ausgabe sehr hilfreich und über den Beuth-Verlag weiterhin erhältlich.

— DKE-IEV: verfügbar unter <https://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Eingangsgröße

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 .

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: ISO/IEC Guide 98-3:2008 beschreibt mit den Begriffen C.2.4 bis C.2.6 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

Für ein mathematisches Modell der Messgröße $Y=f(X_i)$ mit unkorrelierten Eingangsgrößen x_i gilt in erster Näherung (siehe ISO/IEC Guide 98-3):

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

Die Standardunsicherheiten $u(x_i)$ können nach zwei Methoden ermittelt werden (Ermittlungsmethode A und Ermittlungsmethode B, siehe ISO/IEC Guide 98-3).

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 .

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**Überdeckungsintervall**

Intervall, das, basierend auf den verfügbaren Informationen, die wahren Werte einer Messgröße mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit enthält

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Überdeckungsintervall muss nicht auf den gewählten Messwert zentriert sein (siehe ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl.1).

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein Überdeckungsintervall sollte nicht als "Konfidenzintervall" bezeichnet werden, um Verwechslungen mit dem statistischen Konzept zu vermeiden. (siehe ISO/IEC Guide 98-3:2008, 6.2.2).

Anmerkung 3 zum Begriff: Ein Überdeckungsintervall kann aus einer erweiterten Messunsicherheit abgeleitet werden (siehe ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.5).

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.36]

3.12**Überdeckungswahrscheinlichkeit**

Wahrscheinlichkeit, dass die Werte einer Messgröße innerhalb eines bestimmten Erfassungsintervalls enthalten ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Definition bezieht sich auf den Unsicherheitsansatz, wie er im GUM dargestellt ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Überdeckungswahrscheinlichkeit wird im GUM auch als "Vertrauensniveau" bezeichnet.

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.37]

3.13

erweiterte Unsicherheit

U

Überdeckungsintervall, gebildet aus dem 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 mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit diejenigen 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.

3.14

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.

3.15

Messpersonal

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

3.16

Messstelle

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

3.17

Vergleichbedingungen

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

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 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.

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

3.18

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.

3.19

Wiederholbedingungen

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

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

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

3.20

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 Aufnehmeranordnung und Orte des Messpunktes.

3.21

Vor-Ort-Standardabweichung

σ_s

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

3.22

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.

3.23

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.

3.24

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.

3.25

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.

3.26

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.

3.27

Unsicherheitsbudget

<Messung oder eine Kalibrierung> Aussage, die die Schätzungen der zur *Unsicherheit* (3.7) eines Messergebnisses beitragenden Unsicherheitskomponenten zusammenfasst

[QUELLE: DIN EN ISO 14253-2:2018-09, 3.9, modifiziert — Anmerkungen 1 und 2 zum Begriff wurden gelöscht]

3.28

Messgröße

Größe, die gemessen werden soll

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.3, modifiziert — Beispiele 1 und 2 und Anmerkungen 1 bis 4 zum Begriff wurden gelöscht]

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.

Nachdem man mit Hilfe von Abschnitt 5 eine Liste der relevanten Einflüsse aufgestellt hat, beschreibt Abschnitt 6, wie daraus die Unsicherheit ermittelt wird. Dies kann über mathematische Modellbildung, Ringversuche oder gegebene Orientierungswerte nach konkreten Handlungsanweisungen (Erfahrungswerte) erfolgen. Auf diese Möglichkeiten nehmen unterschiedliche Anhänge Bezug.

Wenn die mathematische Modellbildung genutzt wird, enthalten Anhang A bis Anhang D nachrechenbare Beispiele aus verschiedenen Messaufgaben: Arbeitsplatzexpositionen durch Hand-Arm-Vibrationen (Anhang A), Emissionsmessungen an handgehaltenen und handgeführten Maschinen (Anhang B), Immissionsschutz (Anhang C) und Maschinenschwingungen (Anhang D).

Die Unsicherheit kann mit mathematischen Modellen nicht nur analytisch (Anhang A bis Anhang D), sondern auch numerisch ermittelt werden. Dies ist in Anhang E gezeigt, in dem darüber hinaus Konsequenzen verschiedener mathematischer Modelle besprochen werden.

Anhang F zeigt an Beispielen zur Emissionsmessung von Hand-Arm-Vibrationen, wie mit Hilfe von Ringversuchen die Unsicherheit bestimmt werden kann.

Wenn man mit Hilfe des Abschnitts 6 einen Zahlenwert der Unsicherheit bestimmt hat, ist dieser dem Ergebnis der Messung zu seiner Beurteilung beizustellen. Dies ist in Abschnitt 7 beschrieben und in den Anhang A bis Anhang D in den Beispielen umgesetzt.

Hinweise zur Bewertung der Unsicherheit sind im Abschnitt 8 enthalten. Anhang G enthält schließlich Beispiele zur besseren Abgrenzung von Messunsicherheiten zu Messfehlern .

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

5.1 Allgemeines, Ziel der Messung

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 1 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.

Bei der Aufstellung eines Unsicherheitsbudget ist darauf zu achten, dass die Budgetanteile auf den Zweck der Messung abgestimmt sind. So zeigt Tabelle 1 beispielhaft für den Arbeitsschutz, dass ein Interpersoneneffekt nur berücksichtigt werden muss, wenn Aussagen über andere Personen getroffen werden sollen.

Tabelle 1 — Typische Budgetanteile für Messungen der Vibration am Arbeitsplatz

Ziel, Zweck	Wichtigste Budgetanteile
Bestimmung der aktuellen Exposition unter den vorgefundenen Bedingungen (z. B. Ermittlung des Ist-Zustandes).	— Standardabweichung des Messobjekts — Reproduzierbarkeitsbedingungen
Bestimmung der Exposition für den Arbeitsplatz eines Arbeitnehmers (gleiche Maschine). Risikobewertung für die Zukunft z. B. Prävention (Prognose).	— Standardabweichung des Messobjekts — Vor-Ort-Bedingungen

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Ziel, Zweck	Wichtigste Budgetanteile
Ermittlung der Exposition für einen Arbeitsplatz (gleiche Maschinen) und einen (einen) Arbeitnehmer rückwirkend für einen Zeitraum und für eine repräsentative Arbeit (retrospektive Beurteilung).	— Standardabweichung des Messobjekts — Vor-Ort-Bedingungen
Ermittlung der Exposition für den Arbeitsplatz eines Arbeitnehmers (gleiche Maschinengruppe, aber nicht identische Maschine). Risikobewertung für die Zukunft z. B. Prävention (Prognose).	— Standardabweichung des Messobjekts — Vor-Ort-Bedingungen — Standardabweichung des Probanden
Bestimmung der Exposition für ähnliche Arbeitsplätze (ähnliche Arbeitsaufgaben und gleiche Art von Maschinen) und für verschiedene Arbeitnehmer (eine Gruppe von Arbeitnehmern). Risikobewertung für die Zukunft z. B. für Datenbanken.	— Standardabweichung des Messobjekts — Vor-Ort-Bedingungen — Standardabweichung des Probanden — Produktionsstandardabweichung

BEISPIEL 2 Die Fähigkeiten und Fertigkeiten der Probanden haben einen direkten Einfluss auf das Messergebnis sowie auf dessen Standardabweichung. Unerfahrene Probanden handhaben Maschinen nicht immer auf die gleiche Weise oder fahren im Gelände oder auf unbefestigtem Untergrund nicht auf die gleiche Weise wie erfahrene Fahrer. Ungünstige Arbeitspositionen (z. B. Arbeiten mit handgehaltenen Maschinen über Kopf) machen es erforderlich, die Körper- oder Armhaltung aufgrund von Muskelverspannungen ständig zu ändern. Solche Einflussgrößen können in einigen Fällen unter anderem mit Zuschlägen für einen ungeschulten Probanden, eine ungünstige Körperhaltung oder einen ungünstigen Halt berücksichtigt werden.

5.2 Messobjekt

5.2.1 Allgemeines

Messungen im Rahmen dieses Dokuments 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 den Baubetrieb (impulsförmige Erschütterungsquellen, wie Schlagrammen, Fallmeißel, fallende Massen, Sprengungen, oder stationäre Erschütterungsquellen, wie Vibrationsrammen, Verdich-

tungsgeräte), 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

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

ANMERKUNG 1 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 2 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, Türeinschlagen) 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.

BEISPIEL

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Messungen an mehreren Maschinen mit mehreren Probanden sind nur dann nötig, wenn das Ergebnis auch auf mehrere Maschinen mit mehreren Exponierten übertragen werden soll (Tabelle 1).

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 Kalibrier-

protokoll 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 8041-1). 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.

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

ANMERKUNG 2 Geräte, die keine normgerechte Messung ermöglichen (Indikatoren oder Schätzhilfen, siehe ISO/TR 19664), 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 DIN SPEC 45674 beschreibt die erforderliche Kompetenz zur Durchführung und Bewertung von Schwingungsmessungen am Arbeitsplatz.

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 ISO/IEC Guide 98-3).

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 ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008). 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.

ANMERKUNG Grundlagen zu Ringversuchen sind in DIN IEC/TR 62970*VDE 0705-2970:2017-04 beschrieben.

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 Messobjekte so gewählt sind, dass durch die Übertragung der Ergebnisse kein Widerspruch in der Aussage entsteht.

ANMERKUNG 2 Für elektrisch betriebene Handwerkzeuge (siehe DIN EN 62841 Reihe) und transportable motorbetriebene Elektrowerkzeuge (siehe DIN EN 62841 Reihe) 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.

Die Unsicherheiten aus Erfahrungswerten einer Gruppe von Messungen können für die betrachtete Gruppe von Messungen nicht geringer werden.

6.3.2 Eingangsdaten für Abschätzungen

Ist es das Ziel, Unsicherheiten abzuschätzen, so ist die Genauigkeit der Unsicherheit wesentlich davon abhängig, wie viele Bedingungen zwischen der neuen, betrachteten Gruppe von Messungen und der für die Abschätzung herangezogenen Vergleichsgruppe übereinstimmen. Hierbei lassen sich ggf. Hierarchien der in Abschnitt 5 aufgeführten Einflussgrößen bilden. Die Hierarchie kann je nach Messaufgabe unterschiedlich sein. Eine beispielhafte Übersicht zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2 — Darstellung der Einflussfaktoren für Unsicherheitsdaten bei Arbeitsplatzmessungen

Einflussfaktoren	Beispiele	
	Hand-Arm-Schwingungen	Ganzkörperschwingungen
	<i>Unsicherheit der Schwingungsmessung eines Winkelschleifers beim Schneiden von Stahlrohren an einem Arbeitsplatz</i>	<i>Unsicherheit der Schwingungsmessung an einem Gabelstapler in einem Lagerhaus</i>
	Beruht der Vergleichsdatensatz auf einer Messung:	
Zunächst muss als wichtigste Bedingung die Messgröße identisch sein. Darüber hinaus müssen die Messwertaufbereitung und Bewertung identisch erfolgen.	— nach DIN EN ISO 5349-2, z. B. unter Verwendung der W_h Frequenzgewichtung	— nach ISO 2631-1, z. B. unter Verwendung der W_k und W_d Frequenzgewichtungen
Die Messdurchführung zur Ermittlung der Messgröße muss übertragbar sein.	— an den Griffen der Maschine, in der Mitte der Greifzone während der Zeit des repräsentativen Schneidens	— auf dem Fahrzeugsitz, während der Zeit des repräsentativen Fahrens
Die Messobjekte (Maschinen) sollten weitestgehend in Schwingungsentstehung, Größe und Ankopplung zur Umgebung übereinstimmen.	— Schleifmaschine der gleichen Marke und des gleichen Modells oder ähnlicher Spezifikation, Größe, Leistung und Trennscheibe	— Fahrzeug der gleichen Marke und des gleichen Modells oder mit ähnlichen Spezifikationen, Tragfähigkeit und Leistung — gefederter Sitz der gleichen Marke und des gleichen Modells oder einer ähnlichen Leistungsklasse
Der Arbeitsprozess der Messobjekte muss übertragbar sein.	— beim Schneiden (und nicht beim Schleifen) eines ähnlichen Materials	— Fahren auf lagerhausähnlichem Straßenbelag mit ähnlichen Geschwindigkeiten wie in einem Lagerhaus
Der Maschinenbediener, die Messdauer und die Anzahl der Messungen zur Ermittlung der Messwerte sind vergleichbar.	— mit ähnlichen Kräften, Körperhaltungen, Handpositionen und Schnittgeschwindigkeiten	— Handhabung ähnlicher Lasten mit ähnlichen Fahrstrecken und Ladegeschwindigkeiten
Die Umgebung	— Temperatur, Standort (innen, außen), Wetterbedingungen	— Wetterbedingungen, Oberflächenbeschaffenheit

Darüber hinaus können zahlreiche weitere Bedingungen von unterschiedlicher Bedeutung sein, wie z. B. Zustand des Messobjekts, Energieversorgung, Einsatzwerkzeug, Bearbeitungswerkstück, Messumgebung, Messpersonal, Messgerät.

7 Ergebnisdarstellung

Schwingungsgrößen sind mit ihren physikalischen Einheiten, z. B. m/s^2 , anzugeben.

Die Angaben zur Unsicherheit müssen Folgendes umfassen:

- a) eine erweiterte Unsicherheit, die entweder unter Verwendung der physikalischen Einheit der Ausgangsgröße (z. B. als m/s^2) oder als Prozentsatz angegeben wird;
- b) den Erweiterungsfaktor für den Unsicherheitswert;
- c) alle relevanten Zusatzinformationen, z. B. die der erweiterte Unsicherheit zugeordneten Wahrscheinlichkeit oder wenn nicht die Normalverteilung genutzt wird.

Die erweiterte Unsicherheit U der Messgröße setzt sich aus der nach Abschnitt 6 ermittelten kombinierten Standardunsicherheit u_c und einem Erweiterungsfaktor k zusammen. Sein Wert hängt von der angenommenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Verteilungsdichtefunktion) der Messgröße Y und von der geforderten Überdeckungswahrscheinlichkeit p ab. Im Allgemeinen wird bei der Verteilungsdichtefunktion von einer Normalverteilung ausgegangen. Der Erweiterungsfaktor k ergibt sich dann nach Tabelle 3. Es sei betont, dass der Wert des Erweiterungsfaktors entscheidend von der Form der angenommenen Verteilungsdichtefunktion der Messgröße und der zu erreichenden Überdeckungswahrscheinlichkeit abhängt.

Tabelle 3 — Erweiterungsfaktor für verschiedene Überdeckungswahrscheinlichkeiten bei ein- und zweiseitigen Tests bei einer Normalverteilung

Erweiterungsfaktor (gerundet) k	Überdeckungswahrscheinlichkeit p für zweiseitige Tests %	Überdeckungswahrscheinlichkeit p für einseitige Tests %
1,0	68	84
1,3	80	90
1,6	90	95
2,0	95	97,5

Bild 1 erläutert diese Vorgehensweise für ein- und zweiseitige Überdeckungsintervalle (Vertrauensintervalle). Ein einseitiges Überdeckungsintervall wird betrachtet, wenn sicherzustellen ist, dass der Erwartungswert y der Messgröße einen Grenzwert $y_{\max}$ nicht überschreitet (oder einen Grenzwert $y_{\min}$ nicht unterschreitet). Bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit p liegt der Erwartungswert nur mit der Wahrscheinlichkeit $1 - p$ über dem oberen Grenzwert (bzw. unter dem unteren Grenzwert).

Muss der Erwartungswert y der Messgröße bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit p in einem symmetrischen Intervall um den Mittelwert der Messwerte liegen, wird von einem zweiseitigen Überdeckungsintervall ausgegangen. Bei einer als symmetrisch angenommenen Verteilungsdichtefunktion liegt der Erwartungswert y nur mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils $1 - p/2$ über der oberen Intervallgrenze oder unter der unteren Intervallgrenze.

Das Messergebnis ist wie folgt anzugeben:

- a) bei einem zweiseitigen Test

$$Y = \hat{y} \pm U = \hat{y} \pm k u_c \quad (16)$$

Dabei ist

Y die Messgröße;

$\hat{y}$ der aufgrund von Messungen ermittelte beste Schätzwert;

U die erweiterte Unsicherheit, siehe Gleichung (10).

BEISPIEL 1 Für einen gemessenen Wert von $12,5 \text{ m/s}^2$ und einer ermittelten kombinierten Standardunsicherheit von $0,9 \text{ m/s}^2$ ergibt sich bei einem zweiseitigen Test bei einer gewählten Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 %:

$$a_{\text{hw}} = (12,5 \pm 1,8) \text{ m/s}^2$$

d. h. erweiterte Unsicherheit $U = 1,8 \text{ m/s}^2$ mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ (siehe Tabelle 3).

b) bei einem einseitigen Test (siehe auch 8.2)

— falls es darum geht, dass ein Anforderungswert eingehalten wird:

$$Y = \hat{y} + U = \hat{y} + k u_c \quad (17)$$

— falls es darum geht, dass ein Anforderungswert überschritten wird:

$$Y = \hat{y} - U = \hat{y} - k u_c \quad (18)$$

ANMERKUNG 1 Die vorgenannten Angaben gelten für einen positiven Anforderungswert.

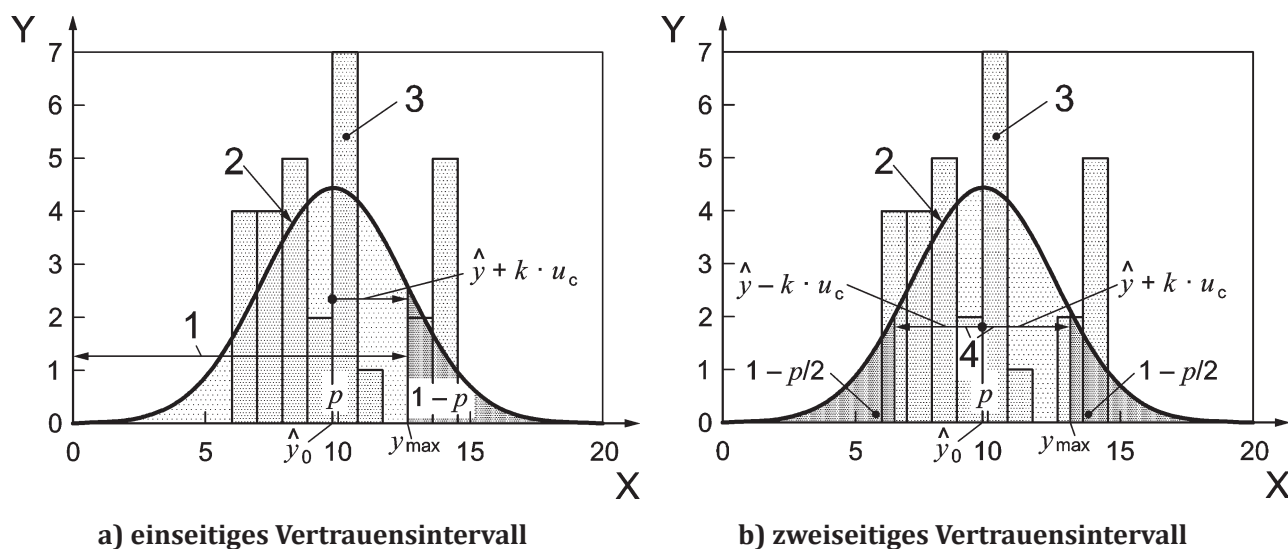
BEISPIEL 2 Für einen gemessenen (positiven) Wert von $12,5 \text{ m/s}^2$ und einer ermittelten kombinierten Standardunsicherheit von $0,9 \text{ m/s}^2$ ergibt sich bei einem einseitigen Test bei einer gewählten Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % nach Gleichung (17):

$$a_{\text{hw}} = (12,5 \pm 1,44) \text{ m/s}^2$$

d. h. erweiterte Unsicherheit $U = 1,44 \text{ m/s}^2$ mit dem Erweiterungsfaktor $k = 1,6$ (siehe Tabelle 3). Ein Anforderungswert von $13,94 \text{ m/s}^2$ wäre in diesem Beispiel mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % eingehalten.

Die Angabe des vollständigen Messergebnisses setzt sich somit aus dem Schätzwert für die Messgröße und seiner erweiterten Messunsicherheit zusammen.

ANMERKUNG 2 Die bislang übliche Angabe des besten Schätzwertes $\hat{y}$ ohne eine erweiterte Unsicherheit entspricht einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von nur 50 %.



Legende

X Messwertintervall

Y Häufigkeit

1 einseitiges Vertrauensintervall

2 geschätzte Verteilungsdichtefunktion

3 Verteilung der Messwerte

4 zweiseitiges Vertrauensintervall

Bild 1 — Beispiel zur Erläuterung zum Erweiterungsfaktor: Aus der exemplarischen Darstellung der Verteilung der Messwerte wird über Mittelwert und Varianz die Form der angenommenen Verteilungsdichtefunktion geschätzt, woraus sich der notwendige Erweiterungsfaktor k ergibt, um die Überdeckungswahrscheinlichkeit p zu erreichen

8 Verwendung der Unsicherheit

8.1 Allgemeines

Ob und wie die Unsicherheit verwendet wird kann durch gesetzliche Bestimmungen oder vertragliche Vereinbarungen festgelegt sein. Die Verwendung der Unsicherheit richtet sich nach dem Zweck der Messung, nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten oder nach der Fragestellung in Streitfällen. Auf Grund bestimmter Bedingungen kann die Unsicherheit auch vernachlässigt werden.

ANMERKUNG Für den Bereich des Arbeitsschutzes wird nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [3] und den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV) „Vibrationen“ [4] für die Vibrationsexposition derzeit keine quantitative Berücksichtigung der Unsicherheit gefordert.

8.2 Verwendung der Unsicherheit bei Vergleichen

Eine entscheidende Rolle spielt die Unsicherheit beim Vergleich von Ergebnissen mit einem Anforderungswert, z. B. bei der Beurteilung von Messergebnissen. Die Verwendung der Unsicherheit geschieht meist nach der Anwendung einer Norm oder eines anderen Regelwerks. Für die Entscheidung, ob das nach einem festgelegten Verfahren ermittelte Ergebnis unter Berücksichtigung der erweiterten Unsicherheit U einen Anforderungswert Y_{anf} , z. B. einen Grenzwert, einhält oder nicht, können folgende Fälle unterschieden werden, wobei die Unsicherheit als Zu- bzw. Abschlag verwendet wird:

— Die Entscheidung „Anforderungswert eingehalten“ ist sicher zu treffen, wenn das Ergebnis plus Unsicherheit den Anforderungswert nicht übersteigt:

$$y + U \leq Y_{\text{anf}} \quad (19)$$